

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА

ТРУДЫ
НИЖЕГОРОДСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА

№ 2 (87)

Нижний Новгород 2011

УДК 050(06)
ББК 9я54
Т 78

Т 78 Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2011. № 2 (87). – 343 с.

Выходит 4 раза в год

Главный редактор С.М. Дмитриев

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

А.Б. Лоскутов (зам. гл. редактора), Е.Г. Ивашкин (зам. гл. редактора),
В.В. Беляков (отв. секретарь), О.В. Пугина (отв. редактор),
Т.В. Третьякова (технич. секретарь), Т.П. Новикова (технич. редактор),
М.В. Ширяев (редактор электронного издания)

Члены редколлегии: О.М. Власова, В.Л. Башкатов, В.Г. Баранов,
В.П. Хранилов, А.А. Куркин, А.Ю. Панов, В.К. Майстренко,
А.М. Грошев, С.Н. Хрунков, С.В. Хватов, И.О. Леушин, М.Г. Михаленко,
А.Н. Зайцев, Е.А. Зайцева, Е.А. Чернышов, О.С. Кошелев, В.В. Глебов,
В.Ф. Кулепов, Е.Н. Соснина

УДК 050(06)
ББК 9я54

Электронная версия журнала:
<http://www.nntu.nnov.ru>

© Нижегородский государственный
технический университет
им. Р.Е. Алексеева, 2011

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE RUSSIAN FEDERATION

**STATE EDUCATIONAL INSTITUTION
OF HIGHER PROFESSIONAL EDUCATION
NIZHNI NOVGOROD STATE TECHNICAL UNIVERSITY
n.a. R.Y. ALEXEEV**

**TRANSACTIONS
of NIZHNI NOVGOROD STATE TECHNICAL
UNIVERSITY
n.a. R.Y. ALEXEEV**

№2 (87)

Nizhni Novgorod 2011

Transactions of NIZHNI NOVGOROD STATE TECHNICAL UNIVERSITY n. a. R.Y. Alexeev
/ NSTU n.a. R.Y. Alexeev. - Nizhni Novgorod, 2011. № 2 (87). – 343 p.

The journal is issued 4 times a year

Editor-in-Chief S.M. Dmitriev

EDITORIAL BOARD:

A.B. Loskutov (Deputy Editor-in-Chief), Y.G. Ivashkin (Deputy Editor-in-Chief),
V.V. Belyakov (Executive Secretary), O.V. Pugina (Executive Editor),
T.V. Tretyakova (Technical secretary), T.P. Novikova (Technical Editor),
M.V. Shiryaev (Editor of Electronic Edition)

Members of Editorial Board: O.M. Vlasova, V.L. Bashkatov, V.G. Baranov,
V.P. Khranilov, A.A. Kurkin, A.Y. Panov, V.K. Maystrenko,
A.M. Groshev, S.N. Khrunkov, S.V. Khvatov, I.O. Leushin, M.G. Mikhalev,
A.N. Zaytsev, Y.A. Zaytseva, Y.A. Chernyshov, O.S. Koshelev, V.V. Glebov,
V.F. Kulepov, Y.N. Sosnina

Electronic version of the journal:
<http://www.nntu.nnov.ru>

СОДЕРЖАНИЕ

РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ.....	11
Шишков Г.И. Широкополосные ступенчатые аттенюаторы.....	11
Беляев А.И., Букварев Е.А., Ястребов А.В. Эффективный вычислитель группы сверток.....	19
Букварёв Е.А., Мартынюк М.В. Использование особенностей линейчатого спектра периодической последовательности импульсов при автоматизированной обработке эхосигналов.....	26
МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ.....	32
Костенко И.С. Исследование воздействия удалённых цунами на побережье Саха- линской области	32
Громов Е.М., Тютин В.В. Стационарные волны в расширенном нелинейном урав- нении Шредингера с учетом индуцированного рассеяния Рамана и нелинейной дис- персии.....	38
Абрашкин А.А., Бодунова Ю.П. Пространственные стоячие волны на поверхности вязкой жидкости.....	49
ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ.....	55
•	
Пиманкин Д.А., Кисельман Б.А. Метод стягивающихся оболочек для восстановления рукопечатных символов.....	55
Никулин Е.А. Модернизация алгоритма контролируемой триангуляции полигонов.....	62
Гунин Л.Н., Кашенков А.В., Хранилов В.П. Опыт внедрения электронного техни- ческого документооборота с использованием PDM-системы на предприятии радио- приборостроения.....	68
МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ.....	75
Петровский А.Н. К задаче оптимизации параметров эвольвентного зацепления.....	75
Кабалдин Ю.Г., Серый С.В., Симагина Е.А., Уткин А.В. Оптимизация составов и функциональных свойств наноструктурных покрытий для режущего инструмента методом функционала электронной плотности.....	88
Добротворский С.С., Басова Е.В. Геометрические параметры плоскости сдвига при высокоскоростной обработке эвольвентной поверхности концевой фрезой со сфери- ческим концом.....	95
Кабалдин Ю.Г., Кретинин О.В. Время как информация.....	101
НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ.....	112
Орлов Л.А., Орлов Л.Н., Тумасов А.В. Расчетная оценка безопасности пешехода в случае наезда легкового автомобиля.....	112
Палутин Ю.И. Оценка степени герметичности кузовов автомобилей.....	120

Грошев А.М., Михайлов В.В., Никольский В.А., Тумасов А.В. Применение программно-аппаратных комплексов для оценки тормозных свойств транспортных средств по результатам имитационного моделирования.....	127
ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ.....	133
Нгуен Вьет Хоан. Методика проектирования малых деревянных рыболовных судов ...	133
Кравченко В.А. Некоторые вопросы проектирования морских вертолетных платформ.....	142
Рудницкий В.И., Рудницкий А.В., Виноградов В.С. Информационное обеспечение для управления надежностью судового оборудования.....	147
Ваганов А.Б., Костюнин А.С. Исследование зигзагообразных маневров судна.....	155
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА.....	162
Смирнов А.Ю. Вопросы классификации электрических машин для бесконтактного синхронного привода.....	162
Копелович Е.А. Высоковольтные транзисторно-конденсаторные источники питания для мощных электрофизических установок.....	170
Маслеева О.В. Исследование влияния мини-ТЭЦ на уровень загрязнения атмосферного воздуха.....	176
Дмитриев С.М., Анишев Е.Ю., Рошин Е.В. Снижение уровня крутильных деформаций валопроводов циркуляционных насосов АЭС с частотнорегулируемым электроприводом.....	183
МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ.....	190
Курашкин К.В., Мишакин В.В. Исследование влияния характеристик структуры материала на акустические параметры.....	190
Коровин В.А., Палавин Р.Н., Леушин И.О., Костромин С.В. Микролегирование литой конструкционной стали.....	199
Илларионов И.Е., Петрова Н.В. Жидкостекольные смеси, отверждаемые продувкой углекислым газом.....	208
ХИМИЯ, ХИМИЧЕСКИЕ И БИОТЕХНОЛОГИИ.....	214
Перетрутов А.А., Чубенко М.Н., Ким П.П. Использование пиритного огарка в качестве катализатора получения сернистого ангидрида из отработанной серной кислоты	214
Никандров М.И., Никандров И.С. Исследование процесса приготовления содовой суспензии в производстве фосфатов натрия.....	222
Бажан Л.И., Бодриков И.В., Стацюк В.Е. Амбивалентность систем тиол - амин как инвертор реакционной способности тиолов при взаимодействии с ацетиленами.....	227
ЭКОНОМИКА, ИННОВАЦИИ И МЕНЕДЖМЕНТ.....	234
Шарова А.А. Изучение опыта зарубежных предприятий в сфере управления рисками (на примере предприятий химической отрасли).....	234

Юрлов Ф.Ф., Таскина Л.А. Учет интересов различных заинтересованных сторон при стратегическом планировании и управлении.....	242
Яшин С.Н., Боронин О.С. Теоретические подходы к оценке эффективности инновационных проектов.....	248
СОЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ, ИННОВАЦИИ В ОБРАЗОВАНИИ, PR-ТЕХНОЛОГИИ.....	255
Комлева Е. Ядерное человечество и Ф.М. Достоевский.....	255
Козырьков В.П. Эстетизация как способ существования информационного общества.....	264
Кулачков В.В. Массовое сознание крестьянства Западного региона России в годы первой мировой войны, революции и гражданской.....	277
Щербакова Е.Е., Корнишин А.В. Рекомендации для преподавателей по формированию креативности у студентов	283
МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ.....	288
Волков В.Л. Обоснование требований к параметрам микромеханического акселерометра.....	288
Вавилов В.Д. Разделение сигналов нескольких физических величин, действующих по одному каналу.....	296
Шипунов А.Н., Гаврилов А.А., Гаврилова Е.Н. Балансировка интегрального датчика угловых ускорений	302
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ НАУКАХ.....	309
Кутерин Ф.А., Сумин М.И. О регуляризованном алгоритме Удзавы в обратной задаче финального наблюдения для параболического уравнения	309
Алексеев С.Н., Елькина Е.А. Применение метода дополнительного аргумента к исследованию нелокальной разрешимости задачи Коши для уравнений первого порядка с дифференциальным оператором типа полной производной по времени.....	320
Кондратьев Г.В. Конкретная двойственность высшего порядка.....	330

CONTENTS

RADIO ENGINEERING, TELECOMMUNICATION SYSTEMS, AERIALS AND SHF DEVIES.....	11
Shishkov G.I. Wideband step attenuators.....	11
Belyaev A.I., Bukvarev E.A., Yastrebov A.V. An effective multichannel arithmetic convolution calculator.....	19
Bukvarev E.A., Martinuk M.V. Using properties of the line spectrum of the repetition pulse train for automatic echo signals processing.....	26
MECHANICS OF FLUID, GAS AND PLASMA	32
Kostenko I.S. Research of impact of remote tsunami at the sakhalin region coast.....	32
Gromov E.M., Tyutin V.V. Stationary waves in the extended nonlinear schrodinger equation with stimulated raman-scattering and nonlinear dispersion.....	38
Abrashkin A.A., Bodunova Yu.P. Spatial standing waves on the surface of viscous fluid.....	49
INFORMATION SCIENCE AND CONTROL SYSTEMS.....	55
Pimankin D.A., Kiselman B.A. The method of constricting hulls for degraded handprinted characters reconstruction	55
Nikulin E.A Modernization of the algorithm of managed polygon triangulation.....	62
Gunin L.N., Kashenkov A.V., Khranilov V.P. The experience of electronic workflow implementation with the use of PDM-system at the electronic instrument engineering enterprise	68
MECHANICAL ENGINEERING AND AUTOMATION	75
Petrovskiy A.N. To the problem of the involutes gear parameters optimization.....	75
Kabaldin Y.G., Seryi S.V., Simagina E.A., Utkin A.V. Optimization of composition and functional properties of nanostructured coatings for cutting tools using the density functional.....	88
Dobrotvorsky S.S., Basova E.V. Geometric parameters of shear plane in high speed machining involute surface by ball-end-mill cutter.....	95
Kabaldin Y.G., Krettinin O.V. Time like information.....	101
LAND-BASED TRANSPORT SYSTEMS	112
Orlov L.A., Orlov L.N., Tumasov A.V. The calculative estimation of pedestrian safety in case of car running-down accident.....	112
Palutin Yu. I. Criterion of hermetic automobile bodies.....	120
Groshev A.M., Mikhailov V.V., Nikolsky V.A., Tumasov A.V. Application of hardware-software complexes for vehicle braking characteristics estimation on basis of simulation results....	127
PROBLEMS OF SHIPBUILDING AND OCEAN TECHNOLOGY.....	133
Nguyen Viet Hoan Design of small wooden fishings boat.....	133
Kravchenko V.A. Some problems of design marine platforms for helicopters.....	142

Rudnitsky A.V., Rudnitsky V.I., Vinogradov V.S. Information support for management of shipboard equipment's reliability.....	147
Vaganov A.B., Kostyunin A.S. Research of ship's zigzag maneuver.....	155
ELECTRICAL ENGINEERING AND POWER INDUSTRY	162
Smirnov A. Yu. The aspects of electric machines for brushless synchronous drive classification.....	162
Kopelovich E.A. High voltage transistor-capacitor power supplies for power electrophysical installations.....	170
Masleeva O.V. The influence of mini-power-station on the level of atmospheric air pollution	176
Dmitriev S.M., Anishev E.Y., Roschin E.V. Decrease of a level of torsion deformations of shaftings of circulating pumps of the atomic power station with frequency regulation electric drive.....	183
METALLURGY AND SCIENCE MATERIALS	190
Kurashkin K.V., Mishakin V.V. Investigation of the influence of material's structure on acoustic parameters.....	190
Korovin V.A., Palavin R.N., Leushin I.O., Kostromin S.V. Microalloying of the molten structural steel.....	199
Illarionov I.E., Petrova N.V. Liquid glass mixtures, hardened by blow-down by carbon dioxide.....	208
CHEMISTRY, CHEMICAL AND BIOTECHNOLOGIES	214
Peretrutov A.A., Chubenko M.N., Kim P.P. Utilization of a pyrite cinder as a catalyst of getting sulfur dioxide from sulfuric waste acid.....	214
Nikandrov M.I., Nikandrov I.S. Investigation of the cooking soda suspension in the production of sodium phosphates.....	222
Bazhan L.I., Bodrikov I.V., Statsyuk V.E. Ambivalence of the system thiol-amine as in-vertor of reactivity of the thiols at the interaction with acethylenes.....	227
ECONOMICS, INNOVATIONS AND MANAGEMENT	234
Sharova A.A. Foreign industrial enterprises risk-management (i.e. chemicals and utilities sector enterprises)	234
Urlov F.F., Taskina L.A. The account of interests of various interested parties at strategic planning and management	242
Yashin S.N., Boronin O.S. assessment of efficiency innovation projects.....	248
SOCIAL SCIENCES, EDUCATIONAL INNOVATIONS, PR-TECHNOLOGIES.....	255
Komleva E. Nuclear humanity and F.M. Dostoyevsky.....	255
Kozirkov V.P. Aestheticization as a way of existence of the information society.....	264
Kulachkov V.V. The mass consciousness of the peasantry of the Western Region of Russia during the First World War, Revolution and Civil.....	277
Sherbakova E.E., Kornishin A.V. Recommendations to teachers on the formation the students creativity	283

MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS.....	288
Volkov V.L. Motivation of the requirements to parameters for accelerometer a micromechanical.....	288
Vavilov V.D. Division signal several physical values, acting on one channel.....	296
Shipunov A.N., Gavrilov A.A., Gavrilova E.N. Balancing the integral sensor of the angular speedups.....	302
MATHEMATICAL METHODS IN NATURAL, TECHNICAL ANDSOCIAL SCIENCES.....	309
Kuterin F.A., Sumin M.I. On regularized algorithm of Uzawa in inverse problem of final observation for parabolic equation.....	309
Alekseenko S.N., Elkina E.A. Applying the method of an additional argument to an investigation of a nonlocal solvability of the Cauchy problem for first order equations with differential operator of total derivative with respect to time type.....	320
Kondratev G.V. Concrete duality of higher order.....	330

РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ

УДК 621.372.8

Г.И. Шишков

ШИРОКОПОЛОСНЫЕ СТУПЕНЧАТЫЕ АТТЕНЮАТОРЫ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Описаны принцип действия и конструкции широкополосных ступенчатых аттенюаторов. Приведены технические характеристики.

Ключевые слова: ступенчатые аттенюаторы, радиотехнические приборы, пластинчатые резисторы.

Введение

В современных широкополосных коаксиальных ступенчатых аттенюаторах, как и в фиксированных аттенюаторах, в качестве диссипативных элементов применяются тонкопленочные пластинчатые резисторы [1]. Ячейки-ослабители ступенчатых аттенюаторов практически представляют собой фиксированные аттенюаторы, выполненные в отрезках либо коаксиальных, либо полосковых линий передач.

Принцип действия коаксиального ступенчатого аттенюатора заключается в том, что в разрыв коаксиального тракта включается от одного до нескольких (чаще всего не более четырех) ячеек-ослабителей. Эти ячейки, будучи включенными последовательно, создают в тракте определенное ослабление сигнала, выключенными – создают в тракте «нулевое» (начальное) ослабление.

Ступенчатые аттенюаторы с ручным управлением

Одна из традиционных конструкций ступенчатых аттенюаторов – конструкция барабанного типа. Основными элементами её являются:

- статор с высокочастотными разъемами (вход, выход);
- ротор с размещенными в нём ячейками-ослабителями;
- контактные устройства для обеспечения неразрывности коаксиального тракта между статором и ячейками-ослабителями;
- устройство переключения.

Ячейки-ослабители, которые вставляются в сквозные отверстия ротора, по существу, являются коаксиальными фиксированными аттенюаторами на пластинчатых резисторах. Одна из разработанных моделей ступенчатых аттенюаторов имеет габаритные размеры $\varnothing 63 \times 112$ мм, коаксиальные разъемы сечением 7/3,04 мм. В аттенюаторе устройства переключения и фиксации совмещены со шкалой отсчета (рис. 1).

Ослабление аттенюатора изменяется от 0 до 50 дБ ступенями по 10 дБ с погрешностью не более $\pm 1,5$ дБ, диапазон частот от постоянного тока до 10 ГГц при КСВН $\leq 1,5$.

Представляют интерес конструкции малогабаритных ступенчатых аттенюаторов, в которых также использована схема барабанного аттенюатора [2]. Отличительная особенность их за-

ключается в том, что пластинчатые резисторы размещены непосредственно на поверхности ротора и изменен принцип включения ячеек-ослабителей в СВЧ-тракт аттенюатора: входной и выходной высокочастотные коаксиальные разъемы находятся в одной плоскости.



Рис. 1. Внешний вид ступенчатого аттенюатора барабанного типа



Рис. 2. Внешний вид малогабаритного ступенчатого аттенюатора

Внешний вид аттенюатора, габаритные размеры которого (без ручки управления) составляют 36x45x57 мм, показан на рис. 2.

На рис. 3 представлен упрощенный чертёж аттенюатора в разрезе.

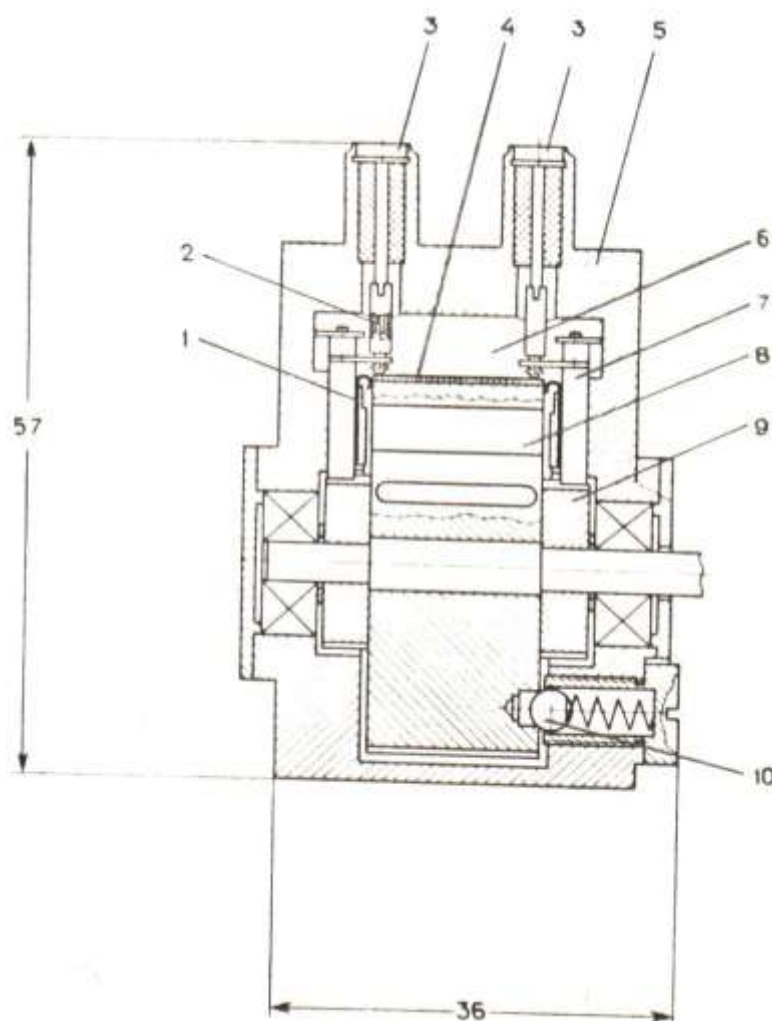


Рис. 3. Упрощенный чертёж малогабаритного ступенчатого аттенюатора в разрезе

Основными элементами аттенюатора являются: ротор 8; статор 5 с коаксиальными разъемами 3; механизм переключения, состоящий из толкателя 7, распределительного кулачка 9 и фиксатора 10. На образующей поверхности ротора расположены пластинчатые резисторы 4. Каждый резистор совместно с согласующей камерой 6 статора образует ячейку – ослабитель, представляющую собой несимметричную полосковую линию с потерями, основанием которой служит поверхность ротора [3]. Центральные проводники коаксиальных разъемов 3 имеют непосредственный гальванический контакт с центральными проводниками резисторов 4 с помощью «плавающих» контактов 2. Эти контакты во время переключения (вращения ротора) поднимаются. Необходимый гальванический контакт между ротором и статором осуществляется плоскими пружинами 1.

Диапазон частот аттенюатора составляет 0–6 ГГц, ослабление 0–70 дБ ступенями в 10 дБ, начальное («нулевое») ослабление не более 0,5 дБ, погрешность ослабления не более $\pm 1,5$ дБ при КСВН $\leq 1,5$.

Использование ячеек-ослабителей на базе полосковых линий позволило создать компактные конструкции ступенчатых аттенюаторов, в которых пластинчатые резисторы расположены непосредственно на заземленных основаниях несимметричных полосковых линий [3, 4].

На рис. 4 представлены фото общего вида и схематически конструкция ступенчатого аттенюатора.

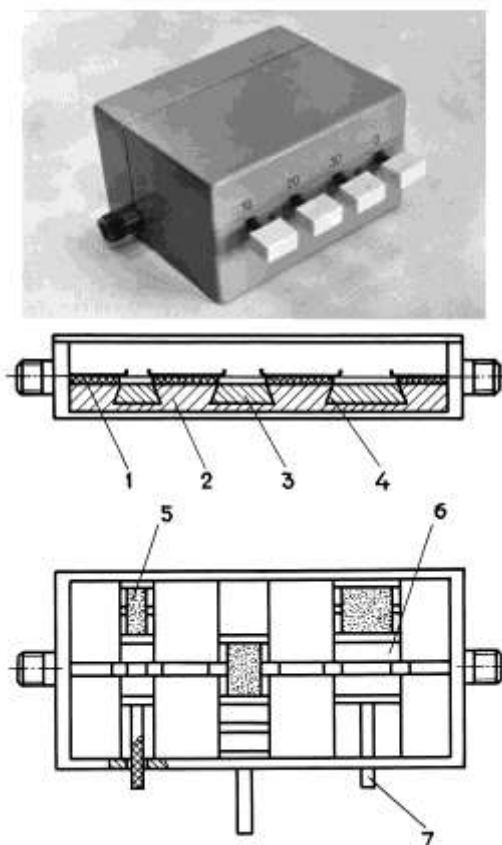


Рис. 4. Внешний вид и конструкция ступенчатого аттенюатора

В основании 2 полосковой линии имеются поперечные пазы 4, в которых размещены металлические вкладыши 3. На их поверхностях расположены пластинчатые резисторы (5) с некоторым A_n ослаблением или «нулевым» ослаблением 6. Наличие контактных пружин 1 обеспечивает включение резисторов в передающий тракт. Переключение ячеек осуществляется толкателями 7, связанными с механизмом переключения (на рис. 4 не показан). Каскад-

ный метод включения секций с различным ослаблением позволяет получать величины ослаблений от «нуля» до $(A_1 + A_2 + A_3)$ дБ.

Секции одной из моделей таких аттенюаторов имеют номинальные ослабления $A_1=10$ дБ, $A_2=20$ дБ, $A_3=30$ дБ.

Ослабление аттенюатора изменяется от 0 до 60 дБ ступенями в 10 дБ, погрешность ослабления составляет не более $\pm 1,5$ дБ. Диапазон частот от постоянного тока до 3 ГГц при КСВН входа (выхода) менее 1,3, коаксиальные разъемы сечением 7/3,04 мм.

Ступенчатые аттенюаторы с электромагнитным управлением

Достижение сверхширокополосности ступенчатых аттенюаторов стало возможным благодаря применению так называемых «накладных» полосковых контактов.

Известны конструкции ступенчатых аттенюаторов, в которых применяются такие контакты. Одна из конструкций показана на рис. 5, 6.

В поперечном сечении волноводная часть аттенюатора представляет собой прямоугольную линию передачи с плоским внутренним проводником, расположенным параллельно узкой стенке.

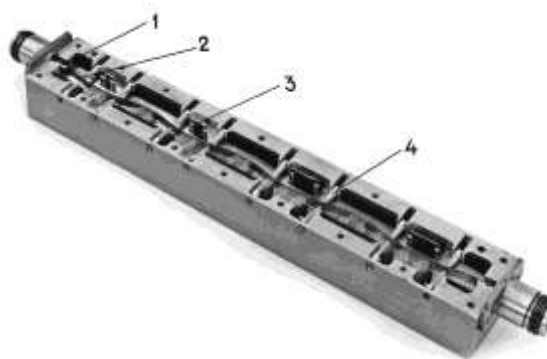


Рис. 5. Внешний вид аттенюатора со стороны СВЧ-тракта



Рис. 6. Внешний вид аттенюатора со стороны системы электромеханического переключения

Входной и выходной коаксиальные разъемы имеют на конце центрального проводника 1 впаянные тонкие ленты 2 из бериллиевой бронзы (ленточные гибкие проводники). Напротив неподвижных ленточных проводников расположены пластинчатые резисторы 3. Ленточные проводники и резисторы образуют с корпусом аттенюатора СВЧ-линию передачи с волновым сопротивлением, равным сопротивлению входного (выходного) тракта. Каждая пара гибких подвижных ленточных проводников при помощи диэлектрических толкателей 4, соединенных с электромагнитными реле, позволяет включать в волноведущий тракт либо

канал «нулевого» ослабления, либо канал любого требуемого ослабления (в зависимости от величины ослабления установленных резисторов).

Представленный на рис. 5,6 ступенчатый аттенюатор имеет ослабление от нуля до 110 дБ ступенями в 10 дБ (схема включения: 10+20+40+40 дБ) в диапазоне частот от постоянного тока до 18 ГГц. На верхних частотах погрешность ослабления не превышает $\pm 4,5$ дБ, начальное ослабление составляет 1,8 дБ, КСВН не более 1,8. Коаксиальные разъемы сечением 7/3,04 мм.

На рис. 7, 8 показан четырехсекционный ступенчатый электромеханический аттенюатор, в котором применяются «накладные» полосковые контакты, а пластинчатые резисторы расположены на диэлектрической подложке крышки 2 аттенюатора [5].

Аттенюатор состоит из крышки, на которой расположены входной 1 и выходной 7 разъемы, пластинчатые резисторы 3-6, корпуса 9, в котором находятся электромагниты 11-14, управляющие толкателями 10 в количестве 8 шт. Толкатели жестко соединены с пластинами (контактами), расположенными на диэлектрическом основании 8 и замыкающими участок тракта передачи на резистор или проводящий элемент.

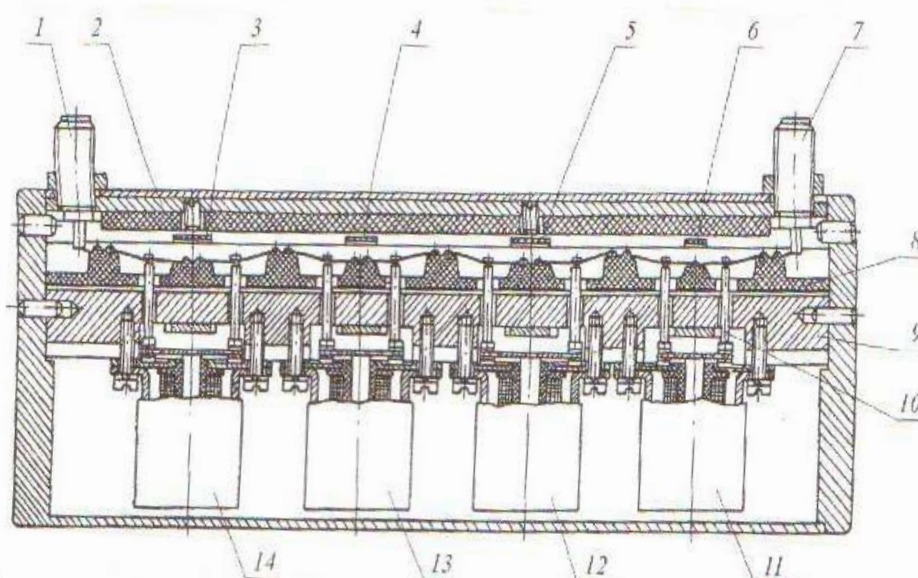


Рис. 7. Четырехсекционный ступенчатый аттенюатор с электрическим управлением

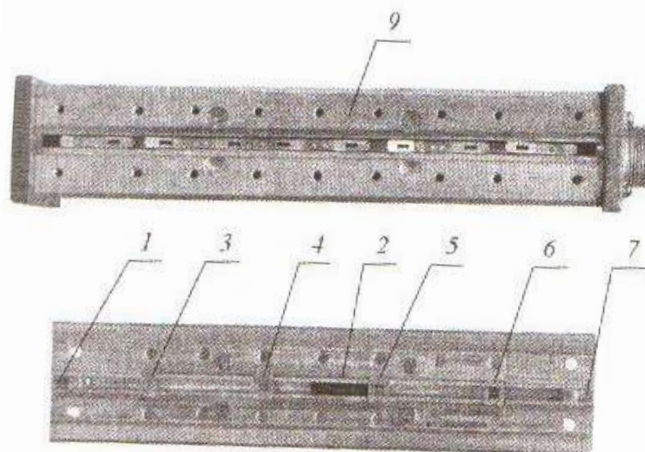


Рис. 8. Конструкция ступенчатого аттенюатора

Аттенюатор модели 1068 имеет ослабление от нуля до 110 дБ ступенями в 10 дБ в диапазоне частот от постоянного тока до 18 ГГц, начальное ослабление 2,8 дБ, погрешность ослабления +3,2 дБ для ослаблений до 60 дБ и от 3,3 до 5,8 дБ для ослаблений от 60 до 110 дБ, величину КСВН не более 1,8, габаритные размеры 110×56×26, массу 350г, коаксиальные разъемы сечением 3,5/1,52 мм.

Аттенюатор модели 1048 имеет общее ослабление от нуля до 35 дБ ступенями в 5 дБ в диапазоне частот от постоянного тока до 37,5 ГГц, начальное ослабление 3,0 дБ, погрешность ослабления +2,5 дБ, величину КСВН не более 1,8 на частотах до 26,5 ГГц и не более 2,2 на частотах до 37,5 ГГц, габаритные размеры 110×56×26 мм, массу 350г, коаксиальные разъемы сечением 2,4/1,04 мм.

Аттенюаторы указанных моделей допускают уровень мощности входного сигнала до 0,2 Вт, число переключений – до $2 \cdot 10^5$ при времени переключения не более 100 мс и напряжении питания (13,5±1,5) В. Переключение осуществляется импульсами напряжения длительностью 100 мс.

Имеются конструкции ступенчатых аттенюаторов, аналогичные аттенюаторам модели 1068 или 1048, но с ручным управлением. Для этого в секции аттенюатора, где находятся электромагниты, вдоль всего корпуса размещается распределительный вал с ручкой управления вне корпуса аттенюатора. На валу находятся кулачки-эксцентрики, которые при вращении вала осуществляют запрограммированные перемещения диэлектрических толкателей.

Коаксиальные ступенчатые аттенюаторы с *p-i-n*-диодами в качестве коммутирующих устройств

Интересными по схмотехническим и конструктивным решениям являются коаксиальные ступенчатые аттенюаторы, в которых переключение ячеек-ослабителей на основе пластинчатых резисторов осуществляется с использованием *p-i-n*-диодов. Применение диодов в качестве переключающих элементов заменяет сложные в изготовлении механизмы переключения известных ступенчатых аттенюаторов на основе полосковых линий передачи, увеличивает число переключений, тем самым повышая надежность этих аттенюаторов.

Однако по техническим характеристикам (начальное ослабление, вносимая погрешность ослабления, степень согласования на входе и выходе) такие аттенюаторы уступают ступенчатым аттенюаторам с механическим переключением. Электрически управляемый аттенюатор [6], содержащий тракт СВЧ-сигнала, входной и выходной коаксиальные разъемы сечением 3,5/1,52 мм, секции с ячейками-ослабителями, имеет в тракте три последовательно соединенные секции:

- с параллельным переключением ослабления 0, 10, 20, 30 дБ;
- параллельным переключением ослабления 0, 40, 80 дБ;
- плавным изменением ослабления от 0 до 10 дБ.

Общая величина вносимого ослабления аттенюатора составляет 120 дБ. На рис. 9 показан внешний вид электрически управляемого аттенюатора, в табл. 1 приведены его технические характеристики.



Рис. 9. Аттенюатор электрически управляемый с тремя секциями

Таблица 1

Технические характеристики аттенюатора электрически управляемого с тремя секциями

Модель	Диапазон частот, ГГц	Ослабление, дБ (ступень 10 дБ)	Ослабление, дБ (плавно)	Начальные потери, дБ	Погрешность ослабления, дБ	КСВН
1094	1,07–4,0	0–110	10, 0	4,0	±1,7	1,7
1095	2,0–8,15	0–110	10,0	6,0	±1,9	2,0

Входная мощность 0,2 Вт, габариты 110х50х33 мм.

На рис. 10 показан внешний вид электрически управляемого аттенюатора, состоящего из двух секций: плавного аттенюатора с ослаблением СВЧ-сигнала 0–50 дБ и секции параллельно переключаемых ячеек-ослабителей с ослаблениями 0, 40, 80 дБ. Аттенюатор имеет входной и выходной коаксиальные разъемы сечением 3,5/1,52 мм. В табл. 2 приведены его технические характеристики.



Рис. 10. Аттенюатор электрически управляемый с двумя секциями

Таблица 2

Технические характеристики аттенюатора электрически управляемого с двумя секциями

Модель	Диапазон частот, ГГц	Ослабление, дБ (ступень 40 дБ)	Начальные потери, дБ	Погрешность ослабления, дБ	КСВН
1091	8,15–17,85	0–110	6,5	±2,2 (40 дБ) ±4,3 (80 дБ)	2,5

Входная мощность 0,2 Вт, габариты 70х50х28 мм.

Коаксиальные ступенчатые аттенюаторы с электромагнитным управлением или с управлением, осуществляемым с использованием *p-i-n*-диодов, предназначены для регулирования входного или выходного уровня сигналов в высокочастотных генераторах сигналов, синтезаторах частоты, анализаторах спектра и другой радиотехнической аппаратуре.

Библиографический список

1. **Шишков, Г.И.** Широкополосные коаксиальные аттенюаторы // Антенны. 2004. Вып. 1 (80).
2. **Шишков, Г.И.** Опыт конструирования малогабаритных широкополосных аттенюаторов. / Г.И. Шишков, В.М. Бунтилов, Ю.А. Горячев // Техника средств связи. Сер. РИТ. 1982. Вып. 7. С. 81–87.
3. А.С. 240789 (СССР). Фиксированный аттенюатор / Г.И. Шишков, В.М. Бунтилов // Б.И. № 13. 1969.
4. А.С. 327866 (СССР). Ступенчатый аттенюатор / В.М. Бунтилов [и др.] // Б.И. № 16. 1972.

5. Радиоизмерительная аппаратура СВЧ и КВЧ. Узловая и элементная базы: монография / под ред. А.М. Кудрявцева. – М.: Радиотехника. 2006.
6. Пат. 2004112608. Атенюатор электрически управляемый / Г.Б. Дзехцер, В.А. Кочедыков, Л.Б. Никифоров. № 39974; заявл. 26.04. 2004; опубл. 20.08.2004.

*Дата поступления
в редакцию 28.04.2011*

G.I. Shishkov

WIDEBAND STEP ATTENUATORS

The principle of operation and design of wideband coaxial step attenuators are described. Their specification are also given.

Key words: step attenuators, radio technical instruments, lamellar resistors.

УДК 519.254

А.И. Беляев, Е.А. Букварев, А.В. Ястребов

ЭФФЕКТИВНЫЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬ ГРУППЫ СВЕРТОК

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Предложен метод увеличения эффективности вычислителя группы сверток, выполняющего операции над бинарными псевдослучайными последовательностями. Сделана теоретическая оценка сложности программной реализации вычислителя. Приведены примеры построения.

Ключевые слова: арифметическая свертка, бинарная последовательность, оптимизация, конвейерные вычисления.

Введение

В настоящее время популярны методы передачи информации с использованием ансамблей шумоподобных последовательностей и схем расширения спектра. При построении асинхронно-адресных систем связи возникает необходимость в параллельном приеме нескольких шумоподобных сигналов для обеспечения поиска нужного абонента и первичной синхронизации. Существуют методы последовательного поиска и обнаружения подобных сигналов [1, 2], которые позволяют значительно сократить сложность устройства в обмен на увеличение времени обнаружения. Однако эти методы рассчитаны на поиск одного опорного сигнала, и при необходимости одновременного поиска нескольких сигналов, требуют линейного увеличения аппаратуры, либо времени поиска. Кроме того, в некоторых приложениях время реакции приемника на появление последовательности от абонента с нужным номером может оказаться критичным. В этом случае наименьшее время обнаружения обеспечит классическая согласованная фильтрация, построенная на основе вычисления арифметических сверток входного сигнала с несколькими образцами. При этом значительно возрастает сложность аппаратуры. В статье предлагается способ реализации вычислителя группы сверток, учитывающего взаимные свойства опорных сигналов.

Постановка задачи

Рассмотрим структуру вычислителя группы сверток (ВГС) для M опорных сигналов $a_0 \dots a_{M-1}$. ВГС выполняет операцию дискретной свертки, сигнал на выходе фильтра описывается выражением

$$Y_m[k] = \sum_{n=0}^{N-1} X[k-n] \cdot a_m[n],$$

где m – номер опорного сигнала; N – число отводов линии задержки; k – отсчет выходного сигнала; n – номер отвода линии задержки; $a_m[n]$ – коэффициенты ВГС для соответствующего опорного сигнала.

Общая схема такого ВГС изображена на рис. 1.

Введем некоторые ограничения. Пусть опорные сигналы представляют собой бинарные псевдослучайные последовательности. Известно, что сигналы такого вида могут принимать значения либо +1, либо -1, вследствие чего операция умножения заменяется операцией сложения или вычитания. Считаем также, что N достаточно большое и кратно степени двойки, а постоянная составляющая любого из опорных сигналов близка или равна нулю:

$$N \gg 2^M; \quad \sum_{i=0}^{N-1} a_i \approx 0; \quad a \in \{-1, +1\}; \quad W(a) = 0,5(\delta(1) + \delta(-1)), \quad (1)$$

где W – плотность вероятности распределения значений a .

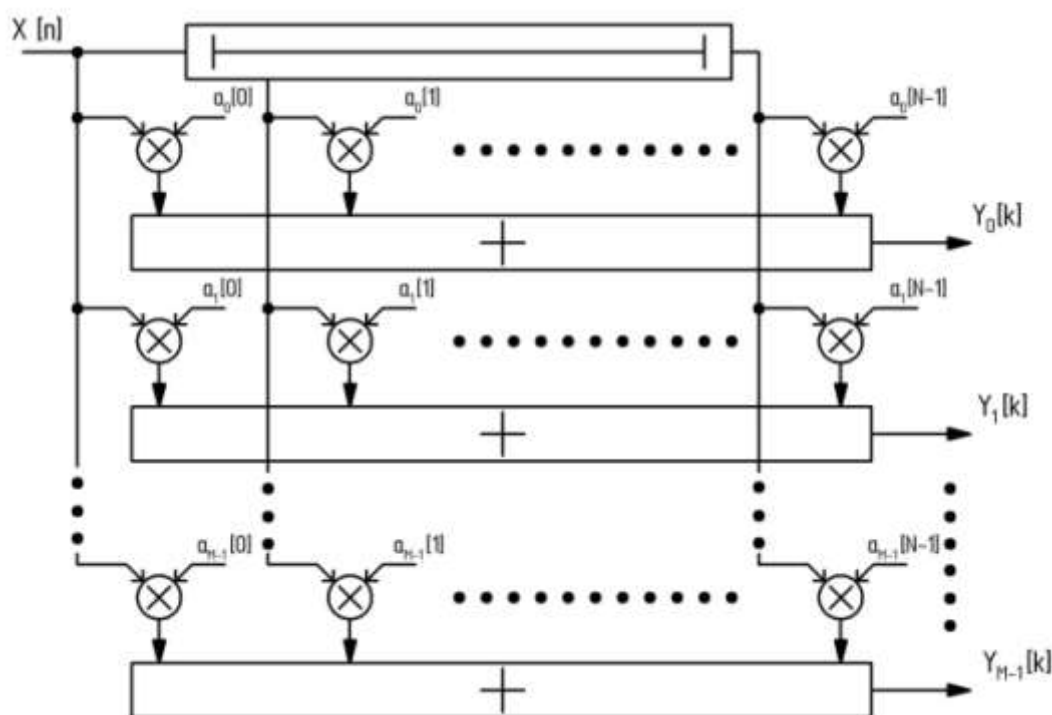


Рис. 1. Общая схема ВГС

Требуется минимизировать количество вычислений, требуемое для получения результатов, при обязательном условии сохранения точности.

Сложность прототипа

Оценим сложность ВГС (рис.1). Структура вычислителя содержит линию задержки и группу корреляторов. Линия задержки оптимизации не подлежит, поэтому все дальнейшие заключения целесообразно делать относительно вычислителей корреляционных сумм. При выполнении вычислений с помощью микропроцессорных систем сложность реализации целесообразно представить в количестве требуемых операций сложения/вычитания. Число операций сложения/вычитания для вычисления одного отсчета свертки входного сигнала с опорным составит $N-1$ операций. Тогда сложность программной реализации неоптимизированного ВГС:

$$C_{base}^{МП} = M(N-1). \quad (2)$$

Оптимизация алгоритма

Общая идея сокращения сложности ВГС состоит в разбиении сумматора на несколько *суммирующих блоков*, входы которых не соединяются между собой. Данное обстоятельство позволяет перенести операцию умножения на выход соответствующего суммирующего блока без потери линейности преобразования. Иными словами, вынести коэффициенты умножения «за скобки». Все операции, выполняемые в оптимизированном ВГС, целесообразно разделить на два этапа обработки: этап предварительных вычислений S_{pre} и финальный S_{post} . На этапе S_{pre} производятся описанные разбиения сумматора и упорядочение предварительных результатов, на этапе S_{post} – подсчет результатов $Y_0 \dots Y_{M-1}$ регулярным способом.

Рассмотрим этап S_{pre} . В общем виде для M опорных сигналов целесообразно ввести понятие *объединенных коэффициентов* A , представляющих собой M -разрядные двоичные числа, образованные следующим образом: $A_n = a_{M-1}^b[n] \dots a_0^b[n]$, где $a_m^b[n]$ – коэффициенты

опорных сигналов n -го отвода, приведенные к однобитному виду по правилу:

$$a_m^b[n] = \begin{cases} 0 & \text{при } a_m[n] = +1 \\ 1 & \text{при } a_m[n] = -1 \end{cases}; \quad n \in \overline{0, N-1}.$$

Таким образом, образуется множество объединенных коэффициентов $A = \{A_0..A_{N-1}\}$, размером N элементов. С учетом условия (1), можно заключить, что часть элементов указанного множества будет иметь одинаковое числовое значение. Иными словами, множество объединенных коэффициентов A разбивается на 2^M непересекающихся подмножеств одинаковых элементов A^j так, что:

$$A = \left(\bigcup_j A^j \right); \quad j \in \overline{0, 2^M - 1}; \quad A^i \cap A^j \equiv 0, \quad \text{при } i \neq j.$$

В каждом из подмножеств A^j можно выполнить суммирование без предварительного умножения на коэффициент опорного сигнала. Выходы суммирующих блоков U_i должны быть разбиты на пары, образованные объединенными коэффициентами, значения которых представляют собой побитовую инверсию друг друга. Кроме того, эти пары целесообразно упорядочить в порядке возрастания значения «неинвертированных» объединенных коэффициентов. Например, последовательность $\{0, 2, 1, 3, 4, 7, 5, 6\}$ в упорядоченном виде выглядит следующим образом: $\{0, 7, 1, 6, 2, 5, 3, 4\}$. На этом завершается этап S_{pre} , полностью определяемый свойствами опорных сигналов (структурой множества A). Сложность данного этапа незначительно варьируется в зависимости от вида опорных сигналов, отношения $\frac{N}{2^M}$, кратности длины N степени двойки. В среднем, сложность S_{pre} можно оценить по формуле

$$C_{S_{pre}} = 2^M \cdot \left(\frac{N}{2^M} - 1 \right) = N - 2^M. \quad (3)$$

Рассмотрим этап S_{post} . Все вычисления на этом этапе уже не зависят от вида опорных сигналов, а определяются только параметрами M и N . Фактически, из 2^M чисел вычисляется M результатов, соответствующих выходам СФ $Y_0..Y_{M-1}$.

Таким образом, этап S_{post} представим в виде регулярной вычислительной структуры глубиной M стадий. Структура образована двухвходовыми сумматорами и вычитателями. На первой стадии используется $\frac{2^M}{2}$ вычитателей, выполняющих функцию $R_x = U_i - U_j$, где U_i, U_j пары упорядоченных выходов этапа S_{pre} . Используя числа из приведенного ранее примера упорядоченной последовательности в качестве индексов, получим $R_0 = U_0 - U_7, R_1 = U_1 - U_6, R_2 = U_2 - U_5, R_3 = U_3 - U_4$. Данные операции являются первой стадией этапа S_{pre} , вычисляющего Y_{M-1} , результата обработки старших бит всех объединенных коэффициентов A . Всего в таком сумматоре M стадий, а его сложность вычисляется следующим образом:

$$C_{Y_{M-1}} = 1 + 2 + 4 + 8 + \dots + 2^{M-1}.$$

Результат Y_{M-2} получается с помощью добавления на последней стадии двухвходового вычитателя, имеющего сложность

$$C_{Y_{M-2}} = 1,$$

Получение каждого из последующих результатов требует добавления к структуре вычислителя финального этапа некоторого количества сумматоров, причем сложность получения очередного значения Y растет с уменьшением его индекса. Это вызвано тем, что при рассмотрении упорядоченного ряда «неинвертированных» объединенных коэффициентов, с уменьшением на единицу номера разряда объединенного коэффициента, удваивается количество перемен значений бит данного разряда на интервале $0 \div 2^M$. Сложность вычисления очередного значения Y имеет ярко выраженную закономерность:

$$C_{Y_{M-3}} = 1 + 2,$$

$$C_{Y_{M-4}} = 1 + 2 + 4, \\ \dots \\ C_{Y_0} = 1 + 2 + 4 + \dots + 2^{M-2}.$$

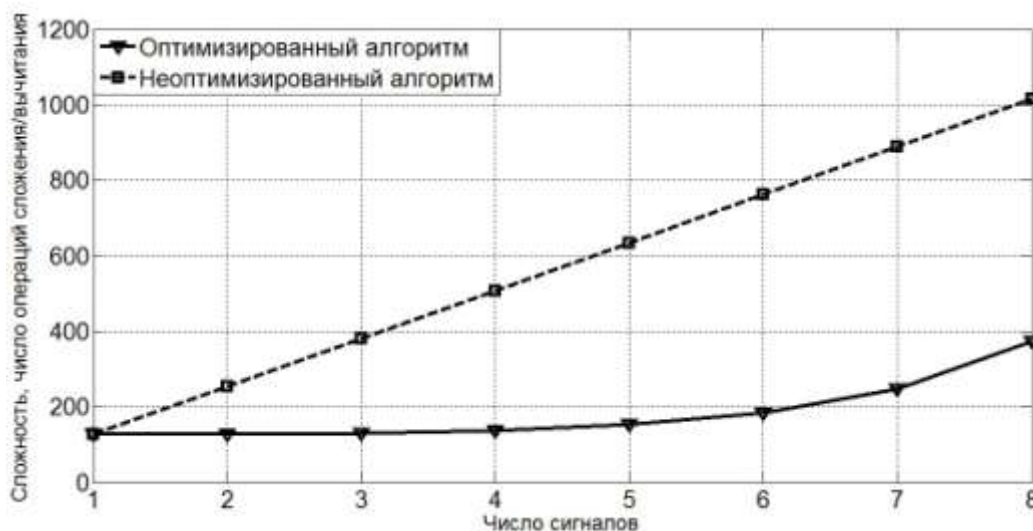
В целом, сложность финального этапа можно выразить следующей формулой:

$$C_{S_{post}}^{МП} = \sum_{i=0}^{M-1} 2^i (M-i). \quad (4)$$

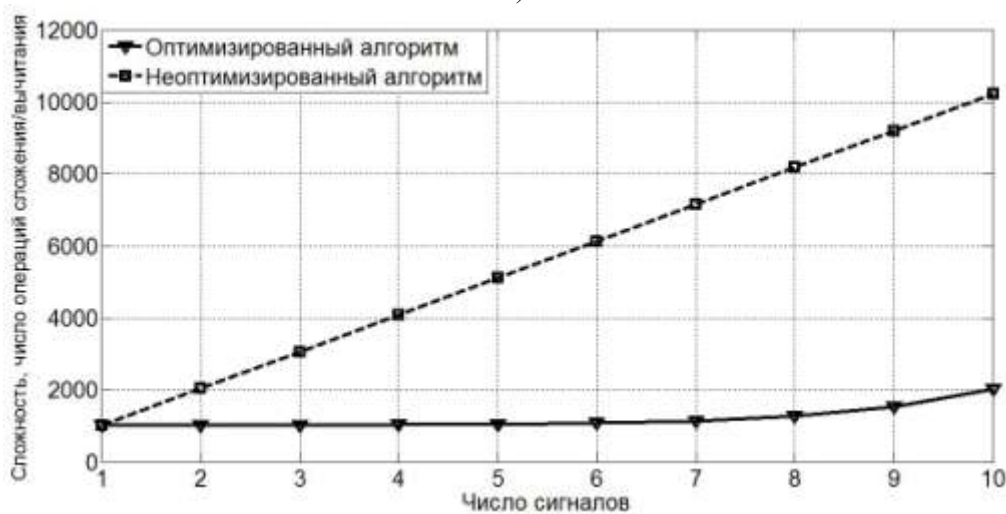
С учетом (3) и (4) общую сложность оптимизированного ВГС можно записать следующим образом:

$$C_{BGC} = C_{S_{pre}}^{МП} + C_{S_{post}}^{МП} = N - 2^M + \sum_{i=0}^{M-1} 2^i (M-i). \quad (5)$$

На рис. 2 приведены сложности неоптимизированного и оптимизированного ВГС в зависимости от числа каналов M для значений $N = 128$ и 1024 , вычисленных по формулам (2) и (5). Видно, что по мере приближения M к значению $\log_2 N$ эффективность алгоритма падает. Это вызвано уменьшением размера подмножеств A^j , что уменьшает общий вес этапа предварительных вычислений. Несмотря на это, даже при граничном случае, когда $M = \log_2 N$, сложность оптимизированного СФ в несколько раз меньше сложности прототипа.



а)



б)

Рис. 2. Зависимость величины сложности ВГС от числа сигналов:
а — при $N=128$; б — при $N=1024$

Далее приведены результаты вычисления сложности вычислителя.

Таблица 1

Сравнение величины сложности при реализации различных алгоритмов

Алгоритм	Сложность			
	$M=1, N=128$	$M=3, N=128$	$M=6, N=128$	$M=8, N=128$
Неоптимизированный алгоритм	374	404	686	1690
Оптимизированный алгоритм	374	1122	2244	2992
	$M=1, N=1024$	$M=4, N=1024$	$M=8, N=1024$	$M=10, N=1024$
Неоптимизированный алгоритм	1023	4092	8184	10230
Оптимизированный алгоритм	1023	1034	1270	2036

Примеры построения оптимизированных ВГС

1. ВГС, рассчитанный на прием одного сигнала. В таком ВГС сумматор разбивается на два суммирующих блока, а объединенные коэффициенты являются одноразрядными. Зададим вид опорного сигнала: $a[n]=\{+1, -1, -1, +1, +1, -1, -1, +1\}$. Математическое ожидание такого сигнала равно нулю, а длина $N=8$. В данном примере оба суммирующих блока имеют по четыре входа, образуя структуру, приведенную на рис. 3. Арифметический инвертор, выделенный кружком с надписью «-1», показан условно. Аппаратно арифметическая инверсия выполняется суммирующим блоком финального этапа.

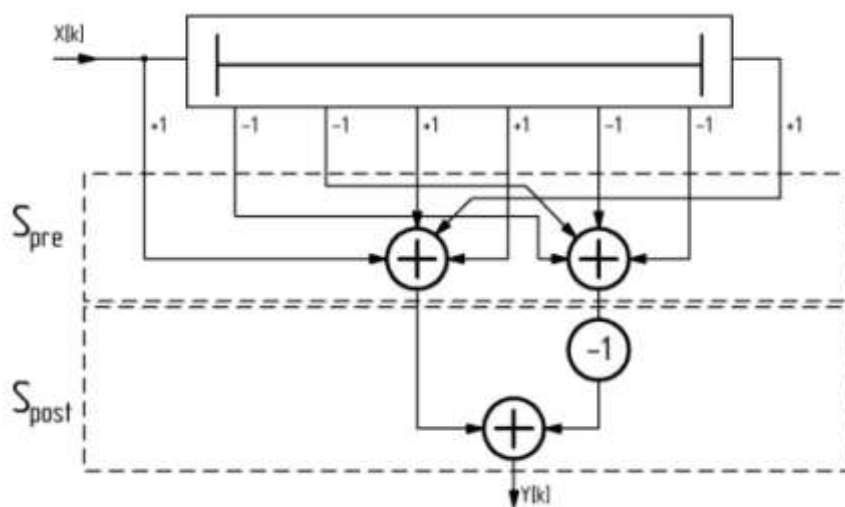


Рис. 3. Структура СФ для одного сигнала

Суммирующие блоки предварительной стадии разбивают множество отводов на два подмножества, собирающих отдельно «+1» и «-1». Последняя стадия в этом случае тривиально заменяется операцией вычитания. Таким образом, сложность одноканального варианта одинакова для случая оптимизированного СФ и прототипа.

2. ВГС, рассчитанный на прием двух сигналов. Зададим вид опорных сигналов: $a_0[n]=\{+1, -1, -1, +1, +1, -1, -1, +1\}$, $a_1[n]=\{+1, -1, +1, -1, +1, -1, +1, -1\}$. Параметры: $M=2, N=8$. Тогда множество объединенных коэффициентов $A \in \overline{0, 2^M - 1}$, или $A \in \overline{0, 3}$, и условие (1) выполняется. На рис. 4 изображена структура такого вычислителя. Суммирующие блоки этапа S_{pre} условно обозначены символами «+1+1», «-1-1», «-1+1», «+1-1» соответственно значению объединенных коэффициентов.

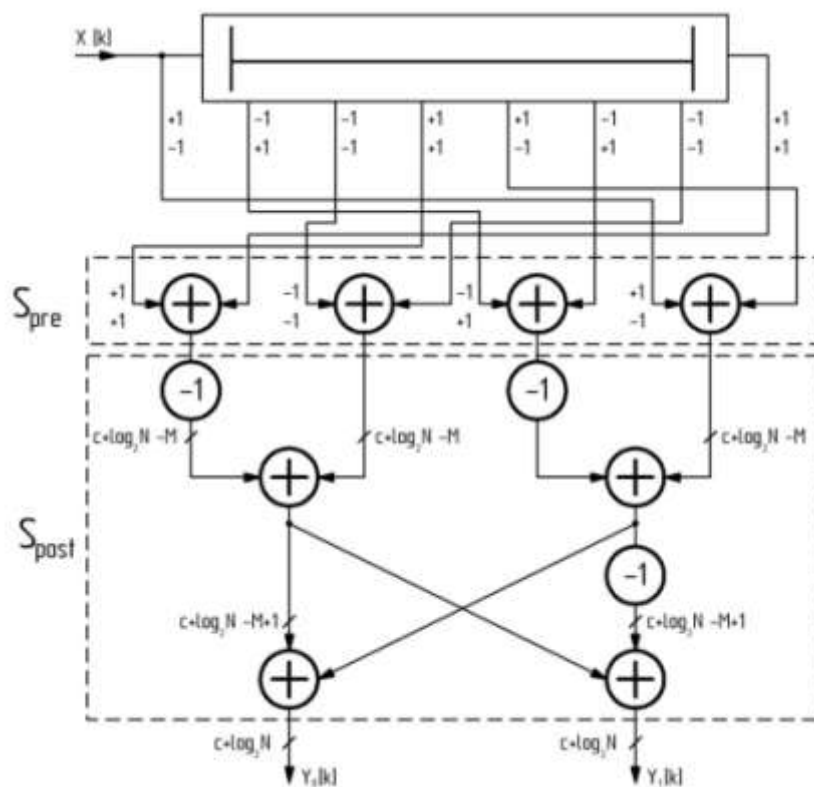


Рис. 4. Структура оптимизированного ВГС для двух сигналов

3. ВГС, рассчитанный на прием трех сигналов. Зададим вид опорных сигналов: $a_0[n]=\{+1, -1, -1, +1, +1, -1, -1, +1\}$, $a_1[n]=\{+1, -1, +1, -1, +1, -1, +1, -1\}$, $a_2[n]=\{+1, -1, +1, -1, +1, -1, +1, -1\}$.

На рис. 5 изображена структура такого фильтра, входной сигнал и линия задержки не отображены.

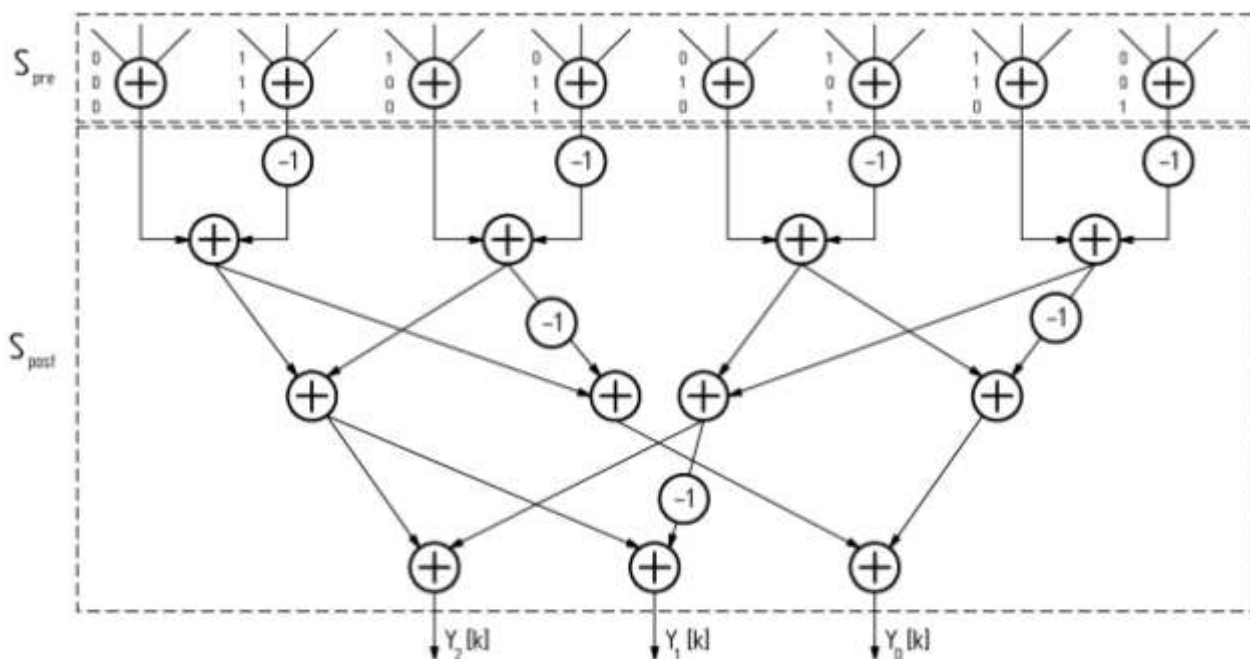


Рис. 5. Структура оптимизированного ВГС для трех сигналов

Выводы

1. Предложенный способ построения вычислителя группы сверток позволяет уменьшить сложность многоканального вычислителя до величины, сравнимой с одноканальным вариантом.
2. Для одноканального случая сложности реализации оптимизированного и неоптимизированного фильтров одинаковы.
3. С увеличением размера группы эффективность оптимизации падает.

Библиографический список

1. **Ипатов, В.** Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов / В. Ипатов. – М.: Техносфера, 2007. – 488 с.
2. **Кузнецов, В.С.** Быстрое декодирование на основе пассивной согласованной фильтрации длинных кодов Голда / В.С. Кузнецов, К.А. Мордасов // Естественные и технические науки. 2009. №4. С. 321-327.
3. **Угрюмов, Е.П.** Цифровая схемотехника / Е.П. Угрюмов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2001. – 528 с.
4. **Стешенко, В.Б.** ПЛИС фирмы «Altera»: элементная база, система проектирования и языки описания аппаратуры / В.Б. Стешенко. – М.: Издательский дом «Додека-XXI», 2002. – 576 с.

*Дата поступления
в редакцию 28.04.2011*

A.I. Belyaev, E.A. Bukvarev, A.V. Yastrebov

AN EFFECTIVE MULTICHANNEL ARITHMETIC CONVOLUTION CALCULATOR

An optimization method of multichannel pseudonoise binary sequences correlation calculator was proposed. Theoretical complexity for the software implementation was showed. Some examples were adduced.

Key words: arithmetic convolution, binary sequence, optimization, pipelined processing architecture.

УДК 519.688; 534.6.08; 534.8

Е.А. Букварёв, М.В. Мартынюк

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ЛИНЕЙЧАТОГО СПЕКТРА
ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСОВ
ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКЕ ЭХОСИГНАЛОВ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В статье рассматривается решение проблемы надёжной качественной оценки временного положения отдельных реплик в эхосигнале полученном из акустического тракта в присутствии ревербераций.

Ключевые слова: ультразвуковое зондирование, ревербирующая среда, акустическая анизотропия.

Введение

В настоящее время достаточно широко применяются методы неразрушающего контроля с использованием акустического зондирования исследуемой среды (акустические уровнемеры, толщиномеры, измерители механических напряжений). Обычно информативным параметром, извлекаемым из принятого сигнала (эхосигнала), является время распространения. По времени распространения, при известном распределении скоростей в среде, можно определить толщину материала или уровень жидкости. Методы акустической тензометрии позволяют на основании изменения времени распространения для ненапряжённого и напряжённого состояний материала определить величину внутреннего механического напряжения.

Практически всегда исследуемый акустический тракт является ревербирующим. При наличии в исследуемой среде только одного акустического тракта (такой средой является, например, стенка трубы, выполненная из слабоанизотропной стали) интервал между импульсами (репликами) определяется временем прохождения сигналом пути: излучатель – граница раздела сред – приёмник, и последовательность импульсов в эхосигнале для подобного тракта является периодической. Наличие множества реплик (откликов, отражений) повышает информативность принятого из среды сигнала, но затрудняет его автоматическую обработку.

Проблема повышения надёжности подобных автоматизированных систем является достаточно актуальной и особенно важна в случаях, когда время работы оператора должно быть максимально сокращено, например, при контроле защитных оболочек реакторных отделений АЭС, когда оператор вынужден находиться в зоне повышенной радиационной опасности.

Рассматриваемый метод позволяет повысить надёжность определения интервала повторения реплик в ревербирующем тракте и уменьшить количество необходимой априорной информации.

Постановка задачи

Пусть производится зондирование по схеме (рис. 1), содержащей цепи согласованной обработки эхосигнала. Сигнал на выходе согласованного фильтра (СФ-эхосигнал) представляет собой периодическую последовательность сжатых импульсов с высокочастотным заполнением в случае отсутствия акустической анизотропии (рис. 3, а) либо сумму периодических последовательностей, отличающихся энергией и периодами повторения. Периоды повторения отличаются не более, чем на 15%, при соответствующей акустической анизотропии. Требуется определить период следования импульсов в последовательности с макси-

мальной энергией и положение первого импульса в этой последовательности. Метод определения должен обеспечивать автоматизированную обработку при отношении сигнал/помеха не хуже 20 дБ, количестве реплик не менее пяти.



Рис. 1. Этапы предварительной обработки эхосигнала

Определение интервала

Определение интервала предлагается построить по схеме, показанной на рис. 2. На первой стадии производится амплитудное детектирование с помощью устройства взятия модуля, последовательно соединённого с фильтром низкой частоты ФНЧ-1. Частотная характеристика последнего выбирается с учётом подавления частоты заполнения входных импульсов не менее 40 дБ. ФНЧ-2 обеспечивает дополнительную фильтрацию огибающей с целью её последующего выравнивания. Выравнивание огибающей обеспечивает узел деления А/В (блок 7), на вход которого поступает огибающая СФ-эхосигнала после нелинейного преобразования в блоке 6, выполняющего подавление сигнала меньшего заданного порога.

Затем вычисляется модуль спектра сигнала, и вся дальнейшая обработка производится в спектральной области. Спектральная оценка относится к категории интегральных и обладает преимуществом при оценке периодических сигналов в условиях флуктуаций и шумов. Во многом это вызвано уменьшенным влиянием на результат поведения сигнала во временной области в окрестностях точки. Иными словами, локальные особенности сигнала (несколько локальных максимумов на одном пике, модуляции амплитуды реплик), затрудняющие анализ эхосигнала во временной области, слабо влияют на спектр эхосигнала.

Известно, что спектр периодической последовательности импульсов является линейчатым. Положение (частота) первой гармоники в линейчатом спектре импульсной последовательности определяется периодом (интервалом) повторения импульсов, поэтому можно оценивать интервал повторения реплик на основании положения первой гармоники в спектре ВО СФ-эхосигнала, однако прямому использованию данного метода препятствуют следующие факторы:

- наличие постоянной составляющей и высокий уровень помехи в спектре вблизи неё;
- неполное выравнивание огибающей;
- наличие 2-й периодической последовательности в случае акустической анизотропии.

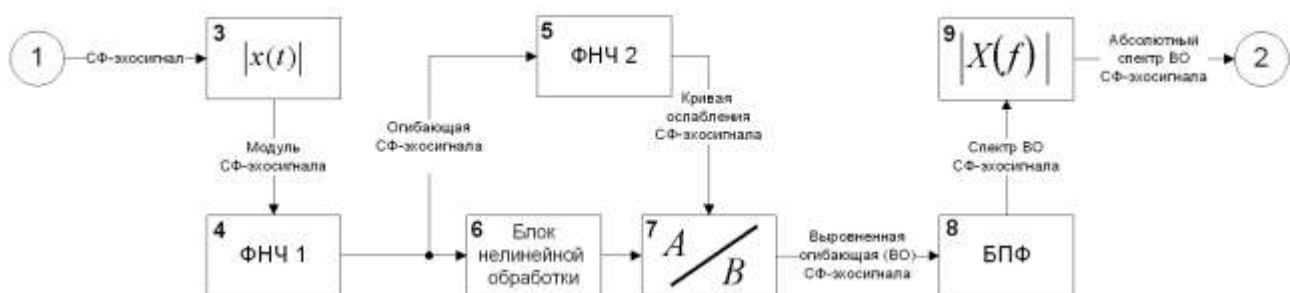


Рис. 2. Этапы дополнительной обработки СФ-эхосигнала

Фактор наличия постоянной составляющей решается отбрасыванием низкочастотной монотонно убывающей (с нулевой частоты) области абсолютного спектра ВО СФ-эхосигнала.

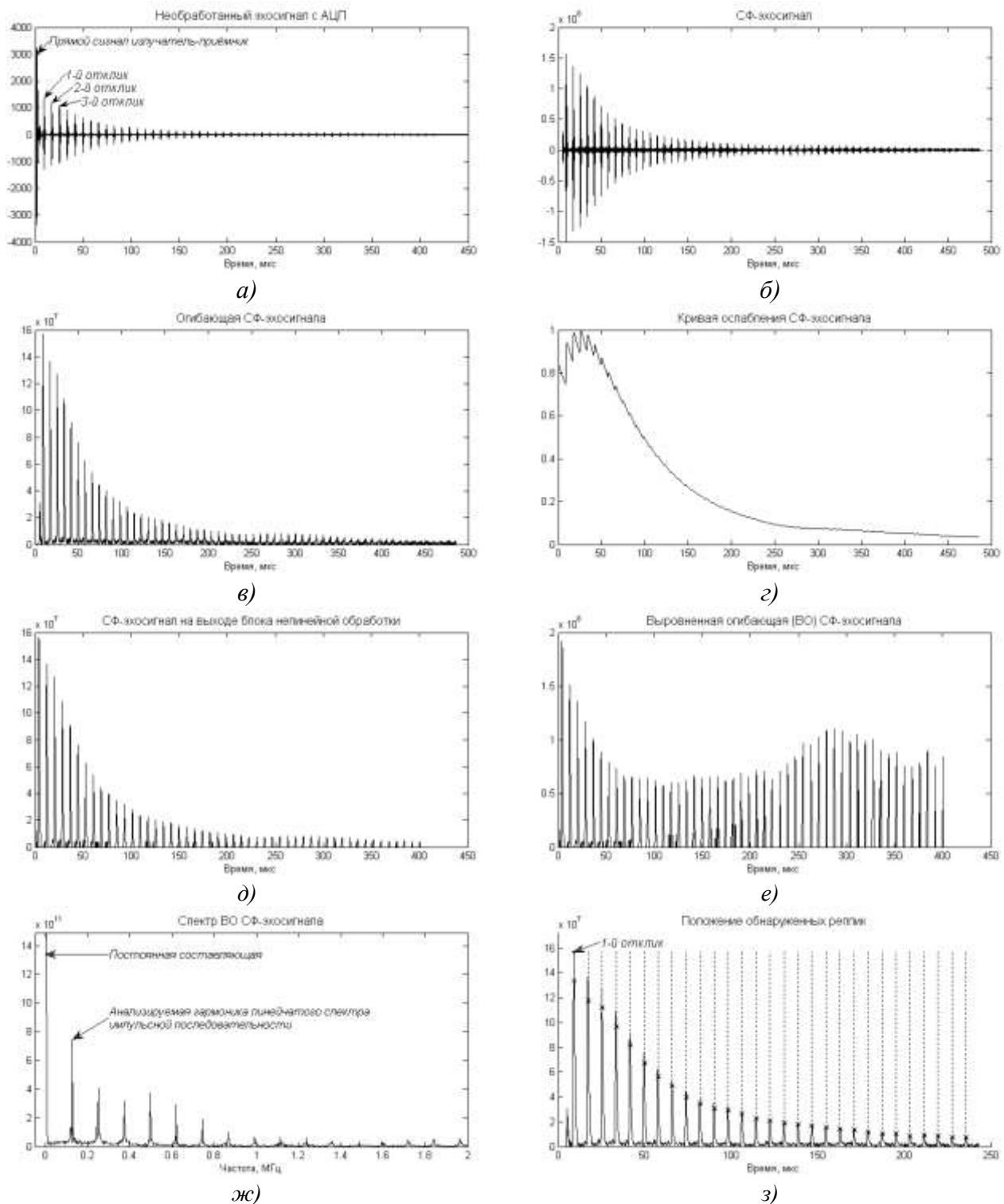


Рис. 3. Этапы обработки эхосигнала при отсутствии акустической анизотропии:

а – необработанный сигнал с выхода АЦП (сигнал на входе блока 1, рис. 1); б – эхосигнал после согласованной фильтрации и отбрасывания прямого сигнала (сигнал на выходе блока 2, рис. 1); в – огибающая СФ-эхосигнала (сигнал на выходе блока 4, рис. 2); г – кривая ослабления СФ-эхосигнала (сигнал на выходе блока 5, рис. 2); д – сигнал на выходе блока нелинейной обработки (блока 6, рис. 2); е – выровненная огибающая СФ-эхосигнала (выход блока 7, рис. 2); ж – спектр ВО СФ-эхосигнала (выход блока 9, рис. 2); з – положение обнаруженных в огибающей СФ-эхосигнала реплик

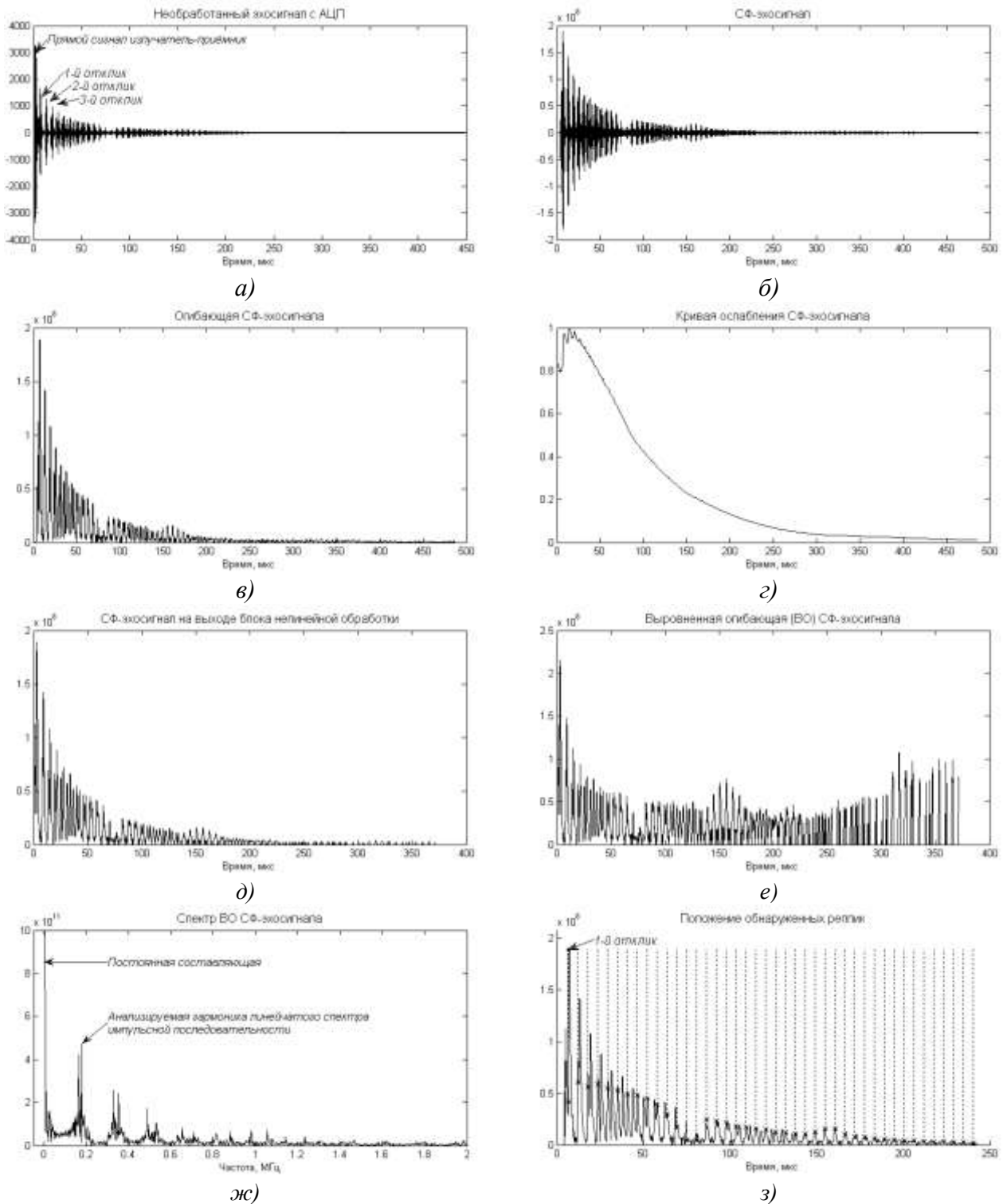


Рис. 4. Этапы обработки эхосигнала при наличии акустической анизотропии:

а – необработанный сигнал с выхода АЦП (сигнал на входе блока 1, рис. 1); *б* – эхосигнал после согласованной фильтрации и отбрасывания прямого сигнала (сигнал на выходе блока 2, рис. 1); *в* – огибающая СФ-эхосигнала (сигнал на выходе блока 4, рис. 2); *г* – кривая ослабления СФ-эхосигнала (сигнал на выходе блока 5, рис. 2); *д* – сигнал на выходе блока нелинейной обработки (выход блока 6, рис. 2); *е* – выровненная огибающая СФ-эхосигнала (выход блока 7, рис. 2); *ж* – спектр ВО СФ-эхосигнала (выход блока 9, рис. 2); *з* – положение обнаруженных в огибающей СФ-эхосигнала реплик

Неполное выравнивание огибающей приводит к искажению формы и фазы линейчатого спектра в окрестностях каждой из гармоник, что увеличивает взаимное влияние гармоник

друг на друга и приводит к ошибке определения положения максимума первой гармоники. Поэтому желательно обеспечить максимальное расстояние между гармониками, что достигается включением в область анализа максимально возможного количества реплик (не менее пяти).

Похожим образом влияет на результат наличие акустической анизотропии. В этом случае необходимо максимально обузить гармонику в спектральной области. Для этого необходимо выполнить предварительную оценку интервала повторения реплик на основании положения 1-й гармоники абсолютного спектра ВО СФ-эхосигнала, затем выбрать область анализа выровненной огибающей ВО СФ-эхосигнала кратной данной оценке интервала и выполнить повторную обработку блоками $8 \div 9$ (рис. 2).

Определение положения первого импульса

Предлагается также использовать информацию о фазе первой гармоники линейчатого спектра [1] ВО СФ-эхосигнала для оценки положения первой реплики эхосигнала. Поскольку на данном этапе уже известна приближённая оценка периода следования импульсов (T), повторное вычисление БПФ ВО СФ-эхосигнала выполняется на интервале, кратном периоду следования импульсов: от T до $(n+1) \cdot T$, где $n = 3, 4, 5, \dots$ – число анализируемых импульсов. Интегрирование необходимо начинать с момента T для устранения прямого сигнала излучатель-приёмник.

Рассмотрим спектральную плотность одиночного импульса $S(t)$ на интервале от $-0.5 \cdot T$ до $+0.5 \cdot T$. Обозначим фазу спектральной плотности одиночного импульса на частоте $f_0 = T^{-1}$ как φ_0 . Требование равенства $\varphi_0 = 0$ будет соблюдаться при соблюдении следующего условия:

$$\int_{-0.5 \cdot T}^0 S(t) dt = \int_0^{0.5 \cdot T} S(t) dt.$$

Например, если одиночный импульс симметричен относительно максимума φ_0 будет равно нулю, если максимум расположен в точке $t = 0$. Далее, положением импульса на временной оси будем называть момент времени t_s , делящий импульс на две равные по площади части.

Огибающая спектра периодической последовательности импульсов

$$\dots + S(t - 2T) + S(t - T) + S(t) + S(t + T) + S(t + 2T) + \dots$$

отличается от спектра одиночного импульса только масштабом (вдоль оси ординат), т.е. фаза первой гармоники на частоте f_0 линейчатого спектра периодической последовательности импульсов будет совпадать с фазой спектральной плотности одиночного импульса на частоте f_0 .

Сдвиг сигнала во времени на t_0 приводит к изменению фазовой характеристики спектра на величину $2\pi \cdot f_0 \cdot t_0$.

Следовательно, положение n -го импульса на временной оси будет связано с фазой φ_0 первой гармоники линейчатого спектра следующим элементарным соотношением:

$$t_s = \frac{(\varphi_0 + n)T}{2\pi},$$

где $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Большинство реализаций быстрого преобразования Фурье (БПФ) (в том, числе и библиотека FFTW [2], используемая в Matlab) производят интегрирование на интервале от 0 до t , а не на интервале от $-0.5 \cdot T$ до $+0.5 \cdot T$, т.е. анализируется сигнал

$$S(t) + S(t + T) + S(t + 2T) + \dots + S(t + (N-1) \cdot T).$$

Поэтому приведённая формула останется справедливой только при соблюдении следующих условий: если сигнал представляет собой периодическую последовательность из N импульсов, то длительность сигнала, поступающего на вход БПФ, должна быть строго кратна T . Желательно также, чтобы интервал анализа не превышал $N \cdot T$: в этом случае все гармоники линейчатого спектра будут иметь минимальную ширину и максимальную энергию в частотной области.

Экспериментальная проверка метода

Метод был опробован при определении времени распространения в семи стальных заготовках различной толщины ($11 \div 75$ мм), имеющих различную акустическую анизотропию. Проверка проводилась для продольных и сдвиговых волн. Метод показал устойчивую работу даже при малом количестве откликов (рис. 5).

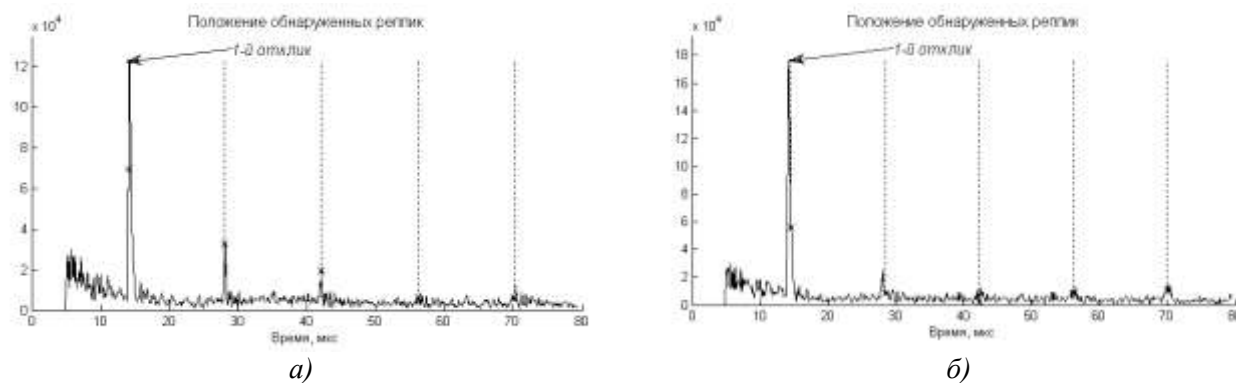


Рис. 5. Результаты обработки эхосигнала, полученного при зондировании стальной заготовки толщиной 75 мм, при сильном поглощении в тракте

Выводы

Предложен метод автоматического определения периода следования импульсов в периодической последовательности и положение первого импульса в этой последовательности. Применяя различные методы интерполяции, можно добиться высокой точности определения временного положения некоторой характерной точки отдельного пика (например, максимума огибающей) и, соответственно, интервалов между пиками. Однако для этого необходимо с достаточной степенью надёжности определить положение самих пиков.

Предлагаемый метод может быть использован в качестве вспомогательного для предварительной приближённой оценки положения хорошо локализованных (коротких) импульсов периодической последовательности на временной оси с последующим уточнением положения (например, максимума) с помощью различных методов интерполяции. Для слабо локализованных (длинных) импульсов (например, являющихся откликами узкополосного тракта) данный метод может использоваться в качестве основного.

Библиографический список

1. Гоноровский, И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: учебник для вузов / И.С. Гоноровский. – М.: Радио и связь, 1986. – 512 с.
2. [Электронный ресурс] // www.fftw.org

Дата поступления
в редакцию 28.04.2011

Е.А. Bukvarev, M.V Martinuk,

USING PROPERTIES OF THE LINE SPECTRUM OF THE REPETITION PULSE TRAIN FOR AUTOMATIC ECHO SIGNALS PROCESSING

This article deal with solving of the problem robust and qualitative definition temporary situation of the separate replicas in echo signal received from acoustic tract under reverberations.

Key words: ultrasonic sounding, reverberating medium, acoustic anisotropy.

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ

УДК 517.951

И.С. Костенко

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ УДАЛЁННЫХ ЦУНАМИ НА ПОБЕРЕЖЬЕ САХАЛИНСКОЙ ОБЛАСТИ

Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН

Проведено численное моделирование распространения исторических цунами сейсмического происхождения в Тихом океане. Рассматривались события с эпицентрами удаленными от Дальневосточного побережья России. Была проведена оценка времени прихода волн от удаленных цунами, силы воздействия на побережье, рассмотрены особенности прохождения цунами через Курильские проливы. Приведен спектральный анализ записей.

Ключевые слова: цунами, инструментальные данные, численное моделирование, Сахалин.

Чилийское землетрясение - сильнейшее землетрясение в истории наблюдения, магнитуда, по разным оценкам от 9,3 до 9,5, произошло 22 мая 1960 года в 19 ч 11 мин по местному времени и послужило причиной цунами. Возникшие волны достигали высоты 15-20 м у побережья Южной Америки. Цунами разрушило несколько городов и смыло десятки селений. Погибло 10 тысяч человек. Еще одно землетрясение, произошедшее 27 февраля 2010 года в 03 ч 34 мин по местному времени у берегов Чили, было магнитудой 8,8 и также послужило причиной цунами.

Эти цунами привели к катастрофическим последствиям на побережье Южной Америки. Волны цунами дошли до Дальневосточного побережья России.

Численное моделирование

Для моделирования этих событий использовался вычислительный комплекс NAMIDANCE [2, 9, 12], рекомендованный ЮНЕСКО для расчета распространения цунами [10]. Математическая модель основана на нелинейных уравнениях мелкой воды, записанных в сферических координатах, и является модификацией известного японского кода TUNAMI. Она уже использовалась для моделирования цунами в 2004 году в Индийском океане [1] и оценки цунами риска Япономорского побережья России [3].

Пространственный шаг исходной расчетной сетки для акватории Тихого океана 2,7 мин. Такой шаг слишком велик для прохождения волны через Курильские проливы, поэтому для моделирования волны в Охотском море необходимо использование вложенных сеток. Этот метод основывается на том, что каждая сетка, находящаяся внутри большей, имеет шаг в три раза меньше. Для моделирования этих случаев цунами использовали три вложенные сетки. Шаг сетки для южной части Охотского моря и Курильских островов 90 с, для Курильских проливов 30 с (рис. 1). Батиметрии получены из одноминутной батиметрии GEBCO1 Digital Atlas.

Источники чилийских цунами 1960 и 2010 годов (рис. 1) выбраны в соответствии с решением Окада [7], использующим данные о параметрах землетрясения, которые приводятся на сайте Геофизической службы США [8]. Эпицентр наиболее сильного землетрясения, произошедшего 22 мая 1960 года, локализован в точке с координатами 76.5° з.д., 39.5° ю.ш.

на глубине 53 км. Длина разрыва, определяемая по афтершокам, 800 км, его ширина 200 км и смещение по разрыву 30 м. Угол разлома с меридианом (strike) 10^0 , угол смещения плиты вглубь от разлома (dip) 10^0 и вдоль разлома (slip) 91^0 . Эпицентр землетрясения, произошедшего 27 февраля 2010 года, севернее от предыдущего в точке с координатами 72.72^0 з.д. и 35.846^0 ю.ш. на глубине 55 км. Длина разрыва 450 км, ширина 100 км, смещение по разрыву 15 м. Угол разлома (strike) 16^0 , угол смещения плиты вглубь (dip) 14^0 , вдоль разлома (slip) 104^0 .

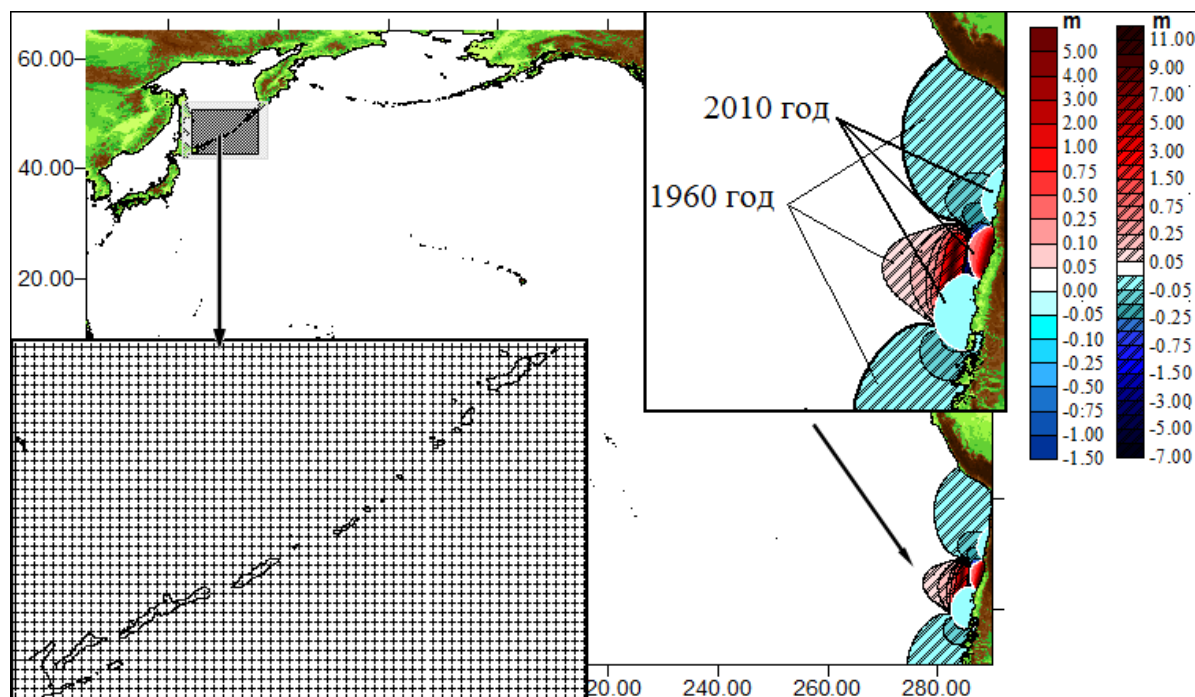


Рис. 1. Источники чилийских цунами 1960 и 2010 годов и расположение вложенных сеток для Охотского моря и Курильских островов

Рассчитанные начальные волны представляют собой знакопеременное смещение с максимальным поднятием в результате землетрясения 1960 года на 10.8 м и опусканием на 6 м, так что максимальная высота волны в очаге составила около 17 м. Максимальная высота волны в очаге, образовавшемся 27 февраля 2010 года, – около 6 м.

Накат волны на берег не моделировался, и в расчетах используются условия полного отражения (приближение вертикальной стенки на глубине 5 м). Цунами моделировалось на протяжении 35 ч с момента начала землетрясения.

В связи с тем, что источники землетрясения располагались недалеко друг от друга, по сравнению с расстоянием от источников землетрясения до Курильских островов и о. Сахалин, то время прохождения волны через Тихий океан составило порядка 21-22 часа от обоих источников.

Однако высоты волн, образовавшиеся от цунами 2010 года, были на порядок меньше, например, в Северо-Курильске (о. Парамушир) в 1960 году высота цунами составила 4,7 м, в п. Малокурильское (о. Шикотан) 4 м, а в 2010 году высоты волн составили 2,28 м и 1,1 м соответственно.

В 1960 году на Курильских островах при максимальном подъеме уровня воды в г. Северо-Курильск были затоплены дома на побережье, склады и причал, смыты мост и некоторые строения в Южно-Курильске. В Малокурильском были затоплены причалы и некоторые здания, мост вынесло на сушу. Суда сорваны с якорей. При обоих цунами волна проникла в Охотское море.

Проявления Чилийских цунами 1960 и 2010 годов на Курильских островах и о. Сахалин приведены в табл. 1 [11].

Таблица 1

Высоты волн цунами, проявившиеся на побережье Сахалина и Курильских островов, вызванные землетрясениями в Чили

Наименование населенного пункта	Высота цунами в 1960 году, м	Высота цунами в 2010 году, м
г. Северо-Курильск (о. Парамушир)	4,7	2,28
п. Малокурильское (о. Шикотан)	4	1,1
г. Курильск (о. Итуруп)	1,0	0,1-0,15
г. Поронайск (о. Сахалин)	0,8	0,25
п. Стародубское (о. Сахалин)	Измерения не проводились	0,2-0,3
г. Корсаков (о. Сахалин)	1,2	0,2
г. Холмск (о. Сахалин)	0,1	0,08

Максимальные распределения амплитуд волн цунами от обоих источников схожи по географии расположения. Максимальные волны приходятся на Курильские острова (рис. 2), которые являются естественной преградой на пути распространения волн цунами, и в Охотское море цунами заходит, уже потеряв достаточное количество энергии. В настоящее время ведется работа по вычислению этих потерь. Анализ наблюдений за высотами волн цунами в северо-западной части Тихого океана это подтверждает.

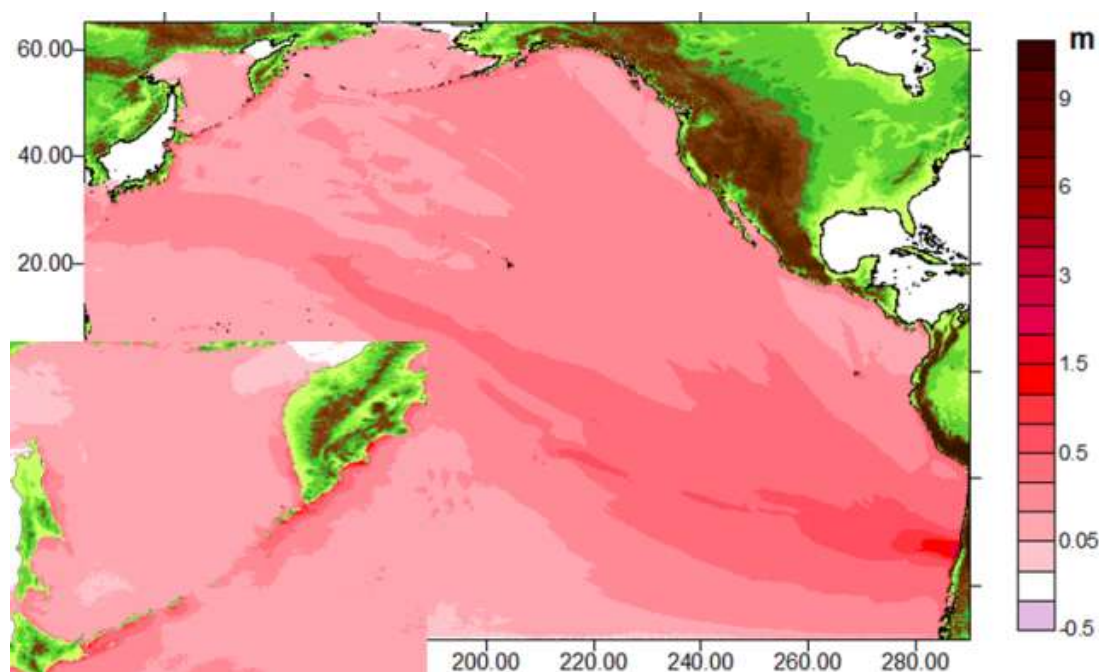


Рис. 2. Максимально распределение амплитуд Чилийского цунами 27 февраля 2010 года

Сопоставление измеренных и расчетных данных

В настоящей работе проведено сравнение численного моделирования Чилийского цунами 2010 года с натурными записями уровня моря. Для изучения особенностей проявления цунами в разных пунктах Сахалинской области были использованы записи уровня моря в г. Корсаков и п. Стародубское, предоставленные Сахалинским центром цунами и запись уровня в п. Охотское в ковше рыбозавода, которая проводилась ИМГиГ ДВО РАН. Чтобы сделать сравнительный анализ произошедшего события с данными моделирования в этих населенных пунктах при выполнении моделирования были поставлены компьютерные мареографы.

На рис. 3 представлены совмещенные записи уровня моря в г. Корсаков (о. Сахалин) по данным наблюдений и моделирования в первые часы прихода цунами. Из записи наблюдений вычтен предвычисленный прилив. Наблюдается достаточно хорошее совпадение

уровней. Цунами началось с небольшого поднятия на 5-10 см спустя 25 ч после начала землетрясения. Период колебаний длился около 4 ч. Время прихода волны при моделировании и в записи наблюдения практически совпадают.

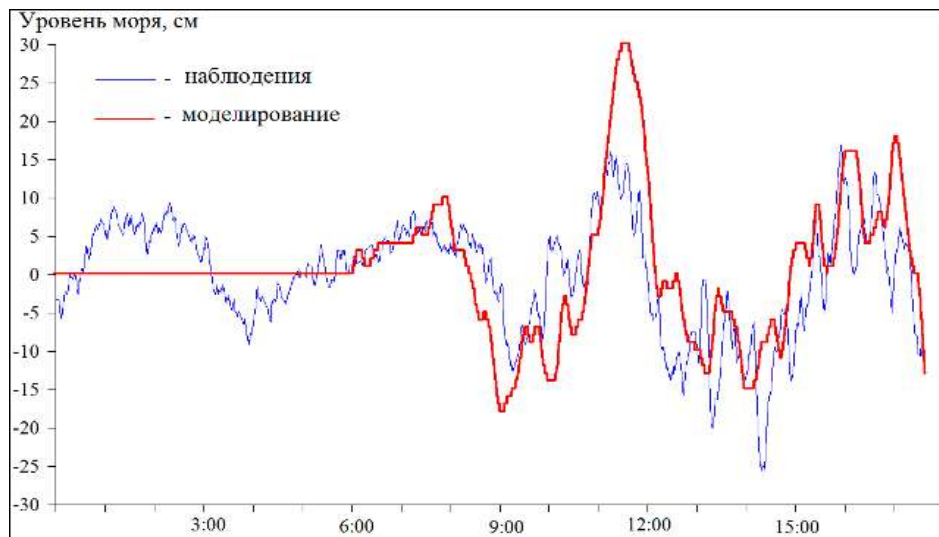


Рис. 3. Сопоставление записей Чилийского цунами 2010 года в г. Корсаков (по данным наблюдения и моделирования)

На рис. 4 представлены совмещенные записи уровня моря в п. Стародубское (о. Сахалин) по данным наблюдений и моделирования. Из записи наблюдений вычтен предвычисленный прилив. Из графика видно достаточно хорошее совпадение высот и периодов первых волн записи моделирования и наблюдения, характерный период колебаний составляет около 100 мин. Волна цунами пришла спустя примерно 21 час после землетрясения, и цунами началось с небольшого подъема (5 см).

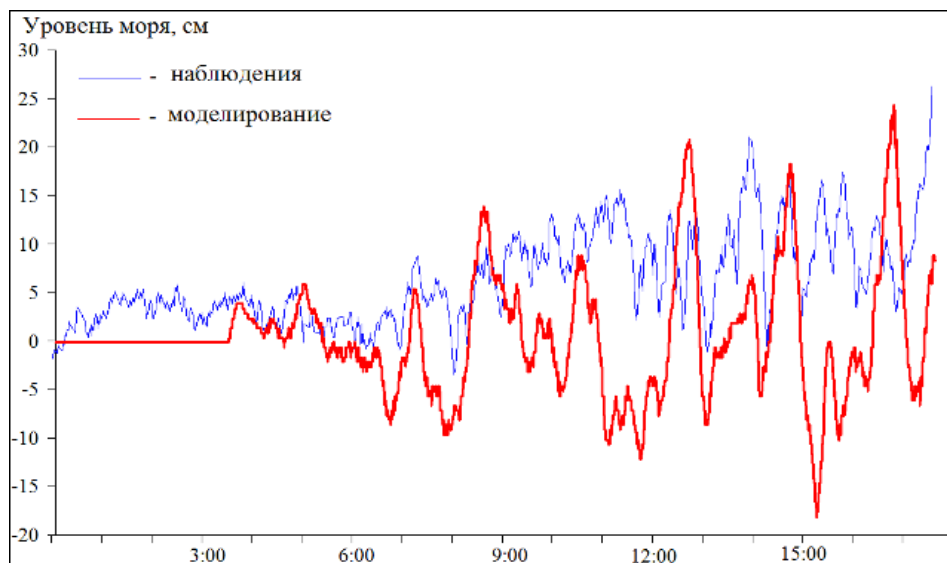


Рис. 4. Сопоставление записей чилийского цунами 2010 года в п. Стародубское (по данным наблюдения и моделирования)

На рис. 5 представлены совмещенные записи уровня моря в п. Охотское (о. Сахалин) по данным наблюдений и моделирования. Из записи наблюдений вычтен предвычисленный прилив. Из графика видно достаточно хорошее по времени приходу цунами и периоду колебаний. Характерный период колебаний составляет около 100 мин. Волна цунами пришла

спустя примерно 21 ч после землетрясения, и цунами началось с небольшого подъёма (5 см). Амплитуды колебаний уровня моря модельного ряда больше, так как модельный (компьютерный) мареограф располагался в открытом море, поэтому высоты получились больше, чем у стационарного мареографа, расположенного в закрытом ковше рыбозавода.

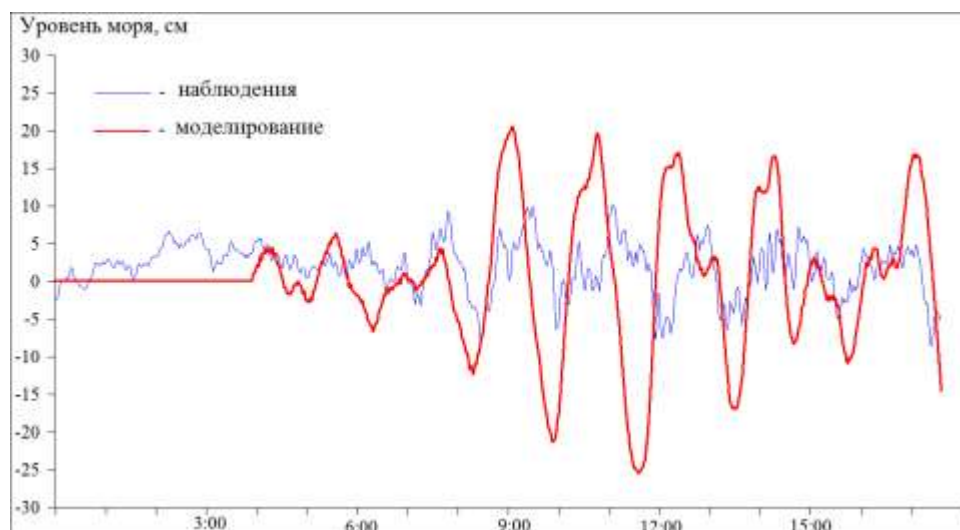


Рис. 5. Сопоставление записей чилийского цунами 2010 года в п. Охотское (по данным наблюдения и моделирования)

Датчики измерения уровня моря располагаются в ковше порта, а компьютерные мареографы – вне его на глубине около 10 м. Этим объясняется немного более ранний приход волны цунами по данным моделирования.

Также было проведено сравнение по времени прихода волн цунами и их высоте для населенных пунктов Курильских островов, в которых проводились наблюдения [4, 5, 6]. Анализ показывает достаточно хорошее совпадение записей цунами.

На рис. 6 представлено сравнение спектральной плотности мощности для рассчитанных записей Чилийских цунами 1960 и 2010 года в районе г. Северо-Курильска (Курильские острова). Отсюда видно, что усиление наблюдается на одних и тех же периодах: 85, 32 и 19 мин.

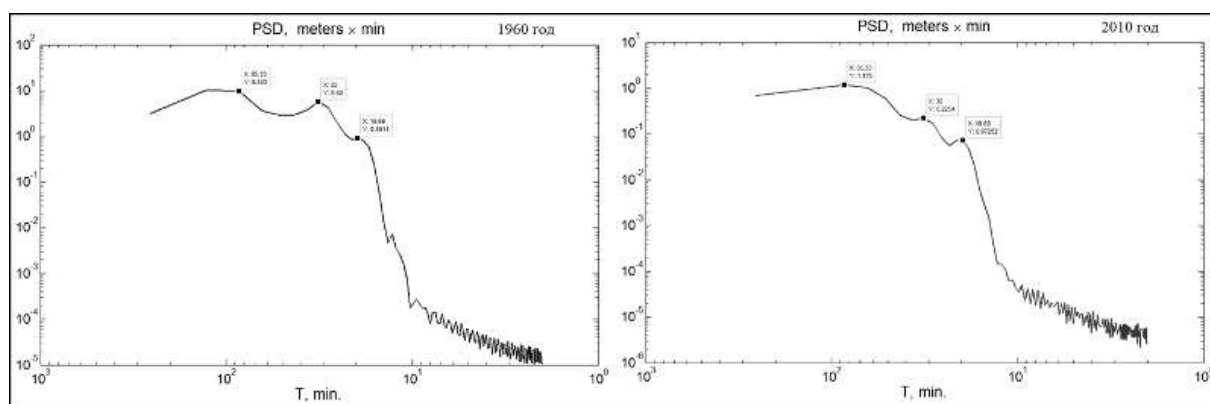


Рис. 6. Оценка спектральной мощности плотности для полученных модельных записей волновых процессов (г. Северо-Курильск)

Выводы

Выполнено моделирование чилийских цунами 1960 и 2010 годов с помощью вычислительного комплекса, основанного на уравнениях мелкой воды, в сферических координатах с учётом вращения Земли. Проведено сравнение рассчитанных и реально наблюдавшихся

записей уровня моря для пунктов на побережье о. Сахалин и Курильских островах. Также было получено практически полное согласие расчета времени прихода волны в населенные пункты, которые удалены на значительное расстояние от эпицентров цунами. Сравнительный анализ рассчитанных записей цунами на шельфе Курильских островов показывает, что параметры волны на удалённых пунктах задаются формой шельфа, и для случаев чилийских цунами они являются схожими.

Выполнение этой работы поддержано грантом РФФИ 09-05-00971

Библиографический список

1. **Зайцев, А.И.** Моделирование распространения катастрофического цунами (26 декабря 2004 г.) в Индийском океане / А.И. Зайцев [и др.] // Доклады РАН. 2005. Т. 402. № 3. С. 388–392.
2. **Куркин, А.А.** Модифицированный вычислительный комплекс «ЦУНАМИ» для оценки рисков, связанных с цунами / А.А. Куркин [и др.] // Известия АИН им. А.М. Прохорова. Прикладная математика и механика. 2004. Т. 9. С. 88–100.
3. **Куркин, А.А.** Сравнительная оценка цунами опасности япономорского побережья России на основе численного моделирования / А.А. Куркин [и др.] // Океанология. 2004. Т. 44. № 2. С. 179–188.
4. **Левин, Б.В.** Первые результаты регистрации длинных волн в диапазоне периодов цунами в районе Курильской гряды на разнесенной сети станций / Б.В. Левин [и др.] // Доклады Академии наук. 2009. Т. 427. № 2. С. 239–244.
5. **Файн, И.В.** Расчет захваченных волн для района Курильской гряды // В сб.: Волновые процессы в северо-западной части Тихого океана. – Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1980. С. 87–92.
6. **Файн, И.В.** Частотные свойства Курильского шельфа // Генерация цунами и выход волны на берег. – Москва. 1984. С. 80–83.
7. **Okada, Y.** Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // Bull. Seism. Soc. America. 1985. V. 75. P. 1135–1154.
8. **Yalciner, A.C.** Modeling and visualization of tsunamis: Mediterranean examples / A.C. Yalciner [et al.] // Tsunami and Nonlinear Waves (Ed: Anjan Kundu), Springer, 2007. P. 273–283.
9. сайт Геофизической службы США (http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/events/1960_05_22.php)
10. [http://ioc3.unesco.org/ptws/21/\(documents\)/TsuModelMan-v3-ImamuraYalcinerOzyurt_apr06.pdf](http://ioc3.unesco.org/ptws/21/(documents)/TsuModelMan-v3-ImamuraYalcinerOzyurt_apr06.pdf).
11. <http://avi-nami.ce.metu.edu.tr>.
12. <http://sakhmeteo.ru/company/structure/tsunamicenter>
13. <http://namidance.ce.mrttu.edu.tr>

Дата поступления
в редакцию 29.04.2011

I.S. Kostenko

RESEARCH OF IMPACT OF REMOTE TSUNAMI AT THE SAKHALIN REGION COAST

In the present work numerical modeling distribution of historical tsunamis of a seismic origin in Pacific Ocean is lead. Events with an epicenter removed from Far East coast of Russia were considered. The estimation of arrival time of waves from the removed tsunami, forces of influence at coast has been lead, features of passage of a tsunami through Kuriles passages are consider. The spectral analysis of records in settlements of Sakhalin and Kuriles is lead.

Key words: tsunami, gauge records, numerical modeling, Sakhalin.

УДК 537.86

Е.М. Громов, В.В. Тютин

СТАЦИОНАРНЫЕ ВОЛНЫ В РАСШИРЕННОМ НЕЛИНЕЙНОМ УРАВНЕНИИ ШРЕДИНГЕРА С УЧЕТОМ ИНДУЦИРОВАННОГО РАССЕЯНИЯ РАМАНА И НЕЛИНЕЙНОЙ ДИСПЕРСИИ

Государственный университет – Высшая школа экономики

В рамках расширенного нелинейного уравнения Шредингера, содержащего члены нелинейной дисперсии и индуцированного рассеяния Рамана, исследованы стационарные волны перепада с нелинейной фазовой модуляцией. Найдены два класса волн перепада: одни обусловлены балансом эффектов нелинейной дисперсии и индуцированного рассеяния и исчезают при пренебрежении нелинейной дисперсией, другие – балансом индуцированного рассеяния и линейной дисперсией второго порядка и сохраняются при пренебрежении нелинейной дисперсией. Показано, что волны перепада на подложке реализуются лишь в присутствии нелинейной дисперсии.

Ключевые слова: расширенное нелинейное уравнение Шредингера, индуцированное рассеяние Рамана, нелинейная дисперсия, стационарные волны перепада.

Введение

Интерес к высокочастотным стационарным волнам обусловлен возможностью их распространения на значительные расстояния с сохранением своей формы и переноса энергии и информации без значительных потерь. Высокочастотные стационарные волны имеют большое значение в различных областях физики при исследовании распространения интенсивных волновых полей в нелинейных диспергирующих средах: оптических импульсов в волоконных линиях связи [1–3], электромагнитных и ленгмюровских волн в плазме [4]. Распространение высокочастотных импульсов достаточно большой протяженности хорошо описывается нелинейным уравнением Шредингера (НУШ) [5, 6], учитывающим линейную дисперсию второго порядка и кубичную нелинейность (self-phase modulation). Стационарные волны в рамках этого уравнения возникают в результате баланса дисперсионного разбегания и нелинейного сжатия волнового пакета.

Уменьшение протяженности высокочастотных волновых импульсов приводит к необходимости учета в НУШ членов более высокого (третьего) порядка малости, соответствующих нелинейным эффектам укрупнения (stepping) [7], индуцированного рассеяния Рамана (stimulated Raman-scattering) [8] и линейного эффекта абберационного искажения, отвечающего линейной дисперсии третьего порядка (third-order linear dispersion). Это расширенное НУШ. Так, в расширенном НУШ с учетом индуцированного рассеяния Рамана, но в пренебрежении нелинейной дисперсией и линейной дисперсией третьего порядка стационарные волны изучались в [9]. При пренебрежении в расширенном НУШ эффектом рассеяния Рамана, но с учетом нелинейной дисперсии и линейной дисперсии третьего порядка стационарные волны изучались в [10] при нелинейной фазовой модуляции, а в [11, 12] – при линейной фазовой модуляции. Найдены как локализованные, так и нелокализованные стационарные волны. В этом случае стационарные волны возникают в результате баланса нелинейной дисперсии и линейной дисперсии третьего порядка (абберации). В [13] рассматривались стационарные волны в рамках расширенного НУШ с учетом нелинейной дисперсии, но в пренебрежении индуцированным рассеянием и линейной дисперсией третьего порядка.

В данной работе анализируются стационарные волны в рамках расширенного НУШ, содержащего индуцированное рассеяние Рамана и нелинейную дисперсию, но в пренебрежении линейной дисперсией третьего порядка. Найдены условия существования стационарных волн перепада.

Стационарные волны в расширенном НУШ

Рассмотрим динамику огибающей $U(\xi, t)$ волнового поля $U(\xi, t)\exp(i\omega t - ik\xi)$ в рамках расширенного НУШ с учетом нелинейной дисперсии и индуцированного рассеяния

$$2i\frac{\partial U}{\partial t} + 2i\beta\frac{\partial(|U|^2 U)}{\partial \xi} - \mu U\frac{\partial(|U|^2)}{\partial \xi} + q\frac{\partial^2 U}{\partial \xi^2} + 2\alpha|U|^2 U = 0, \quad (1)$$

где $\xi = x - V_g^L \cdot t$, $V_g^L = \partial\omega/\partial k$ – линейная групповая скорость; $\omega = \omega(k, |U|^2)$ – нелинейное дисперсионное соотношение; $q = -\partial^2\omega/\partial k^2$ – коэффициент линейной дисперсии второго порядка; $\alpha = \partial\omega/\partial(|U|^2)$ – коэффициент кубичной нелинейности (self-phase modulation); β – коэффициент нелинейной дисперсии (stepping); μ – коэффициент индуцированного рассеяния Рама-на (stimulated Raman-scattering).

В (1) перейдем в систему, движущуюся со скоростью V : $\eta = \xi - V \cdot t, t' = t$. Решение вновь полученного уравнения ищем в виде стационарной волны:

$$U(\eta, t) = A(\eta)\exp(i\Omega t + i\phi(\eta)).$$

Для $A(\eta)$ и $\phi(\eta)$ получим систему уравнений

$$q\frac{d^2\phi}{d\eta^2}A + 2q\frac{d\phi}{d\eta}\frac{dA}{d\eta} + 2(3\beta A^2 - V)\frac{dA}{d\eta} = 0, \quad (2)$$

$$q\frac{d^2A}{d\eta^2} + \left(\alpha - 2\beta\frac{d\phi}{d\eta}\right)A^3 - 2\mu A^2\frac{dA}{d\eta} + \left(2V\frac{d\phi}{d\eta} - q\left(\frac{d\phi}{d\eta}\right)^2 - 2\Omega\right)A = 0. \quad (3)$$

Интегрируя (2), получим

$$\left(q\frac{d\phi}{d\eta} - V + \frac{3}{2}\beta A^2\right)A^2 = C_\infty, \quad (4)$$

где C_∞ – постоянная интегрирования, определяемая параметрами стационарной волны при $\eta \rightarrow -\infty$. В дальнейшем будем рассматривать стационарные волны при $C_\infty = 0$. Это либо стационарные волны при нулевой амплитуде на $-\infty$: $A(\eta \rightarrow -\infty) \rightarrow 0$, либо волны с ненулевой амплитудой на $-\infty$, но удовлетворяющие условию $q\left(\frac{d\phi}{d\eta}\right)_{\eta=-\infty} = V - \frac{3}{2}\beta A^2(\eta = -\infty)$.

В этом случае из (4) получим для пространственного изменения фазы волны

$$\frac{d\phi}{d\eta} = \frac{1}{q}\left(V - \frac{3}{2}\beta A^2\right). \quad (5)$$

Подставляя (5) в (3), получим

$$q^2\frac{d^2A}{d\eta^2} - 2\mu q A^2\frac{dA}{d\eta} + (V^2 - 2q\Omega)A + (q\alpha - 2V\beta)A^3 + \frac{3}{4}\beta^2 A^5 = 0. \quad (6)$$

Проанализируем уравнение (7) при различных знаках соотношений $V^2 - 2q\Omega$ и $q\alpha - 2V\beta$.

1. При $V^2 - 2q\Omega > 0$ и $q\alpha - 2V\beta < 0$, произведя в (6) замену координаты $\rho = \eta \frac{\sqrt{V^2 - 2q\Omega}}{q}$ и амплитуды волнового поля $A = B \cdot \sqrt{\frac{V^2 - 2q\Omega}{2V\beta - q\alpha}}$, имеем

$$\frac{d^2B}{d\rho^2} - pB^2\frac{dB}{d\rho} + B - B^3 + rB^5 = 0, \quad (7)$$

где $p = 2\mu \frac{\sqrt{V^2 - 2q\Omega}}{2V\beta - q\alpha} > 0$, $r = \frac{3}{4}\beta^2 \frac{V^2 - 2q\Omega}{(2V\beta - q\alpha)^2} > 0$. Параметр $p \sim \mu$ в (7) характеризует индуцированное рассеяние, а $r \sim \beta^2$ – нелинейную дисперсию. Уравнение (7) имеет пять состояний равновесия $B = 0$, $\pm B_- = \pm \sqrt{\frac{1 - \sqrt{1 - 4r}}{2r}}$ и $\pm B_+ = \pm \sqrt{\frac{1 + \sqrt{1 - 4r}}{2r}}$. Последние четыре существуют при $r \leq 1/4$ и удовлетворяют неравенствам $1 \leq B_-^2 \leq 2 \leq B_+^2$.

Линеаризованное в окрестности $B = 0$ уравнение (7) сводится к уравнению осциллятора $\frac{d^2 B}{d\rho^2} + B = 0$, которое описывает состояние типа «центр». Однако, в силу неконсервативности уравнения (7), необходимо проанализировать его решение при малом, но конечном значении B (метод Ван-дер Поля [14]). Для этого, представляя решение (7) в виде $B = R(\rho)e^{i\rho} + R^*(\rho)e^{-i\rho}$, где R – радиус осцилляций, а R^* – комплексно сопряженная R величина, и проводя усреднение полученного уравнения по периоду осцилляций, получим $\frac{d|R|}{d\rho} = p|R|^2$. При $p > 0$ радиус осцилляций растет, что соответствует неустойчивому фокусу.

Состояния равновесия $\pm B_-$ уравнения (7) – седла. Тип состояний равновесия $\pm B_+$ определяется соотношением параметра индуцированного рассеяния p и величины $B_+^2 = \frac{1 + \sqrt{1 - 4r}}{2r}$, зависящей от параметра нелинейной дисперсии r .

Так, при достаточно слабом эффекте индуцированного рассеяния по сравнению с эффектом нелинейной дисперсии $p^2 \leq \frac{16r\sqrt{1 - 4r}}{1 + \sqrt{1 - 4r}}$ состояния равновесия $\pm B_+$ – неустойчивые фокусы. Фазовая плоскость уравнения (7) для этого случая приведена на рис. 1. Стационарным волнам конечной амплитуды на рис. 1 отвечают траектории 1 – 4, связывающие состояния равновесия. В этом случае реализуются лишь стационарные волны перепада с затухающими осцилляциями. Траектории 1 и 2 отвечают стационарным волнам без подложки, а траектории 3 и 4 – волнам на подложках величины $\pm B_-$.

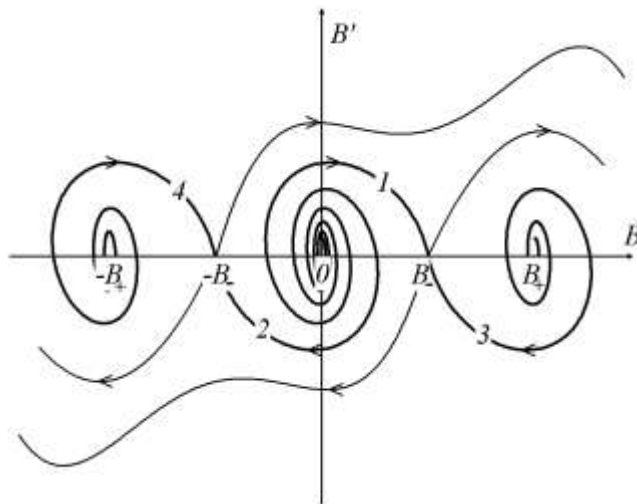


Рис. 1. Фазовая плоскость уравнения (7) при достаточно слабом эффекте индуцированного рассеяния:
стационарным волнам конечной амплитуды отвечают траектории 1 – 4, связывающие состояния равновесия

При достаточно сильном эффекте индуцированного рассеяния по сравнению с эффектом нелинейной дисперсии $p^2 > \frac{16r\sqrt{1-4r}}{1+\sqrt{1-4r}}$, состояния равновесия $\pm B_+$ – неустойчивые узлы. Фазовая плоскость уравнения (7) для этого случая приведена на рис. 2. Стационарным волнам конечной амплитуды на рис. 2 отвечают траектории, связывающие состояния равновесия. При этом реализуются стационарные волны перепада как с затухающими осцилляциями в окрестности нулевой амплитуды (траектории 1 и 2), так и волны перепада без осцилляций (kink-waves) (траектории 3 и 4), но на подложках $\pm B_-$. Величина перепада интенсивности волнового поля в стационарной волне на подложках (траектории 3 и 4) без осцилляций определяется соотношением $\Delta(B^2) = B_+^2 - B_-^2 = \frac{\sqrt{1-4r}}{r}$, содержащим параметр нелинейной дисперсии r . Из данного соотношения следует, что величина перепада уменьшается с увеличением r . Необходимо отметить, что при стремлении к нулю параметра нелинейной дисперсии $r \rightarrow 0$ из состояний равновесия $\pm B_-$ и $\pm B_+$ остаются только $\pm B_-$, для которых $B_-^2 \rightarrow 1$. Состояния $\pm B_+$ уходят на бесконечность.

Таким образом, при $r=0$ стационарные волны на подложке (траектории 3 и 4) исчезают, и реализуются лишь волны перепада с затухающими осцилляциями в окрестности нулевого значения поля (траектории 1 и 2). Отсюда следует, что стационарные волны на подложке (траектории 3 и 4) реализуются при балансе эффектов нелинейной дисперсии и индуцированного рассеяния, в то время как стационарные волны без подложки (траектории 1 и 2) сохраняются при исчезновении нелинейной дисперсии и обусловлены балансом эффектов индуцированного рассеяния и линейной дисперсии второго порядка (нелинейная дисперсия лишь меняет параметры стационарной волны).

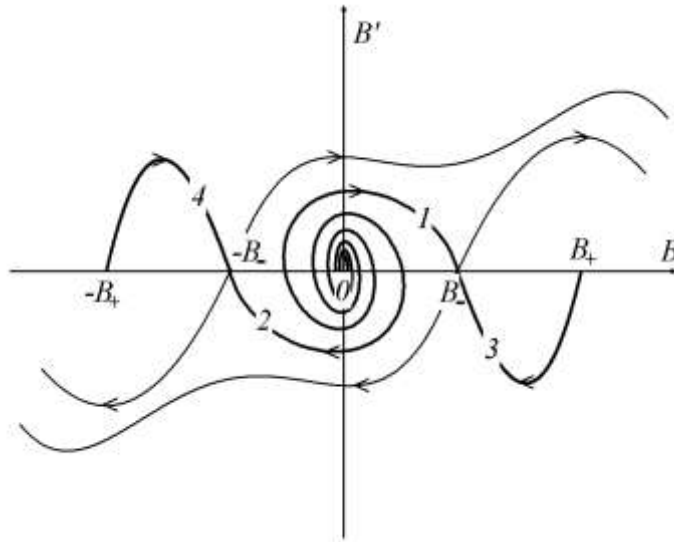


Рис. 2. Фазовая плоскость уравнения (7) при достаточно сильном эффекте индуцированного рассеяния:
стационарным волнам конечной амплитуды отвечают траектории 1 - 4, связывающие состояния равновесия

Отметим, что случай 1, приводящий к фазовым портретам с пятью состояниями равновесия (рис. 1, 2), реализуется при одновременном выполнении соотношений $q\alpha - 2V\beta < 0$ и $V^2 - 2q\Omega > 0$, справедливых, в частности, для сред с достаточно малым положительным

значением линейной дисперсии второго порядка q , либо при $q < 0$. Стационарные волн конечной амплитуды в этом случае существуют при достаточно малом значении параметра нелинейной дисперсии в таких средах $r \leq 1/4$. Соотношение параметров индуцированного рассеяния p и нелинейной дисперсии r влияет на структуру волн перепада. Так, в средах с достаточно малой величиной индуцированного рассеяния p сильная нелинейная дисперсия приводит к осцилляциям в волнах перепада (рис. 1), а в средах с доминированием индуцированного рассеяния над нелинейной дисперсией в стационарных волнах на подложке осцилляции подавляются (траектории 3, 4 на рис. 2).

2. При $V^2 - 2q\Omega > 0$ и $q\alpha - 2V\beta > 0$, произведя в (6) замену координаты $\rho = \eta \frac{\sqrt{V^2 - 2q\Omega}}{q}$ и амплитуды волнового поля $A = B \cdot \sqrt{\frac{V^2 - 2q\Omega}{q\alpha - 2V\beta}}$, имеем

$$\frac{d^2 B}{d\rho^2} - pB^2 \frac{dB}{d\rho} + B + B^3 + rB^5 = 0, \quad (8)$$

где $p = 2\mu \frac{\sqrt{V^2 - 2q\Omega}}{q\alpha - 2V\beta} > 0$, $r = \frac{3}{4}\beta^2 \frac{V^2 - 2q\Omega}{(q\alpha - 2V\beta)^2} > 0$. Уравнение (8) имеет единственное состояние равновесия $B = 0$. Линеаризация (8) в окрестности $B = 0$ приводит к уравнению $\frac{d^2 B}{d\rho^2} + B = 0$, которое описывает состояние равновесия типа «центр». Однако, как и в предыдущем случае, детальный анализ траекторий при малых, но конечных значениях B указывает на существование неустойчивого фокуса (метод Ван-дер Поля [14]). Стационарные волны конечной амплитуды в этом случае отсутствуют.

3. При $V^2 - 2q\Omega < 0$ и $q\alpha - 2V\beta < 0$, произведя в (6) замену координаты $\rho = \eta \frac{\sqrt{2q\Omega - V^2}}{q}$ и амплитуды волнового поля $A = B \cdot \sqrt{\frac{2q\Omega - V^2}{2V\beta - q\alpha}}$, получим уравнение

$$\frac{d^2 B}{d\rho^2} - pB^2 \frac{dB}{d\rho} - B - B^3 + rB^5 = 0, \quad (9)$$

где $p = 2\mu \frac{\sqrt{2q\Omega - V^2}}{2V\beta - q\alpha} > 0$, $r = \frac{3}{4}\beta^2 \frac{2q\Omega - V^2}{(q\alpha - 2V\beta)^2} > 0$. Уравнение (9) имеет три состояния равновесия $B = 0$ и $\pm B_0 = \pm \sqrt{\frac{1 + \sqrt{1 + 4r}}{2r}}$.

Состояние равновесия $B = 0$ - седло. Тип состояний равновесия $\pm B_0$ определяется соотношением параметра индуцированного рассеяния p и величины $B_0^2 = \frac{1 + \sqrt{1 + 4r}}{2r}$, зависящей от параметра нелинейной дисперсии r .

Так, при достаточно слабом эффекте индуцированного рассеяния по сравнению с эффектом нелинейной дисперсии $p^2 < \frac{16r\sqrt{1 + 4r}}{1 + \sqrt{1 + 4r}}$ состояния равновесия $\pm B_0$ - неустойчивые узлы. Фазовая плоскость уравнения (9) для этого случая приведена на рис. 3. В этом случае существуют конечные по амплитуде стационарные волны перепада (kink-waves) без под-

ложки, которым отвечают траектории 1, 2, связывающие состояния равновесия. Величина перепада интенсивности в стационарной волне в этом случае определяется значением

$$B_0^2 = \frac{1 + \sqrt{1 + 4r}}{2r} \text{ и уменьшается с ростом параметра нелинейной дисперсии } r.$$

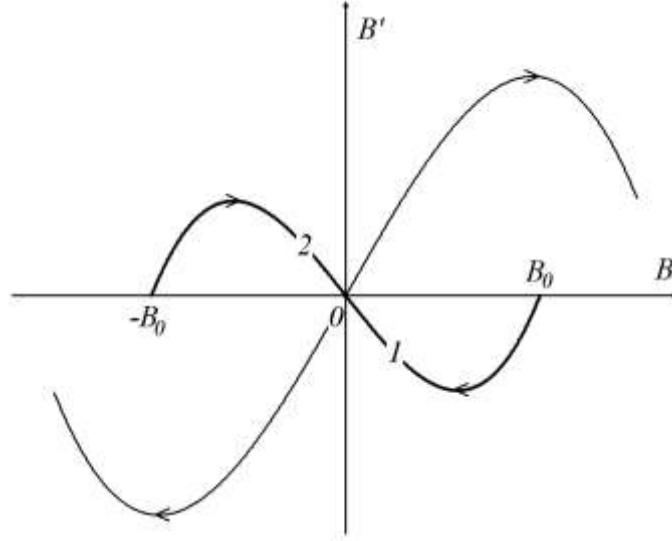


Рис. 3. Фазовая плоскость уравнения (9) при достаточно слабом эффекте индуцированного рассеяния:
стационарным волнам конечной амплитуды отвечают траектории 1 и 2, связывающие состояния равновесия

Уравнение (9) в частном случае допускает решение в явном виде для волн перепада, отвечающих траекториям 1 и 2 на рис. 3. Для этого в (9) сделаем замену $t = \tan(\delta\rho)$:

$$\delta^2(1-t^2)^2 \frac{d^2B}{dt^2} - 2\delta^2 t(1-t^2) \frac{dB}{dt} - p(1-t^2) B^2 \frac{dB}{dt} - B - B^3 + rB^5 = 0. \quad (10)$$

Представляя решение (10) в виде $B = B_* \sqrt{1+t}$ и требуя выполнения полученного соотношения при всех значениях t , из условия обращения в нуль коэффициентов при различных степенях t получим систему уравнений

$$rB_*^4 + \frac{p\delta}{2} B_*^2 + \frac{3}{4} \delta^2 = 0, \quad (11)$$

$$rB_*^4 - \frac{B_*^2}{2} - \frac{\delta^2}{4} = 0, \quad (12)$$

$$rB_*^4 - \left(1 + \frac{p\delta}{2}\right) B_*^2 - \left(1 + \frac{\delta^2}{4}\right) = 0. \quad (13)$$

Система уравнений (11) – (13) при $r > 0$ и $p > 0$ совместна при $\delta = -1$, $B_*^2 = 2/(p-1)$, $r = (p-1)(p+3)/16$, в которых $p > 1$. Протяженность области перепада по исходной пере-

менной η в полученном решении составляет $\Delta \sim \frac{\sqrt{2q\Omega - V^2}}{q}$, которая уменьшается с ростом линейной дисперсии q .

При достаточно сильном эффекте индуцированного рассеяния по сравнению с эффек-

том нелинейной дисперсии: при $p^2 > \frac{16r\sqrt{1+4r}}{1+\sqrt{1+4r}}$ состояния равновесия $\pm B_0$ являются неустойчивыми фокусами.

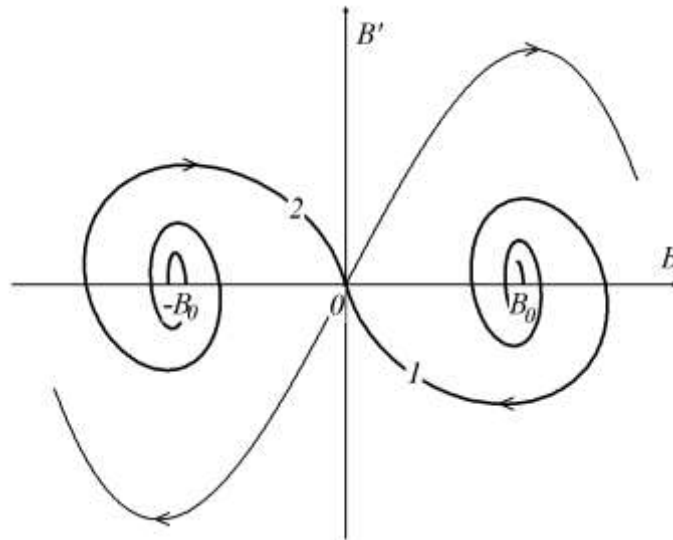


Рис. 4. Фазовая плоскость уравнения (9) при достаточно сильном эффекте индуцированного рассеяния:

стационарным волнам конечной амплитуды отвечают траектории 1 и 2, связывающие состояния равновесия

Фазовая плоскость уравнения (9) для этого случая приведена на рис. 4. Стационарным волнам конечной амплитуды отвечают траектории 1 и 2, связывающие неустойчивые фокусы с седлом.

Необходимо отметить, что при исчезновении в уравнении (9) параметра нелинейной дисперсии $r \rightarrow 0$ состояния равновесия $\pm B_0$ уходят на бесконечность, что приводит к исчезновению стационарных волн конечной амплитуды при $r = 0$. Отсюда следует, что существование стационарных волн конечной амплитуды (траектории 1 и 2, рис. 3, 4) в этом случае обусловлено балансом эффектов нелинейной дисперсии и индуцированного рассеяния.

4. При $V^2 - 2q\Omega < 0$ и $q\alpha - 2V\beta > 0$, произведя в (6) замену координаты $\rho = \eta \frac{\sqrt{2q\Omega - V^2}}{q}$ и амплитуды волнового поля $A = B \cdot \sqrt{\frac{2q\Omega - V^2}{2V\beta - q\alpha}}$, получим уравнение

$$\frac{d^2 B}{d\rho^2} - pB^2 \frac{dB}{d\rho} - B + B^3 + rB^5 = 0, \quad (14)$$

в котором $p = 2\mu \frac{\sqrt{2q\Omega - V^2}}{q\alpha - 2V\beta} > 0$, $r = \frac{3}{4}\beta^2 \frac{2q\Omega - V^2}{(q\alpha - 2V\beta)^2} > 0$. Уравнение (14) имеет три со-

стояния $B = 0$ и $\pm B_1 = \pm \sqrt{\frac{-1 + \sqrt{1+4r}}{2r}}$.

Состояние равновесия $B = 0$ - седло. Тип состояний равновесия $\pm B_1$ определяется

соотношением параметра индуцированного рассеяния p и величины $B_1^2 = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4r}}{2r}$, зависящей от параметра нелинейной дисперсии r .

Так, при достаточно слабом эффекте индуцированного рассеяния по сравнению с эффектом нелинейной дисперсии $p^2 < 16r \frac{\sqrt{1 + 4r}}{\sqrt{1 + 4r} - 1}$ состояния равновесия $\pm B_1$ – неустойчивые фокусы. Фазовая плоскость уравнения (14) для этого случая приведена на рис. 5. В этом случае существуют стационарные волны перепада с затухающими осцилляциями (траектории 1, 2 на рис. 5).

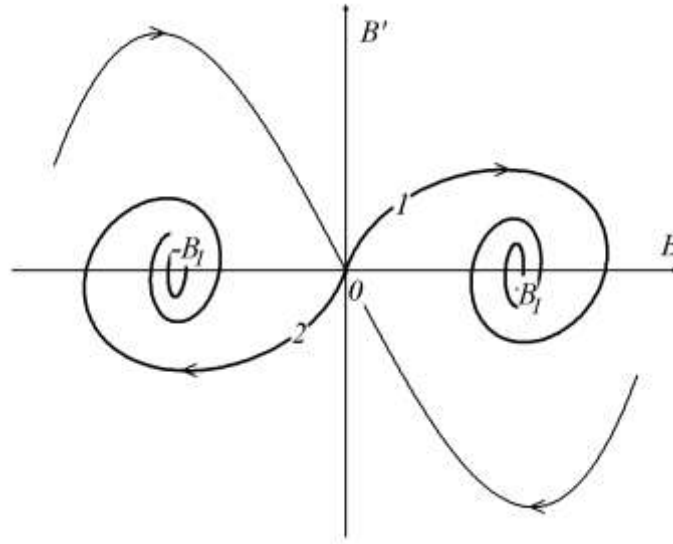


Рис. 5. Фазовая плоскость уравнения (14) при достаточно слабом эффекте индуцированного рассеяния:
стационарным волнам конечной амплитуды отвечают траектории 1, 2, связывающие состояния равновесия

Необходимо отметить, что в этом случае при пренебрежении в (14) эффектом индуцированного рассеяния ($p = 0$) уравнение (14) принимает вид $\frac{d^2 B}{d\rho^2} - B + B^3 + rB^5 = 0$, которое имеет солитонное решение [13]:

$$B(\rho) = \frac{\pm 2}{\sqrt{1 + \sqrt{1 - \frac{16}{3}r \cdot \cosh(2\rho)}}}.$$

При достаточно сильном эффекте индуцированного рассеяния по сравнению с эффектом нелинейной дисперсии $p^2 > 16r \frac{\sqrt{1 + 4r}}{\sqrt{1 + 4r} - 1}$ состояния равновесия $\pm B_1$ являются неустойчивыми узлами. Фазовая плоскость уравнения (14) для этого случая приведена на рис. 6. В этом случае существуют конечные по амплитуде стационарные волны перепада без осцилляций (траектории 1, 2 на рис. 6). Величина перепада интенсивности в этих волнах определяется значением $B_1^2 = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4r}}{2r} \leq 1$, зависящим от параметра нелинейной дисперсии r .

Так, при достаточно малом значении параметра нелинейной дисперсии $r \ll 1$ перепад интенсивности равен 1, а наименьшее значение параметра индуцированного рассеяния для реализации стационарных волн перепада составит $p_c = 2\sqrt{2}$. Отсюда следует, что при пренебрежении в (14) нелинейной дисперсией стационарные волны (траектории 1 и 2) не исчезают и обусловлены балансом эффектов индуцированного рассеяния и линейной дисперсии второго порядка. С ростом r величина перепада интенсивности уменьшается и при $r \gg 1$ определяется соотношением $B_1^2 \approx 1/\sqrt{r}$. Величина параметра индуцированного рассеяния для реализации волн перепада в этом случае должен удовлетворять соотношению $p > 4\sqrt{r}$.

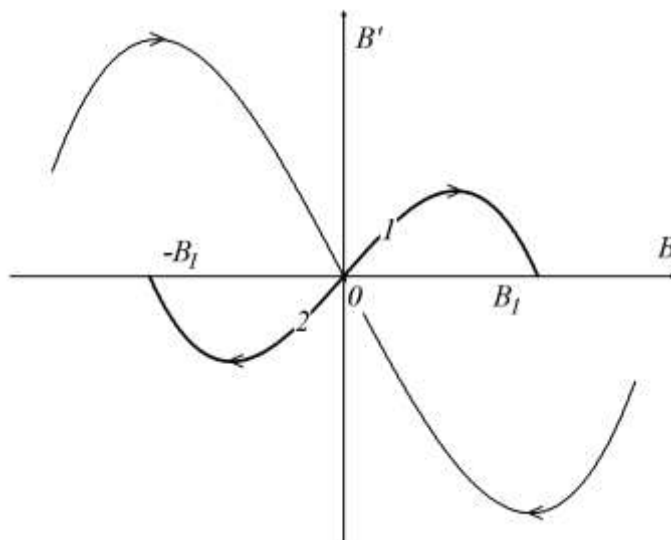


Рис. 6. Фазовая плоскость уравнения (14) при достаточно сильном эффекте индуцированного рассеяния:

стационарным волнам конечной амплитуды отвечают траектории 1, 2, связывающие состояния равновесия

В частном случае уравнение (14) допускает решение в явном виде для волн перепада, отвечающих траекториям 1 и 2 на рис. 6. Для этого в (14) сделаем замену $t = \tan(\delta\rho)$:

$$\delta^2(1-t^2)^2 \frac{d^2 B}{dt^2} - 2\delta^2 t(1-t^2) \frac{dB}{dt} - p(1-t^2)B^2 \frac{dB}{dt} - B + B^3 + rB^5 = 0. \quad (15)$$

Представляя решение (15) в виде $B = B_* \sqrt{1+t}$ и требуя выполнения полученного соотношения при всех значениях t , из условия обращения в нуль коэффициентов при различных степенях t получим систему уравнений

$$rB_*^4 + \frac{p\delta}{2}B_*^2 + \frac{3}{4}\delta^2 = 0, \quad (16)$$

$$rB_*^4 + \frac{B_*^2}{2} - \frac{\delta^2}{4} = 0, \quad (17)$$

$$rB_*^4 + \left(1 - \frac{p\delta}{2}\right)B_*^2 - \left(1 + \frac{\delta^2}{4}\right) = 0. \quad (18)$$

При $r > 0$ и $p > 0$ система уравнений (16)–(18) совместна при $\delta = -1$, $B_*^2 = 2/(1+p)$, $r = (1+p)(p-3)/16$, в которых $p \geq 3$.

Отметим, что проанализированные в п. 4 стационарные волны реализуются при одновременном выполнении соотношений $q\alpha - 2V\beta > 0$ и $V^2 - 2q\Omega < 0$, справедливых, в частности, для сред с достаточно большой положительной величиной линейной дисперсии второго порядка.

Выводы

В данной работе в рамках расширенного нелинейного уравнения Шредингера, содержащего члены нелинейной дисперсии и индуцированного рассеяния Рамана, исследованы стационарные волны с нелинейной фазовой модуляцией, пропорциональной интенсивности волнового поля. Найдены два класса стационарных волн: существование одних – балансом эффектов нелинейной дисперсии и индуцированного рассеяния, и эти волны исчезают при пренебрежении нелинейной дисперсией; существование других обусловлено балансом индуцированного рассеяния и линейной дисперсии второго порядка и эти волны не исчезают при пренебрежении нелинейной дисперсией. Показано, что для волн перепада, обусловленных балансом эффектов нелинейной дисперсии и индуцированного рассеяния, величина перепада интенсивности волнового поля определяется параметром нелинейной дисперсии r и уменьшается с его увеличением. Соотношение параметров нелинейной дисперсии r и индуцированного рассеяния p меняет лишь структуру стационарных волн перепада.

Детально исследованы стационарные волны перепада в средах с большими и малыми значениями параметра линейной дисперсии второго порядка q .

Так, в средах с достаточно большой положительной величиной линейной дисперсией второго порядка q , удовлетворяющей соотношениям $q > 2V\beta/\alpha$ и $q > V^2/2\Omega$, стационарные волны перепада существуют при любых значениях параметра нелинейной дисперсии r : при достаточно слабом эффекте индуцированного рассеяния по сравнению с эффектом нелинейной дисперсии существуют стационарные волны перепада с затухающими осцилляциями, а при доминировании эффекта индуцированного рассеяния осцилляции подавляются.

В средах с достаточно малой положительной величиной линейной дисперсии второго порядка q , удовлетворяющей соотношениям $q < 2V\beta/\alpha$ и $q < V^2/2\Omega$, стационарные волны конечной амплитуды существуют при достаточно малом значении параметра нелинейной дисперсии $r \leq 1/4$. В таких средах при доминировании эффекта нелинейной дисперсии на эффектом индуцированного рассеяния существуют стационарные волны перепада без осцилляций, а при доминировании эффекта индуцированного рассеяния – с затухающими осцилляциями.

Библиографический список

1. **Yang, Y.** Solitons in Field Theory and Nonlinear Analysis / Y. Yang. Springer. New York. 2001.
2. **Dickey, L.A.** Soliton Equation and Hamiltonian Systems / L.A. Dickey. World Scientific. New York. 2005.
3. **Kivshar, Y.S.** Optical Solitons: From Fibers to Photonic Crystals / Y.S. Kivshar, G.P. Agrawal. Academic. San Diego. 2003.
4. **Захаров, В.Е.** Коллапс ленгмюровских волн // ЖЭТФ. 1972. Т. 62. № 5. С. 1745–1759.
5. **Zakharov, V.E.** Exact theory of two-dimensional self-focusing and one-dimensional self-modulation of waves in nonlinear media / V.E. Zakharov, A.B. Shabat // Sov. Phys. JETP. 1972. V. 34. P. 62–69.
6. **Hasegawa, A.** Transmission of Stationary Nonlinear Optical Physics in Dispersive Dielectric Fibers I: Anomalous Dispersion / A. Hasegawa, F. Tappert // Appl. Phys. Lett. 1973. V. 23. N. 3. P. 142–144.
7. **Oliviera, J.R.** Analytical Solution for the Modified Nonlinear Schrodinger Equation Describing Optical Shock Formation / J.R. Oliveira, M.A. Moura // Phys. Rev. E. 1998, V. 57. P. 4751–4755.
8. **Gordon, J.P.** Theory of the Soliton Self-frequency Shift // Opt. Lett. 1986. V. 11. P. 662–664.

9. **Kivshar, Y.S.**, Dark-soliton Dynamics and Shock Waves Induced by the Stimulated Raman Effect in Optical Fibers // Phys. Rev. A. 1990. V. 42. N. 3. P. 1757–1761.
10. **Gromov, E.M.** Stationary Waves in a Third-Order Nonlinear Schrödinger Equation / E.M. Gromov, V.V. Tyutin // Wave Motion. 1998. V. 28. N. 1. P. 13–24.
11. **Gromov, E.M.** Nonlinear Dynamics of Short Wave Trains in Dispersive Media / E.M. Gromov, V.I. Talanov // Zh. Eksp. Teor. Fiz. 1996. V. 110. P. 137–141.; JETP. 1996. V. 83. P. 73–79.
12. **Gromov, E.M.** Short Optical Solitons in Fibers / E.M. Gromov, V.I. Talanov // Chaos. 2000. V. 10. N. 3. P. 551–558.
13. **Громов, Е.М.** Короткие солитоны огибающей (комбинированное нелинейное уравнение) / Е.М. Громов, В.И. Таланов // Изв. Вузов. Радиофизика. 1996. Т. 39. N. 6. С. 735–755.
14. **Рабинович, М.И.** Введение в теорию колебаний и волн / М.И. Рабинович, Д.И. Трубецков. – М.: Наука, 1984.

*Дата поступления
в редакцию* 29.04.2011

E.M. Gromov, V.V. Tyutin

**STATIONARY WAVES IN THE EXTENDED NONLINEAR SCHRÖDINGER
EQUATION WITH STIMULATED RAMAN-SCATTERING
AND NONLINEAR DISPERSION**

The stationary waves with nonlinear phase modulation in the frame of the extended nonlinear Schrodinger equation with taking into account both the nonlinear dispersion and stimulated Raman-scattering terms are considered. Two classes of a kink-waves are found: one class exists as the result of balance of the stimulated Raman-scattering and nonlinear dispersion, other class – as the result of balance of the stimulated Raman-scattering and second-order linear dispersion. Is show that kink-waves with pedestal exist only in present of the nonlinear dispersion.

Key words: extended nonlinear Schrodinger equation, stimulated Raman-scattering, nonlinear dispersion, non-linear stationary waves, kinks

УДК 532.59.032

А.А. Абрашкин, Ю.П. Бодунова

**ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ СТОЯЧИЕ ВОЛНЫ НА ПОВЕРХНОСТИ
ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ**

Нижегородский государственный педагогический университет

Построено решение для стоячих пространственных линейных гравитационно-капиллярных волн на поверхности бесконечно глубокой вязкой жидкости. Используются лагранжевые координаты. Дан качественный анализ дисперсионного уравнения. Движение жидких частиц изучены в длинноволновом приближении. Найдены выражения для компонент завихренности.

Ключевые слова: волны на воде, вязкая жидкость, завихренность, переменные Лагранжа.

Изучение влияния вязкости на распространение поверхностных волн традиционно ограничивается рассмотрением плоских (двумерных) волн [1, 2]. Эффекты, связанные с учетом поперечной модуляции профиля волны, до настоящего времени не исследовались.

Отличительная особенность исследования эволюции поверхностных волн в вязкой жидкости состоит в том, что толщина пограничного слоя вблизи свободной поверхности может быть мала по сравнению с амплитудой волны. Вследствие этого ставить поверхностные граничные условия на уровне $y = 0$ (y - вертикальная декартова координата) не представляется удовлетворительным. Лучшим вариантом является выбор системы отсчета, движущейся с волной, и использование ортогональной криволинейной координатной системы, в которой свободная поверхность является координатной поверхностью. При эйлеровом описании течения ее вид неизвестен, поэтому при изучении двумерных линейных волн граничные условия формулируются на плоской поверхности $y = 0$, а при рассмотрении квадратичных эффектов на синусоидальной поверхности, соответствующем профилю линейной волны [2, 4, 5]. Анализ эффектов в третьем приближении по малой крутизне волны предполагает знание профиля во втором порядке теории возмущений и т.д. Изучение пространственных волн при таком подходе представляется нереальным ввиду значительного объема требуемых вычислений.

Все эти трудности, однако, отсутствуют при лагранжевом описании волнового движения. Форма свободной поверхности при таком подходе задается условием $b = 0$, где b - вертикальная лагранжевая координата. Оно не зависит ни от порядка теории возмущений, ни от размерности задачи. В рамках лагранжевого подхода в работах [6, 7] выполнен ряд расчетов для двумерных поверхностных волн. В частности, выяснено влияние на дрейфовое течение в жидкости движения воздуха, вращения Земли [6] и упругих пленок на свободной поверхности [7]. Ниже построено и проанализировано решение для линейных пространственных стоячих волн в бесконечно глубокой жидкости.

Постановка задачи

Рассмотрим пространственную стоячую гравитационно-капиллярную волну в бесконечно глубокой, вязкой жидкости. Движение будем описывать в лагранжевых координатах a, b, c . Система уравнений гидродинамики в этих переменных имеет следующий вид [8]:

$$[X, Y, Z] = \frac{D(X, Y, Z)}{D(a, b, c)} = 1; \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
X_{tt} &= -\frac{1}{\rho}[Y, Z, p] + \nu\{[Y, Z, [Y, Z, X_t]] + [Z, X, [Z, X, X_t]] + [X, Y, [X, Y, X_t]]\}; \\
Y_{tt} &= g - \frac{1}{\rho}[Z, X, p] + \nu\{[Y, Z, [Y, Z, Y_t]] + [Z, X, [Z, X, Y_t]] + [X, Y, [X, Y, X_t]]\}; \\
Z_{tt} &= -\frac{1}{\rho}[X, Y, p] + \nu\{[Y, Z, [Y, Z, Z_t]] + [Z, X, [Z, X, Z_t]] + [X, Y, [X, Y, Z_t]]\},
\end{aligned} \quad (2)$$

$X(a, b, c, t)$, $Y(a, b, c, t)$, $Z(a, b, c, t)$ - координаты траектории жидкой частицы; t - время, квадратные скобки обозначают операцию взятия якобиана по переменным a, b, c ; ρ - плотность жидкости; p - давление; ν - вязкость; g - ускорение свободного падения (ось y направлена вертикально). Уравнение непрерывности (1) отражает то обстоятельство, что в начальный момент координаты жидких частиц равны соответственно a, b, c .

Систему уравнений (1), (2) следует дополнить граничными условиями. В случае свободных волн на бесконечно глубокой воде это требование непротекания на дне - $Y_t = 0$ при $b = -\infty$, и условие отсутствия вязких напряжений на свободной поверхности, которое можно записать так:

$$\begin{aligned}
T_{ik}n_k &= (-p_0 + \sigma K)n_i; \quad b = 0; \\
\vec{n} &= \frac{\vec{x}_0(Y_a Z_c - Y_c Z_a) + \vec{y}_0(Z_a X_c - X_a Z_c) + \vec{z}_0(X_a Y_c - X_c Y_a)}{\sqrt{(Y_a Z_c - Y_c Z_a)^2 + (Z_a X_c - X_a Z_c)^2 + (X_a Y_c - X_c Y_a)^2}}; \\
K &= \frac{Y_{aa}(1 + Y_c^2) - 2Y_a Y_c Y_{ca} + Y_{cc}(1 + Y_a^2)}{(1 + Y_a^2 + Y_c^2)^{3/2}},
\end{aligned} \quad (3)$$

где T_{ik} - тензор вязких напряжений; p_0 - постоянное внешнее давление; σ - коэффициент поверхностного натяжения, \vec{n} - внешняя нормаль к свободной поверхности $Y = Y(a, 0, c)$; K - ее средняя кривизна. Выражения для компонент тензора T_{ik} получаются, если их представление в эйлеровых координатах записать в якобианной форме, затем перейти к новым переменным (по правилу "перемножения" якобианов) и учесть уравнение (1):

$$\begin{aligned}
T_{xx} &= -p + 2\nu\rho[X_t, Y, Z]; \\
T_{yy} &= -p - 2\nu\rho[Y_t, X, Z]; \\
T_{zz} &= -p - 2\nu\rho[Z_t, Y, X]; \\
T_{xy} &= T_{yx} = \nu\rho([Y_t, Y, Z] - [X_t, X, Z]); \\
T_{xz} &= T_{zx} = \nu\rho([Z_t, Y, Z] - [X_t, Y, X]); \\
T_{yz} &= T_{zy} = \nu\rho([Y_t, X, Y] - [Z_t, X, Z]).
\end{aligned}$$

Представим все входящие в уравнения движения функции в виде ряда по малому параметру крутизны волны $\varepsilon = kA$, k - волновое число, A - амплитуда волны:

$$\begin{aligned}
X &= a + \varepsilon \xi_1 + O(\varepsilon^2); \quad Y = b + \varepsilon \eta_1 + O(\varepsilon^2); \\
Z &= c + \varepsilon \zeta_1 + O(\varepsilon^2); \quad p = p_0 - \rho g b + \varepsilon p_1 + O(\varepsilon^2).
\end{aligned}$$

Подстановка этих соотношений в систему (2), (3) даст искомые уравнения для неизвестных функций.

Линейные волны

Система уравнений в первом порядке по малой крутизне волны имеет вид:

$$\begin{aligned}\xi_{1a} + \eta_{1b} + \zeta_{1c} &= 0; \\ \xi_{1t} &= -\rho^{-1} p_{1a} - g\eta_{1a} + v\Delta\xi_{1t}; \\ \eta_{1t} &= -\rho^{-1} p_{1b} - g\eta_{1b} + v\Delta\eta_{1t}; \\ \zeta_{1t} &= -\rho^{-1} p_{1c} - g\eta_{1c} + v\Delta\zeta_{1t},\end{aligned}\tag{4}$$

где Δ - лапласиан по переменным Лагранжа. Граничные условия для нее на свободной поверхности ($b = 0$) запишутся следующим образом:

$$\begin{aligned}\eta_{1ta} + \xi_{1tb} &= 0; \\ \eta_{1tc} + \zeta_{1tb} &= 0; \\ -p_1 + 2v\rho\eta_{1tb} &= \sigma(\eta_{1aa} + \eta_{1cc}).\end{aligned}\tag{5}$$

Будем искать решение методом разделения переменных, полагая

$$\begin{aligned}\xi_1 &= \operatorname{Re} A(b)e^{nt} \sin ka \cos mc; \\ \eta_1 &= \operatorname{Re} B(b)e^{nt} \cos ka \cos mc; \\ \zeta_1 &= \operatorname{Re} C(b)e^{nt} \cos ka \sin mc; \\ p_1 &= \operatorname{Re} H(b)e^{nt} \cos ka \cos mc.\end{aligned}\tag{6}$$

Функции A, B, C, H и постоянная n считаются комплексными. Проводя несложные алгебраические выкладки, придем к уравнению для функции A :

$$A^{IV} - \left[2(k^2 + m^2) + \frac{n}{v} \right] A'' + (k^2 + m^2) \left(k^2 + m^2 + \frac{n}{v} \right) A = 0.$$

Полагая $A = \exp lb$, получим для l биквадратное уравнение, решением которого будут соотношения

$$l_1^2 = k^2 + m^2 = M^2; \quad l_2^2 = k^2 + m^2 + \frac{n}{v} = N^2.$$

Волновые возмущения должны спадать по мере погружения вглубь (при $b \rightarrow -\infty$), поэтому функцию A следует выбрать в таком виде:

$$A = \alpha e^{Mb} + \beta e^{Nb}; \quad M, \operatorname{Re} N > 0.\tag{7}$$

Выражения для функций B, C, H находятся из системы (4) и выглядят так:

$$\begin{aligned}B &= -\frac{M}{k} \alpha e^{Mb} + \delta e^{Nb}; \quad C = \frac{m}{k} \alpha e^{Mb} + R e^{Nb}; \\ H &= \frac{\rho}{k} (gM + n^2) \alpha e^{Mb} - \rho g \delta e^{Nb},\end{aligned}\tag{8}$$

α, β, δ, R - комплексные постоянные, удовлетворяющие условию

$$k\beta + N\delta + mR = 0,\tag{9}$$

которое является следствием уравнения непрерывности (1). Для определения конкретного

вида этих постоянных подставим выражения (7), (8) в граничные условия (5). В итоге получим три уравнения для определения четырех постоянных:

$$\begin{aligned} 2M\alpha + N\beta - k\delta &= 0; \\ 2M \frac{m}{k} \alpha + NR - m\delta &= 0; \\ \frac{1}{k} [n^2 + 2\nu n M^2 + gM + \rho^{-1} \sigma M^3] \alpha - [g + 2\nu n N + \rho^{-1} \sigma M^2] \delta &= 0. \end{aligned}$$

С учетом соотношения (9) условие совместности этой системы запишется так:

$$(n + 2\nu M^2)^2 + (gM + \rho^{-1} \sigma M^3) = 4\nu^2 M^3 N. \quad (10)$$

Введем обозначения

$$\omega^2 = gM + \rho^{-1} \sigma M^3; \quad \frac{\nu M^2}{\omega} = \theta; \quad n + 2\nu M^2 = s\omega, \quad (11)$$

с их учетом выражение (10) можно свести к следующему уравнению

$$(s^2 + 1)^2 = 16\theta^3 (s - \theta). \quad (12)$$

Оно совпадает с уравнением для плоских поверхностных волн в вязкой жидкости, только роль волнового числа в двумерной волне теперь играет величина полного волнового числа $M = \sqrt{k^2 + m^2}$, где k - продольное волновое число, а m - поперечное (пространственный период модуляции). Значение $m = 0$ отвечает плоской волне. Выражение для параметра ω совпадает с частотой гравитационно-капиллярных волн, распространяющихся по поверхности идеальной жидкости.

Постоянные, входящие в решение для линейных волн, определяются равенствами

$$\beta = -\frac{2MN}{M^2 + N^2} \alpha; \quad \delta = \frac{2M^3}{k(M^2 + N^2)} \alpha; \quad R = -\frac{2mMN}{k(M^2 + N^2)} \alpha. \quad (13)$$

Соотношение (6)-(8), (12), (13) дают полное решение задачи о стоячих пространственных линейных волнах на поверхности вязкой жидкости. Величина α , входящая в выражения для остальных констант, задает амплитуду волны B_0 , которая

$$B_0 = |B|_{b=0} = \operatorname{Re} \frac{nM\alpha}{\nu k(M^2 + N^2)}.$$

В качестве параметра крутизны волны ε выступает величина $\varepsilon = MB_0$.

Анализ дисперсионного уравнения

Конкретные значения постоянных (13) находятся по известному решению дисперсионного уравнения (12). Оно дает возможность по заданным значениям вязкости жидкости, частоты ω и волнового числа M , определяющих величину параметра θ , найти величину числа s , а значит, и выражение для n , входящее в решение (6).

Проведем качественный анализ уравнения (12). Графиком функции, задаваемой его левой частью, служит вогнутая кривая с минимумом, равным 1 при $s = 0$. Левая же часть уравнения определяет прямую. Она пересекает ось ординат ниже нуля и имеет положительный угол наклона, тангенс которого равен $16\theta^3$. Две эти линии либо пересекаются (при достаточно большом θ), и тогда уравнение (12) имеет два действительных корня, либо не пересекаются: в этом случае дисперсионное уравнение не имеет действительных корней. Оба

действительных корня, как следует из соотношений (10), (11), удовлетворяют условию $\text{Re } N > 0$ (смотри (7)).

Проверим теперь, удовлетворяют ли этому условию комплексные корни уравнения (12). Пусть $s = s_1 + is_2$, где s_1, s_2 - действительные числа. При условии, что $s_2 \neq 0$, уравнение (12) эквивалентно следующей системе:

$$(s_1^2 - s_2^2 + 1)^2 = 4s_1^2 s_2^2 + 16\theta^3(s_1 - \theta); \quad (14)$$

$$s_1(s_1^2 - s_2^2 + 1) = 4\theta^3. \quad (15)$$

Знак величины $\text{Re } N$ совпадает со знаком выражения $\text{Re}(s^2 + 1) = (s_1^2 - s_2^2 + 1)$, поэтому, исходя из равенства (14) заключаем, что условию $\text{Re } N > 0$ соответствуют только корни с положительной реальной частью. С другой стороны, правая часть выражения (14), очевидно, всегда больше нуля. Но это означает, что величина s_1 удовлетворяет условиям

$$s_1 < -2\frac{\theta^3}{s_2^2} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{s_2^2}{\theta^2}} \right); \quad s_1 > 2\frac{\theta^3}{s_2^2} \left(\sqrt{1 + \frac{s_2^2}{\theta^2}} - 1 \right).$$

При наличии только комплексных корней два из них имеют отрицательную реальную часть, а другая пара комплексно сопряженных решений (12) имеет положительную реальную часть. В случае существования пары действительных корней (для них $s_2 = 0, s_1 > 0$) два других комплексных корня соответствуют $s_1 < 0$, а значит, не удовлетворяют условию $\text{Re } N > 0$.

Длинноволновое приближение

Будем рассматривать волновые возмущения, для которых выполняется соотношение

$$M^{-1} \gg \sqrt{2\nu/\omega} = \Delta^{-1}. \quad (16)$$

Величина Δ характеризует толщину (очень тонкого) пограничного слоя, а само неравенство (16) отражает тот факт, что длина волны существенно превышает этот характерный масштаб. Из соотношения (16) следует, что $\theta \ll 1$. При выполнении этого условия в уравнении (12) можно пренебречь правой частью, и его решением будут значения $s = \pm i$ или в размерных переменных

$$n = -2\nu M^2 \pm i\omega. \quad (17)$$

Отсюда заключаем, что величина декремента равна $\text{Re } n = -2\nu M^2$, а частота колебаний равна частоте гравитационно-капиллярных волн в идеальной жидкости ω . Знак перед частотой определяет фазу колебаний и может быть любым; выберем для определенности плюс.

С учетом неравенства (16) выражения (13) переписутся так

$$\beta \approx \frac{2ivMN}{\omega} \alpha; \quad \delta \approx -\frac{2ivM^3}{\omega k} \alpha; \quad R \approx \frac{2ivmMN}{\omega k} \alpha; \quad N \approx \Delta(1 + i). \quad (18)$$

Из последнего равенства следует, что вторые слагаемые в выражениях (7), (8) для функций A, B, C, H существенны только в поверхностном пограничном слое толщины Δ^{-1} . Величина $\text{Re } \alpha$ будет равна $kM^{-1}B_0$. Выражения (6)-(8) с учетом соотношений (16)-(18) описывают пространственную слабозатухающую стоячую поверхностную волну.

Формулы для проекций вектора завихренности в лагранжевых переменных имеют вид

$$\Omega_X = [Z_t, Z, X] + [Y_t, Y, X] = \varepsilon(\zeta_{1tb} - \eta_{1tc}) + O(\varepsilon^2);$$

$$\Omega_Y = [Z_t, Z, Y] + [X_t, X, Y] = \varepsilon(\xi_{1tc} - \zeta_{1ta}) + O(\varepsilon^2);$$

$$\Omega_Z = [Y_t, Y, Z] + [X_t, X, Z] = \varepsilon(\eta_{1ta} - \xi_{1tb}) + O(\varepsilon^2).$$

Подставляя в них представления для траекторий жидких частиц (6), получим для компонент завихренности $\Omega_{x1}, \Omega_{y1}, \Omega_{z1}$ первого порядка теории возмущений следующие представления:

$$\Omega_{x1} = -\operatorname{Re} \frac{2mMn^2\alpha}{vk(M^2 + N^2)} \exp(Nb + nt) \cos ka \sin mc; \quad \Omega_{y1} = 0;$$

$$\Omega_{z1} = \operatorname{Re} \frac{2Mn^2\alpha}{v(M^2 + N^2)} \exp(Nb + nt) \sin ka \cos mc.$$

В длинноволновом приближении эти выражения примут вид

$$\Omega_{x1} = \frac{2mM\omega}{k} \operatorname{Re} i\alpha \exp[\Delta(1+i)b + i\omega t] \cos ka \sin mc;$$

$$\Omega_{z1} = 2M\omega \operatorname{Re} i\alpha \exp[\Delta(1+i)b + i\omega t] \sin ka \cos mc.$$

Случай $m = 0$ соответствует плоской волне [9]. Полагая $\Delta = 0$, $\nu = 0$, получим решение для пространственной потенциальной стоячей волны [10].

Библиографический список

1. Ламб, Г. Гидродинамика / Г. Ламб. – М.: Гостехиздат, 1947.
2. Филипс, О.М. Динамика верхнего слоя океана / О.М. Филипс. – Л.: Гидрометеиздат, 1980.
3. Stokes, G.G. On the theory of oscillatory waves // Trans. Camb. Phil., 1847. V. 8. P 441-455; reprinted in Math. Phys. P. 1. 314-326.
4. Longuet-Higgins, M.S. Mass transport in water waves // Phil. Trans. R. Soc. Lond., 1953. A 245. 535-581.
5. Longuet-Higgins, M.S. Mass transport in the boundary layer at a free oscillating surface // J. Fluid Mech., 1960. 8. P. 293-306.
6. Weber, J.E. Effect of the air on the drift velocity of water waves / J.E. Weber, E. Forland // J. Fluid Mech., 1990. 218. P. 619-640.
7. Weber, J.E. Mass transport induced by surface waves in viscous rotating fluid // Free surface flows with viscosity. Computational Mechanics Publications: Southampton UK and Boston USA, 1997.
8. Абрашкин, А.А. Вихревая динамика в лагранжевом описании / А.А. Абрашкин, Е.И. Якубович. – М.: Физматлит, 2006. – 175 с.
9. Abrashkin, A.A. Nonlinear Gravitational Waves on the Surface of Viscous Fluid: Lagrange Approach / A.A. Abrashkin, Yu.P. Bodunova // Physics of Wave Phenomena. 2010. V. 18. No. 4. P. 251-255.
10. Сретенский, Л.Н. Теория волновых движений жидкости / Л.Н. Сретенский. – М.: Наука, 1977. – 815 с.

Дата поступления
в редакцию 29.04.2011

A.A. Abrashkin, Yu.P. Bodunova

SPATIAL STANDING WAVES ON THE SURFACE OF VISCOUS FLUID

Analytical solution for spatial standing linear gravitationally-capillary waves on the surface of viscous fluid is determined. Lagrange coordinates are used. The qualitative analysis of dispersion equation is done. The motion of fluid particles is studied in long-wave approximation. The components of vorticity are founded.

Key words: water waves, viscous fluid, vorticity, Lagrange variables.

ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 004.932

Д.А. Пиманкин, Б.А. Кисельман

МЕТОД СТЫГИВАЮЩИХСЯ ОБОЛОЧЕК ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РУКОПЕЧАТНЫХ СИМВОЛОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Предложен адаптивный метод восстановления искаженных бинарных изображений, основанный на последовательном уменьшении среднего расстояния между объектом и его оболочкой. Показана возможность его применения для восстановления рукопечатных символов.

Ключевые слова: оптическое распознавание символов, восстановление изображений, морфологическая обработка, метод стягивающихся оболочек.

Введение

Задача оптического распознавания символов вообще и рукопечатных (написанных от руки печатных символов), в частности, состоит в поиске соответствия между символом и образцами (шаблонами), что зачастую существенно затруднено искажениями входных бинарных изображений. Искажения могут проявляться в виде шумов, разрывов линий и т.д. [3, 4].

Определим изображение двумерной функцией $f(x, y)$ пространственных координат x и y . Значение функции в каждой точке, задаваемой парой координат, соответствует интенсивности изображения в этой точке. В цифровом представлении координаты x и y принимают дискретные значения: $x = 0, 1, \dots, M-1$, $y = 0, 1, \dots, N-1$. M и N – соответственно высота и ширина изображения в пикселях. В дальнейшем будем вести речь лишь о бинарных изображениях, поэтому будем считать, что $f(x, y)$ в каждой точке её определения может принимать лишь два значения: 1 для объекта и 0 для фона.



Рис. 1. Пример искажения изображения при условии $F' \subseteq F$

Поставим в соответствие каждому пикселю изображения точку $p_i = (x_i, y_i)$.

Определим множество точек $F = \{p_i : i = 1, 2, \dots, K_F \text{ и } f(p_i) = 1\}$, соответствующих единичным пикселям изображения. Очевидно, что мощность этого множества $K_F \leq M \cdot N$.

Под искаженным будем понимать некоторое изображение $f'(x, y)$. Определим множество точек $F' = \{p_i : i = 1, 2, \dots, K_{F'} \text{ и } f'(p_i) = 1\}$, соответствующих единичным пикселям искаженного изображения. Будем рассматривать лишь случай $F' \subseteq F$ (и, соответственно, $K_{F'} \leq K_F$). При этом случай $F' = F$ ($K_{F'} = K_F$) означает отсутствие искажений.

Пример подобного искажения приведен на рис. 1.

Устранение искажений методами морфологической обработки

Задачей восстановления изображения является нахождение некоторой функции $g(x, y)$, наиболее близкой в некотором смысле к функции $f(x, y)$. Определим множество точек $G = \{p_i : i = 1, 2, \dots, K_G \text{ и } g(p_i) = 1\}$, соответствующих единичным пикселям восстановленного изображения $g(x, y)$.

На практике для восстановления бинарных изображений (устранения шумов, разрывов линий и т. д.) рукописных и рукопечатных символов часто используют морфологическую обработку [1, 9]. Основу морфологических методов восстановления составляют операции дилатации и эрозии [11]. Дилатация изображения A по примитиву (структурному элементу) S определяется следующим образом: $A \oplus S = \{z : (\hat{S})_z \cap A \neq \emptyset\}$. Эрозия изображения A по примитиву S определена как $A \ominus S = \{z : (S)_z \subseteq A\}$. Производной от операций дилатации и эрозии является операция замыкания, определенная как $A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B$.

Специфика задачи анализа и восстановления изображений рукописных и рукопечатных символов состоит в учёте теоретически бесконечного множества вариантов написания одного и того же символа.

Существенным недостатком применения морфологического замыкания для восстановления является то, что сложно заранее найти размер и форму оптимального примитива для этой операции, также тяжело проводить адаптацию под конкретные элементы символа.

Результат применения операции замыкания к искаженному бинарному изображению символа X приведен на рис. 2. Для восстановления использовался структурный элемент в виде окружности.

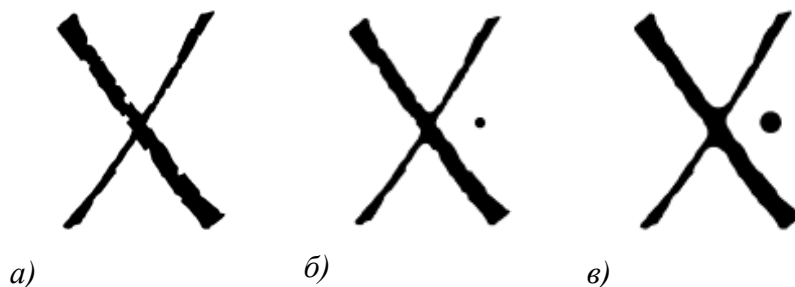


Рис. 2. Результат применения операции замыкания к искаженному изображению:

а – исходное изображение; *б* – после замыкания с окружностью радиусом 11;

в – после замыкания с окружностью радиусом 21

Как видно из рис. 2, результат применения операции замыкания существенно зависит от примитива, по которому проводится замыкание. В данном примере использовались примитивы в виде окружностей различного диаметра по причине инвариантности их к повороту. Можно увидеть, что чем больше радиус окружности, тем лучше сглаживание краев. В то же время происходят сильные искажения в окрестности угловых точек – сглаживание углов. Построение морфологических фильтров, оптимально восстанавливающих изображение, является нетривиальной задачей [5–7].

Метод стягивающихся оболочек

В данной работе предлагается альтернативный метод восстановления поврежденных изображений.

Определим множество точек $H = \{p_i : i = 1, 2, \dots, K_H\}$, соответствующих всем пикселям изображения. Тогда $K_H = M \cdot N$. Очевидно, что $F' \subseteq F \subseteq H$.

Метод основан на представлении изображения символа в следующей форме:

$$G = H - \bigcup_{i=0}^K Q_i, \quad (1)$$

где Q_i – множество точек, ограниченных некоторой окружностью в системе координат Ox .

Построим выпуклую оболочку множества точек F' – наименьший выпуклый многоугольник P , такой, что каждая точка $p_i \in F'$ находится либо на границе многоугольника P , либо в его внутренней области. Обозначим множество точек, ограниченных многоугольником P , как CH , при этом $F' \subseteq CH \subseteq H$. Построение выпуклой оболочки производим одним из быстрых методов, например, методом сканирования по Грэму (Graham's scan), методом обхода по Джарвису (Jarvis's march), методом декомпозиции (divide-and-conquer method) и др. [10]. В силу специфики входных данных (дискретность координат и плотность расположения точек) часть точек можно быстро отбросить, тем самым ускорив работу алгоритма.

Пусть многоугольник P имеет L вершин (p_1, p_2, \dots, p_L) . Обозначим $l_{ij} = (p_i, p_j)$ стороны многоугольника. Любой из отрезков l_{ij} можно представить как дугу окружности бесконечного радиуса. С учетом этого перепишем формулу (1) следующим образом:

$$G = H - \bigcup_{i=1}^K Q_i = H - \bigcup_{i=1}^L Q_i - \bigcup_{i=L+1}^K Q_i = CH - \bigcup_{i=L+1}^K Q_i, \quad (2)$$

где $Q_i, i = 1, 2, \dots, L$ – множества точек, ограниченных окружностями бесконечного радиуса (окружностями, вырожденными в прямые), при этом $Q_i \cap F' = \{\emptyset\}, i = 1, 2, \dots, L$.

Рассчитаем преобразование расстояний (distance transform) для изображения символа. Значение преобразования расстояний в каждой точке равно наименьшему евклидову расстоянию от этой точки до ненулевого (в данном случае единичного) пикселя [8]:

$$d(p) = \min_{q_i \in F'} (\|p - q_i\|), \quad p \in H. \quad (3)$$

На рис. 3 приведено изображение символа W (слева) и рассчитанной для него нормированной функции $d(x, y)$ (справа).

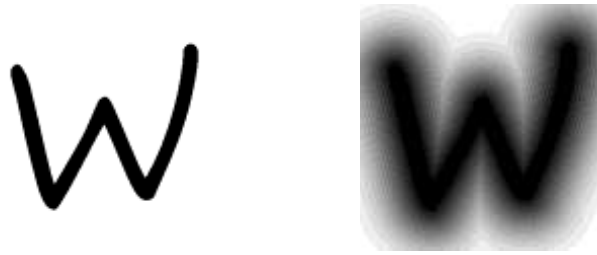


Рис. 3. Изображение символа W (слева) и соответствующей ему функции $d(x, y)$ (справа)

Поставим в соответствие каждой линии l величину w как меру среднего евклидова расстояния между символом и линией:

$$w = \frac{\int_l d(x, y) dl}{\int_l dl}. \quad (4)$$

Обозначим l_{\max} линию с максимальным значением w (w_{\max}).

Пусть Q_{L+1} – множество точек, ограниченных окружностью, проходящей через концы линии l_{\max} – точки A, B и некоторую третью точку $C \in F'$, при этом $Q_{L+1} \cap F' = \{\emptyset\}$. Точку C выберем из условия максимизации $|Q_{L+1} \cap CH|$.

Найдем координаты центра и радиус окружности, проходящей через точки A, B и C . Как известно, уравнение такой окружности записывается следующим образом:

$$\det \begin{pmatrix} x^2 + y^2 & x & y & 1 \\ x_1^2 + y_1^2 & x_1 & y_1 & 1 \\ x_2^2 + y_2^2 & x_2 & y_2 & 1 \\ x_3^2 + y_3^2 & x_3 & y_3 & 1 \end{pmatrix} = 0. \quad (5)$$

Площадь треугольника ABC

$$S = \frac{1}{2} \cdot \det \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Найдем x_0 и y_0 – координаты центра окружности:

$$x_0 = \frac{1}{4S} \cdot \det \begin{pmatrix} x_1^2 + y_1^2 & y_1 & 1 \\ x_2^2 + y_2^2 & y_2 & 1 \\ x_3^2 + y_3^2 & y_3 & 1 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

$$y_0 = -\frac{1}{4S} \cdot \det \begin{pmatrix} x_1^2 + y_1^2 & x_1 & 1 \\ x_2^2 + y_2^2 & x_2 & 1 \\ x_3^2 + y_3^2 & x_3 & 1 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Радиус окружности

$$r = \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2}. \quad (9)$$

Найденная окружность делится точками A и B на две дуги. Пусть точка B лежит в направлении обхода оболочки по часовой стрелке от точки A . Тогда обозначим за AB дугу, такую, что для любой точки $C \in AB$ можно записать

$$(\vec{B} - \vec{A}) \cdot (\vec{C} - \vec{B}) \leq 0. \quad (10)$$

Здесь векторное произведение $v_1 \cdot v_2$ интерпретируется как определитель матрицы:

$$v_1 \times v_2 = \det \begin{pmatrix} x_1 & x_2 \\ y_1 & y_2 \end{pmatrix} = x_1 y_2 - x_2 y_1 = -v_2 \times v_1. \quad (11)$$

Точка C делит дугу AB на две дуги AC и CB .

Итак, Q_i найдено, после этого выполняется следующее преобразование:

$$G_{i+1} = G_i - Q_i \quad (12)$$

После этого для каждой из новых дуг (AC и CB) рассчитывается w и проводится следующая итерация. Одна итерация алгоритма представлена на рис. 4.

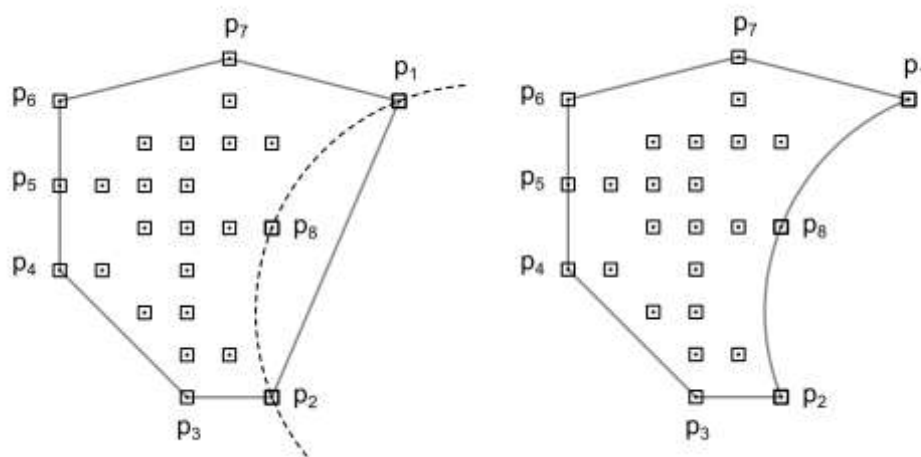


Рис. 4. Деление сегмента p_1p_2 на сегменты p_1p_8 и p_8p_2

Здесь выпуклая оболочка множества F' (показана сплошной линией на рис. 4, слева) образована точками p_1, p_2, \dots, p_7 . Часть окружности, проходящей через точки p_1, p_2 и p_8 показана пунктирной линией. На данном шаге отрезок p_1p_2 переходит в две дуги p_1p_8 и p_8p_2 .

Предлагаемый метод заключается в последовательном приближении к изображению символа по мере стягивания его оболочки (метод стягивающихся оболочек, МСО). При этом на каждом шаге проявляется все больше и больше мелких элементов.

Последовательное приближение символа W дано на рис. 5.



Рис. 5. Последовательное приближение изображения символа "W" его оболочками

В простейшем случае алгоритм повторяется пока $w_{\max} > w_{thr}$, где w_{thr} – заранее заданный фиксированный порог. Однако значительно лучших результатов можно достичь, адаптивно изменяя порог w_{thr} .

Один из вариантов адаптации заключается в том, что каждому сегменту оболочки (каждой дуге) изначально присваивается некоторый уникальный идентификатор – ID . В ходе работы алгоритма, при делении сегмента на два и более ID сохраняется для большей части сегмента, т.е. для части, имеющей большую длину. Например, для рассмотренного случая точек A, B и C ID сегмента AB сохраняется для сегмента AC если $AC / AB > T$ ($T = 0.5 \dots 1$). В случае, если $AC / AB < T$ и $BC / AB < T$, каждой новой дуге присваивается новый ID . В ходе работы алгоритма для сегментов, сохраняющих один и тот же ID продолжительное время, используется более низкие значения порога w_{thr} . Такая адаптация является наиболее простой. На практике можно отслеживать изменения не только длины сегмента, но и угла его наклона, значения w и т.д.

Экспериментальные исследования

Для испытаний использовались искаженные бинарные изображения символов размером 512×512 пикселей. Для восстановления применялся алгоритм с использованием двух порогов: $w_{thr1} = 4.5$ и $w_{thr2} = 0.25$. Низкий порог применялся для дуг со временем жизни ID более J итераций, высокий – для дуг со временем жизни ID менее J итераций.

Результаты восстановления символов с различными топологическими свойствами [2] (число Эйлера для символа X равно 1, для символа A – 0) при помощи операции замыкания и предлагаемого метода приведены на рис. 6.

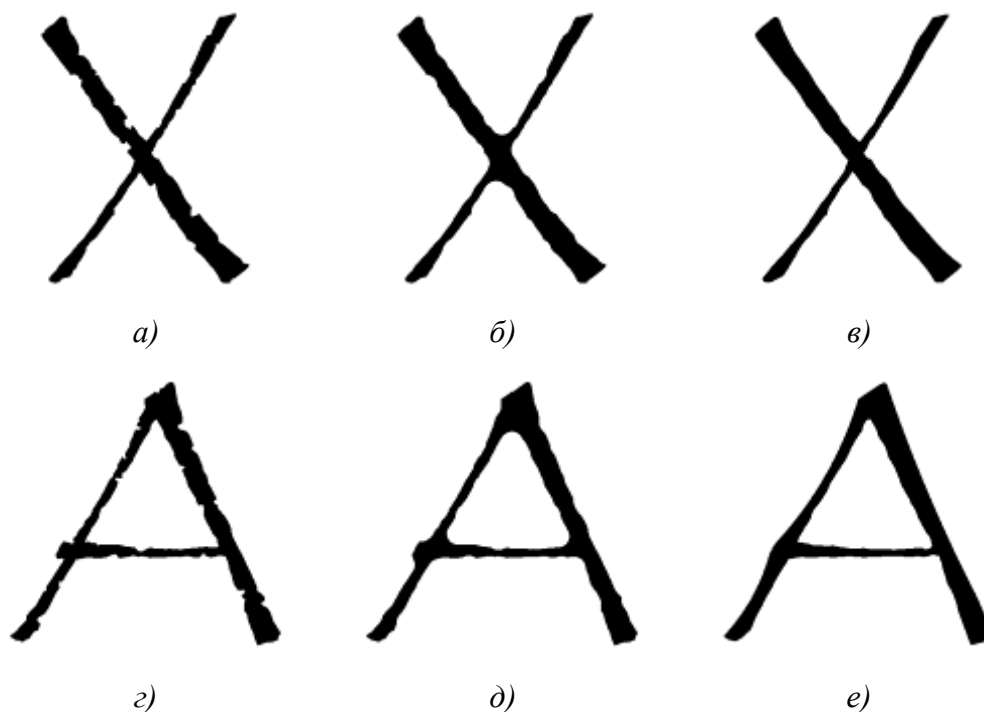


Рис. 6. Сравнение результатов восстановления:

$a, г$ – искаженные изображения; $б, д$ – изображения, восстановленные при помощи операции замыкания ($r = 17$); $в, е$ – изображения, восстановленные при помощи МСО

Таким образом, предлагаемый метод более эффективно устранил дефекты, при этом сохранилась форма в окрестностях угловых точек.

Выводы

Представленный метод позволяет рассматривать изображение в различных масштабах детализации. Сначала изображение грубо представляется описывающей выпуклой областью. С каждой новой итерацией мы имеем все более детальное представление изображения.

Алгоритмическая реализация допускает достаточно гибкую настройку в зависимости от специфики входных данных.

Преимущества метода:

- во-первых, на каждом шаге известна вся предыстория, мы можем активно управлять дальнейшим процессом – адаптировать его под конкретный элемент обрабатываемого символа путем изменения порогов;
- во-вторых, метод не использует понятие связности пикселей, так как работает уже не с самими пикселями, а с точками на плоскости.

Недостатком метода является существенно меньшая скорость работы по сравнению, например, с выполнением морфологического замыкания. Введение ряда приближений и «по-слаблений», возможно, позволит сократить вычислительные затраты.

Библиографический список

1. **Donggang, Yu.** Reconstruction of broken handwritten digits based on structural morphological features / Donggang Yu, Hong Yan // Pattern Recognition. 2001. 34(2). P. 235-254.
2. **Gonzalez Rafael C.** Digital Image Processing, 3rd edition / Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods // Pearson/Prentice Hall. 2008.
3. **Jyotirmoy Banerjee.** Contextual Restoration of Severely Degraded Document Images / Jyotirmoy Banerjee, Anoop M. Namboodiri, C. V. Jawahar // IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2009). 2009. P. 517-524.
4. **Roy, K.** A System for Joining and Recognition of Broken Bangla Numerals for Indian Postal Automation / K. Roy, U. Pal and B. B. Chaudhuri // 4th Indian Conference on Computer Vision, Graphics and Image Processing. 2004. P. 581-586.
5. **Serra, J.** Image Analysis and Mathematical Morphology / J. Serra. – New York: Academic Press 1982.
6. **Shih, F. Y.** Image Processing and Mathematical Morphology: Fundamentals and Applications // CRC Press. 2009.
7. **Shih, F. Y.** Image Processing and Pattern Recognition: Fundamentals and Techniques // IEEE Press. 2010.
8. **Szeliski R.** Computer Vision // Algorithm and Applications. September 3. 2010 draft.
9. **Worapoj Peerawit.** The Utilization of Closing Algorithm and Heuristic Information for Broken Character Segmentation / Worapoj Peerawit, Warat Yingsaeree and Asanee Kawtrakul // IEEE conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS2004). Singapore. 2004.
10. **Кормен, Томас Х.** Алгоритмы: построение и анализ: [пер. с англ.] / Томас Х. Кормен [и др.]. – 2-е изд. – М.: Издательский дом "Вильямс". 2009.
11. **Шапиро, Л.** Компьютерное зрение: [пер. с англ.] / Л. Шапиро, Дж. Стокман. – М.: Бином. Лаборатория знаний. 2006.

*Дата поступления
в редакцию 28.04.2011*

D.A. Pimankin, B.A. Kiselman

**THE METHOD OF CONSTRICTING HULLS FOR
DEGRADED HANDPRINTED CHARACTERS RECONSTRUCTION**

Proposed an adaptive method for reconstructing of corrupted binary images, based on a successive decrease in the average distance between the object and its hull. The possibility of its application for the reconstruction of handprinted characters is demonstrated.

Key words: optical character recognition, image reconstruction, morphological processing, method of constricting hulls.

УДК 681.3.513

Е.А. Никулин

МОДЕРНИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА КОНТРОЛИРУЕМОЙ ТРИАНГУЛЯЦИИ ПОЛИГОНОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Совершенствуется итерационный алгоритм разрезания произвольного полигона на множество треугольников с длинами сторон, не превышающими заданного значения.

Ключевые слова: полигон, триангуляция, разрезание, итерация.

Операция разрезания полигонов (многоугольников) широко распространена в различных прикладных программах и системах автоматизированного проектирования. Она используется в следующих целях:

- для разделения полигона на независимые фрагменты, с которыми далее будут выполняться индивидуальные преобразования;
- замены невыпуклого полигона объединением выпуклых фрагментов, с которыми все тестовые и расчетные задачи выполняются проще и быстрее;
- представления произвольных полигонов объединением простейших *выпуклых* фигур – *треугольников* – с целью унификации и максимального упрощения большинства полигональных операций.

Под *триангуляцией* будем понимать операцию разрезания произвольного, возможно, невыпуклого полигона на треугольники. Ее можно выполнить как рекурсивным [1], так и итерационным методом: поочередным отрезанием выступающих треугольников диагоналями до тех пор, пока не останется последний треугольник. Общий недостаток этих методов состоит в неконтролируемой возможности получения разновеликих и чересчур вытянутых треугольников.

В [1] разработан метод триангуляции произвольного полигона $P = p_1 p_2 \dots p_n p_1$ с *контролируемыми размерами* отрезаемых треугольников, у которых длины сторон не превышают заданного габаритного параметра h . Идея метода, эскизно и без детализации намеченная в [2], заключается в циклическом поиске у полигона *выпуклой* вершины p_m с *минимальным* внутренним углом (рис. 1)

$$\psi \equiv |\varphi_m| = \min_{i \in [1, n]} \{|\varphi_i|\}, \quad \text{где } \varphi_i = \angle(p_{i-1} - p_i, p_{i+1} - p_i) \quad (1)$$

и последующем отрезании от него треугольников с длинами сторон, не превышающими h .

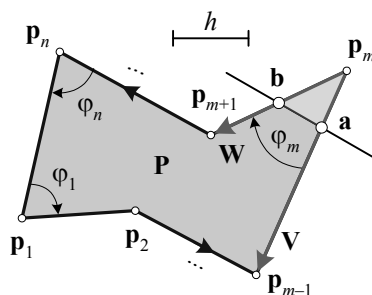


Рис. 1

Модернизация разработанного в [1] алгоритма заключается в замене цикла перебора вершин полигона $P = p_1 p_2 \dots p_n p_1$ их левым циклическим сдвигом с помощью функции

$$LCShift(\mathbf{P}) = \mathbf{p}_2\mathbf{p}_3 \dots \mathbf{p}_n\mathbf{p}_1\mathbf{p}_2, \quad (2)$$

возвращающей список вершин полигона \mathbf{P} , ограниченный вершиной \mathbf{p}_2 . Благодаря этому алгоритм работает с фиксированным индексом $m = 1$. Поиск минимального выпуклого угла теперь основан на n циклических сдвигах $\mathbf{P} = LCShift(\mathbf{P})$ и запоминании конфигурации нового полигона \mathbf{P} при каждом уменьшении модуля его первого угла $\psi = |\varphi_1|$.

В эффективной контролируемой триангуляции число отрезанных треугольников должно быть минимальным, а их форма близка к правильной с длинами сторон, максимально близкими к h , и внутренними углами, близкими к 60° . Для реализации этих требований будем определять число треугольников, отрезаемых от угла $\mathbf{p}_n\mathbf{p}_1\mathbf{p}_2$, в зависимости от величины ψ (рис. 2): один при $\psi \leq 60^\circ$, два при $60^\circ < \psi \leq 120^\circ$ либо три при $120^\circ < \psi < 180^\circ$.

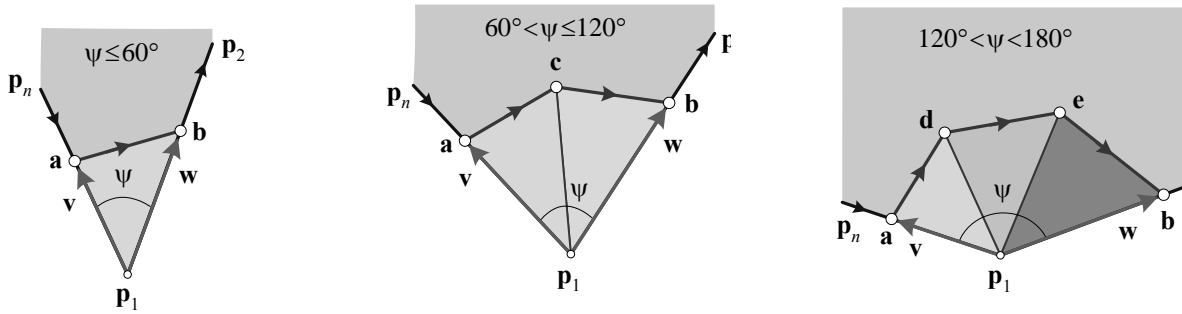


Рис. 2

Выпустим из точки \mathbf{p}_1 в направлении вершин \mathbf{p}_n и \mathbf{p}_1 векторы \mathbf{v} и \mathbf{w} с длинами $|\mathbf{v}| \leq h$ и $|\mathbf{w}| \leq h$. Расположим на концах векторов точки \mathbf{a} и \mathbf{b} , а между ними *равномерно* распределим точки \mathbf{c} , \mathbf{d} и \mathbf{e} . Равномерность достигается помощью параметрической функции

$$\mathbf{u}(\mathbf{v}, \mathbf{w}, \lambda, \psi) = r(\lambda) \bar{\mathbf{v}} \mathbf{R}(-\lambda\psi), \quad (3)$$

где $\mathbf{R}(\alpha)$ — матрица вращения на угол α , а $\bar{\mathbf{v}} = \mathbf{v}/|\mathbf{v}|$ означает нормировку вектора \mathbf{v} . Функция (3) возвращает вектор, длина которого $r(\lambda) = (1 - \lambda) |\mathbf{v}| + \lambda |\mathbf{w}|$ и угол $\gamma = -\lambda\psi$ отклонения от вектора \mathbf{v} являются линейными функциями параметра λ . При изменении последнего в интервале $\lambda \in [0, 1]$ вектор \mathbf{u} переходит из положения \mathbf{v} в положение \mathbf{w} , равномерно увеличивая угол от 0 до ψ и длину от $|\mathbf{v}|$ до $|\mathbf{w}|$. Сопоставим глобальному направлению обхода вершин полигона \mathbf{P} индикатор $\mathbf{D} \in \{1, -1\}$, возвращаемый функцией $dir_test(\mathbf{P})$ из [1]. Тогда вершины отрезаемых треугольников будут расположены в следующих точках:

$$\mathbf{a} = \mathbf{p}_1 + \mathbf{v}, \quad \mathbf{b} = \mathbf{p}_1 + \mathbf{w}, \quad (4a)$$

$$\mathbf{c} = \mathbf{p}_1 + \mathbf{u}(\mathbf{v}, \mathbf{w}, 0.5, D\psi), \quad (4б)$$

$$\mathbf{d} = \mathbf{p}_1 + \mathbf{u}(\mathbf{v}, \mathbf{w}, 1/3, D\psi), \quad \mathbf{e} = \mathbf{p}_1 + \mathbf{u}(\mathbf{v}, \mathbf{w}, 2/3, D\psi). \quad (4в)$$

Отрезанные треугольники добавляются в список треугольников \mathbf{LT} , предварительно инициализированный пустым, а оставшаяся часть полигона поступает на следующую итерацию разрезания. Для недопущения излишнего дробления и уменьшения общего числа треугольников целесообразно по достижении расстояния $|\mathbf{a} - \mathbf{b}| \leq h$ отрезать всегда один треугольник $\mathbf{p}_1\mathbf{b}\mathbf{a}$ независимо от величины угла ψ . Так как при этом $|\mathbf{a} - \mathbf{p}_1| \leq h$ и $|\mathbf{b} - \mathbf{p}_1| \leq h$, то он удовлетворяет габаритному ограничению и не нуждается в разрезании на два или три.

В зависимости от формы и размеров полигона возможны ситуации (рис. 3), когда отрезок **ab** или полилинии **acb**, **adeb** пересекают другие ребра полигона, либо вычисленные по (4) точки **c**, **d** или **e** оказываются за его пределами. В результате новый полигон перестает быть частью старого. Он становится самопересекающимся и может инвертировать направление обхода. Понятно, что дальнейшая триангуляция такого полигона невозможна.

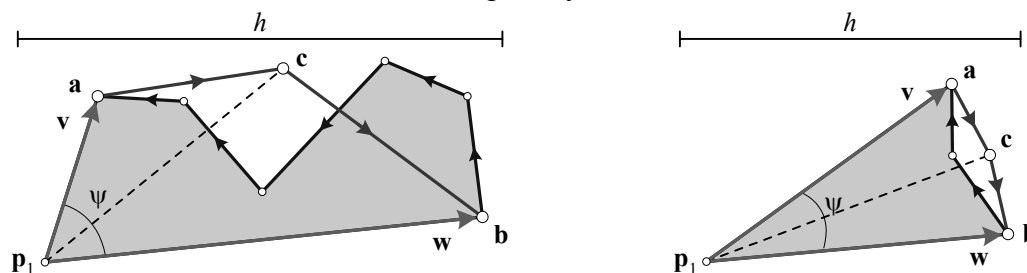


Рис. 3

Предлагается следующее решение этой проблемы. Перед отрезанием треугольников сохраним копии полигона $\mathbf{Q} = \mathbf{P}$ и списка отрезанных треугольников $\mathbf{LQ} = \mathbf{LT}$, а после отрезания проверим новый полигон \mathbf{P} на самопересечение или самокасание тестом *self_test*, определенным в [1]. Он возвращает число 1, если полигон имеет хотя бы одну пару пересекающихся либо касающихся *несмежных* ребер. При *self_test*(\mathbf{P}) = 1 либо *dir_test*(\mathbf{P}) $\neq D$ восстановим сохраненные в \mathbf{Q} и \mathbf{LQ} данные, уменьшим в (3) длины векторов \mathbf{v} и \mathbf{w} , после чего будем отрезать треугольники с новыми вершинами (4) до тех пор, пока полигон \mathbf{P} не перестанет самопересекаться или изменять направление обхода.

На рис. 4 построена блок-схема алгоритма *contri_poly*(\mathbf{P}, h) контролируемой триангуляции полигона \mathbf{P} с габаритным параметром h . В алгоритме используется несколько вспомогательных функций, определенных в [1]:

- *size*(\mathbf{P}) — вычисляет размер полигона \mathbf{P} , возвращая число его сторон n ;
- *min_poly*(\mathbf{P}) — удаляет из полигона \mathbf{P} кратные и коллинеарные вершины;
- *ang*(\mathbf{V}, \mathbf{W}) — возвращает минимальный *алгебраический* угол между векторами \mathbf{V} и \mathbf{W} .

Работа алгоритма начинается с инициализации пустого списка $\mathbf{LT} = \emptyset$, предназначенного для хранения отрезанных треугольников, и вычисления индикатора направления обхода $D = \text{dir_test}(\mathbf{P})$, необходимого в (4), для отбора выпуклых углов по условию $D\varphi_1 < 0$ и обнаружения инверсии направления полигона \mathbf{P} после недопустимого отрезания (рис. 3).

Дальнейший процесс выполняется циклически до отрезания последнего треугольника. После каждого отрезания полигон изменяет свою конфигурацию, число вершин n и их список $\mathbf{P} = \mathbf{p}_1\mathbf{p}_2\dots\mathbf{p}_n\mathbf{p}_1$.

Рассмотрим действия, выполняемые в одном цикле алгоритма.

Шаг 1. Зафиксируем число $n = \text{size}(\mathbf{P})$ сторон минимального полигона $\mathbf{P} = \text{min_poly}(\mathbf{P})$, сохраним копию $\mathbf{Q} = \mathbf{P}$ и установим начальное значение угла $\psi = \pi$.

Шаг 2. В цикле $i=1, n$ вычисляем внутренний угол $\varphi_1 = \text{ang}(\mathbf{q}_n - \mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2 - \mathbf{q}_1)$ при первой вершине полигона $\mathbf{Q} = \mathbf{q}_1\dots\mathbf{q}_n\mathbf{q}_1$. Если он выпукл ($D\varphi_1 < 0$) и минимален ($|\varphi_1| < \psi$), то запоминаем текущий минимум $\psi = |\varphi_1|$ и полигон $\mathbf{P} = \mathbf{Q}$. Далее выполняется циклический сдвиг полигона $\mathbf{Q} = \text{LCShift}(\mathbf{Q})$.

Теперь разместим на сторонах угла $\mathbf{p}_n\mathbf{p}_1\mathbf{p}_2$ точки **a** и **b**, отстоящие от вершины \mathbf{p}_1 не дальше, чем на расстояние h . Проще всего отложить от \mathbf{p}_1 отрезки длиной h , но тогда в конце отрезания ребра, длина которого не кратна h , может остаться очень короткий отрезок, что, в свою очередь, даст мелкий треугольник, длины сторон угла могут быть меньше h .

Процедура *равномерного* разбиения ребер полигона состоит из начальных установок некоторых величин и их циклических настроек.

Шаг 3. Установочная фаза включает:

- вычисление векторов сторон полигона $\mathbf{p}_1\mathbf{p}_n$ и $\mathbf{p}_1\mathbf{p}_2$:

$$\mathbf{V} = \mathbf{p}_n - \mathbf{p}_1, \quad \mathbf{W} = \mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1;$$
- расчет целых кратностей длин сторон к числу h :

$$k_v = \left\lceil \frac{|\mathbf{V}|}{h} \right\rceil, \quad k_w = \left\lceil \frac{|\mathbf{W}|}{h} \right\rceil;$$
- расчет целой кратности угла ψ к углу 60° :

$$k = \left\lceil \frac{3\psi}{\pi} \right\rceil;$$
- сохранение копий полигона и списка треугольников:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{P}, \quad \mathbf{LQ} = \mathbf{LT}.$$

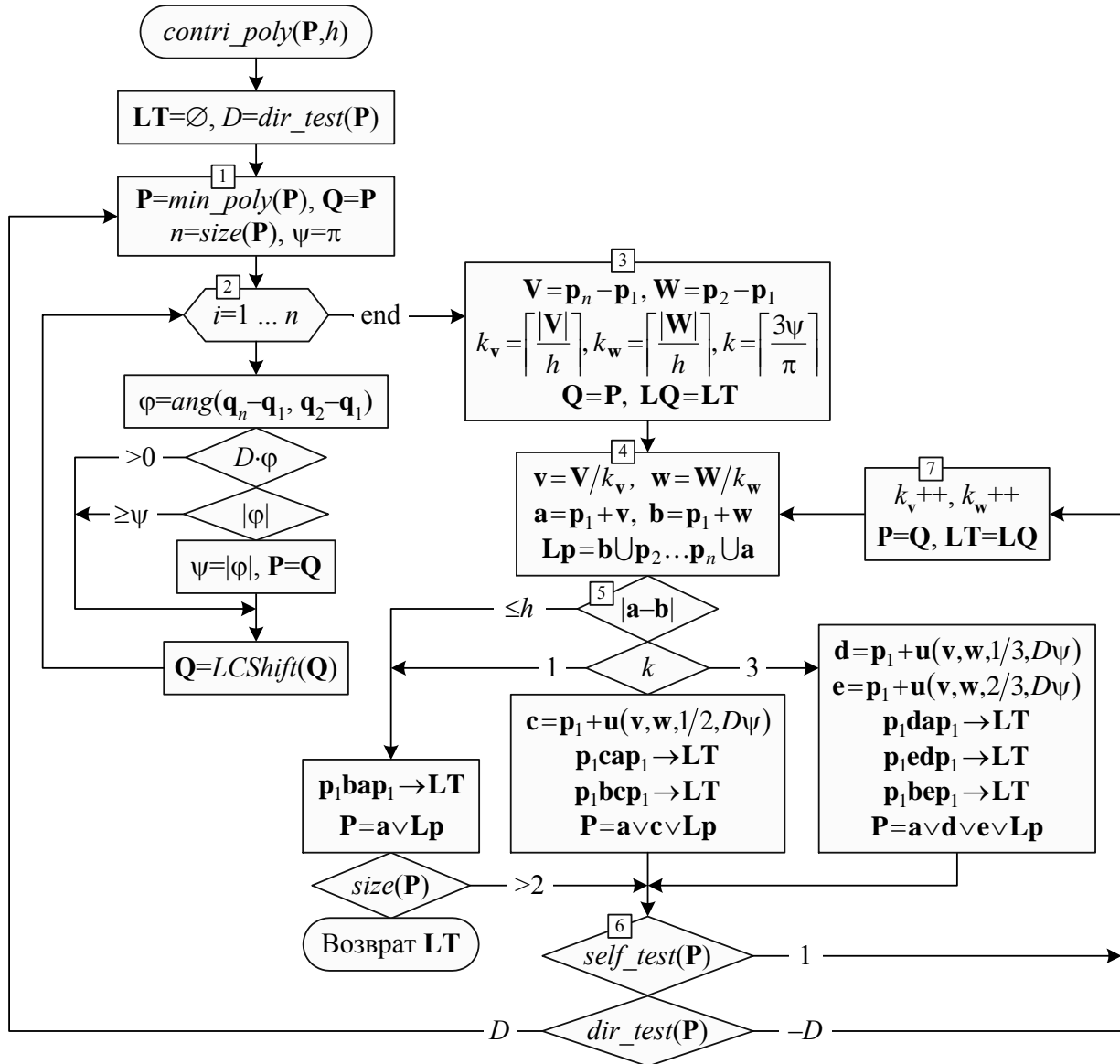


Рис. 4

Шаг 4. Циклическая фаза разбиения ребер $\mathbf{p}_1\mathbf{p}_n$ и $\mathbf{p}_1\mathbf{p}_2$ включает:

- вычисление векторов с длинами, не превышающими значения h :

$$\mathbf{v} = \frac{\mathbf{V}}{k_v}, \quad \mathbf{w} = \frac{\mathbf{W}}{k_w};$$
- вычисление по (4а) вершин треугольников, лежащих на смежных с \mathbf{p}_1 ребрах:

$$\mathbf{a} = \mathbf{p}_1 + \mathbf{v}, \quad \mathbf{b} = \mathbf{p}_1 + \mathbf{w};$$

- формирование списка *некратных* вершин полилинии, проходящей между точками **b** и **a** с учетом возможного совпадения точек $\mathbf{b} = \mathbf{p}_2$ и $\mathbf{a} = \mathbf{p}_n$:

$$\mathbf{Lp} = \mathbf{b} \cup \mathbf{p}_2 \dots \mathbf{p}_n \cup \mathbf{a}. \quad (5a)$$

В программировании логические объединения можно заменить *конкатенациями* (соединениями) с проверками совпадений точек, возникающих при $k_w = 1$ или $k_v = 1$:

$$\begin{cases} \mathbf{Lp} = \mathbf{p}_2 \mathbf{p}_3 \dots \mathbf{p}_n; \\ \mathbf{Lp} = \text{if}(k_w = 1, \mathbf{Lp}, \mathbf{b} \vee \mathbf{Lp}); \\ \mathbf{Lp} = \text{if}(k_v = 1, \mathbf{Lp}, \mathbf{Lp} \vee \mathbf{a}). \end{cases} \quad (5б)$$

Шаг 5. В зависимости от длины отрезка **ab** и коэффициента k , вычисленного на шаге 3, возможны три варианта отрезания треугольников и формирования списка вершин нового полигона **P** (см. рис. 2):

- при $|\mathbf{a} - \mathbf{b}| < h$ либо $k = 1$, т. е. $\psi \leq 60^\circ$, добавляем в список **LT** *один* треугольник $\mathbf{p}_1 \mathbf{b} \mathbf{a} \mathbf{p}_1$, а новый полигон **P** формируем конкатенацией точки **a** и списка **Lp**, полученного в (4). После добавления в **LT** последнего отрезанного треугольника полигон вырождается в двунаправленный отрезок $\mathbf{P} = \mathbf{p}_1 \mathbf{p}_2 \mathbf{p}_1$. Поэтому по условию $\text{size}(\mathbf{P}) < 3$ алгоритм заканчивает работу и возвращает список **LT** с отрезанными треугольниками;
- при $k = 2$, т. е. $60^\circ < \psi \leq 120^\circ$, вычисляем по (4б) точку **c**, добавляем в **LT** *два* треугольника $\mathbf{p}_1 \mathbf{c} \mathbf{a} \mathbf{p}_1$ и $\mathbf{p}_1 \mathbf{b} \mathbf{c} \mathbf{p}_1$, а полигон **P** формируем конкатенацией точек **a**, **c** и списка **Lp**;
- при $k = 3$, т. е. $120^\circ < \psi < 180^\circ$, вычисляем по (4в) точки **d** и **e**, добавляем в список **LT** *три* треугольника $\mathbf{p}_1 \mathbf{d} \mathbf{a} \mathbf{p}_1$, $\mathbf{p}_1 \mathbf{e} \mathbf{d} \mathbf{p}_1$ и $\mathbf{p}_1 \mathbf{b} \mathbf{e} \mathbf{p}_1$, а полигон **P** формируем конкатенацией точек **a**, **d**, **e** и списка **Lp**.

Шаг 6. Проверяем самопересечение нового полигона **P**:

$$s = \text{self_test}(\mathbf{P}).$$

При $s = 0$ и $\text{dir_test}(\mathbf{P}) = D$ переходим на шаг 1.

Шаг 7. В противном случае:

- инкрементируем коэффициенты разбиения ребер:
 k_v++ , k_w++ ;
- восстанавливаем копии полигона и списка треугольников:
 $\mathbf{P} = \mathbf{Q}$, $\mathbf{LT} = \mathbf{LQ}$;
- переходим на шаг 4.

По окончании все возвращенные в списке **LT** треугольники имеют такое же направление обхода, что и у исходного полигона **P**. Это обеспечивается порядком следования вершин треугольников, добавляемых в **LT** на шаге 5.

Проиллюстрируем работу алгоритма контролируемой триангуляции двумя сериями примеров. В первой серии на рис. 5 один и тот же полигон разрезан при разных значениях h на 714, 166, 49 и 10 треугольников. Порядок отрезания треугольников от наименьшего выпуклого угла полигона можно проследить на двух последних рисунках.

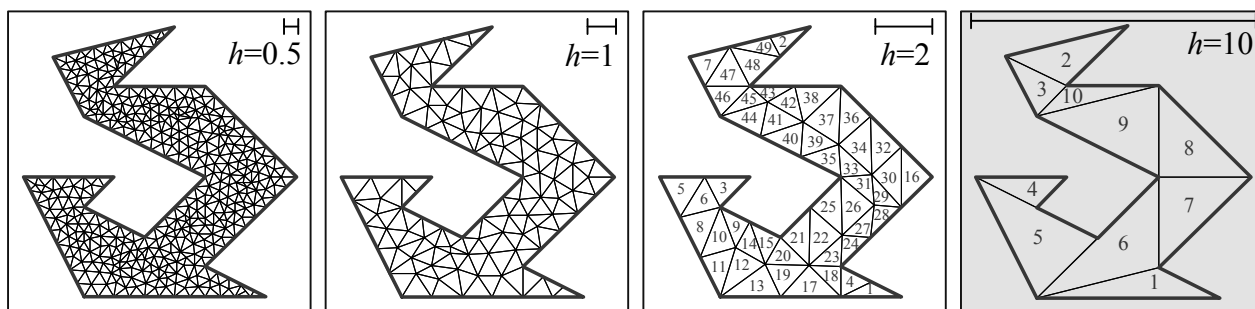


Рис. 5

Отметим, что при задании параметра h заведомо бóльшим габаритов полигона размеры отрезаемых треугольников ограничиваются лишь длинами его ребер.

Таким образом, функцию *contri_poly* можно использовать для разрезания полигона диагоналями на максимально крупные треугольники, что иллюстрируется на рис. 5 решением со значением габаритного параметра $h = 10$.

Во второй серии примеров триангуляции подвергались два случайных полигона, сгенерированных алгоритмом *tpoly* из [1], и один регулярный полигон с внутренним отверстием (рис. 6). Последняя конфигурация требует дополнительной подготовки данных: нужно соединить внешний и внутренний контуры по диагонали двумя ребрами для получения одного замкнутого контура. Во избежание самокасаания полигона эти ребра следует отодвинуть друг от друга на малое расстояние путем соответствующего изменения координат соединяемых вершин внешнего и внутреннего контуров. Направление обхода внутреннего контура должно быть противоположным направлению обхода внешнего. Если у полигона несколько внутренних отверстий, то все они должны быть соединены дополнительными ребрами в один D -ориентированный контур, где D – индикатор направления обхода внешнего контура полигона.

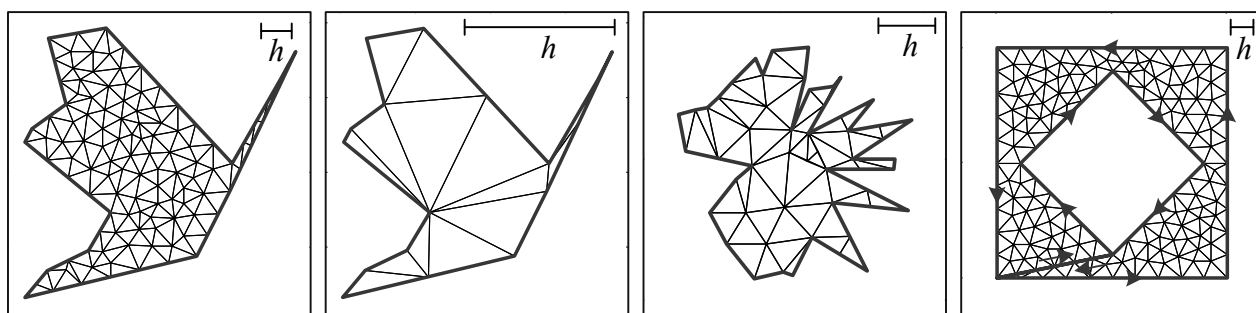


Рис. 6

Выводы

Результатом проведенного исследования является алгоритм разрезания произвольного полигона, автоматизирующий процесс изготовления широкой номенклатуры географических карт. Эта способность разработанного алгоритма решать задачу триангуляции полигона диагоналями, несомненно, повышает его универсальность и полезность.

Библиографический список

1. Никулин, Е.А. Компьютерная геометрия и алгоритмы машинной графики: учеб. пособие для вузов / Е.А. Никулин. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 560 с.
2. Математика и САПР: [пер. с франц.]; В 2-х кн. Кн. 1 / П. Шенен [и др.] – М.: Мир, 1988. – 204 с.

Дата поступления
в редакцию 28.04.2011

E.A Nikulin

MODERNIZATION OF THE ALGORITHM OF MANAGED POLYGON TRIANGULATION

This article describes an improvement of iterational algorithm of cutting an arbitrary polygon in the set of triangles with a limited upper-bound length of their edges.

Key words: polygon, triangulation, cutting, iteration.

УДК 681.518

Л.Н. Гунин¹, А.В. Кашенков², В.П. Хранилов³**ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО
ДОКУМЕНТООБОРОТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ PDM-СИСТЕМЫ
НА ПРЕДПРИЯТИИ РАДИОПРИБОРОСТРОЕНИЯ**

Нижегородский научно-исследовательский приборостроительный институт «Кварц»¹,
Машиностроительный инжиниринговый центр²,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева³

Рассмотрена методика перехода от бумажного архива конструкторской документации к электронному. Показаны основные направления и уровень внедрения ИПИ-технологий на предприятиях радиоэлектронного комплекса. Рассмотрена методика внедрения электронного технического документооборота с использованием PDM-системы.

Ключевые слова: электронный архив, конструкторская документация, отдел технической документации, документооборот, PDM-система, ИПИ-технологии.

Одним из важных элементов организации ИПИ-технологий на предприятии является электронный технический документооборот, который невозможен без использования архива конструкторской и технологической документации (КД и ТД). Поэтому первоочередная задача большинства крупных промышленных предприятий – организация электронного архива КД и ТД на основе имеющегося бумажного архива подлинников [1].

Архив КД является неотъемлемой составляющей любого промышленного предприятия. Документация архива хранится в отделе технической документации (ОТД), где работа с документами в первую очередь сводится к решению следующих задач:

- прием, учет, хранение и обращение конструкторской и технической документации, а также документации, выпущенной на магнитных носителях;
- внесение изменений в техническую документацию, контроль за ее обращением;
- размножение и комплектация технической документации, ее рассылка подразделениям и внешним абонентам.

Организация электронного архива КД является первым шагом к автоматизации документооборота и управлению бизнес-процессами в инженерных службах. Проблемы построения электронного технического документооборота изложены в [2–4].

Для решения задачи единого документооборота предприятия необходимо объединить два известных направления: это идеология электронного документооборота и (как подготовка к нему на переходном этапе) сканирование большого объема имеющейся КД. С этой целью в ОТД была создана локальная сеть, объединяющая множительную и сканирующую технику, сервер архива и рабочие места операторов и корректоров архива. Для удобства работы с архивом и структуризации хранения электронных документов использовано специализированное приложение с возможностью написания дополнительных прикладных программ к нему.

Время, в течение которого осуществляется сканирование всех документов ОТД, можно назвать переходным периодом. Оно зависит от задач и экономических возможностей предприятия. Это время может быть как достаточно малым (два-три месяца), так и большим. Но даже при переводе в электронный вид всей документации полный отказ от использования бумажного архива не предоставляется возможным в силу специфики российских предприятий.

В связи с применением электронного архива были разработаны стандарты предпри-

ятия и руководящие указания, регламентирующие работу с архивом. Так, был определен порядок сдачи электронных документов в архив, определен порядок взаимодействия ОТД и нормоконтроля при прохождении извещения об изменении, порядок проведения самого изменения. Также было разработано приложение, позволяющее автоматизированным способом выполнять отчетность о проделанных в отделе работах и подсчет затраченных материалов (подробнее об организации электронного архива ОТД см. в работах [3, 5]).

Организация на предприятии электронного архива и внедрение цифровых инженерных систем, помимо значительного ускорения процесса размножения документации, позволило:

- осуществлять ввод новых документов в электронном виде;
- проводить коррекцию подлинников КД в электронном виде;
- проводить сканирование (перевод КД в электронный вид) с заполнением базы данных (БД);
- осуществлять поиск КД в электронном виде по десятичному номеру при условии размещения документа в БД;
- осуществлять просмотр сканированных документов в БД с последующим выводом их на печать;
- осуществлять передачу документации в электронном виде как внутренним, так и внешним абонентам.

При всех видимых достоинствах применения электронного архива КД в описанном решении существует недостаток, связанный со структурой хранения электронной документации. При необходимости подобрать всю документацию на изделие приходится вначале определять по спецификациям состав документации, входящей в изделие (состав изделия), и лишь потом подбирать ее по десятичному номеру из электронного архива. При этом затрачивается огромное количество времени, так как состав одного изделия может включать до пяти тысяч и более сборочных единиц и деталей.

Для решения этой проблемы появилась возможность отслеживать и корректировать состав с помощью средств ЭВМ. Работа по такому отслеживанию изменений на ФГУП ННИПИ «Кварц» проводилась средствами «Восток-Кондор». Это позволило отказаться от «ручного» составления списка входящих в изделие документов, но не решило проблему подбора электронной документации.

После проведения указанных мероприятий по внедрению ФГУП ННИПИ «Кварц» входил в перечень предприятий радиоэлектронного комплекса, на которых электронный документооборот осуществляется средствами собственных разработок, что не позволяет интегрировать его в единый комплекс программных средств предприятия.

Предприятия радиоэлектронного комплекса, в силу специфики развития, находятся примерно на одинаковом уровне с точки зрения внедрения информационных технологий. В настоящее время на большинстве предприятий обеспечена информационная поддержка лишь отдельных стадий жизненного цикла изделия. Положение дел на большинстве предприятий отражено в табл. 1.

Такое положение дел противоречит принципу формирования единого информационного пространства предприятия и внедрения ИПИ-технологий [6].

Для их реализации необходимо обеспечить:

- повышение качества и сокращение сроков проведения конструкторской подготовки производства, создание КД (решаются САД-системами);
- повышение качества и сокращение сроков проведения технологической подготовки производства, создание технологической документации, подсчет норм расхода материалов и трудовых ресурсов (решаются САМ-системами);
- надежный учет и хранение электронной технической документации и данных с возможностью их быстрого поиска, разграничения прав доступа для различных пользователей и их групп, учета версий, исключения потери данных, несанкционированного доступа и т.д. (решаются созданием электронного архива средствами PDM-системы);

- управление процессами обмена техническими документами и данными с возможностью планирования этих процессов и контроля их прохождения (документооборот). Эти задачи решаются средствами PDM-системы;
- управление конструкторско-технологическими БД (составы изделий, управляющие программы, базы электронных подлинников и др.), включая ведение справочных БД (материалы, комплектующие, стандартные изделия, покупные изделия, элементная база, ГОСТы и т.д.) (решаются средствами PDM-системы);
- автоматизированное проведение инженерных изменений (извещений) (решаются средствами PDM-системы);
- интеграцию конструкторских систем в систему планирования производства и управления предприятием (MRP/ERP) с организацией единого информационного пространства (ЕИП). Решение этой задачи позволит вводить информацию в ЕИП предприятия единожды в месте ее возникновения и исключает повторный ввод данных на последующих этапах;
- планирование производства;
- управление финансовыми, трудовыми, материальными, складскими и другими ресурсами;
- контроль качества и надежности.

В связи с реализацией данной концепции на ФГУП ННИПИ «Кварц» возникла необходимость переноса существующих данных о хранимой в архиве ОТД документации в хранилище PDM-системы с целью начального заполнения БД.

Структура исходных данных для работы по заполнению БД:

- сведения о составе изделий хранятся в наборе БД, не связанных друг с другом. Для каждого изделия существует собственный набор БД;
- карточки учета документов содержатся в БД, которая не связана с БД составов изделий;
- электронные копии документов хранятся в виде файлов, расположенных в наборе папок. Каждый документ состоит из одного или нескольких файлов, представляющих собой электронную копию одной страницы документа.

Конвертация данных состоит из набора последовательно выполняемых фаз:

- приведение исходных данных в соответствие с промежуточной схемой данных. Формирование обобщенных БД, описывающих составы изделий. Приведение всех БД к требуемому формату;
- разбор составов изделий и создание на их основе структуры связанных файлов и папок в хранилище PDM-системы;
- обновление атрибутов файлов и папок на основе БД карточек архивных документов;
- подготовка файлов документов к перемещению в хранилище PDM-системы. Перемещение файлов документов в хранилище PDM-системы.

В ходе анализа исходных данных были выявлены некоторые несогласованности, способные привести к ошибкам в ходе проведения работ по конвертации данных:

- исходные БД, содержащие составы изделий, не связаны между собой, следовательно, не гарантировалась целостность исходных данных;
- в БД существуют записи, содержащие некорректные данные. Однозначная интерпретация таких записей невозможна;
- отступления от схемы содержимого полей БД, поля с не структурированными данными;
- не гарантируется совпадение имен файлов документов и обозначений документов в записях БД.

Такие данные должны либо переноситься в хранилище в неизменном виде, либо отбрасываться в процессе конвертации. Информация об этих данных должна фиксироваться с целью их дальнейшей корректировки.

Области информационных технологий / задачи		Предприятия	
		1 – n	ФГУП НИИПИ «Кварц»
Конструкторское и технологическое проектирование	Электронный технический документооборот	Собственные разработки	SolidWorks SWE-PDM
	Системы автоматизированного проектирования	Разнообразные САД	SolidWorks 3D, SWR-Технология, MoldFlow, Logopress, GibbsCAM, SpcKad и т.д.
	Разработка и моделирование электрических схем	–	IAR Embedded Workbench, Microcap, Microwave office и т.д.
	Управление производством	Собственные разработки	«ИС-Про» Управление производством, SWR-Технология, SWE-PDM (Проект)
Организация и управление	Электронный канцелярский документооборот	Собственные разработки	Directum Lite (Проект)
Маркетинг и снабжение	Управление материально-техническим снабжением	Собственные разработки	«ИС-Про» Логистика (Проект)
Бухгалтерия и финансы	Управление бухгалтерской деятельностью	ИС. Бухгалтерия, собственные разработки	«ИС-Про». Бухгалтерский и налоговый учет Учет основных средств
	Учет труда и заработной платы	Собственные разработки	«ИС-Про» Управление персоналом
	Управление финансовой деятельностью	Собственные разработки	ИС-Про» Управление финансовыми расчетами

Для решения поставленных задач разработано программное обеспечение, позволяющее автоматизировано провести вторую, третью и четвертую выполняемые фазы конвертации данных.

Этапы выполнения работ по конвертации данных, проводимые на ФГУП ННИПИ «Кварц». *На первом этапе* должны быть подготовлены данные, состоящие из четырех БД и папок с файлами. Все базы должны быть преобразованы в единый формат.

Данные о составах изделий должны содержаться в единой БД с полями: признак вида документа, обозначение документа, наименование документа, обозначение спецификации, в которую входит документ, и тема, в рамках которой разработан документ.

Данные об используемых в изделиях крепежах должны содержаться в единой БД с полями: наименование крепежа, обозначение крепежа, стандарт крепежа, тема, в рамках которой разработан крепеж, обозначение спецификации, в которую входит крепеж, и признак крепежа собственной разработки.

Данные о технологических составах изделий должны содержаться в единой БД с полями: признак вида документа, обозначение документа, обозначение спецификации, в которую входит документ, вид документа, формат документа.

Схема БД карточек учета документов, а также структура папок и файлов электронных копий документов остается неизменной.

На втором этапе, используя данные из указанных БД, в хранилище PDM-системы:

- создаются папки, соответствующие каждой разработанной теме;
- создаются папки, соответствующие каждой спецификации в теме;
- создаются файлы, на основе шаблона, соответствующие каждому документу, включая спецификации;
- создаются файлы, на основе шаблона, соответствующие крепежу собственного изготовления;
- заполняются атрибуты у карточек метаданных файлов и папок (данные о наименовании, обозначении и применяемости);
- между файлами создаются взаимосвязи на основе входимостей.

На третьем этапе переносится информация о документации в карту данных файлов PDM-системы. Информация переносится из всех полей БД карточек учета документов.

На четвертом этапе осуществляется перемещение электронных файлов документов в хранилище PDM-системы. Перенос файла и замена имеющегося в хранилище файла-шаблона осуществляются в соответствии с обозначением документа. При этом если перемещаемый документ имеет несколько файлов (листов), то перед перемещением файлы документа необходимо конвертировать в единый многостраничный файл. В случае если заменяемый файл-шаблон отсутствует в хранилище, то файл документа переносится в специальную папку «Несвязанные документы хранилища».

Результатами проделанной работы является находящиеся в PDM-системе:

- структура папок и файлов электронных документов КД, соответствующая составам изделий;
- заполненные карточки учета документов.

На рис. 1 изображена структура электронного архива КД ОТД на базе PDM-системы.

Благодаря расширенным возможностям PDM-системы разграничивать права доступа к хранилищу архива и при условии наличия локальной сети по всему предприятию, появляется возможность просмотра КД в электронном виде на рабочих местах при разработке и коррекции документации, при ее обработке в плановом, планово-диспетчерском отделах, в отделе материально-технического снабжения и комплектации и т.д. В частности, появляется возможность обращения к КД у технологов при разработке комплектовочных, маршрутных и

операционных карт и подсчете норм расходов материалов. Все это позволяет отказаться от выпуска бумажной копии КД и хранения ее в перечисленных структурных подразделениях предприятия.

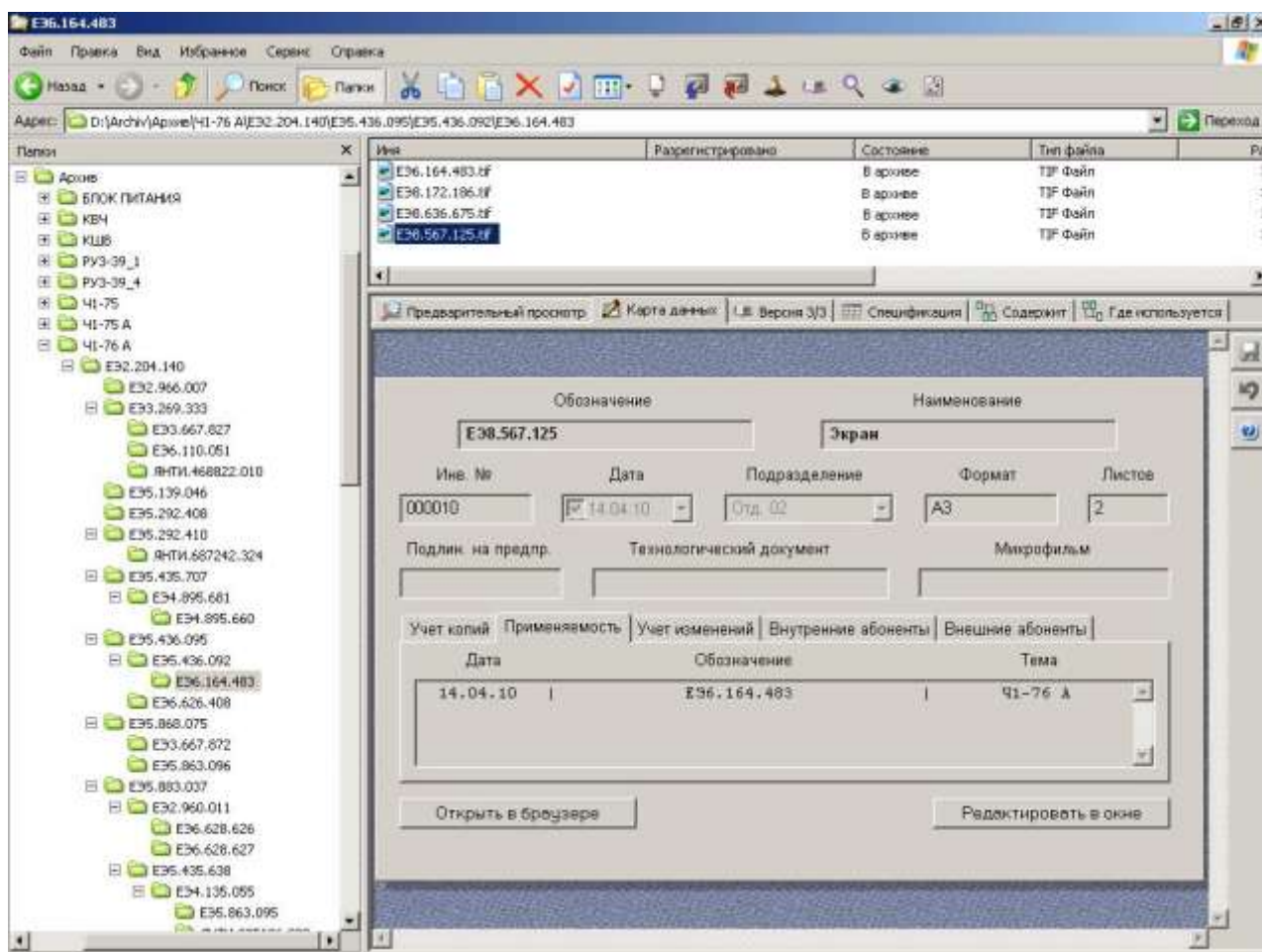


Рис. 1. Структура электронного архива КД ОТД

Библиографический список

1. **Гуний, Л.Н.** Создание электронного архива конструкторской и технологической документации на основе имеющегося архива на бумаге как составляющая CALS-технологий / Л.Н. Гуний, Э.В. Конева // Вестник Верхне-Волжского отделения Академии технологических наук РФ. – Н. Новгород, 2004. № 1(10). С. 65-68.
2. **Гуний, Л.Н.** Модель внедрения ИПИ-технологий на предприятиях радиоприборостроения в условиях организационных изменений и ограниченных ресурсов: монография / Л.Н. Гуний, В.П. Хранилов; НГТУ. – Н. Новгород, 2006. – 153 с.
3. **Гуний, Л.Н.** Проблемы построения электронного документооборота // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2009. №4. С. 45-52.
4. **Гуний, Л.Н.** Автоматизация производственной деятельности отдела технической документации при переходе на CALS-технологии / Л.Н. Гуний, Э.В. Конева, В.П. Хранилов; НГТУ // Информационные технологии: труды нижегород. гос. техн. ун-т. – Н. Новгород, 2005. Т. 56. Вып. 2. С. 111-116.
5. **Кашенков, А.В.** Взаимодействие отдела технической документации и нормоконтроля при прохождении извещения об изменении / А.В. Кашенков, Л.Н. Гуний // Информационные системы и технологии ИСТ-2008: матер. докл. Междунар. науч.-техн. конф.; НГТУ. – Н. Новгород, 2008. С. 182, 183.

6. **Гунин, Л.Н.** Внедрение ИПИ-технологий на предприятиях радиоприборостроения / Л.Н. Гунин, В.П. Хранилов, А.В. Кашенков // Автоматизация в промышленности. 2009. №10. С. 26-29.

*Дата поступления
в редакцию 28.04. 2011*

L.N. Gunin, A.V. Kashenkov, V.P. Khranilov

**THE EXPERIENCE OF ELECTRONIC WORKFLOW IMPLEMENTATION
WITH THE USE OF PDM-SYSTEM AT THE ELECTRONIC INSTRUMENT
ENGINEERING ENTERPRISE**

The article is concerned with the methodology for transferring from the paper-office of engineering documentation to the electronic archive. This article represents the primary areas and level of implementation of CALS-technology at the enterprises of the radio electronic network and the implementation methodology for electronic workflow of technological documentation with the use of PDM-system.

Key words: electronic archive, engineering documentation, technological documentation department, workflow, PDM-system, CALS-technology.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ

УДК 621.833

А.Н. Петровский

К ЗАДАЧЕ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ЭВОЛЬВЕНТНОГО ЗАЦЕПЛЕНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Задача оптимизации сформулирована как система условий существования и качества рабочего и станочных зацеплений. Численное решение получено на двухмерном массиве возможных чисел зубьев. Оптимизированные параметры обеспечивают предельные показатели нагрузочной способности, регламентируемые стандартами расчета на прочность. Предлагается стандартизация эвольвентных передач с улучшенными свойствами на основе оптимизированных параметров и технологии двухпозиционного обката.

Ключевые слова: эвольвентное зацепление, зубчатые передачи, коробки передач, редукторы, двухпозиционный обкат, оптимизация параметров, нагрузочная способность, надежность, качество, шум, вибрация.

Оптимизации параметров эвольвентного зацепления посвящено много работ, авторы которых сообщают об увеличении нагрузочной способности и надежности зубчатых передач, уменьшении их размеров, массы, вибрации и шума. Лучшие результаты исследователи объясняют исключением из задач оптимизации важного технологического ограничения – положения о стандартном исходном производящем контуре (ИПК). «Такой синтез зацепления и передачи в целом открывает возможности творческого конструирования, разделяя этот процесс на конструирование эвольвентной части зубьев и конструирование переходной кривой. При этом инженера не удовлетворит стандартный производящий исходный контур с единственно возможным сочетанием параметров. В общем случае, потребуется разработка специального инструмента, без которого оптимальное проектирование станет невозможным», – пишет Э. Б. Вулгаков, автор теории эвольвентного зацепления в обобщающих параметрах [1, 2].

С отказом части разработчиков от стандартного ИПК в практике проектирования эвольвентных передач утвердились два подхода: хорошо известный *технологический* и относительно новый *конструктивный*.

Технологический подход предусматривает синтез рабочего зацепления на основе стандартного ИПК, стандартные расчеты геометрии и прочности. Теоретические положения технологического подхода используются высшей школой в качестве методических основ преподавания теории и технологии зубчатых передач. Высокий уровень стандартизации и установившиеся программы подготовки специалистов способствуют сохранению технологического подхода в большинстве отраслей машиностроения. Однако современные требования потребителей к нагрузочной способности зубчатых передач, уровням их вибрации и шума показывают, что нормы технологического подхода не всегда достаточны для достижения конкурентоспособности машин.

Конструктивный подход предусматривает синтез рабочего зацепления на основе анализа показателей нагрузочной способности и качества, которые рассматривают как функции геометрических параметров рабочего зацепления. Сторонники конструктивного подхода отказались от технологических ограничений стандартного ИПК и на основе прямого конструирования (Direct Gear Design) создают зацепления, которые превосходят аналоги, разработанные

ные по нормам технологического подхода. Рост нагрузочной способности, снижение уровней вибрации и шума достигают за счет рациональной формы зубьев и высоких коэффициентов перекрытия [3–7].

Конструктивный подход развивает технические идеи начала XX века, интерес к которым был утрачен в период длительного доминирования технологических норм проектирования. 100 лет назад посредством ручного графического анализа и эмпирического конструирования было создано множество оригинальных зацеплений, включая зацепление несимметричных зубьев. Доктор-инженер профессор Штутгартского высшего технического училища К. Бах в фундаментальном труде «Детали машин, их расчет и конструкция» привел обзор публикаций своих современников, успешно конструировавших зацепления. Труды К. Хента (C.W. Hunt), М. Маага, (Max Maag) и О. Лаше (Oskar Lasche) он выделил как наиболее удачные в области эвольвентного зацепления [8].

Конструктивный подход получил системное применение в авиационной промышленности, где действуют отраслевые стандарты и методики проектирования [9–11]. В автомобильной промышленности возможности этого подхода реализованы не полностью, а в станко-, судостроении, общепромышленном и гражданском машиностроении сохраняется технологический подход. Консерватизм мотивируют дополнительными затратами на специальный инструмент, отсутствием директивных норм проектирования и подготовленных специалистов. Перечисленные проблемы можно снять, применив комплексный конструктивно-технологический подход.

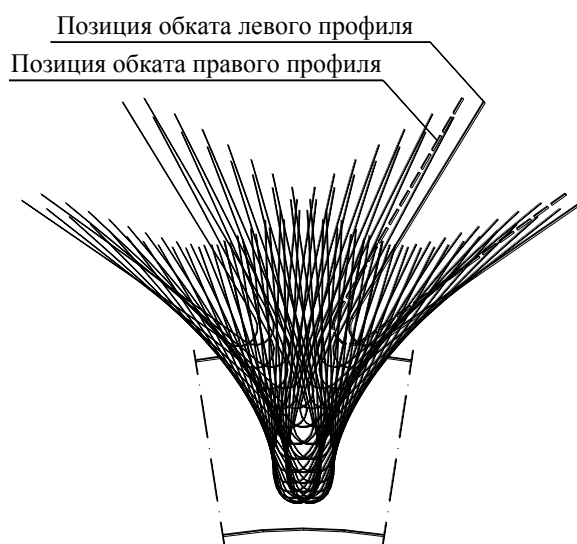


Рис. 1. Двухпозиционный обкат

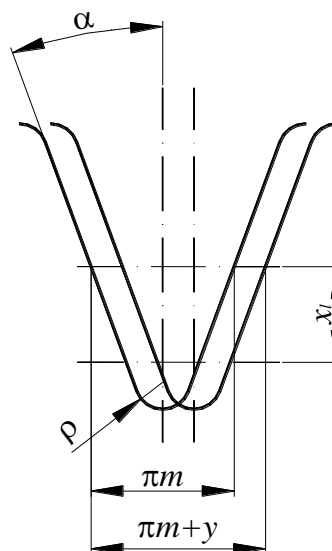


Рис. 2. Универсальный ИПК

Конструктивно-технологический подход предусматривает совместный синтез рабочего и станочных (технологических) зацеплений на основе анализа удельных показателей нагрузочной способности [12–14], условий существования и качества зацеплений. Другая технологическая особенность этого подхода – двухпозиционный обкат заготовок универсальным ИПК с постоянными параметрами [15]. По этой технологии в первой позиции обката образуют боковые профили одной стороны зубьев. Необходимую толщину зубьев обеспечивают настройкой второй позиции обката за счет тангенциального или углового смещения ИПК и заготовки (рис. 1). Обкатом во второй позиции образуют боковые профили противоположной стороны зубьев. Форма универсального ИПК определяется двумя постоянными параметрами: углом профиля α и радиусом округления головки ρ .

Позиции ИПК задают радиальным x_l и тангенциальным y смещениями (рис. 2). Под-

бором смещений исключают эффекты подрезания, заострения, интерференции и сокращения толщины зубьев. По своим результатам двухпозиционный обкат аналогичен обкату ИПК с переменной толщиной выступа. Для улучшения формы переходной кривой можно применить многопозиционный обкат.

Основные положения конструктивно-технологического подхода приведены далее как решение задачи оптимизации геометрических параметров зацепления.

Обобщенным критерием качества зацепления принят показатель удельной нагрузочной способности пары сопряженных зубчатых колес:

$$t = \frac{T_1}{V}, \quad (1)$$

где t – удельная нагрузочная способность, МПа; T_1 – вращающий момент на шестерне, Нм; V – сумма объемов начальных цилиндров сопряженных зубчатых колес на рабочей ширине зубчатых венцов, м³.

Критерий численно равен средней энергии упругой деформации, приходящейся на единицу объема начальных цилиндров, имеет размерность напряжения и применяется для построения целевых функций. Для эвольвентных передач главные целевые функции получены из соотношений ГОСТ 21354-87 в виде

$$t_{H1(2)} = \left(\frac{\sigma_{H \lim 1,2}^2}{Z_E^2 S_{H1,2}^2 K_H} \right) \left(\frac{\varepsilon_\alpha \sin 2\alpha_{tw}}{2 \cos \beta_b} \right) \left(\frac{u}{\pi(u^2 + 1)(u + 1)} \right) = q_{H1,2} \frac{\gamma_H}{v_H}, \quad (2)$$

$$t_{F1(2)} = \left(\frac{\sigma_{F \lim b1,2}^0}{S_{F1,2} K_F} \right) \left(\frac{2\varepsilon_\alpha \cos \alpha_{tw} \cos^3 \beta_b}{z_1 Y_{FS12} Y_\beta \cos \alpha_t} \right) \left(\frac{1}{\pi(u^2 + 1)} \right) = q_{F1,2} \frac{\gamma_{F1,2}}{v_F}, \quad (3)$$

где H – индекс условий контактной прочности; F – индекс условий прочности на изгиб; 1 – индекс шестерни; 2 – индекс колеса; t – индекс торцового сечения; $\sigma_{H \lim}$ – предел контактной выносливости поверхностей зубьев, соответствующий базовому числу циклов напряжений, МПа; Z_E – коэффициент, учитывающий механические свойства материалов колес, МПа^{0.5}; $\sigma_{F \lim b}^0$ – предел выносливости зубьев при изгибе, соответствующий базовому числу циклов напряжений, МПа; $z_{1,2}$ – число зубьев; u – передаточное число; Y_{FS} – коэффициент, учитывающий форму зуба и концентрацию напряжений; Y_β – коэффициент, учитывающий наклон зуба; ε_α – коэффициент перекрытия; α_{tw} – угол зацепления; β_b – угол наклона зубьев в плоскости зацепления; S_H – сводный коэффициент безопасности по напряжениям контакта; S_F – сводный коэффициент безопасности по напряжениям изгиба; для прямоугольного зацепления в функцию (2) взамен ε_α подставляют $(Z_\varepsilon)^{-2}$ – коэффициент, учитывающий суммарную длину контактных линий.

В больших скобках главных целевых функций (2), (3) сгруппированы статистические, геометрические и структурные величины. Они образуют автономные целевые функции допускаемых напряжений q_{H12} , q_{F12} , зацепления γ_H , $\gamma_{F1,2}$ и структуры v_H , v_F . Функции γ_H , v_H , v_F общие для шестерни и колеса. Функции структуры пары сопряженных колес содержат один параметр – передаточное число u . Функции зацепления и структуры безразмерные, а их отношение – функция формы – характеризует геометрические свойства зацепления.

Лимитирующая нагрузочная способность зацепления определяется наименьшим из показателей (2), (3):

$$t = \min(t_{H1,2}; t_{F1,2}) = q \frac{\gamma}{v}. \quad (4)$$

Обозначения лимитирующих функций применяются без индексов.

Из соотношений (1), (4) следует полезная формула для расчета функции допускаемых напряжений действующих и опытных образцов:

$$q = T_1 \left(\frac{v}{\gamma} \right) \frac{(u + 1)^2}{\pi a_{tw}^2 b_w (u^2 + 1)}, \quad (5)$$

где a_{rw} – межосевое расстояние; b_w – рабочая ширина зубчатых венцов.

Анализ передач известных производителей показал, что каждому из них соответствуют устойчивые значения функций допускаемых напряжений, которые отражают специальные и отраслевые требования к надежности и исполнению передач. Например, для скоростных передач автомобильной коробки скоростей $q_H = 32 \dots 36$ МПа, $q_F = 340 \dots 380$ МПа [14].

Таким образом, для фиксированных значений q предельная нагрузочная способность передач будет достигнута при максимальных значениях целевых функций зацепления:

$$\gamma_H = \frac{\varepsilon_\alpha \sin 2\alpha_{rw}}{2 \cos \beta_b}, \quad (6)$$

$$\gamma_{F1(2)} = \frac{2\varepsilon_\alpha \cos \alpha_{rw} \cos^3 \beta_b}{z_1 Y_{FS1,2} Y_\beta \cos \alpha_t}. \quad (7)$$

Это сложные неявные многопараметрические функции. Массив переменных параметров состоит из координат узловых точек профиля сопряженных зубьев. Профиль симметричного зуба с эвольвентным теоретическим профилем определен на плоскости четырьмя узловыми точками: a, e, l, f – и их восемью координатами (рис. 3). Если радиус основной окружности шестерни r_{b1} принять равным единице, то радиус основной окружности колеса будет равен передаточному числу, а профиль каждого зуба будет определен в полярной системе координат четырьмя переменными.

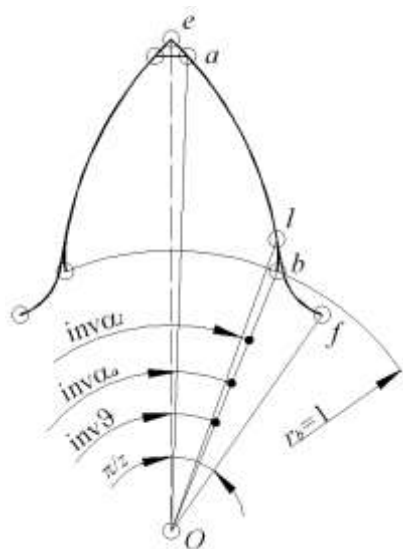


Рис. 3. Профиль симметричного эвольвентного зуба и узловые точки: a, e, l, f

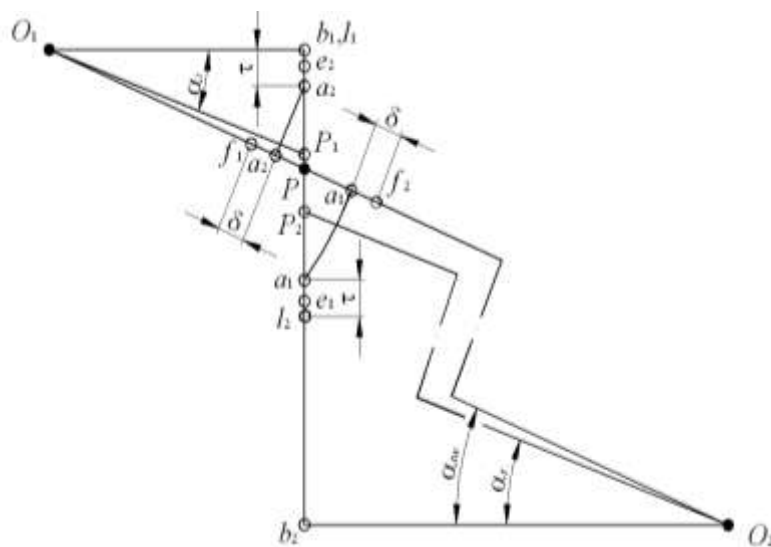


Рис. 4. Положение узловых точек в рабочем и станочных зацеплениях

Положение узловых точек в рабочем и станочных зацеплениях показано на рис. 4, где: $O_{1,2}$ – центры зубчатых колес; P – полюс рабочего зацепления, $P_{1,2}$ – полюса станочных зацеплений.

Числа зубьев z_1, z_2 , углы профиля $\vartheta_{1,2}$ в верхней предельной точке теоретического профиля, углы профиля $\alpha_{a1,2}$ на окружностях вершин, углы профиля $\alpha_{l1,2}$ на граничных окружностях и угол β_b наклона линии зуба в плоскости зацепления образуют массив девяти переменных, определяющих целевые функции (6) и (7). Кроме того, функция (7) содержит параметры ИПК, определяющие форму переходной кривой и коэффициенты формы зуба $Y_{FS1,2}$.

Переменные параметры связаны конструктивно-технологическими условиями суще-

ствования и качества зацеплений. Если условия сформулировать в виде системы совместных уравнений, число которых равно числу оптимизируемых параметров, то задача оптимизации может иметь единственное решение.

Некоторые из условий содержат размерные ограничения в виде конструктивно-технологических норм производства и эксплуатации (табл. 1). Указанные в табл. 1 обозначения δ^* , τ^* и ρ^* выражают размеры в долях нормального модуля, а их применение без знака «*» соответствует линейным размерам.

Представленная далее система конструктивно-технологических условий не является единственной. Численные эксперименты показали, что условия могут быть выражены через другие параметры, другие ограничения и в другом виде, но для целевых функций (6) и (7) приводят к близким результатам.

Таблица 1

Размерные ограничения

Наименование	Ограничения
Коэффициент радиального зазора в зацеплении	$\delta^* \geq 0.15$
Коэффициент запаса от подрезания, интерференции и завышенного скольжения	$\tau^* \geq 0.05$
Отношение центральных углов между точками разноименных теоретических профилей на окружности вершин и основной окружности	$\mu = 1 - \frac{inv\alpha_a}{inv\vartheta} \geq 0.03$
Угол профиля ИПК, см. условие 13	$\alpha = 15 \dots 20^\circ$
Коэффициент округления головки ИПК	$\rho^* \geq 0.25$

1. Условие собираемости – главное уравнение зацепления [1, 2].

На начальных окружностях сумма толщин сопрягаемых зубьев равна шагу

$$\left(\frac{z_2}{z_1} + 1 \right) inv\alpha_{nw} = \vartheta_1 + \frac{z_2}{z_1} inv\vartheta_2 - \frac{\pi}{z_1}. \quad (8)$$

2. Условие рационального перекрытия зубьев:

$$1 \leq \varepsilon_\alpha \leq 2,1, \quad (9)$$

$$\varepsilon_\alpha = \frac{z_1}{2\pi} \left(\operatorname{tg}\alpha_{a1} + \frac{z_2}{z_1} \operatorname{tg}\alpha_{a2} - \left(\frac{z_2}{z_1} + 1 \right) \operatorname{tg}\alpha_{nw} \right). \quad (10)$$

Нижний предел коэффициента перекрытия отражает условие существования кинематической связи в прямозубой передаче, а верхний – практику выбора чисел зубьев. Значения ε_α могут быть и выше [14], но реализуются при больших числах зубьев, применение которых требует специального анализа.

3. Условия отсутствия интерференции и недопустимых удельных скольжений в рабочем зацеплении – 1-е ограничение углов профиля на окружности вершин.

$$\alpha_{a\tau 1} \leq \arctg \left[\left(\frac{z_2}{z_1} + 1 \right) \operatorname{tg}\alpha_{nw} - \frac{z_2}{z_1} \operatorname{tg}\alpha_{l2} - \frac{2}{z_1 \cos \alpha_t} \tau^* \right], \quad (11)$$

$$\alpha_{a\tau 2} \leq \arctg \left[\left(1 + \frac{z_1}{z_2} \right) \operatorname{tg}\alpha_{nw} - \frac{z_1}{z_2} \operatorname{tg}\alpha_{l1} - \frac{2}{z_2 \cos \alpha_t} \tau^* \right], \quad (12)$$

где τ – отличительный индекс условия.

4. Условия гарантированных радиальных зазоров в рабочем зацеплении – 2-е ограничение углов профиля на окружности вершин.

$$\alpha_{a\delta 1} \leq \arccos \left(\left(\frac{1}{\cos \alpha_{nw}} \left(\frac{z_2}{z_1} + 1 \right) - \frac{z_2}{z_1 \cos \alpha_{l2}} + \rho^* \frac{2}{z_1 \cos \alpha_t} (1 - \sin \alpha_t) - \delta^* \frac{2}{z_1 \cos \alpha_t} \right)^{-1} \right), \quad (13)$$

$$\alpha_{a\delta 2} \leq \arccos \left(\left(\frac{1}{\cos \alpha_{nw}} \left(\frac{z_2}{z_1} + 1 \right) - \frac{1}{\cos \alpha_{l1}} + \rho^* \frac{2}{z_1 \cos \alpha_t} (1 - \sin \alpha_t) - \delta^* \frac{2}{z_1 \cos \alpha_t} \right)^{-1} \right), \quad (14)$$

где δ – отличительный индекс условия.

5. *Условия минимальной толщины зубьев на окружности вершин – ограничение углов профиля в верхних предельных точках.*

$$\text{inv} \vartheta_{\mu 1} \geq \text{inv} \alpha_{a1} \left(1 + \frac{\mu^*}{2} \right), \quad (15)$$

$$\text{inv} \vartheta_{\mu 2} \geq \text{inv} \alpha_{a2} \left(1 + \frac{z_1}{z_2} \frac{\mu^*}{2} \right), \quad (16)$$

где μ – отличительный индекс условия.

6. *Условие равной нагрузочной способности на изгиб сопрягаемых зубьев.*

Условие следует из равенства целевых функций (7) для шестерни и колеса:

$$\left(\frac{\sigma_{F \lim b1}^0}{S_{F1}} \right) Y_{FS2} = \left(\frac{\sigma_{F 2imb2}^0}{S_{F2}} \right) Y_{FS1}. \quad (17)$$

В качестве первого приближения для решения уравнения (17) используется условие равной толщины сопрягаемых зубьев по граничным окружностям:

$$\frac{(\text{inv} \vartheta_1 - \text{inv} \alpha_{l1})}{\cos \alpha_{l1}} = \frac{z_2 (\text{inv} \vartheta_2 - \text{inv} \alpha_{l2})}{z_1 \cos \alpha_{l2}}. \quad (18)$$

Более точные решения получают методами теории упругости, варьируя отношением толщин зубьев, шестерни и колеса:

$$K_9 = \frac{z_2 \text{inv} \vartheta_2}{z_1 \text{inv} \vartheta_1}.$$

Равенство (17) выполняется при большей толщине зуба шестерни, когда $K_9 < 1$. Для пары одинаковых колес ($z_1 = z_2$), выполненных из одного материала и по одной технологии, уравнения (17), (18) сводятся к равенству углов ϑ_1 и ϑ_2 .

7. *Условие равной нагрузочной способности зубьев по контактной прочности и прочности на изгиб.*

$$\cos^4 \beta_b \leq \frac{\sin \alpha_{nw} \cos \alpha_t \sigma_{H \lim}^2 Z_1 Y_{\beta} Y_{FS1,2} S_{F1,2} u}{2 \sigma_{F \lim b1,2}^0 Z_E^2 S_{H1,2}^2 (u+1)}. \quad (19)$$

Это соотношение следует из равенства функций (2), (3) и позволяет наращивать нагрузочную способность за счет перераспределения напряжений контакта и изгиба. Условие (19) следует рассматривать совместно с условием кратности рабочей ширины зацепления осевому шагу.

$$b_w = \frac{2\pi}{z_1 \sin \beta_b} k, \quad k = 1, 2, 3 \dots$$

8. *Условие отсутствия подрезания зубьев в станочных зацеплениях – ограничение углов профиля на граничной окружности.*

Целевые функции возрастают с увеличением углов профиля на окружности вершин $\alpha_{a1,2}$ и уменьшением углов профиля на граничной окружности $\alpha_{l1,2}$. Очевидно, что для последних целесообразно принимать минимальные значения, не допуская подрезания зубьев. Для увеличения активного участка линии зацепления и коэффициента перекрытия

$$\alpha_{l1} \geq 0. \quad (20)$$

Чтобы обеспечить близкую форму сопрягаемых зубьев, угол α_{l2} колеса принимается так, чтобы высота ножки зуба была не меньше, чем у зуба шестерни:

$$0 \leq \alpha_{l2} \leq \arctg \left[\left(1 + \frac{z_1}{z_2} \right) \operatorname{tg} \alpha_{tw} - \left(1 - \frac{z_1}{z_2} \right) \operatorname{tg} \alpha_t \right]. \quad (21)$$

9. Условие совместности соотношений для углов профиля на окружности вершин.

$$\alpha_{a1,2} = \operatorname{MIN}(\alpha_{a\delta 1,2}, \alpha_{at1,2}). \quad (22)$$

Принимаются меньшие значения из соотношений (11), (12) и (13), (14).

10. Условие совместности соотношений для углов профиля в верхней предельной точке теоретического профиля.

Соотношения (8), (15), (16), (17) для углов профиля в верхней предельной точке $\vartheta_{1,2}$ и угла зацепления α_{tw} будут совместны, если

$$\operatorname{inv} \vartheta_{1,2} = \operatorname{MIN}(\operatorname{inv} \vartheta_{\mu 1,2}; \operatorname{inv} \vartheta_{1,2}), \quad (23)$$

что исключает неопределенность выбора одного из углов $\vartheta_{1,2}$, не нарушая других условий существования и качества зацеплений.

11. Условие совместности соотношений для углов профиля в верхней предельной точке рабочего и станочных зацеплений.

Из геометрии станочного зацепления следует выражение для углов профиля в верхней предельной точке:

$$\operatorname{inv} \vartheta_{l1,2} = \operatorname{inv} \alpha_t + \frac{\pi}{z_{1,2}} - \frac{2\rho^*}{z_{1,2}} \cos \alpha_t - \sin \alpha_t \left(\frac{1}{\cos \alpha_t} - \frac{\cos(\alpha_t - \alpha_{l1,2})}{\cos \alpha_{l1,2}} \right),$$

где l – отличительный индекс условия.

В общем случае углы $\vartheta_{l1,2}$ и $\vartheta_{1,2}$ не совпадают, и сформировать зубья с параметрами $\alpha_{l1,2}$ и $\vartheta_{1,2}$ в одной позиции обката не удастся. Необходимый угол профиля $\vartheta_{1,2}$ можно получить обкатом заготовки во второй позиции, которую настраивают угловым смещением заготовки или тангенциальным смещением ИПК.

Угловое смещение определяется соотношением

$$\varphi_{1,2} = 2(\operatorname{inv} \vartheta_{1,2} - \operatorname{inv} \vartheta_{l1,2}), \quad (24)$$

а соответствующее тангенциальное смещение определяется коэффициентом

$$y_{1,2}^* = \frac{z_{1,2}}{\cos \beta} (\operatorname{inv} \vartheta_{1,2} - \operatorname{inv} \vartheta_{l1,2}), \quad (25)$$

где β – угол наклона ИПК.

Смещения, рассчитанные по формулам (24), (25), имеют отрицательные значения, что указывает их направление «в тело» заготовки.

Коэффициент радиального смещения определяется соотношением

$$x_{l1,2}^* = \frac{\pi - 4\rho^* \cos \alpha}{4 \operatorname{tg} \alpha} - \frac{z_{1,2} \cos \alpha_t}{2 \cos \beta} \left(\frac{1}{\cos \alpha_t} - \frac{\cos(\alpha_t - \alpha_{l1,2})}{\cos \alpha_{l1,2}} \right).$$

В расчетах размеров для контроля взаимного положения разноименных профилей зубьев, например по формулам ГОСТ 16532-70, удобно воспользоваться приведенным коэффициентом смещения:

$$x_{1,2}^* = x_{l1,2}^* + \frac{y_{1,2}^*}{2 \operatorname{tg} \alpha_t}.$$

12. Условие совместности рабочего и станочных зацеплений по коэффициенту перекрытия и радиальному зазору – ограничение угла профиля ИПК.

В станочных зацеплениях параметры ИПК должны обеспечить гарантированные радиальные зазоры и коэффициенты перекрытия несколько большие, чем в рабочем зацеплении. Из схемы станочного зацепления (рис. 5) следует, что при радиальном зазоре δ_0 параметры ИПК должны удовлетворять соотношениям

$$\varepsilon_a \leq \varepsilon_{a0} = \left(\operatorname{tg} \alpha_{a0} - \operatorname{tg} \alpha_t + \frac{\pi}{z_1 \cos^2 \alpha_t} + \rho^* \frac{2}{z_1 \cos \alpha_t} \right) \frac{z_1}{2\pi},$$

$$\alpha_{a0} = \arccos \left(\left(\frac{1}{\cos \alpha_t} + \left(\frac{\pi}{z_1 \cos \alpha_t} - 4 \frac{\rho^*}{z_1} \right) \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha_t} - \left(\frac{\pi}{z_1 \cos \alpha_t} + 2 \frac{\rho^*}{z_1} \right) \operatorname{tg} \alpha_t \right)^{-1} \right),$$

где 0 – индекс станочного зацепления; ε_{a0} – коэффициент перекрытия; α_{a0} – предельный угол профиля на окружности вершин.

На рис. 5 показана зависимость ε_{a0} от числа зубьев, согласно которой ε_{a0} превышает предельное значение $\varepsilon_a = 2,1$ рабочего зацепления при $\alpha_t \leq 20^\circ$. Учитывая изменение угла профиля ИПК в торцовом сечении косозубых колес, рациональные значения α составляют $15 - 20^\circ$ (табл. 1).

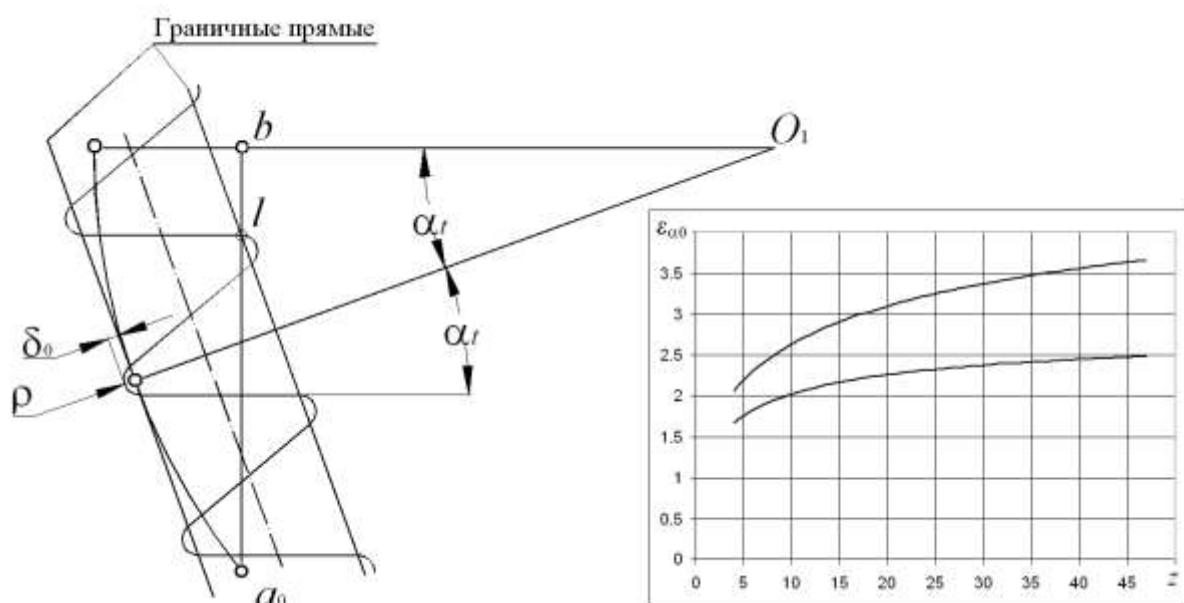


Рис. 5. Схема станочного зацепления при минимальном радиальном зазоре δ_0

Рассмотренные условия сводятся к системе восьми (с учетом индексов) совместных соотношений (8), (15), (19), (20), (21), (22) и (23 – для одного из колес), которые определяют угол зацепления α_{tw} и семь переменных параметров сопрягаемых зубьев: $\vartheta_{1,2}$, $\alpha_{a1,2}$, $\alpha_{l1,2}$, β_b . Общий интервал определения переменных $(0; \pi)$ и равенство числа переменных числу связывающих их соотношений указывают на возможность представления условий системой совместных уравнений, имеющей единственное решение. Отсюда следует важное положение: *синтез оптимизированных зацеплений, расчет их геометрии, показателей качества и нагрузочной способности может быть выполнен для двухмерного массива натуральных независимых переменных $z_1 \cdot z_2$.*

Трансцендентный характер рассмотренных соотношений предполагает применение в расчетах методов итерации и программных средств. Численное решение задачи оптимизации получено в виде трехмерного массива $\{z_1, z_2, N\}$, каждый элемент которого определен целочисленными координатами, где N – номер величины, расположенной в N -м уровне над двумерным массивом натуральных чисел $z_1 \cdot z_2$.

Каждая из расчетных величин может быть представлена в виде условной поверхности, заданной точками с натуральными координатами z_1 и z_2 . Условная поверхность, представляющая произведение $\varepsilon_a \sin 2\alpha_{tw}$ и характеризующая целевую функцию зацепления (6), показана на рис. 6. В этом варианте численного решения условие $\varepsilon_a \leq 2,1$ выполнялось

следующим образом: если при изменении чисел зубьев шестерни от z_1 до z_2 для некоторого z_1' выполнялось неравенство $\varepsilon_\alpha \geq 2,1$, то соответствующее значения угла α_{tw} и $\varepsilon_\alpha = 2,1$ принимались для всех сочетаний, где $z_1' \leq z_1 \leq z_2$. На рис. 6 эти сочетания расположены под плоским участком условной поверхности.

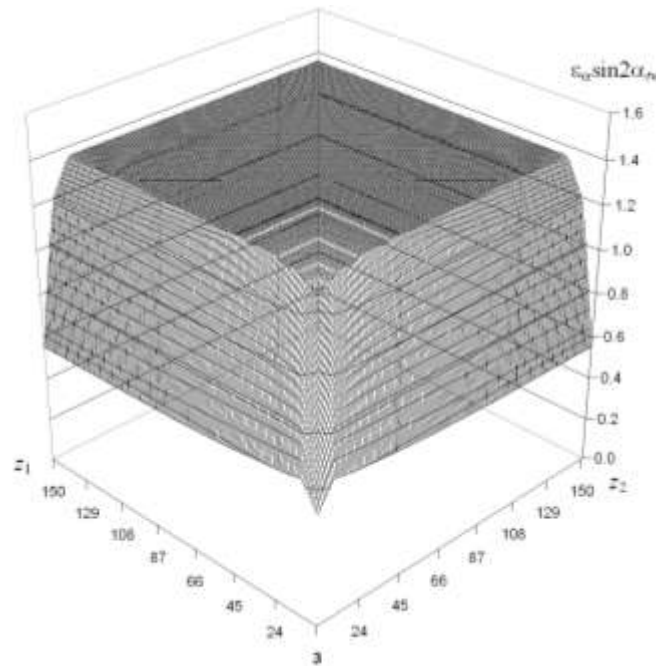


Рис. 6. Условная поверхность, представляющая произведение $\varepsilon_\alpha \sin 2\alpha_{tw}$

Таблица 2

Результаты расчета

№ п/п	Исходные данные					Конструктивно-технологические ограничения				
	Оптимизация		Расчет линейных размеров			Параметры ИПК		Параметры зацеплений		
	z_1	z_2	T_1 , Нм	q_H , МПа	q_F , МПа	α , °	ρ^*	δ^*	μ	τ^*
	10	36	500	42.50	390	20	0.30	0.15	≥ 0.05	≥ 0.05
Оптимизированные геометрические параметры, показатели качества и нагрузочной способности										
N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	ϑ_1	ϑ_2	α_{a1}	α_{a2}	α_{l1}	α_{l2}	β_b	α_{tw}	ε_α	$(Z_s)^{-2}$
	45.633	29.790	44.191	27.371	0.000	9.948	0.000	22.639	1.460	1.181
1	γ_H	—	v_H	q_H , МПа	—	—	t_{H1}	t_{H2}	—	V , м ³
	0.42	—	56.04	42.50	—	—	0.32	0.32	—	0.00157
2	γ_{F1}	γ_{F2}	v_F	—	—	—	t_{F1}	t_{F2}	Y_{FS1}	Y_{FS2}
	0.050	0.050	43.857	—	—	—	0.44	0.44	4.64	4.82
3	m , мм	a , мм	a_{tw} , мм	b_w , мм	x_{l1}^*	x_{l2}^*	y_{l1}^*	y_{l2}^*	x_1^*	x_2^*
	6.00	138.00	140.50	38.40	0.845	0.339	-0.038	-0.231	0.741	-0.296
4	d_1 , мм	d_2 , мм	d_{a1} , мм	d_{a2} , мм	d_{f1} , мм	d_{f2} , мм	Z_{wr1}	Z_{wr2}	W_1 , мм	W_2 , мм
	60.00	216.00	78.63	228.56	50.76	200.68	3	4	48.16	63.80
m_i , мм	5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
a_i , мм	6	92.0	103.5	115.00	126.50	138.00	161.00	184.00	207.00	230.00
a_{twi} , мм	7	93.67	105.38	117.09	128.79	140.50	163.92	187.34	210.76	234.17
b_{twi} , мм	8	86.4	68.3	55.3	45.7	38.4	28.2	21.6	17.1	13.8

Численное решение задачи оптимизации содержит в безразмерном виде данные для инженерной разработки зацеплений по заданной нагрузке T_1 (или параметрах a_{tw} , b_w) и функции допускаемых напряжений q .

Пример. Разработать прямозубое эвольвентное зацепление: $z_1 = 10$; $z_2 = 36$; $T_1 = 500$ Нм; $q_{F1,2} = 380$ МПа; $q_{H1,2} = 42,5$ МПа – эмпирические значения, рассчитанные по формуле (5) для надежного серийного образца.

Для заданных чисел $z_{1,2}$ из массива $\{z_1, z_2, N\}$ выводим оптимизированные безразмерные параметры: $\vartheta_{1,2}$, $\alpha_{a1,2}$, $\alpha_{a1,2}$, угол зацепления α_{tw} , коэффициент перекрытия ε_α , коэффициенты смещения: $x_{1,2}^*$, $y_{1,2}$, $x_{1,2}^*$, коэффициенты формы зубьев $Y_{FS1,2}$, функции зацепления: γ_H , $\gamma_{F1,2}$ и структуры v_H , v_F .

Из соотношений (2)–(4) получаем лимитирующее значение удельной нагрузочной способности $t = t_{H1,2}$ и соответствующее значение $q = q_{H1,2}$.

Для определения линейных размеров стандартному ряду модулей m_i поставлены в соответствие ряды межосевых расстояний: делительных a_i и рабочих a_{twi} :

$$a_{twi} = m_i \frac{z_1 + z_2}{2 \cos \beta} \left(\frac{\cos \alpha_t}{\cos \alpha_{tw}} \right) = a_i \left(\frac{\cos \alpha_t}{\cos \alpha_{tw}} \right), i = 1, 2, 3, \dots,$$

а также рабочие ширины зубчатых венцов b_{wi} , полученные из формулы (5).

Результаты расчета представлены в табл. 2. Ряды линейных размеров расположены в 5-й – 8-й строках таблицы. Из условий компоновки передачи принято $a_{tw} = 140,5$ мм, $b_w = 38,5$ мм. Исполнительные размеры, обозначения которых соответствуют ГОСТ 16532-70, приведены в 4-й строке таблицы.

Расчетные значения межосевых расстояний обычно не соответствуют рядам натуральных или предпочтительных чисел, но приводятся к ним без затруднений за счет незначительного изменения параметров колеса с соответствующим изменением угла зацепления.

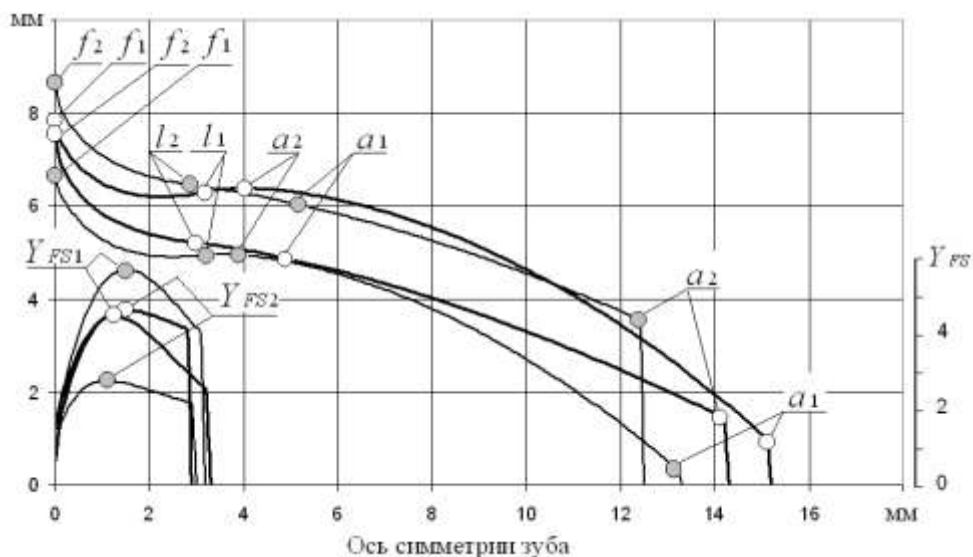


Рис. 7. Профили зубьев и эпюры коэффициентов формы

На рис. 7 показаны профили зубьев и эпюры коэффициентов формы $Y_{FS1,2}$ для рассмотренного примера и его промышленного аналога. Узловые точки на профилях аналога затемнены. У аналога толщина зуба шестерни меньше, а коэффициент формы больше, чем у зуба колеса. Такая форма зубьев ограничивает коэффициент перекрытия $\varepsilon_\alpha = 1,19$ и нагрузочную способность. В оптимизированном варианте $\varepsilon_\alpha = 1,46$ зубья шестерни и колеса

имеют близкие значения коэффициентов формы, расчетная нагрузочная способность увеличена для контактной прочности на 10%, а для прочности на изгиб – на 29%.

Следующим шагом оптимизации зацепления может стать некоторое увеличение чисел зубьев, что приведет к росту коэффициента перекрытия и нагрузочной способности для лимитирующих условий контактной прочности. Но в этом случае последует снижение нагрузочной способности для условий прочности на изгиб, которое потребует анализа перегрузочной способности зацепления и динамических характеристик привода.

На двумерном массиве переменных $z_1 \cdot z_2$, (рис. 8) можно выделить области чисел зубьев, существенно отличающиеся нагрузочной способностью, и поставить им в соответствие серии зацеплений: *тяжелую, среднюю и легкую*.

Тяжелая серия включает зацепления с $5 \leq z_1 \leq 16$ и $1 \leq \varepsilon_\alpha \leq 1,5$, которые отличаются высокой перегрузочной способностью: $t_F/t_H > 2$.

Средняя серия включает зацепления с $10 < z_1 < 23$ и $1,5 < \varepsilon_\alpha \leq 2,1$, у которых перегрузочная способность убывает с ростом z_1 : $1 < t_F/t_H \leq 2$.

Легкая серия включает зацепления с $z_1 \geq 23$; $\varepsilon_\alpha \approx 2.1$ и $t_F/t_H \approx 1$. Накопление опытных данных по сериям позволит оптимизировать и выбор $z_{1,2}$.

Синтез оптимизированных зацеплений и технологические операции двухпозиционного обката апробированы в проектных, консалтинговых, опытно-конструкторских и опытно-технологических работах. Установлено, что эвольвентные передачи большинства производителей имеют существенные резервы повышения расчетной нагрузочной способности.

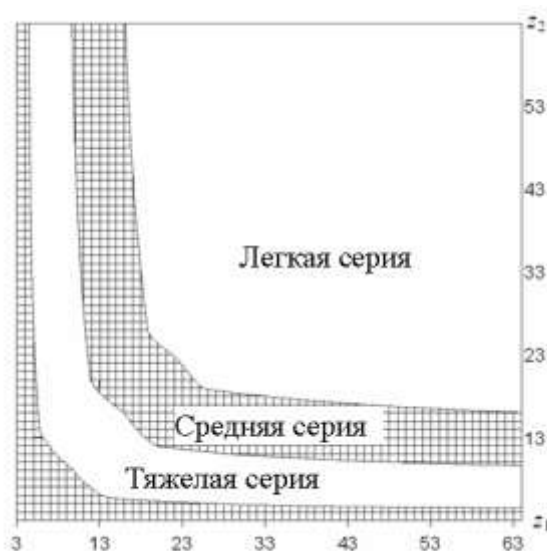


Рис. 8. Серии зацеплений для сочетаний чисел зубьев $z_1 \cdot z_2$

Перспективы конструктивно-технологической оптимизации связаны с типизацией и последующей стандартизацией эвольвентных передач с предельными показателями расчетной нагрузочной способности [16]. Естественным результатом стандартизации будет развитие высокоточных автоматизированных технологий производства зубчатых колес с переходом на новый уровень точности и качества.

Выводы

1. Конструктивно-технологическая оптимизация геометрических параметров эвольвентного зацепления обеспечивает предельные показатели нагрузочной способности, регламентируемые стандартами расчета на прочность.

2. Численное решение задачи оптимизации на массиве возможных сочетаний чисел зубьев сокращает инженерную разработку эвольвентных передач и создает предпосылки типизации и стандартизации зубчатых колес.

3. Зубчатые колеса оптимизированных передач могут быть изготовлены способом двухпозиционного обката универсальным, а в перспективе стандартным инструментом с постоянными параметрами ИПК для всех чисел зубьев.

4. Типизация и стандартизация деталей эвольвентных передач позволит развивать высокоточные автоматизированные технологии их производства, подобные технологиям подшипниковой и инструментальной промышленности.

Библиографический список

1. **Вулгаков, Э.Б.** Зубчатые передачи с улучшенными свойствами. Обобщенная теория и проектирование / Э.Б. Вулгаков. – М.: Машиностроение, 1974. – 264 с.
2. **Вулгаков, Э.Б.** Теория эвольвентных зубчатых передач / Э.Б. Вулгаков. – М.: Машиностроение, 1995. – 320 с.
3. **Вулгаков, Э.Б.** Компьютерное проектирование эвольвентных зубчатых передач в обобщающих параметрах / Э.Б. Вулгаков, В.Л. Дорофеев // Конверсия в машиностроении. 2002. № 6. С. 148-151.
4. **Каргин, П.А.** Синтез эвольвентных зубчатых передач при свободном выборе параметров зуборезного инструмента / П.А. Каргин. – Ростов-на-Дону: РГАСХМ, 1998. – 121 с.
5. **Kapelevich, A.L.** Tooth Fillet Profile Optimization for Gears with Symmetric and Asymmetric Teeth / A.L. Kapelevich, Y.V. Shekhtman // Gear Technology, september/october 2009. P. 73–79.
6. **Алипиев, О.Л.** Геометрический расчет эвольвентных передач обобщенного исходного контура // Теория Механизмов и Машин. 2008. № 2. Т. 6. С. 60–73.
7. **Гольдфарб, В.И.** Новые возможности автоматического проектирования эвольвентных цилиндрических передач с помощью блокирующих контуров / В.И. Гольдфарб, А.А. Ткачев // Машиноведение и детали машин: труды Всеросс. науч.-техн. конф., 10-12 октября 2008. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2008. С. 139–142.
8. **Бах, К.** Детали машин их расчет и конструкция: [пер. немецкого] / Д.М и М.С. Горфинкель, М.А. Гуковского; под ред. и с доп. И.М. Холмогорова, Н.С. Ачеркана. – Л.– М.: Государственное научно-техн. издательство по машиностроению, металлообработке и черной металлургии, 1932. Т. 1. – 720 с.
9. **Дорофеев, В.Л.** Прямой синтез авиационных эвольвентных зубчатых передач. Ч.1. Проектирование зацепления / В.Л. Дорофеев. – М.: ФГУП ММП «Салют», 2003. – 22 с.
10. Производство зубчатых передач газотурбинных двигателей: произв. – практ. издание / Ю.С. Елисеев [и др.]; под. ред. Ю.С. Елисеева. – М.: Высш. шк., 2001. – 493 с.
11. **ОСТ 100480–83.** Передачи зубчатые цилиндрические внешнего зацепления. Расчет геометрии в обобщающих параметрах. – 191 с.
12. **Попов, П.К.** Удельная нагрузочная способность механических передач / П.К. Попов, Л.А. Андриенко, А.Н. Петровский // Современные проблемы механики и автоматизации в машиностроении и на транспорте: труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева; НГТУ. Нижний Новгород. 2008. Т. 67. С. 101–108.
13. **Андриенко, Л. А.** Критерий удельной нагрузочной способности механических передач / Л. А. Андриенко, А.Н. Петровский // Изв. вузов. Машиностроение. 2008. №7. С. 22–32.
14. **Попов, П.К.** Обобщенная оценка совершенства механических передач. Справочник / П.К. Попов, Л.А. Андриенко, А.Н. Петровский // Инженерный журнал. 2009. № 7. С. 20–31; №8. С. 6–12.
15. Патент 2412026 РФ, МКП B23F5/14, B23F5/14. Способ образования зубчатых передач двухпозиционным обкатом / А.Н. Петровский // Изобретения. Полезные модели. Официальный бюл. 2011. № 5.

16. **Петровский, А.Н.** Предпосылки стандартизации цилиндрических зубчатых передач с улучшенными свойствами // Актуальные задачи машиноведения, деталей машин и триботехники: труды Международ. науч.- техн. конф. 27-28 апреля 2010 г. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т. – 2010. С. 90-94.

*Дата поступления
в редакцию 28.04.2011*

A.N. Petrovskiy

TO THE PROBLEM OF THE INVOLUTES GEAR PARAMETERS OPTIMIZATION

The optimization problem is formulated as existence and quality conditions system to operating gear and machine tool gears. The computational solution is got for two-dimensional array of gear tooth numbers. The optimized parameters maintain high load capacity in compliance with the standard strength calculation. The quality improvement is explained as the result of the optimized parameters standardization and two-position gear train technology.

Key words: involutes gear-tooth form system, parameters optimization, two-position gear train, load capacity, reliability and quality gear, standardization, noise, vibration, wheel gear.

УДК 621

Ю.Г. Кабалдин, С.В. Серый, Е.А. Симагина, А.В. Уткин

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВОВ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ НАНОСТРУКТУРНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА МЕТОДОМ ФУНКЦИОНАЛА ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приведены теоретические и экспериментальные исследования ряда составов наноструктурных покрытий.

Ключевые слова: наноструктурные покрытия, оптимизация составов, метод потенциала электронной плотности.

Работоспособность металлорежущего инструмента в автоматизированном производстве существенно влияет на качество обрабатываемой поверхности за счет изменения контактных условий в зоне резания, повышение стабильности процесса резания, а также на производительность обработки за счет сокращения времени резания на замену режущего инструмента.

В настоящей статье изложены результаты теоретических исследований и производственных испытаний режущих сменных многогранных неперетачиваемых пластин (СНП), организованных с целью оценки работоспособности режущего инструмента с различными видами наноструктурных покрытий. Научный подход к исследованию такого вида покрытий в настоящее время отсутствует.

Испытания проводились в условиях действующего производства. Были испытаны СНП формы TNMG 220408 из сплава ВК8, производства «Кировоградский завод твёрдых сплавов», с различным видами наноструктурных покрытий (пять видов), нанесённых для испытания в вакуумной установке для магнетронного плазменного распыления UniCoat 700 НПФ. В табл. 1 приведены результаты испытания пластин с покрытиями.

Таблица 1

Характеристики покрытий

№ п/п	№ опыта	Тип покрытия	Цвет покрытия	a , мкм	H , ГПа	E^* , ГПа	H/E	nIT , %	HV	Адгезия
1	48к АТ	AlTiN	Серый	3,1	44	367	0,127	75	4125	HF1
2	54к АТ-Т	AlTiN- TiN ml	Радужный	3,0	39	326	0,127	74	3686	HF1
3	84к АХ	AlCrN	Светло-серый	3,5	42	363	0,122	73	3931	HF1
4	57к АТ-Т	AlTiN-TiN ml	Радужный	3,5	41	369	0,118	71	3851	HF1
5	6к АТ	(Ti,C)N	Светло-коричневый	3,0	42	317	0,14	78	3932	HF1

Примечание: a – расчётная толщина; HIT – инденторная твёрдость; $E^*=E/(1-\nu^2)$; ГПа – приведённый модуль упругости (где E – модуль Юнга, $\nu=0,25$ – коэффициент Пуассона), HV – микротвёрдость по Виккерсу; nIT , % - доля работы упругой деформации (упругое восстановление).

Механические характеристики покрытия (табл. 1) оценивались методом наноиндентации образца-свидетеля в соответствии с DIN EN ISO 14577-1 с использованием системы

FISHERSKOPE ®H100C. Адгезия покрытия к основе оценивалась по адгезионному тесту Роквелла (стандарт VDI-3198): индентации образца-свидетеля с покрытием на твердомере Роквелла под нагрузкой 150 кгс и последующей визуальной оценкой результата индентации по 6-балльной шкале. Балл HF1 соответствует наивысшей адгезионной прочности.

Испытания образцов при резании проводились на операции токарной обработки детали 31029-1701040 – «Крышка первичного вала» (материал СЧ18 ГОСТ1412-85 – отливка 143-229 HB) (табл. 2).

Таблица 2

Данные об операции токарной обработки

№ п/п	Операция	05-токарная
1	Обработка	получистовая с ЧПУ
2	Оборудование	Станок токарный с ЧПУ СВ-141
3	СОЖ	АТМ СОЖ
4	Обрабатываемый размер	d116/d82
5	Частота вращения шпинделя	$n=380$ об/мин
6	Скорость резания	$V=100-130$ м/мин
7	Глубина резания	$a=0,5-1$ мм
8	Длина обработки	$L_{обр}=32$ мм
9	Минутная подача	$S_m=57$ мм/мин
10	Время резания	$T_{рез}=0,56$ мин

Испытания проводились по действующей методике М 37.102.0022. В процессе испытания фиксировалась величина фактической стойкости и износа СНП. Смена изношенных граней СНП производилась по технологическому критерию (при несоответствии обработанной поверхности заданным параметрам точности и шероховатости). После окончания испытаний проводилась статистическая обработка полученных результатов.

Стойкость СНП при обработке СЧ18

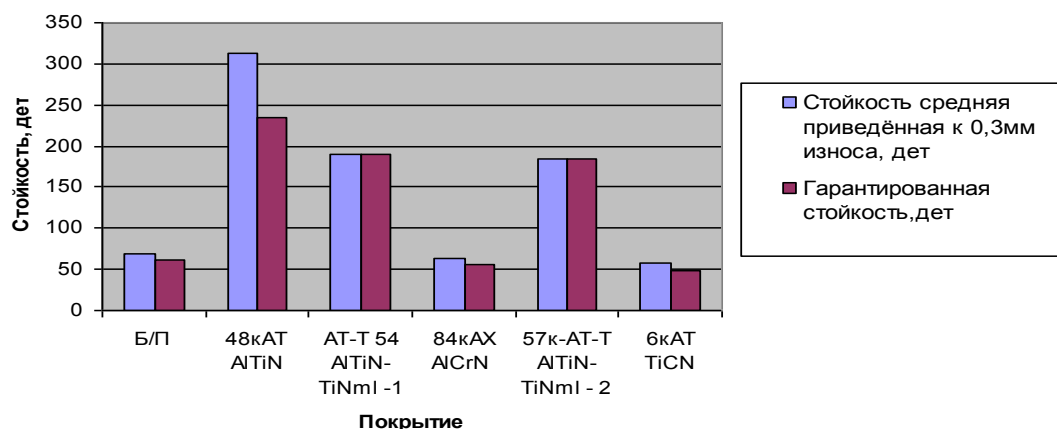


Рис. 1. Гистограмма, иллюстрирующая стойкость СНП с различными видами наноструктурных покрытий при обработке СЧ18

Оценка работоспособности СНП с различными покрытиями осуществлялась на основе сравнения их стойкости со стойкостью СНП без покрытия (рис. 1). Коэффициент стойкости СНП без покрытия принят равным 1. Из рис. 1 видно, что наибольшую работоспособность проявляет покрытие AlTiN. Этот вывод вытекает и из анализа табл. 3.

В табл. 3 приведены результаты математической обработки испытуемого инструмента с наноструктурными покрытиями.

Таблица 3

Результаты испытания вариантов покрытий

№ п/п	Покрытие	Количество опытов	Средняя приведённая стойкость, дет./грань	Гарантированная стойкость, дет./грань	Коэффициент стойкости (по сравнению с непокрытым образцом)	Коэффициент вариации средней приведённой стойкости
-	Без покрытия	9	69	61	1,00	0,09
1	AlTiN	9	312	234	4,54	0,20
2	AlTiN-TiNml1	9	189	145	2,75	0,18
3	AlCrN	9	64	55	0,92	0,10
4	AlTiN-TiNml2	9	185	161	2,68	0,10
5	(Ti,C)N	9	58	48	0,84	0,13

Таким образом, наилучшая работоспособность показал режущий инструмент с покрытием AlTiN. В связи с этим, в процессе дальнейшей работы были проведены электронно-микроскопические исследования и математическое моделирование составов покрытий методом функционала электронной плотности.

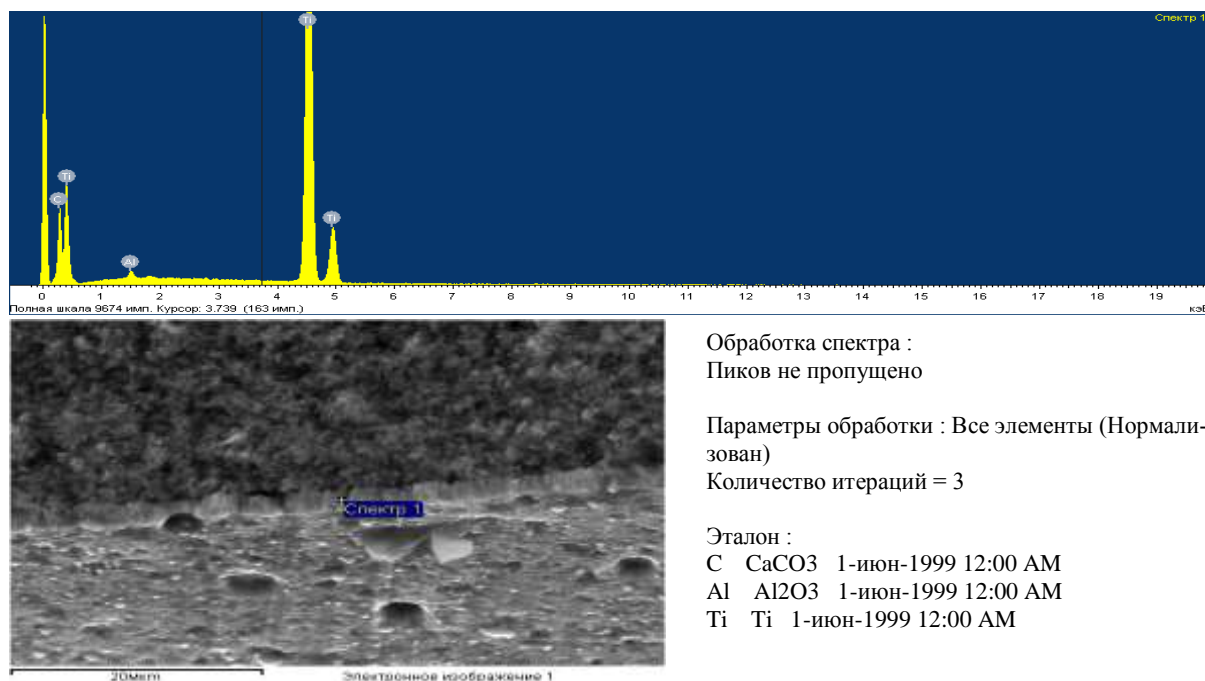
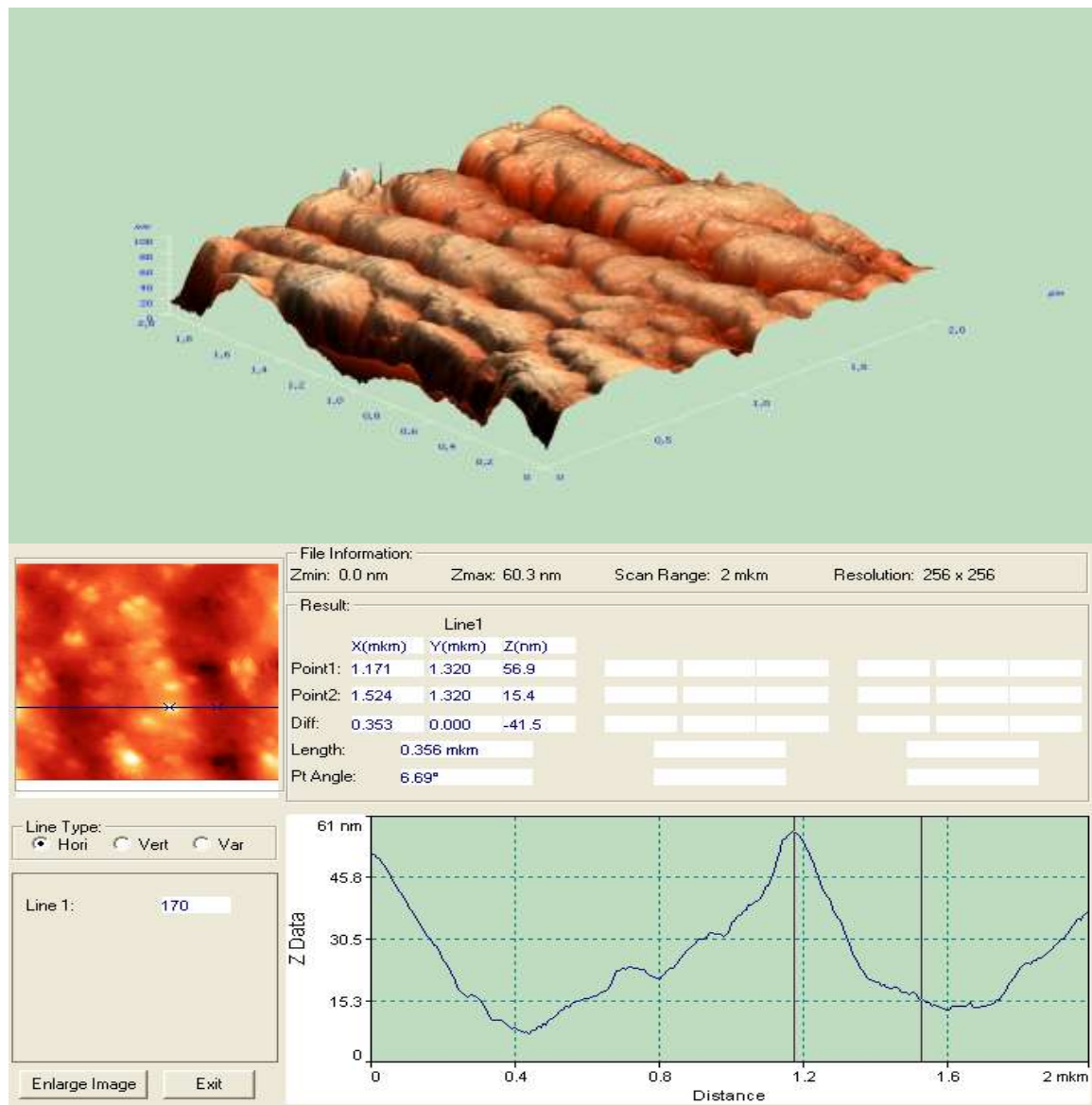


Рис. 2. Результаты микрорентгеноспектрального анализа покрытия AlTiN по толщине

Электронно-микроскопические исследования выполняли на растровом и атомном силовом микроскопах. На рис. 2 приведена электронная микрофотография с микрорентгеноспектральным анализом структуры покрытия по его толщине, которая составляла ~ 3,1 мкм.

На рис. 3 представлена электронная микрофотография структуры покрытия AlTiN, выполненная на атомном силовом микроскопе (АСМ), где приведены расчеты размеров зерен покрытия.

При разработке наноструктур с заданными функциональными свойствами путём моделирования атомной сборки необходимо учитывать положение и свойства каждого атома. Эта задача сейчас успешно решается путем квантово-механического математического моделирования из первых принципов (*ab initio*).



№	Средняя высота зерен
9	60,7412 ±14,5567 nm
10	87,5158 ±21,9893 nm
11	69,4618 ±15,3346 nm

Рис. 3. Результаты исследований покрытия AlTiN на атомном силовом микроскопе

Если в традиционных металлических материалах положение атомов в узлах кристаллической решётки определено, т.е. существует обычная повторяемость или простая трансляция элементарной ячейки, то в сложной наноструктуре и на границе наноструктур (как в случае с покрытиями) организацию атомов сложно задавать. Поэтому возникает вопрос: каковы принципы организации взаимодействий последовательностей расположения атомов в наноструктуре и её форма для обеспечения заданных функциональных свойств [2]?

Существует ряд методов оптимизации пространственной организации наноструктур

при расчёте минимума энергии межатомных связей в структуре. Однако в силу указанных требований, т.е. необходимость точного определения выгодного, с точки зрения энергетического состояния, координат каждого атома, существующие программные продукты оказываются достаточно эффективными при первопринципном математическом моделировании сборки наноструктур достаточно большого порядка (10^2 - 10^3 атомов). Кроме того, в силу прогресса в вычислительной технике и распараллеливании вычислений, становится возможным на основе расчёта множеств эффективных энергетических состояний (атомарных конфигураций с минимальной энергией) прогнозировать функциональные свойства наноструктур. В связи с этим, предлагаются новые подходы к прогнозированию функциональных свойств наноструктур и их дальнейшему эмпирическому обоснованию.

Разработаны и численно реализованы эффективные методы моделирования сложных наноструктур на основе теории функционала электронной плотности (ТФП, англ. DFT). Согласно ТФП [3], все электронные свойства системы, включая энергию, могут быть получены из электронной плотности (без знания волновых функций).

В программном коде программного комплекса *ab-initio* расчетов FHI (*fhi96md*, *fhi98md*) используется реализация ТФП на основе метода псевдопотенциала, позволяющего заменить часть базисных функций на некоторый эффективный потенциал. Такая замена производится автоматически при расчёте. От пользователя требуется выбрать псевдопотенциал требуемого типа. В работе используются псевдопотенциалы, предлагаемые по умолчанию в пакете FHI98pseudo.

В работе ставилась цель – провести *ab-initio* исследования применительно не только к однородному материалу, а к нанопокрыванию, а также исследовать прочностные свойства и затем эмпирически убедиться в достоверности расчетов. В связи с этим, проведены расчеты покрытий на основе AlTiN при взаимодействии с твердосплавной режущей пластинки из WC/Co (зерна карбида вольфрама в кобальтовой связке взаимодействуют с алюминием и титаном).

Теоретические расчеты также основаны на теории функционала электронной плотности (DFT) [3] в приближении обобщенного градиента (GGA), совмещенного с методом псевдопотенциалов, и базисе плоских волн. Для расчетов использовался программный пакет FHI96md, позволяющий оптимизировать атомную конфигурацию системы и находить ее полную энергию. Данный пакет представляет собой эффективный инструмент для проведения полноэнергетических расчетов многоатомных систем (молекулы, кристаллы, дефекты, поверхности) для широкого класса материалов.

Псевдопотенциалы для алюминия, кобальта и углерода были сконструированы по схеме Труллера-Мартинса. Для вольфрама s- и p-компоненты находились по методике Хамана [7], а d-компонента – по схеме Труллера-Мартинса. В качестве базиса были выбраны плоские волны, энергия обрезания в расчетах составила 40 ридберг. В качестве *k*-точки использовалась Γ -точка зоны Бриллюэна. Для вычисления обменной и корреляционной энергии использовалось градиентное приближение в форме, предложенной Педью и Вэнгом.

Псевдопотенциалы вычислялись с помощью пакета FHI98pp, они были испытаны на отсутствие ложных состояний (*ghost states*) и проверены на способность воспроизвести основные решеточные характеристики объемных материалов (постоянную решетки и модуль упругости), получены распределения электронной плотности состояний и СТМ-изображения поверхностей наноструктур (рис. 4 и рис. 5).

Вычисления показывают, что функциональные свойства результирующей электронной структуры зависят от следующих взаимодействий: на границе Co и Al, границе WC и Al, а также Co и Ti и WC с Ti.

Наилучшие результаты при расчетах достигнуты при поиске минимума энергии Co и Al, в том случае обеспечивается наибольшая сходимость расчетов электронной структуры. При расчете взаимодействий карбида вольфрама с алюминием (граница WC и Al) при переборе возможных пространственных атомарных конфигураций сходимости не достигнуто.

Таким образом, прочность нанесенного покрытия обеспечивается связями Co и Al, а не WC и Al, т.е. нанопокрывтие взаимодействует с кобальтовой связкой твердосплавной пластинки, а не с зернами карбида вольфрама.

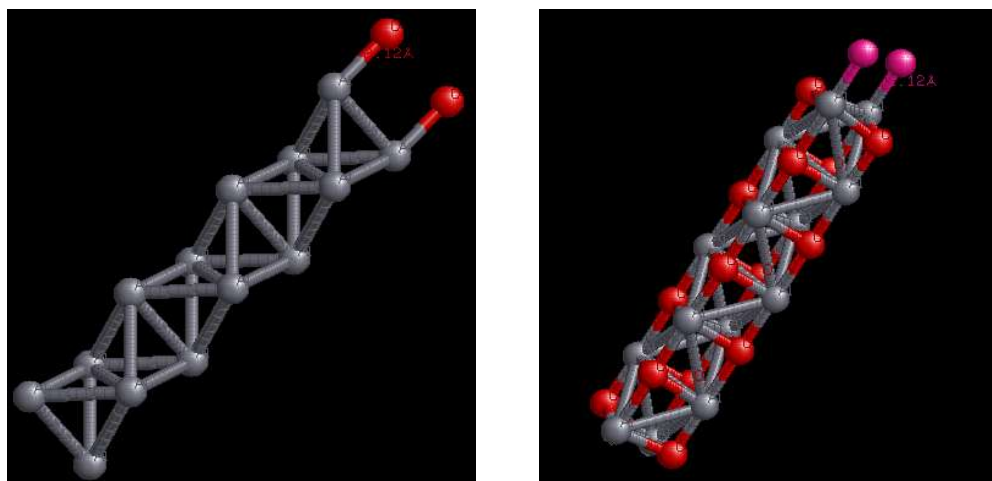


Рис. 4. Моделирование взаимодействий нанопокрывтия с компонентами твердосплавной подложки механообрабатывающего инструмента:
Co и Al(слева), WC и Al (справа)

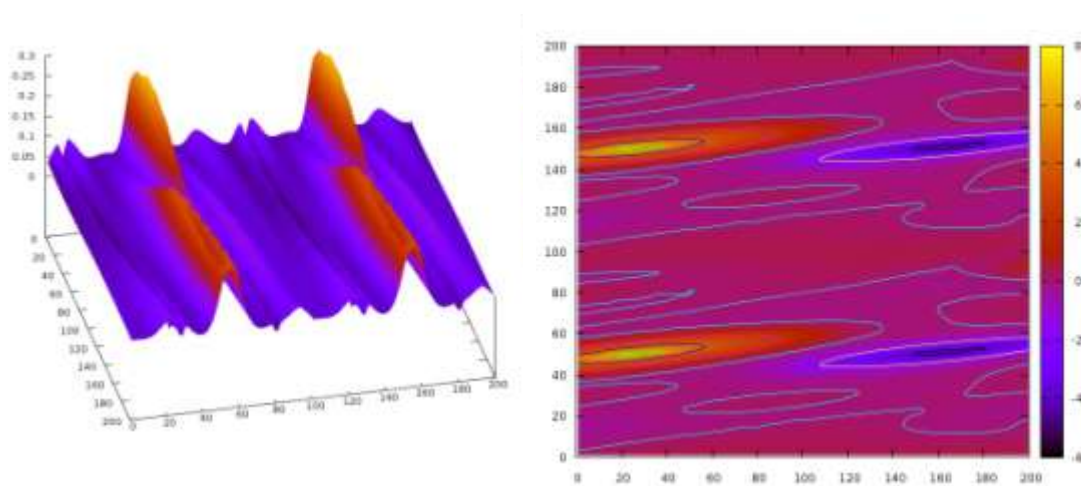


Рис. 5. Распределение электронной плотности состояния моделируемой наноструктур:
по 2 атома в каждой элементарной ячейке (слева), моделирование СТМ- изображения поверхности наноструктуры - STM simulation (справа)

В табл. 4 приведены расчеты E_{Π} общей энергии в рассматриваемых системах.

Таблица 4

Система	WC-Al	WC-Ti	Co-Al	Co-Ti	Al-Fe
E_{Π} , эВ	-	-	18,48	33,85	34,45

Известно, что химические связи между атомами устанавливаются путем перекрытия электронных орбиталей и стягиванием ядер атомов [1]. Из табл. 4 следует, что между карбидом вольфрама и атомами Al и Ti связь отсутствует. Химическая связь кобальта с алюминием более устойчива, чем кобальта с титаном, имеющим большую общую энергию. Расчеты показывают, что связь алюминия с железом также имеют большую энергию, чем Co – Al, что обеспечивает устойчивость покрытий на инструменте.

Приведенные квантово-механические расчеты требуют мощной вычислительной техники и времени. В связи с этим, также проводилось исследование эффективности распараллеливания квантово-механических расчетов (рис. 6), что сокращало время расчетов.

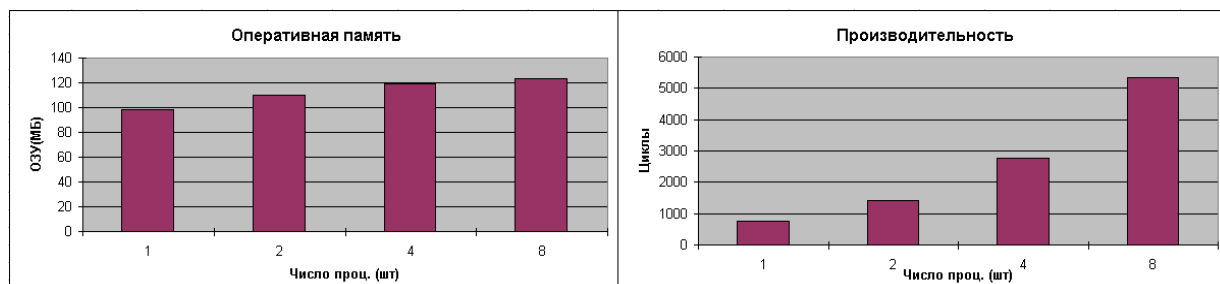


Рис. 6. Тестовое распараллеливание ab-initio расчетов (ПК на основе Intel i7, 8 ядер)

Получая достоверные экспериментальные данные, используя современные численные квантово-механические методы и эффективное распараллеливание, в дальнейшем требуется численно провести моделирование для постановок задач с многослойными нанопокрывтиями путем более сложных ab-initio расчетов на основе ТФП.

Библиографический список

1. **Кабалдин, Ю.Г.** Информационные модели наносборки наносистем и наноструктурирования материалов при внешнем механическом воздействии / Ю.Г. Кабалдин [и др.]. – Комсомольск – на – Амуре: КнАГТУ, 2009. – 212 с.
2. **Уолвертон, М.** Большая проблема малого // В мире науки и техники. 2009. №2. С. 14.
3. P. Hohenberg and W. Kohn, Phys. Rev. 136, B864, 1964.
4. F. Birch, J. Geophys. Res. 83, 1257, 1978.
5. M. J. Mehl, J. E. Osburn, D. A. Papaconstantopoulos, and B. M. Klein, Phys. Rev. B 41, 10311, 1990.
6. Jochen M. Schneider. Effect of transition metal additives on electronic structure and elastic properties of TiAl and Ti3Al. Phys. Rev. B 74, 174110, 2006.
7. D.R. Hamann. Phys. Rev. B 40, 2980 (1989).

Дата поступления
в редакцию 08.04.2011

Y.G. Kabaldin, S. V. Seryi, E.A. Simagina, A.V. Utkin

OPTIMIZATION OF COMPOSITION AND FUNCTIONAL PROPERTIES OF NANOSTRUCTURED COATINGS FOR CUTTING TOOLS USING THE DENSITY FUNCTIONAL

The article presents the results of theoretical and experimental studies several formulations of nanostructured coatings.

Key words: nanostructured coatings, optimization of the compositions, method of building the electronic density.

УДК 621.914

С.С. Добротворский, Е.В. Басова

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПЛОСКОСТИ СДВИГА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКЕ ЭВОЛЬВЕНТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ КОНЦЕВОЙ ФРЕЗОЙ СО СФЕРИЧЕСКИМ КОНЦОМ

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт

Рассматривается геометрическая модель процесса фрезерования эвольвентной поверхности концевой фрезой со сферическим концом. Описаны геометрические параметры плоскости сдвига с учётом параметров режущего инструмента и процесса резания. Приведены перспективы дальнейших исследований.

Ключевые слова: высокоскоростное фрезерование, скорость резания, плоскость сдвига, концевая фреза со сферическим концом, эвольвентная поверхность.

Современное машиностроение характеризуется повышением требований к геометрическим параметрам качества изготовления поверхностей деталей. При этом необходимо обеспечить не только заданные требования качества поверхности, но и их стабильность, которая определяется стохастическими характеристиками параметров геометрии поверхности детали, задаваемыми законом их распределения. На сегодняшний день перед производителями остро стоит вопрос о соотношении качества и себестоимости продукции. Решить эту задачу можно путём применения высокоскоростной лезвийной обработки. Однако для достижения высокого качества поверхностей сложной конфигурации при высокоскоростной обработке необходимо глубокое понимание и изучение явлений, протекающих в процессе резания и формирования микроструктуры.

Исследованиями обеспечения качества поверхностного слоя методом высокоскоростной обработки занимаются учёные всего мира. Основополагающими можно считать работы Г. Соломона, Т. Скопесека, Г. Шульца, Ю. Свободы, П. Хофмана и другие исследователей. Качество поверхностного слоя, а также методы его управления описаны в работах А.М. Сулимы, В.А. Шулова, А.Ю. Албагичева, В.А. Моисеева и др. В.В. Батуев в своей работе [1] обратил внимание на чистовую обработку пространственно-сложных поверхностей со ступенчатым припуском концевыми фрезами со сферическим концом при нормальных скоростях резания. В связи с тем, что именно концевые фрезы со сферическим концом являются основным применяемым инструментом при высокоскоростной обработке сложных поверхностей [2], становятся актуальными исследования, направленные на решение проблемы технологического обеспечения геометрических параметров качества деталей с такими поверхностями.

При управлении процессом формирования качественной поверхности по температурному критерию (учитывая, что мгновенное температурное поле формируется с учётом ряда геометрических, технологических и теплофизических параметров области резания и непосредственно режущего инструмента) в условиях обработки на высоких скоростях концевыми фрезами со сферическим концом необходимо в первую очередь сформулировать адекватную модель зоны контакта инструмента и обрабатываемой поверхности.

Необходимо учитывать тот факт, что применяемое современное программное обеспечение для геометрического моделирования только проверяет корректность траекторий инструмента и обрабатываемой детали, что недостаточно для оптимизации параметров процесса резания. Для определения оптимальных параметров резания необходимо сформулировать геометрическое представление модели, которая могла бы отображать физику процесса, включая силы резания и другие параметры.

Разрабатывая геометрическую модель процесса резания концевой фрезой со сфериче-

ским концом, необходимо учитывать её главное отличие от резания торцевой фрезой – сложность точного описания геометрии среза и плоскости сдвига, так как точки вдоль режущей кромки образуют трохоидные кривые. Сам процесс резания инструментом такого типа обусловлен сложными зависимостями между параметрами механической обработки (подача на зуб, глубина и ширина резания) и технологическими параметрами (толщина стружки, эффективная площадь резания). Вторым немаловажным отличием использования в механической обработке концевых фрез со сферическим концом является скорость удаления материала (скорость резания), которая в разных точках рабочей поверхности режущей кромки будет различна: уменьшаться в направлении к вертикальной оси инструмента и, соответственно, увеличиваться по направлению к максимальному эффективному диаметру фрезы.

На рис. 1 представлена геометрическая модель концевой фрезы со сферическим концом.

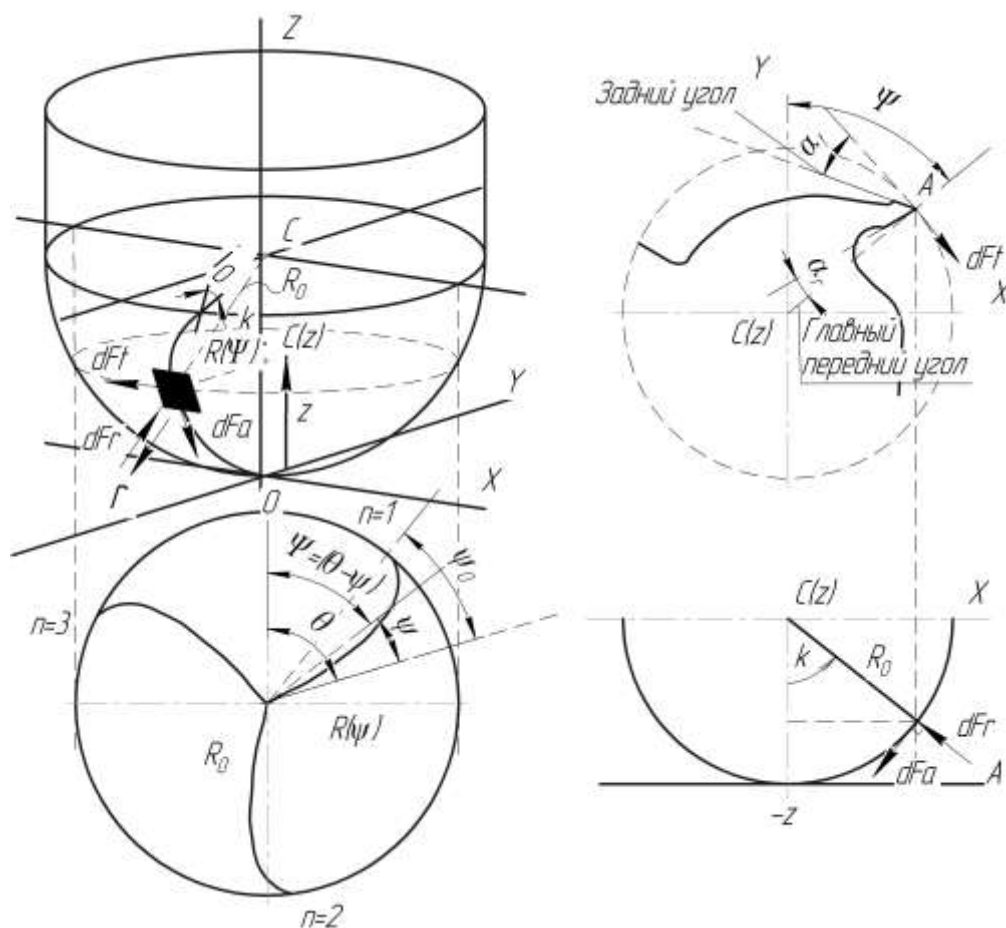


Рис. 1. Геометрическая модель концевой фрезы со сферическим концом:

i_0 – угол подъёма винтовой линии по поверхности сферической формы в точке пересечения канавки и хвостовика; R_0 – радиус фрезы; $R(\psi)$ – радиус инструмента в плоскости $x-y$ в некой точке, определяемой ψ ; θ – угол поворота инструмента по часовой стрелке относительно оси Y ; ψ_0 – максимальный угол сдвига между вершиной инструмента ($z=0$) и самой высокой точки режущей кромки ($z=a$); k – угол в вертикальной плоскости между точкой на канавке и осью Z ; dF_t, dF_r, dF_a – дифференциальные силы резания в тангенциальном, радиальном и осевом направлении зуба

Радиус сферической части фрезы в касательной плоскости $x-y$ к точке на спиральной канавке, расположенной под углом ψ , может быть определён следующим образом [3]:

$$R(\psi) = R_0 \sqrt{1 - (\psi \cos^2 i_0 - 1)^2}. \quad (1)$$

Уравнение, описывающее положение точки канавки на высоте z , связанное с дуговой координатой ψ в глобальной системе координат, было описано в работе [3]:

$$\Psi_j(z) = \theta + (j-1) \cdot \phi_p - \frac{z}{R_0} \cdot \tan i_0, \quad (2)$$

где j – иммерсионный угол канавки, изменяющийся вдоль осевой подачи; $\phi_{p=2\pi/n}$ – угол подъёма винтовой линии режущего инструмента (n – число зубьев фрезы).

Для оценки площади контакта заготовки и инструмента предварительно необходимо смоделировать геометрическое представление о плоскости сдвига при обработке концевой фрезой со сферическим концом.

На основании концепции зарубежных учёных [4, 5] о геометрических моделях плоскостей сдвига при обработке фрезами со сферическим концом в горизонтальном и вертикальном направлении, представленных в работе [6], авторами разработана модель прогнозирования плоскости сдвига при обработке сложной поверхности на примере обработки эвольвентной поверхности.

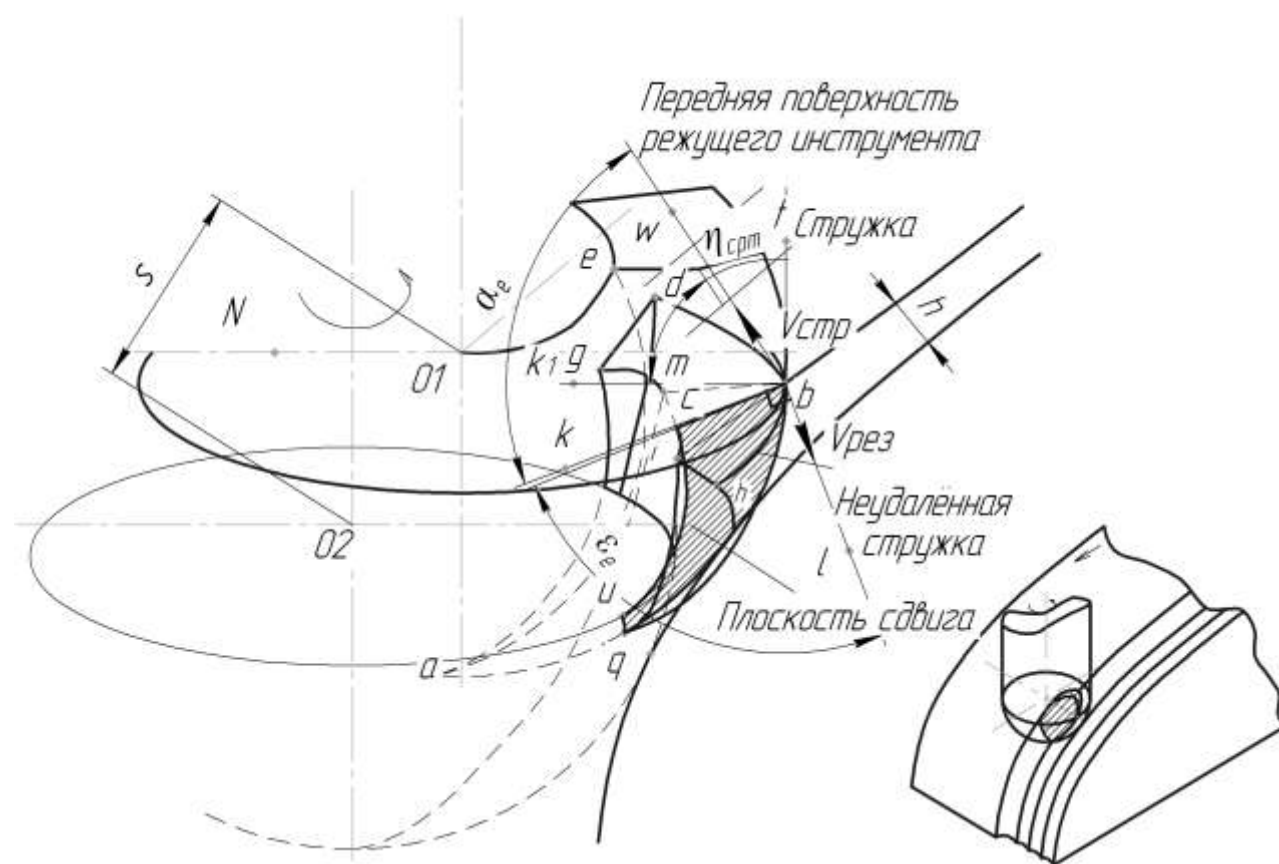


Рис. 2. 3D-модель перемещения концевой фрезы со сферическим концом по эвольвентной поверхности вверх

На рис. 2 и рис. 3 представлены трехмерные геометрические модели процесса резания (при встречном фрезеровании) эвольвентной поверхности. Образование стружки происходит в процессе сдвига в плоскости сдвига (геометрическая область abc) завитой режущей кромкой. Скорость резания $V_{рез}$ является касательной к контактной точке недеформированной стружки и режущей кромки фрезы со сферическим концом. Минимальная и максимальная эффективная скорость резания (скорость граничных точек рабочей режущей кромки) может быть определена следующим образом [7]:

$$V_{eff.max} = \frac{2\pi \cdot N \cdot R \cdot \sin\left(\theta + \arccos\left(\frac{R-h}{R}\right)\right)}{1000}, \quad (3)$$

$$V_{eff.min} = \frac{2\pi \cdot N \cdot R \cdot \sin\left(\theta - \arcsin\left(\frac{f_z}{R}\right)\right)}{1000}, \quad (4)$$

где R – радиус сферической части фрезы; θ – угол наклона обрабатываемой поверхности относительно горизонтальной плоскости (рис. 4); h – глубина резания (величина припуска); f_z – подача на зуб; N – скорость вращения шпинделя.

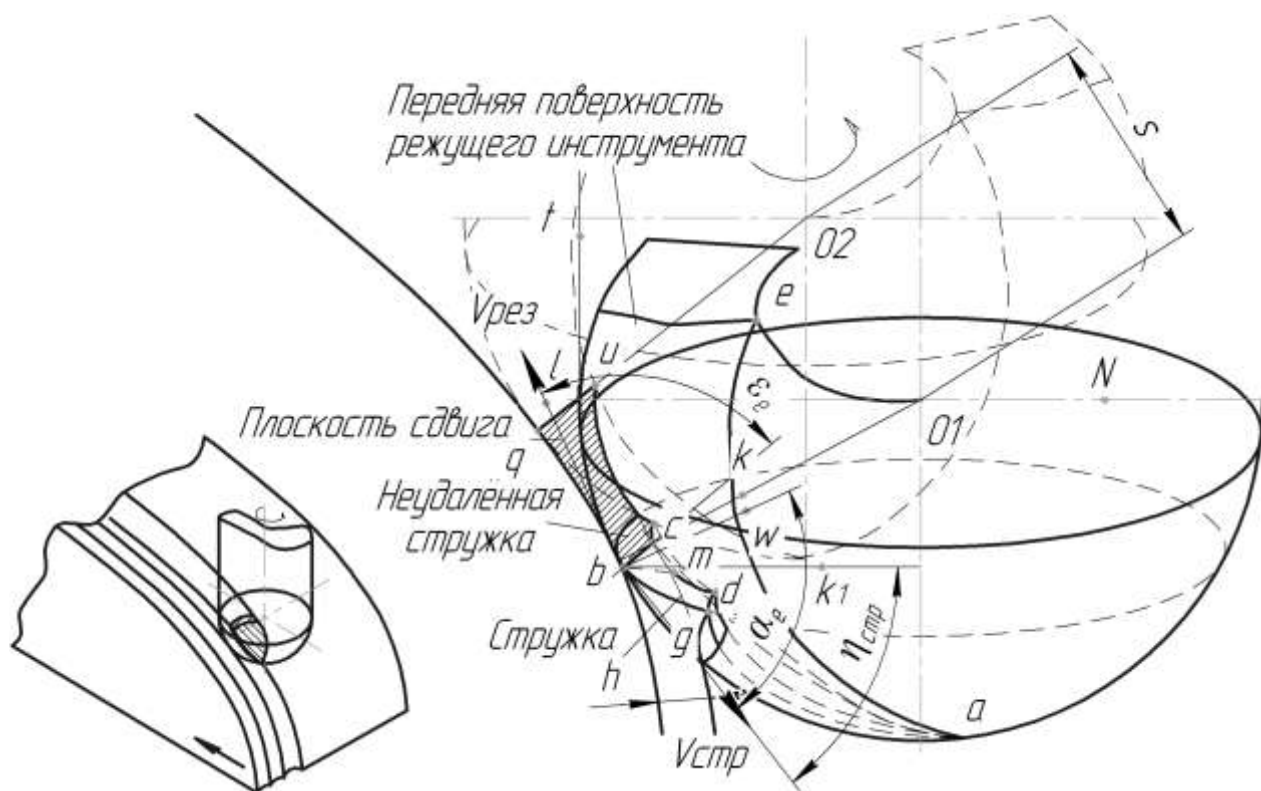


Рис. 3. 3D модель перемещения концевой фрезы со сферическим концом по эвольвентной поверхности вниз

Стружка вытекает из передней поверхности режущего инструмента со скоростью схода стружки $V_{стр}$ и углом $\eta_{стр}$ относительно линии bk_1 на передней поверхности режущего инструмента tbk_1 . Линия bk_1 параллельна горизонтальной оси ON . В плоскости kbl угол между параллельным направлением плоскости сдвига и касательной из точки контакта b (направление скорости $V_{рез}$) определяется как эффективный угол сдвига ϵ_e . В плоскости wbl рабочий передний угол α_e (угол kbw , рис 3 и рис. 4) может быть определён как угол между передней поверхностью режущего инструмента и направлением линии bk , которая, в свою очередь, вертикально направлена к скорости резания $V_{рез}$.

В таком процессе резания толщина неудалённой стружки (сечение aib) срезается винтовой режущей кромкой (кривая ab), тем самым образуя эффективную зону трения (область amb) передней поверхности режущего инструмента и накапливающейся завивающейся стружки (сечение adg). Следует отметить, что режущая кромка распространяется от точ-

ки a и до высшей точки b , а не от центральной точки, расположенной на оси режущего инструмента и периферии режущей кромки.

Используя геометрию (рис. 2, рис. 3) и геометрию режущего инструмента (рис. 1), представим плоскости сдвига (рис. 4), формирующиеся в процессе высокоскоростного фрезерования концевой фрезой со сферическим концом.

На рис. 4, a плоскость сдвига представлена заштрихованной областью, которая разделена на две части $\Pi_{1,bb}$ и $\Pi_{2,bb}$ в соответствии с направлением схода стружки относительно проецируемой плоскости (угол $\eta_{c.c}$). Взаимоотношение параметров передней поверхности режущего инструмента определим следующим уравнением:

$$\eta_{c.c} = \tan^{-1} \cdot \left(\frac{(\tan \eta_{c.т} - \sin \alpha_r \cdot \tan i) \cdot \cos i}{\sin \alpha_r} \right), \quad (5)$$

где α_r – главный передний угол, i – угол наклона режущей кромки (рис. 1).

В соответствии с обозначениями (рис. 4, a) определим площадь плоскости сдвига при резании эвольвентной поверхности:

$$\Pi = \Pi_{1,bb} + \Pi_{2,bb} = \int_{\varphi_2}^{\varphi_1} f_1(\varphi) ds + \int_{\varphi_0}^{\varphi_2} f_2(\varphi) ds. \quad (6)$$

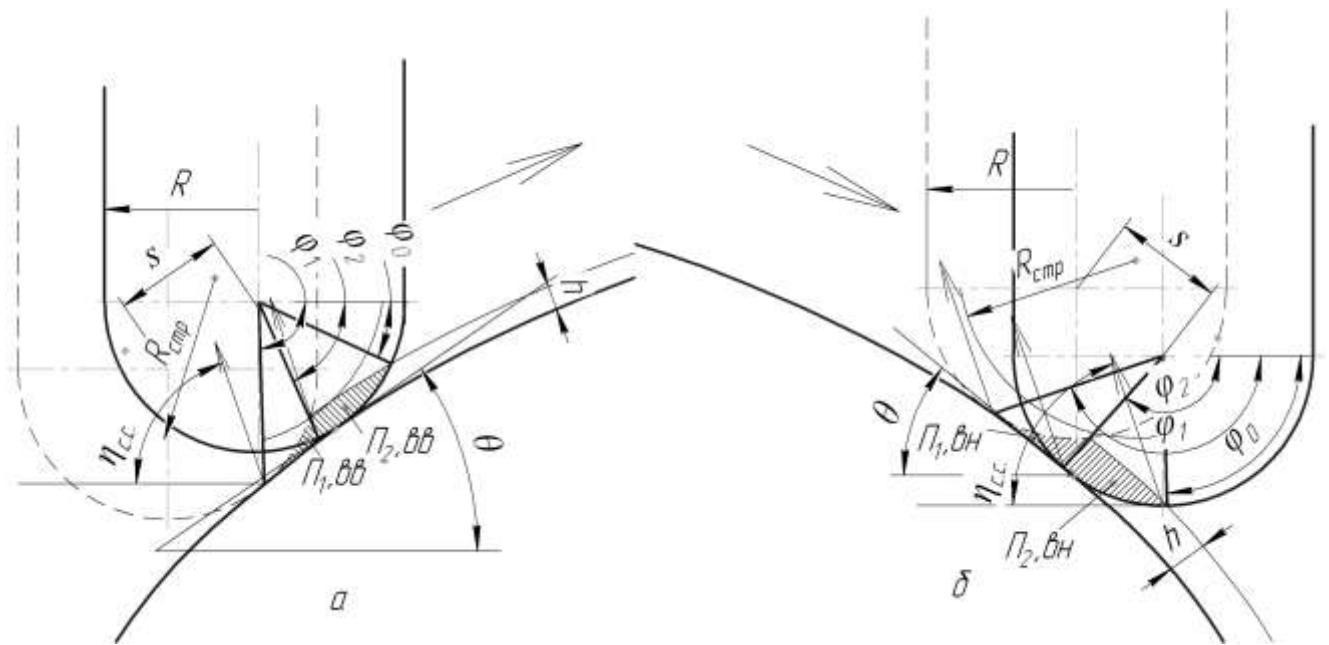


Рис. 4. Геометрическое представление площади плоскости сдвига при высокоскоростной обработке концевыми фрезами со сферическим концом

В соответствии с обозначениями (рис. 4, b) определим площадь плоскость сдвига, соответствующую рис. 3:

$$\Pi = \Pi_{1,вн} + \Pi_{2,вн} = \int_{\varphi_2}^{\varphi_1} g_1(\varphi) ds + \int_{\varphi_0}^{\varphi_2} g_2(\varphi) ds. \quad (7)$$

Результатом данного исследования является определение связи и взаимоотношений геометрии углов и режимов резания с плоскостью сдвига и площадью эффективного трения, что в перспективе позволит определить область эффективного трения передней поверхности режущего инструмента и срезаемого материала и сформулировать модели сил резания при

процессе высокоскоростного фрезерования сложнопрофильных поверхностей концевыми фрезами со сферическим концом с учётом энергетических составляющих: энергии сдвига в единицу времени и энергии трения в единицу времени.

Библиографический список

1. **Батуев, В.В.** Повышение производительности и точности чистового фрезерования пространственно-сложных поверхностей со ступенчатым припуском: дисс. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Батуев Виктор Викторович; Юж.-Урал. гос. ун-т. – Ч., 2007. – 21 с.
2. Technical Handbook // информ.-аналит. журн. – Е. : ОТС-Технологии, 2010. – 145 с.
3. **Lee, Peter Pak Wing** Mechanics and dynamics of ballend milling / Peter Pak Wing Lee. – C: The university of british Columbia. 1995. – 163 p.
4. **Usui, E.** Analytical prediction of three dimensional cutting process. Part 2. Chip formation and cutting force with conventional single-point tool [Text] / E. Usui, A. Hirota // Trans. ASME, J. Eng. 1978. – Ind. 100. – P. 229–235.
5. **Usui, E.** Analytical prediction of three dimensional cutting process. Part 1: basic cutting model and energy approach [Text] / E. Usui, A. Hirota, M. Masuko // Trans. ASME, J. Eng. 1978. – Ind. 100. P. 222–228.
6. **Tsai, C.L.** Prediction of cutting forces in ball-end milling by means of geometric analysis [Text] / C.L. Tsai, Y.S. Liao // journal of materials processing technology. 2008. № 205. – P. 24–33.
7. **Daymi, A.** Influence of workpiece inclination angle on the surface roughness in ball end milling of the titanium alloy Ti-6Al-4V [Text] / A. Daymi, M. Boujelbene, J.M. Linares, and etc. // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. 2009. Vol. 35 (1). P. 79–86.

*Дата поступления
в редакцию 04.05.2011*

S.S. Dobrotvorskyy, E.V. Basova

GEOMETRIC PARAMETERS OF SHEAR PLANE IN HIGH SPEED MACHINING INVOLUTE SURFACE BY BALL-END-MILL CUTTER

We propose a geometric model of the milling process involutes' surface by ball-end-mill cutter. The geometric parameters of the shear plane within the parameters of the cutting tool and cutting process was described. The prospects for further research were given.

Key words: high-speed milling, cutting speed, shear plane, ball-end-mill cutter, involutes' surface.

УДК 621

Ю.Г. Кабалдин, О.В. Кретинин

ВРЕМЯ КАК ИНФОРМАЦИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены информационные истоки понятия времени. Обоснована квантовая (дискретная) природа времени и информации. Изложен квантовый механизм генерации информации в мозге человека и её усиление до классической в виде образов в его сознании об устройстве мира. Предложено измерять время в количестве генерированных квантов информации при совершении элементарных событий.

Ключевые слова: время, информация, эволюция Вселенной.

Время занимает центральное место в быту, физике, химии, биологии и особенно в космологии. Столетиями оно привлекало пристальное внимание философов, художников и ученых в различных областях.

Несмотря на то, что существование стрелы времени, т.е. различия между прошлым и будущим в повседневной жизни очевидно, фундаментальные законы физики от классической до квантовой, а также теория относительности не содержат в себе различия между прошлым и настоящим. Настоящего момента в них нет, а потому нет и течения времени. Иными словами, имеет место Т-симметрия.

В работе [1] поставлен вопрос: является ли время иллюзией, будет ли разрыв между временем физиков и временем повседневной жизни, углубляться и расширяться? Однако мы полагаем, что проблема не в самом времени как таковом, а в реальности информации о том или ином событии во времени. Или иначе, является ли наша информация о внешнем мире реальностью? Информационная природа времени очевидна. Проблема времени включает также и механизм восприятия реальности как на микроскопическом, так и на классическом уровне в нашем сознании, а также в каких единицах должна измеряться информация.

Физика И. Ньютона долгие годы являлась основой космологии. Пространство и время считалось абсолютным. Теория относительности А. Эйнштейна устанавливает взаимосвязь между материей, с одной стороны, и геометрическими свойствами пространство-время – с другой. Решение нестационарных уравнений общей теории относительности А. Эйнштейна вначале А. Фридманом, затем Ж. Леметром, Г. Робертсоном и А. Уокером показало, что Вселенная не статична, а расширяется. Впоследствии этот вывод подтвердил Э. Хаббл, что позволило наделить её возрастом ($\sim 13,7$ млрд лет), т.е. стрелой времени. А. Эйнштейном предложено измерять время с использованием часов [2, 3].

Таким образом, проблема стрелы времени на фундаментальном уровне и повседневном восприятии времени по-прежнему остается логически не завершенной.

По мнению И. Пригожина [4], наш повседневный жизненный опыт показывает, что между временем и пространством существует коренное различие. Мы можем передвигаться из одной точки пространства в другую, но не в силах повернуть время вспять.

Ощущение невозможности обратить время в прошлое приобретает особую научную значимость. Допустимые (разрешенные) состояния отделены от состояний, запрещенных вторым началом термодинамики бесконечно большим энтропийным барьером. В связи с этим, в классической физике имеется немало других барьеров. Одним из них является скорость света. По современным представлениям, информация не может распространяться быстрее скорости света. Существование этого барьера весьма важно для придания смысла причинности времени. По мнению И. Пригожина, энтропийный барьер является предпосылкой, позволяющей также придать физический смысл связи между классической и квантовой теорией [4].

В настоящее время есть основание утверждать, что необратимость существует и на микроскопическом уровне и играет важную роль. Следовательно, в микроскопическом мире должно быть нечто проявляющееся на макроскопическом уровне, подобное необратимости. Чтобы построить квантовую модель события, изменяющегося со временем, мы должны изучить квантовое состояние системы. Именно ее эволюция должно задавать стрелу времен. Экспериментальные данные требуют уточнения основных положений квантовой физики.

В связи с этим, рассмотрим некоторые положения квантовой теории, квантовые истоки времени, имеющие информационную основу, а также информационную модель эволюции Вселенной. Покажем, что Вселенная как квантовая система генерирует информацию, которая воплощается в виде законов природы, определяющих в том числе и истоки понятия времени на микроскопическом уровне.

В классической физике, причиной необратимости является глобальная неустойчивость динамических процессов, т.е. возникновение динамического хаоса [4]. При попытках осуществить аналогичную программу в квантовой механике возникли трудности. Выяснилось, что замкнутые квантово-механические системы динамически устойчивы. Это значит, что при малом изменении начальных условий возмущения со временем не нарастают. Интегральная мера начальных отклонений остается постоянной и не увеличивается со временем [6]. Квантовая неопределённость В. Гейзенберга усугубляет исследование этого процесса.

Выяснено, что законы природы в нашей Вселенной отличаются от других возможных вариантов. Иными словами, при образовании нашей Вселенной был выбран один из многих вариантов, т.е. возникла информация. Росла ли она по мере эволюции?

Правомерен также вопрос, почему мы существуем именно в этой Вселенной, а не в какой-либо другой? Ответ дан в работе [5]. Показано, что «мы», т.е. живые существа, могли возникнуть только в такой Вселенной, основу которой составляет органика.

При возникновении жизни и дальнейшей эволюции биосферы также возникала информация. Это процессы неотделимы от эволюции Вселенной, космоса.

В связи с этим, рассмотрим некоторые механизмы формирования информации, ее генерации, направления ее течения (в будущее или прошлое), а также связь информации со временем на микро- и макроскопическом уровнях.

Традиционно теория информации занимается преимущественно проблемами передачи информации и ее хранения. Вопрос о том, каким образом генерируется информация, стал изучаться сравнительно недавно.

Во всех случаях для возникновения информации необходимо сочетание условий: наличие хаоса (для случайности выбора) и запоминания. Таким сочетанием свойств обладают не все динамические системы.

Чтобы динамическая система являлась информационной и могла генерировать информацию, она должна удовлетворять следующим условиям [6]:

1) система должна быть мультистабильной (по крайней мере, бистабильной). Это означает, что у системы должно быть $n \geq 2$ устойчивых стационарных состояний и может быть осуществлен выбор одного из них;

2) выбранное состояние может считаться запомненным, если оно сохраняется достаточно долго. Для этого необходимо, чтобы оно было абсолютно устойчивым.

Важный вывод, который необходимо сделать, а точнее подтвердить исходя из нашего анализа, состоит в том, что информация дискретна и всегда предстаёт в виде формы, структуры, взаиморасположения окружающих нас предметов и явлений в пространстве и во времени. Это прежде всего означает, что информация неотделима от пространства. Информацию мы всегда наблюдаем в пространстве и во времени. Так, в биологических системах генетическая информация от ДНК передается белкам при их синтезе и в виде формы (первичная, вторичная, третичная и четвертичная форма белков). Именно форма, а не структурный состав в большей степени определяет функциональные свойства белков. Особенно это наглядно видно при морфогенезе, где информация реализуется в виде пространственного формиро-

вания различных органов организма. В ряде работ показано, что свойства белков в живых организмах необратимы во времени.

Генетическая информация – продукт длительной эволюции (около 4 млрд лет), приведшей к созданию органических молекул, способных к усложнению и росту в них информации, определивших свойство к самовоспроизведению и появлению живых организмов.

Проблема сознательного восприятия внешнего мира и времени, по мнению Р. Пенроуза [7], тесно связана с решением проблем квантовой механики, в частности, с проблемой скачкообразного прерывания эволюции квантовой системы при измерении.

Среди многих физиков, как уже было отмечено, распространен взгляд, что квантовая механика вовсе не дает нам никакой картины «реальности»! Формализм квантовой механики, с их точки зрения, следует рассматривать именно как математический формализм. Этот формализм, как считают многие физики-теоретики, не говорит нам в сущности ничего о действительной реальности нашего мира, а всего лишь позволяет вычислять вероятности альтернативных реальностей, которые могли бы возникнуть. Такой подход к отражению реальности на микроскопическом уровне заложил один из отцов-основателей квантовой механики Н. Бор.

По мнению Р. Пенроуза [7], основная трудность, которая стоит перед теоретиками в области квантовой физики и приводит многих из них к подобным взглядам, – это конфликт между двумя квантовыми процессами U и R (где U – есть детерминированный процесс унитарной эволюции (поскольку он описывается уравнением Шредингера), а R – редукция квантового состояния, которая имеет место, когда производится «измерение». U – процесс, описывает четко очерченную эволюцию определенной физической величины – вектора состояния $|\psi\rangle$, которая детерминированным образом описывается некоторым дифференциальным уравнением в частных производных; при этом временная эволюция, описываемая уравнением Шредингера).

В то же время R – процесс представлял для физиков нечто совершенно новое – скачкообразное случайное изменение состояния $|\psi\rangle$, при котором определению подлежат только вероятности различных исходов. Однако если бы информация о наблюдаемом мире описывалась простой величиной $|\psi\rangle$, меняющейся в соответствии с процедурой U самой по себе, то у физиков не возникло бы серьезных сомнений в том, чтобы считать эту процедуру описывающей «физически реальный» процесс эволюции «физически реальной» величины $|\psi\rangle$.

Однако наблюдаемый мир ведет себя не так. Вместо этого перед нами сложная комбинация, состоящая из U -процессов, прерываемых время от времени совершенно иным R -процессом! Поэтому физикам гораздо труднее считать, что величина $|\psi\rangle$, действительно может служить описанием физической реальности. Вопрос о том, как R -процесс может возникать в условиях, когда состояние изменяется в соответствии с U – эволюцией, составляет проблему измерения или, иначе, как парадокс измерения – в квантовой механике.

Чередование этих двух совершенно различных процессов (рис.1), считает Пенроуз, должно проявляться и в весьма необычном поведении Вселенной. Можно предположить, что в действительности это есть приближенное описание чего-то пока неизвестного. Возможно, что существует некоторое более общее описание чего-то пока не известного. Может быть, существует некоторое более общее математическое уравнение или некоторый принцип эволюции когерентного типа, по отношению к которому U и R являются предельными случаями? R -процесс несимметричен во времени и содержит элемент термодинамической необратимости, так как каждый раз при R -процессе происходит рост энтропии. Это, на наш взгляд, важный вывод, который существенно меняет суть физики и истоков понятия времени на микроскопическом уровне. Теперь оно, во-первых, необратимо. Во-вторых, оно имеет информационную природу, так как каждое изменение квантового состояния – это событие, а не только причинности. Как видно на рис. 1, информация о квантовом состоянии системы является дискретной, т.е. периодической, и что особенно важно, квантовые системы генерируют информацию каждый раз, когда происходит R -процесс.

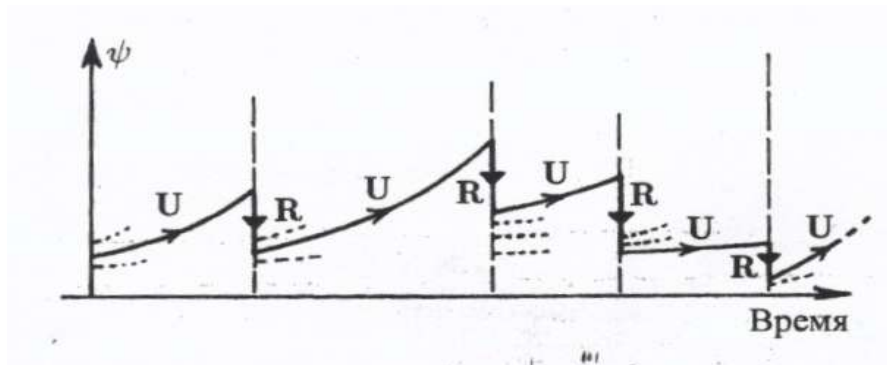


Рис. 1. Согласно общепринятой квантовой механике, временная эволюция состояния ψ физической системы состоит в чередовании двух совершенно различных процессов: унитарной (шредингеровской) эволюции U (непрерывной и детерминированной) и редукции состояния (скачкообразной и вероятностной)

Пенроуз [7] отмечает, что мы не замечаем временной асимметрии в той части квантовой теории, которая относится к U -процессам, в R -процессах имеется существенная временная асимметрия. Следовательно, требуется некоторый вариант R -процесса, чтобы можно было заменить симметричную квантовую суперпозицию вероятностной смесью менее симметричных состояний. R -процесс, как видно на рис. 1, изменяет квантовое состояние и меняет направление течения времени.

Редукцию квантового состояния частиц Пенроуз [7] связывает с гравитационной энергией E_G . Согласно Пенроузу, гравитационные эффекты обеспечивают объективную R -процедуру (объективную редукцию, ОР), сменяющую U -процесс. Гравитационная ОР возникает спонтанно и не требует участия какого-либо разумного наблюдателя. В обычных условиях происходит частое повторение ОР, и это приводит к классическому миру, который в качестве отличного приближения появляется на больших масштабах. Поэтому нет необходимости привлекать какого-либо разумного наблюдателя, чтобы обеспечить редукцию квантового состояния (R) при проведении измерения.

Следовательно, считает Пенроуз, мы сталкиваемся с трудностями при попытке применить наши рассуждения к отдельным частицам, если требует точной стационарности обоих состояний $|\chi\rangle$ и $|\phi\rangle$, поскольку не существует стационарных решений обычного уравнения Шредингера для одной свободной частицы (с положительной массой), спадающих на пространственной бесконечности. Разгадка состоит в том, что, выписывая уравнение Шредингера, мы должны учитывать гравитационное поле частицы. Здесь не требуется, чтобы само гравитационное поле было квантовым, его действие описывается ньютоновской гравитационной потенциальной функцией Φ , источником которой служит так называемое «математическое ожидание» [7].

Проведенный анализ позволяет утверждать, что квантовые системы являются мультистабильными информационными системами, благодаря суперпозиции квантового состояния и могут генерировать информацию во времени. Как следует из рис.1, информация об изменении квантового состояния является периодической, причем R -процесс при этом изменяет направление течения времени, а следовательно, информации. Квантовое состояние системы – это информация во времени и в пространстве. Структура Вселенной по мере её эволюции усложнялась (возникали звёзды, Галактики, чёрные дыры и т.д.), т.е. росло число квантовых событий, росла её масса. Следовательно, Вселенная, расширяясь, генерирует информацию по мере её эволюции и увеличивает массу.

Однако в научной литературе отсутствуют сведения, подтверждающие, что информация адекватно описывает временную эволюцию Вселенной. На наш взгляд, сопоставляя временную эволюцию информационного содержания отдельных частиц (атомов) материи, например от роста их массы в таблице Д.И. Менделеева, можно разработать и информацион-

ную модель эволюции Вселенной [8]. Их сопоставление, в отличие от работы [1], является более обоснованной, о чем указывалось ранее.

Иными словами, мы используем подход, где время является скрытым [1]. Например, на макроуровне (в масштабе Вселенной) время отсутствует, т.е. она статична, а ее подсистемы (отдельные части) генерируют информацию о событиях, являясь часами для Вселенной в целом. Рассмотрим это на примере изменения эволюции информационного содержания в атомах в таблице Д.И. Менделеева.

При сопоставлении информации о квантовом состоянии частиц будем исходить из их информационной энтропии, имеющей вероятностную основу [11]. В качестве квантового события примем информацию об образовании химических элементов – атомов, составляющих основу материи Вселенной, т.е. их временную эволюцию. Тогда время следует рассматривать как последовательное чередование элементарных событий, т.е. процесс дискретного генерирования информации (рис. 1) в результате *R*-процессов.

Существование атомов - это реальность, подтверждённая многочисленными исследованиями. В связи с этим, большое развитие получила атомная энергетика, а в последнее время нанотехнологии.

В работе [9] показано, что формирование химических элементов обусловлено квантовым механизмом возникновения прежде всего водорода, гелия и лития, которые образовались в процессе Большого Взрыва, а последующие химические элементы (их ядра), являются продуктом термоядерных реакций (синтеза), осуществляемых в звездах.

Как известно [10], в основу структуры атома положена оболочечная модель, предложенная Н. Бором. Работы Г. Мозли показали зависимость расположения атомов от заряда ядра (*Ze*). Затем на основе симметрии обнаружен спин электрона, разработан принцип запрета Паули, который гласит, что на одной орбитали не может быть двух электронов с одинаковым состоянием. И если два таких электрона заняли оболочку, то их спины должны быть парными. В периодах, например во втором от Li и до Ne, с ростом числа электронов сферическая симметрия к концу периода спонтанно изменяется (повышается), и Ne уже имеет кубическую симметрию и становится устойчивым. Считается, что оболочечная модель объясняет периодичность химических свойств элементов в таблице Д.И. Менделеева. Периодический рост атомного радиуса от *Z* связывают с ростом в атомах числа электронов в периодах. На наш взгляд, более низкие значения атомных радиусов в конце периодов по сравнению с увеличенным атомным радиусом элементов в начале периодов связано с гравитацией. При этом сжатие атома в результате *R*-процесса не происходит до бесконечности, что и обеспечивает периодичность их расположения, а также определяет возможность дальнейшего роста числа электронов в атомах и усложнение их структуры при увеличении *Z*.

Это утверждение вытекает из теории Р. Пенроуза [7], согласно Пенроузу редукция квантового состояния частицы наблюдается только в результате *R*-процесса, т.е. вследствие ОР, имеющей гравитационную природу. При росте числа электронов в атоме происходит локализация электронов, т.е. сжатие электронной подсистемы, увеличение массы атомов и периодический *R*-процесс их квантового состояния. Иными словами, при росте атомной массы, в силу принципа неопределенности Гейзенберга, суперпозиция квантового состояния атома будет периодически редуцировать в одно из двух составляющих ее устойчивых стационарных состояний только на строго определённом этапе (при достижения критического значения атомной массы) детерминированной их *U*-эволюции, так как рост числа частиц в атоме(электронах) вызывает *R*-процесс [7] в периодах. *R*-процесс изменяет также направление эволюции квантового состояния частиц, вызывая периодический рост и снижение информационного содержания.

Как указывалось ранее, в таблице Д.И. Менделеева каждый период заканчивается нейтральным атомом - это Ne, Ar и т.д. При этом начиная с первого атома (Li), во втором периоде, а также в других периодах происходит рост числа нуклонов и электронов. Рассмат-

ривая усложнение структуры атомов как событие, в результате которого происходит генерация информации, можно полагать, что при этом будет происходить и рост в атомах информационного содержания. Возможность генерации информации в периодах и её роста связана прежде всего с тем, что атом не подвергается полному коллапсу, что, как будет показано далее, обусловлено запретом Паули. Согласно Пенроузу, материальные частицы - это информационные волны.

Информационная энтропия H электронной оболочки атома определим по формуле

$$H_a = -(W_K \ln W_K + W_L \ln W_L + \dots + W_Q \ln W_Q),$$

где W_K, W_L, \dots, W_Q - вероятности присутствия электронов в слоях K, L, M, N, O, P и Q соответственно (или степени заполненности электронных слоев).

Степень заполненности j -го слоя определяется следующим образом:

$$W_j = \begin{cases} \frac{n_j}{C_j} & \text{при } n_j \neq 0 \\ 1 & \text{при } n_j = 0, \end{cases}$$

где n_j - количество электронов, находящихся в слое; C_j - полное число электронов слое (максимальное количество электронов, которое может содержать слой).

Полные числа электронов являются постоянными для каждого слоя:

$$C_K = 2, C_L = 8, C_M = 18, C_N = 32, C_O = 50, C_P = 72, C_Q = 98.$$

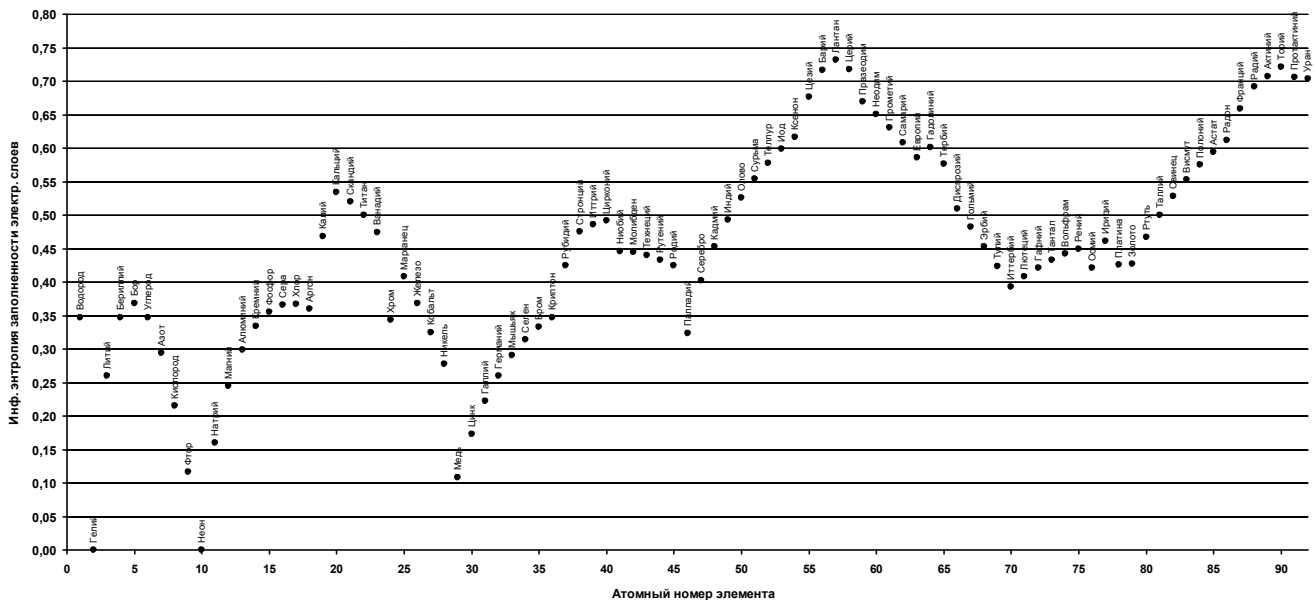


Рис. 2. Зависимость информационной энтропии электронных оболочек химических элементов от их атомного номера

На рис. 2 видно, что с увеличением порядкового номера, а следовательно, атомной массы элемента - m и заряда ядра - Ze , происходит периодическое изменение как информации, так и энтропии. Вероятность роста как информации, так и энтропии в конце периода снижаются. Начальный рост информации в периодах связан с ростом числа электронов на соответствующих орбиталях, т.е. с увеличением энергии E в атомах. Однако затем энергия периодически, в соответствии с уравнением Эйнштейна $E=mc^2$, переходит в массу последующих элементов. Рост массы атома, в свою очередь, вызывает рост гравитационного сжатия атома по мере роста Z в периоде, т.е. в пределах периодов наблюдается цикл «расши-

ренное состояние - сжатое состояние». Иными словами, локализация электронов в атомах в конце периодов, вследствие R -процессов, сопровождается в следующих периодах, начиная со второго, их расплыванием, а следовательно, увеличением атомного радиуса в элементах Na, K и т.д., вследствие изменения направления эволюции их квантового состояния.

В целом, следует отметить тенденцию, которая заключается в том, что, несмотря на периодичность изменения H (рис.2), все же в целом наблюдается как рост энтропии, так и информационного содержания в атомах. Как отмечалось ранее, квантовые частицы могут существовать в нескольких состояниях одновременно, т.е. суперпозиции. Электроны в состоянии суперпозиции хранят значительную информацию. Квантовое состояние частиц формирует бит или кубит, т.е. информацию. Как видно из рис. 2, в результате R -процесса в конце периода, в следующих периодах происходит рост информации, начиная с первых элементов (Li, Na и т.д.).

В [12] указывается, что рост информационной энтропии может характеризовать направление течение времени, и, по-видимому, эволюцию системы. Периодический (дискретный) характер её изменения от атомной массы химического элемента (рис. 2), как указывалось ранее, связан с воздействием на атомы энергии гравитации, т.е. R -процессом. Следовательно, R -процессы должны вызывать не только скачкообразное изменение течения времени, но и изменение его направления, что и показано на рис. 1, а также информационного содержания квантовой системы - атома (рис.2). Дискретный характер изменения времени и генерации информации, вследствие R -процессов, по-видимому, характерен для любой квантовой системы, которые испытывают U -эволюцию и R -процесс. Поэтому дискретный характер генерации информации (рис. 2) в зависимости от Z может характеризовать периодическую эволюцию квантовой системы (рис. 1) во времени.

Таким образом, рост порядкового номера- Z (рис. 2) в таблице Д.И. Менделеева сопровождается усложнением структуры атомов, ростом массы и повышением в них информационного содержания вследствие увеличения в них числа электронов на орбиталях. Поэтому периодическое генерирование информации при R -процессах и смена её направления, вследствие принципа неопределённости оказывают влияние на характер эволюции квантового состояния атомов, и оно изменяется дискретно (рис. 2), подобно зависимости, приведенной на рис.1. В связи с этим, можно утверждать, что рост энергии атома при увеличении в нём числа нуклонов и электронов и переход её в массу (рис. 2) будет определяться управляющим воздействием информации о квантовых процессах формирования химических элементов.

Анализ таблицы Д.И. Менделеева на основе зависимости информационной энтропии от Z (рис. 2) позволяет также рассматривать её как последовательное чередование неустойчивых и устойчивых дискретных квантовых состояний атомов в пределах периода вследствие R -процессов, т.е. менее симметричная суперпозиция квантовых состояний атомов в начале периода под действием R -процесса, спонтанно переходит в более симметричную суперпозицию к концу периода. R -процессам [7] характерны малые и большие периоды (рис. 1), поэтому периоды в таблице Д.И. Менделеева тоже являются малыми и большими. Неустойчивость квантового состояния атома связана с различными частотами колебаний электронов, что приводит к снижению прочности связи внешних электронов с ядром и *расплыванию* электронов, т.е. росту атомного радиуса. Поэтому валентные электроны у них возбуждены. Это атомы Li, Na, K и т.д., расположенные в начале периодов и имеющие высокий потенциал ионизации. В связи с этим, заметим, что зависимость потенциала ионизации от Z [10] подобна зависимости эволюции U от времени (рис. 1), т.е. является периодической. Повышенный атомный радиус щелочных элементов свидетельствует об их хаотическом состоянии. Поэтому именно с этих элементов наблюдается рост содержания информации в периодах (рис. 2) как результат изменения направления эволюции квантового состояния атомов.

Хаос генерирует информацию. В то же время информационное содержание атомов в пределах периодов вначале растёт, а затем снижается (рис. 2), так как устойчивость квантового состояния атомов в конце периодов возрастает.

Таким образом, периодический R -процесс, т.е. редукция квантового состояния атома вызывает как периодическое генерирование информации, так и рост энтропии в периодах. Это обстоятельство обуславливает также и невозможность обратимости квантового состояния атома в прошлое квантовое состояние.

Следовательно, необратимость информации и энтропии, вследствие R -процессов в конце периодов, определяет новое дискретное квантовое состояние атомов с большим информационным содержанием, т.е. атомов щелочных элементов в следующем периоде (рис. 2) в таблице Д.И.Менделеева, вследствие изменения направлений эволюции их квантового состояния.

Считается [10], что в атоме электроны находятся во взаимодействии с ядром кулоновскими силами, которые уравниваются силами отталкивания, что и обеспечивает устойчивость атомов. Известно, что принцип запрета Паули утверждает, что на орбиталях не могут находиться электроны с одинаковым квантовым состоянием. В связи с этим, принцип Паули следует рассматривать как запрет атому сжиматься до бесконечности (коллапсу) под действием R -процесса. Как отмечает Р. Пенроуз, твёрдое тело не *схлопывается* внутрь себя вследствие принципа Паули, так как атом состоит из фермионов (электронов, нуклонов), избегающих друг друга.

Таким образом, мы считаем, что запрет Паули – это антиколлапсирующий принцип. Именно этот фактор, на наш взгляд, обеспечивает возможность роста массы атомов (увеличение в них числа электронов, т.е. усложнение структуры атома) по мере роста Z .

Основу теории квантовой физики, как известно, заложил М. Планк. Применительно к атому её использовал Н. Бор в виде постулатов. В его модели атома электрон периодически излучает энергию, оставаясь на орбитали, и не падает на ядро. Теперь ясно, что излучение – это R -процедура, т.е. временной процесс. *Поэтому вследствие принципа неопределённости у разных атомов должны быть и различные периоды (кванты) излучения (малые и большие), а не одинаковые, что и находит отражение в их спектрах.*

Согласно теории Э. Шрёдингера [7], вероятность нахождения электрона в атоме подобна облаку, окружающему ядро. При R -процессе (при излучении) это облако локализуется, и атом переходит в новое квантовое состояние, при этом его симметрия изменяется (повышается).

Следовательно, это другой важный фактор, обуславливающий периодичность таблицы Д.И. Менделеева. Необходимо отметить, что формирование нейтральных атомов (Ne, Ar и т.д.) в конце периодов, на наш взгляд, связано с квантовой когерентностью, т.е. созданием единого квантового состояния в структуре атомов. Дело в том, что атомы – это многочастичные системы, где имеет место взаимодействие электронов не только с ядром, но и между собой [10]. Поэтому нейтральность – это особое квантовое состояние атомов, имеющих высокую защитную энергетическую зону, которую трудно преодолеть, а следовательно, и изменить квантовое состояние.

Описанные процессы, совершающиеся с атомами, близки к процессам, происходящим в больших квантовых системах, например при образовании звёзд, где тоже вначале происходит гравитационное сжатие сгустков материи, затем течение термоядерных процессов, рост массы и гравитационный коллапс. Различие только в массах. Причем здесь также нет полного коллапса, чему способствует принцип Паули. Поэтому [13] сжатие материи не происходит до бесконечности. В результате может образоваться черная звезда – новое квантовое состояние материи. Таким образом, гравитационный коллапс больших квантовых систем, также связан с их массой, которая соотносится к массе Солнца.

Развитая информационная основа понятия времени на микроскопическом уровне даёт основание, как было показано ранее, не только принимать информацию в качестве посредника (рис. 2) при изучении структуры и временной эволюции Вселенной, но и ответить на вопрос, кто направляет её эволюцию (рис. 1). Анализ рис. 1 и рис. 2 позволяет ответить опрелелённо-информация. Известно, что эволюция Вселенной хорошо описывается математическими моделями, а также Большими числами [7], где, как показано рядом исследователей, изменение одного из параметров (например, постоянной тонкой структуры), существенно изменяет условия существования Вселенной. Квантовый механизм формирования Вселенной, воплощённый в законы природы, т.е. информацию, делает последнюю материальной силой, которая направляет эволюцию Вселенной и в настоящее время является результатом саморазвития. В результате ОР, информация изменяет направление эволюции квантового состояния Вселенной (рис. 1 и рис. 2), т.е. информация обладает управляющим воздействием, что наглядно видно на примере живой материи.

Жизнь - это прежде всего квантово-информационный феномен. Генетическая информация управляет формой живого в пространстве и во времени (морфогенез). Любая направленность движения материи как в вещественной, так и в полевой форме определяется только результатом воздействия информации, носителями которой являются прежде всего фундаментальные поля - гравитационные и электромагнитные. Вселенная - это глобальная информационная система, которая генерирует информацию о квантовых процессах. Эти процессы необратимы. В процессе остывания после БВ, во Вселенной неоднократно происходило нарушение симметрии [4], т.е. частые *R*-процессы. Отсутствие времени в ОТО связано с тем, что Эйнштейн исходил из статичной Вселенной. Однако, как мы отмечали, данные наблюдений на основе сверхновых звёзд (свечки во Вселенной) показывают, что она расширяется, т.е. Вселенная не может быть статичной.

Р. Пенроуз [7] и И. Пригожин [4] говорят о возможности в природе ряда ОР и неустойчивостей соответственно в процессе эволюции Вселенной. Такой подход имеет важное значение при изучении эволюции Вселенной. В частности, используя концепцию ОР [7], можно полагать, что квантовое состояние Галактик, звезд, а следовательно, их информационное содержание во времени как и атомов (рис. 2) периодически изменяется. Квантовое состояние, как видно на рис. 1, не только дискретно, но и периодическое его изменение вызывает либо расширение, либо сжатие системы, например атомов. Звезды тоже, периодически испытывая ОР, могут расширяться и сжиматься и переходить в новое квантовое состояние, в частности, становиться нейтронными звездами, карликами различного вида, а также черными дырами [13]. Каждое изменение квантового состояния - это событие, т.е. информация. Периодичность - закон Вселенной.

Как известно, в повседневной жизни время и информацию мы ощущаем постоянно (мы стареем). На квантовом уровне, как указывалось выше, течение времени (рис. 1) нарушается *R*-процессами, что, в свою очередь, генерирует информацию. В связи с этим, рассмотрим механизм генерирования информации в мозге человека и механизм сознательного восприятия им реальности мироздания. По утверждению Р. Пенроуза, течение времени мы воспринимаем только благодаря сознанию. Им предложен квантовый механизм формирования сознания в мозге человека. Далее мы развили эту теорию, введя в этот процесс нелокальное взаимодействие частиц. Дело в том, что в его теории, как и в классической теории функционирования мозга, рассматривается только механизм управления синапсами на основе цитоскелетных структур в микротрубочках. Вопрос генерации информации в клетках мозга на основе квантового подхода не освещён. Известно, что на сетчатку глаза попадает до 100 млрд битов в секунду. Однако в зрительный нерв, отходящий от неё, попадает лишь 6 млн битов в секунду. Из них только 10 тысяч битов в секунду доходит до зрительной коры. Возникает вопрос, с чем это связано? Во-первых, генерирование информации - это вероятно

стный (случайный) процесс. Иными словами, информация обрабатывается и другими областями мозга. Во-вторых, информация как и время (рис. 1), квантуется, т.е. она дискретна. Это объясняет снижение объёма информации при переходе её от клеток сетчатки к зрительной коре мозга.

Мы полагаем, что световые электромагнитные волны (фотоны) постоянно и независимо от нас активируют клетки сетчатки, в результате возникает нервный импульс, и в нем создаётся определённое дискретное квантовое состояние. Вследствие *R*-процесса суперпозиции квантового состояния, в клетках зрительной коры периодически генерируется информация, соответствующая одному из его стационарных состояний. Как мы указывали, в состоянии суперпозиции информационное содержание системы возрастает. Из-за квантовой сцепленности (нелокальности) электронов, обеспечивающих передачу электрических нервных импульсов через синапсы (помимо нейромедиаторов), может возбуждаться значительное число нейронов. В результате, в ансамблях нейронов устанавливаются дальнедействующие корреляции, возникают новые синапсы. Обмен информацией усиливается, и она возрастает. Далее в зрительной коре мозга и гиппокампе информация достигает классического уровня и распознаётся в виде образов, запечатлённых в памяти в прошлом. Мышление - результат ОР суперпозиции квантового состояния нейронов с образованием единого квантового состояния (квантовой когерентности) в синапсах и ансамблях нейронов с различной устойчивостью, т.е. с образованием кратковременной, либо долговременной памяти. *R*-процедуры, на наш взгляд, вызывают и изменение направления обработки информации (это может быть фантазией или озарением, т.е. особым направлением мышления) с образованием новых нейронных ансамблей и синапсов в других областях мозга, их взаимодействия и синхронизации.

Таким образом, человеческое сознание преобразует реальность внешнего мира от квантового (дискретного) уровня до классического (образов), т.е. в виде непрерывной информации, что и вызывает ощущение течения времени.

В связи с изложенным, в настоящей работе предложен новый подход к проблеме измерения времени. Время (точнее, пространство-время) - это количество квантов генерированной информации о элементарных событиях в сознании (мозге) человека. Действительно, когда мы хотим измерить время, то мы вспоминаем прежде всего элементарные события, сопоставляя их друг с другом.

Библиографический список

1. **Каллендер, К.** Время как иллюзия // В мире науки. 2010. № 8, 9. С. 33-39.
2. **Массер, Д.** Простой поворот судьбы // В мире Науки. 2010. № 8, 9. С. 8-9.
3. **Винер, Н.** Кибернетика или Управление и связь в животном и машине / Н. Винер. – М.: Наука, 1958. – 382 с.
4. **Пригожин, И.** Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой: [пер. с англ.] / под ред. В.И. Аршинова, Ю.Л. Климонтовича, Ю.В. Сачнова. – изд. 5-е. – М.: КомКнига. 2005. – 296 с.
5. **Розенталь, И.Л.** Элементарные частицы и структура Вселенной // УФН. 1997. Т. 167. №8. С. 801–836.
6. **Чернавский, Д.С.** Синергетика и информация. Динамическая теория информации / Д.С.Чернавский. – изд. 3-е., доп. – М.: Книжный дом «ЛИБЕРКОМ», 2009. – 304 с.
7. **Пенроуз, Р.** Путь к реальности, или законы, управляющие Вселенной / Р. Пенроуз. – М.: Ижевск ИКИ, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2007. – 912 с.
8. **Кабалдин, Ю.Г.** Возникновение и эволюция Вселенной / Ю.Г. Кабалдин, С.В. Серый, А.А. Просолович // Наноструктурные и информационные процессы в биологии и во Вселенной: труды КНАГТУ. – Комсомольск-на-Амуре. 2010. С. 10–75.
9. **Шиханов, Б.С.** Частицы, ядра атомов: учебник / Б.С. Шиханов, Н.М. Капитонов, И.П. Юдин. – изд. 2-е. – М.: Изд-во ЛКИ, 2007. – 584 с.

10. **Потапов, А.А.** Электронное строение атомов / А.А. Потапов. – М.: Ижевск. 2008. – 264 с.
11. **Shannon, C.E.** Communication in the presence of noise. Proc/JRE, 37. 1949. P. 10–21.
12. Теперь ясно, куда течет время// Знание – сила. 2009. № 1. С. 13.
13. Черные дыры являются звездами // Иллюстрированная наука. 2010. № 1. С. 32–35.

*Дата поступления
в редакцию 28.04.2011*

Y.G. Kabaldin, O.V Krettinin

**THE ARTICLE DEALS WITH INFORMATION SOURCES OF THE CONCEPT
OF TIME. SUBSTANTIATED QUANTUM (DISCRETE) NATURE
OF TIME AND INFORMATION.**

Presented a quantum mechanism for the generation of information in the human brain and its increase up to a classic in the form of images in his mind about the world.

Proposed measure time as the number of quanta generated information in commission of elementary events

Key words: time, information, the evolution of Universe.

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 629.113

Л.А. Орлов¹, Л.Н Орлов², А.В. Тумасов²

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ ПЕШЕХОДА В СЛУЧАЕ НАЕЗДА ЛЕГКОВОГО АВТОМОБИЛЯ

Тольяттинский государственный университет¹,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

Представлены результаты совместной поисковой научно-исследовательской работы, выполненной специалистами НГТУ и ТГУ, направленной на исследование процесса столкновения легкового автомобиля с пешеходом методами компьютерного моделирования аварийных ситуаций. Дано описание подробной конечно-элементной модели ударника головы, приведены результаты тестовых расчетов.

Ключевые слова: пешеход, ударник, пассивная безопасность, капот, критерий травмируемости головы.

По данным международной статистики [1], более 1000000 человек в год гибнет в дорожно-транспортных происшествиях (ДТП) по всему миру и около 700 детей попадают в ДТП каждый день. В России вопросам повышения безопасности дорожного движения уделяется особое внимание, поскольку количество погибших в различных ДТП в нашей стране в среднем в три-пять раз больше, чем в европейских странах. Одна из главных проблем в России – высокий процент ДТП с участием пешеходов, поэтому проблема повышения безопасности наименее защищенных участников дорожного движения является весьма актуальной.

Вопросы исследования характера столкновения автомобиля с пешеходом отражены в публикациях зарубежных и отечественных исследователей. Так, в исследовании специалистов Шведского технологического университета [2] показано, что наиболее часто подвергаются повреждениям голова и нижние конечности пешеходов. В табл. 1 представлены среднестатистические данные по повреждениям отдельных участков тела пешехода, полученные в результате обработки 293 случаев ДТП.

Таблица 1

Повреждения отдельных участков тела пешехода в условиях фронтального столкновения с легковым автомобилем

Участок тела	Распределение повреждений в момент столкновения, %	Распределение повреждений при повторном соударении (после отскока от автомобиля), %
Голова	42,8	35,6
Шея	0,8	0,4
Грудная клетка	22,2	15,7
Руки	33,8	37,7
Живот	6,9	5,5
Таз	14,1	10,6
Ноги	66,1	43,7

В докладе рабочей группы ЕЭК ООН по пассивной безопасности [3] приведена следующая информация по ДТП с участием пешеходов:

- наибольшая частотность дорожно-транспортных происшествий приходится на детей в возрасте от 5 до 9 лет, при этом на детей до 15 лет включительно, (составляющих всего 18% населения) – около одной трети всех травм;
- наибольшая частотность смертельных и серьезных травм приходится на голову среди детей и взрослых и на ноги среди взрослых людей;
- травмы каждой из этих частей тела составляют более 30% всех ДТП;
- основным источником травм головы у детей является поверхность капота/крыла, а у взрослых травмы головы обусловлены ударом о поверхность капота/крыла и зону ветрового стекла;
- ДТП со скоростью столкновения до 40 км/ч охватывает более 75% всех случаев травмирования пешеходов.

Таким образом, если рассматривать скорость удара до 40 км/ч, то можно значительно уменьшить степень травмирования пешеходов в случае фронтального столкновения механических транспортных средств с ними.

В отчете специалистов Европейского комитета обеспечения пассивной безопасности (APSN) [4], указывается на то, что для повышения пассивной безопасности пешеходов необходимо прежде всего добиться минимального уровня травмируемости головы.

Принятые в 2008 году Глобальные технические Правила № 9 [5], равно как и фаза 2 Директивы 2003/102/ЕС [6], предполагают проведение пяти видов испытаний передних конструкций легковых автомобилей на безопасность, касающихся столкновения с пешеходом. Условия проведения испытаний основаны на результатах статистических исследований. Наиболее жесткие требования предъявляются к безопасности элементов конструкции автомобиля, о которые происходит удар пешехода головой. Оцениваемым параметром при этом является критерий травмируемости головы КТГ (*HIC*):

$$HIC = \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a dt \right]^2 \cdot (t_2 - t_1) \quad (1)$$

где a – результирующее ускорение; $t_2 - t_1$ – временной интервал, при котором значение *HIC* является максимальным (временной интервал не должен превышать 15 мс).

Считается, что значения КТГ ниже уровня 1250 неопасны; от 1250 до 1500 – вызывают повреждения средней тяжести; выше уровня 1500 – вызывают тяжёлые и смертельные травмы.

На этапах проектирования и доводки наиболее рациональным является исследование процесса столкновения автомобиля с пешеходом на основе результатов компьютерного моделирования аварийных ситуаций, которое позволяет симитировать полный спектр необходимых испытаний и оценить уровень пассивной безопасности конструкции автомобиля с точки зрения пешехода. При этом широкое распространение получили расчетные исследования, моделирующие условия взаимодействия ударников (имитаторов отделенных частей тела человека) с элементами конструкции автомобиля. Виртуальные модели ударников так же, как и реальные конструкции, должны соответствовать технико-эксплуатационным требованиям, описанным в Директиве 2004/90/ЕС [7]. Например, ударник головы при проверке его адекватности подвешивается задней лицевой поверхностью под углами 25° и 90° к горизонту (рис. 1), после чего по нему наносится удар сертифицированным импактором, имеющим массу 1 кг. Импактор должен быть позиционирован таким образом, чтобы центр тяжести ударника головы располагался на центральной линии импактора. В табл. 2 приведены требования к срабатыванию акселерометра ударника головы при соударении с импактором.

Несмотря на достигнутые результаты в области исследования процесса столкновения автомобиля с пешеходом, многие проблемы остаются нерешенными. В частности, недоста-

точно полно изучены вопросы, связанные с выбором геометрических, жесткостных и демпфирующих свойств элементов передней части автомобиля. Для решения данной проблемы необходимо иметь адекватные расчетные модели ударников, использование которых в процессе компьютерного моделирования аварийных ситуаций позволит сократить материальные и временные затраты на разработку безопасных конструкций автомобилей.

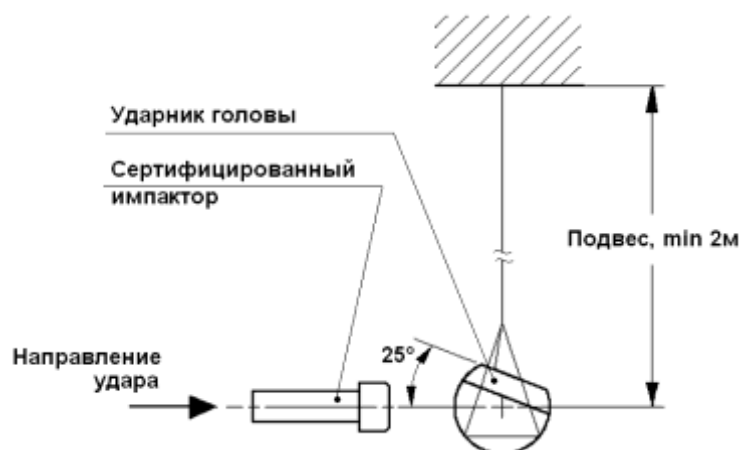


Рис. 1. Схема проверки ударника головы на соответствие требованиям Д 2004/90/ЕС

Таблица 2

Требования к срабатыванию акселерометра ударника головы

Тип ударника	Масса, кг	Скорость при сертификации, м/с	Нижняя граница, g	Верхняя граница, g
Голова ребенка	2,5	7	405	495
Голова ребенка/небольшого взрослого	3,5	7	290	350
Голова взрослого	4,8	10	337,5	412,5

Для выполнения расчетных исследований специалистами НГТУ и ТГУ была разработана подробная конечно-элементная модель (КЭМ) ударника головы ребенка (рис. 2), позволяющая проводить широкий спектр виртуальных испытаний и оценивать безопасность передней части конструкции легкового автомобиля в условиях соударения головы ребенка с поверхностью капота.

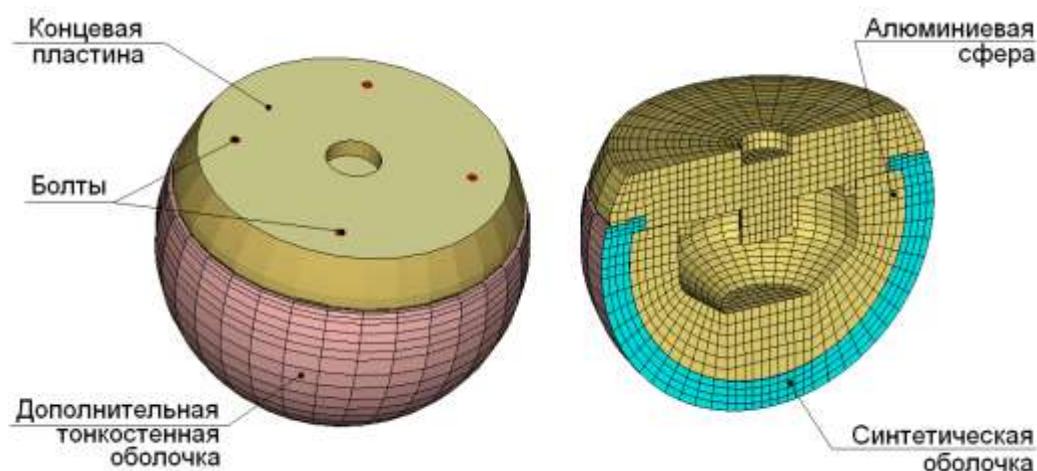


Рис. 2. Подробная КЭМ ударника

Модель ударника состоит из 13094 узлов и 11624 элементов и включает в себя части алюминиевых деталей (концевая пластина и сфера) и синтетической оболочки, представленных объемными 8-узловыми элементами типа *SOLID*. Соединительные болты имитированы стержневыми элементами типа *BEAM*. Между оболочкой и алюминиевыми деталями были заданы условия контактного взаимодействия, допускающие смещение узлов оболочки относительно элементов алюминиевых деталей.

Следует отметить, что в КЭМ ударника была введена дополнительная тонкостенная оболочка, представленная элементами типа *SHELL*. Данная оболочка выполняет *техническую* функцию и служит для более простого задания контактного взаимодействия между ударником головы и панелями конструкции автомобиля, которые, как правило, также представляются в виде элементов типа *SHELL*. Использование дополнительной оболочки обеспечивает возможность работы с различными типами контактов, характерных для поверхностных моделей. Оболочка также необходима для подавления (исключения) в ходе расчета вероятности возникновения элементов с «отрицательным объемом», поскольку материал синтетической оболочки имеет относительно низкий модуль упругости и при нагружении оболочки ее элементы могут инвертироваться, порождая отрицательные объемы, что, в свою очередь, может привести к ошибочному прекращению счета.

В связи с этим рекомендуется использовать опцию создания дополнительных контактных взаимодействий между внутренними гранями объемных элементов, а также наносить на наружную поверхность компоненты сетку оболочечных элементов.

Для задания синтетической оболочки ударника был использован вязкоупругий материал, характеристики которого (плотность, модуль упругости, коэффициент Пуассона, кривая напряжение-деформации) были подобраны таким образом, чтобы суммарная масса всех компонент ударника составляла 3,5 кг, а ускорения ударника при тестовом нагружении в соответствии со схемой (рис. 1) находились в диапазоне 290...350 g.

На рис. 3 показан характер распределения относительных деформаций по элементам оболочки ударника при моделировании условий тестового нагружения.

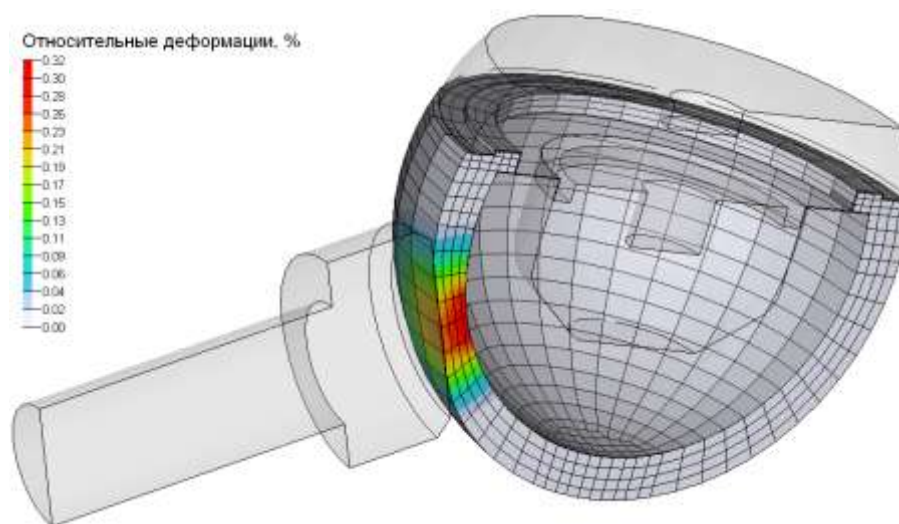


Рис. 3. Характер распределения относительных деформаций в оболочке ударника ($t = 2,5$ мс)

На рис. 4 представлен график изменения суммарного ускорения ударника. Видно, что максимальное значение ускорения составляет $3,0 \cdot 10^3$ м/с² (305 g), что соответствует допустимому диапазону 290...350 g для данного типа ударников.

Таким образом, разработанная подробная КЭМ ударника головы ребенка соответствует требованиям Директивы 2004/90/ЕС и может быть использована при проведении расчетных исследований пассивной безопасности конструкций легковых автомобилей.

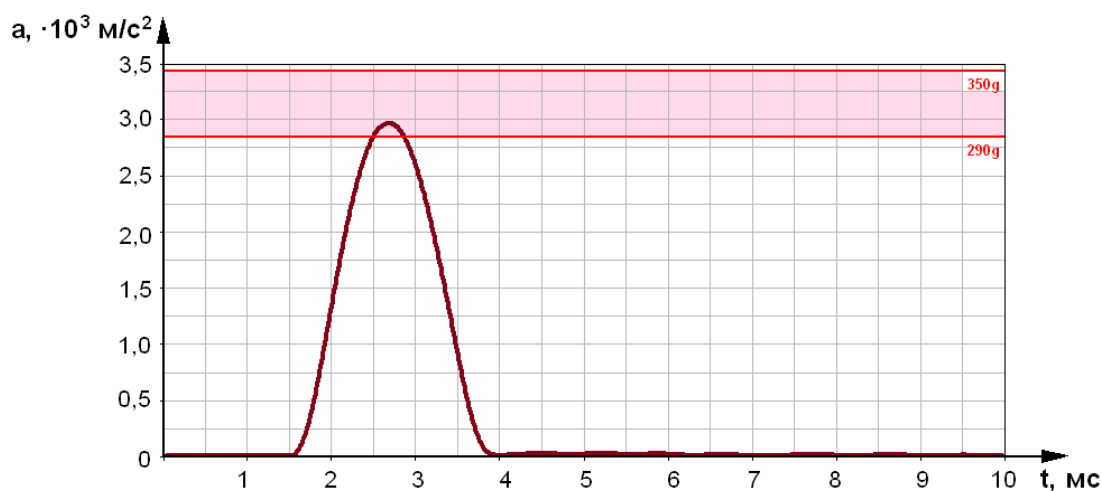


Рис. 4. График изменения ускорений центра масс КЭМ ударника головы пешехода

С целью проверки работоспособности модели ударника были выполнены исследования по оценке пассивной безопасности капота легкового автомобиля. В расчетах рассматривалась только передняя часть автомобиля (задние силовые элементы автомобиля и двери были исключены). Оси колес автомобиля, а также крайние элементы модели (на линиях обрыва) закреплялись по трем степеням свободы (рис. 5, а). При этом в подкапотном пространстве двигатель и радиатор были представлены жесткими телами, а передняя подвеска моделировалась с помощью одномерных элементов с вязкоупругими свойствами. В исследуемой модели автомобиля отсутствовали многие элементы подкапотного пространства, которые на практике могли бы ограничить деформацию капота в условиях ударного воздействия со стороны импактора. На рис. 5, б показаны исследуемые случаи нагружения.

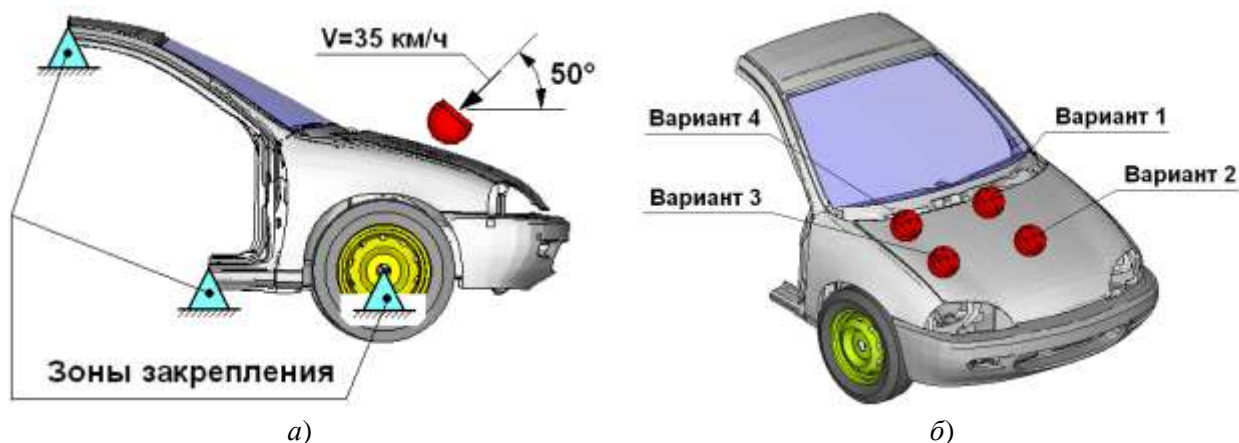


Рис. 5. Схемы закрепления и нагружения передней части легкового автомобиля:
а – схема закрепления и нагружения; б – варианты нагружения автомобиля

На рис. 6 представлены наибольшие деформации передней части автомобиля в условиях различных вариантов нагружения. Видно, что деформации достигают 60...80мм. Как отмечают специалисты АвтоВАЗа [8], для получения величины *NIC* менее 1000 единиц необходимо обеспечить не менее 62 мм свободной деформации капота, в этом случае деформации капота позволяют добиваться хорошего поглощения удара.

На рис. 7 показаны графики вертикальных перемещений ударников за время соударения, характеризующих деформируемость отдельных зон капота автомобиля. Видно, что наибольшие перемещения капота наблюдаются в первом варианте нагружения. Во втором варианте нагружения вертикальные перемещения ударника были ограничены поперечно

расположенным двигателем и присоединенным к нему радиатором. Меньшие перемещения ударника наблюдались в последних двух вариантах, что обусловлено более высокой жесткостью боковых частей (крыльев) кузова автомобиля. Тем не менее, следует признать полученные перемещения несколько завышенными, поскольку в реальной конструкции они могут быть ограничены не учтенными в модели конструктивными элементами подкапотного пространства.

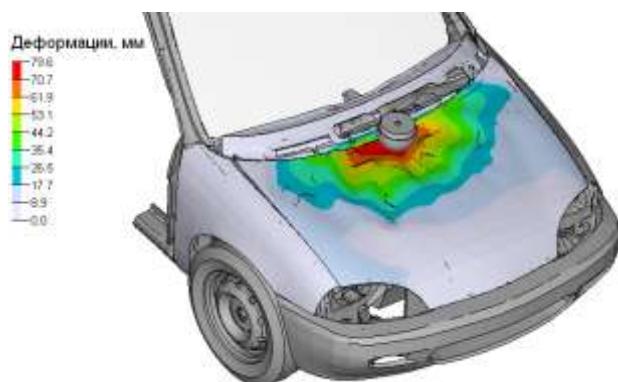
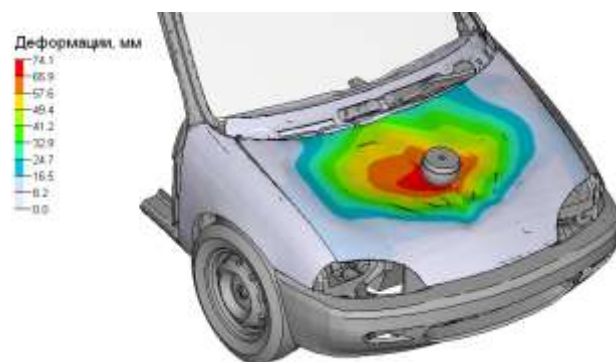
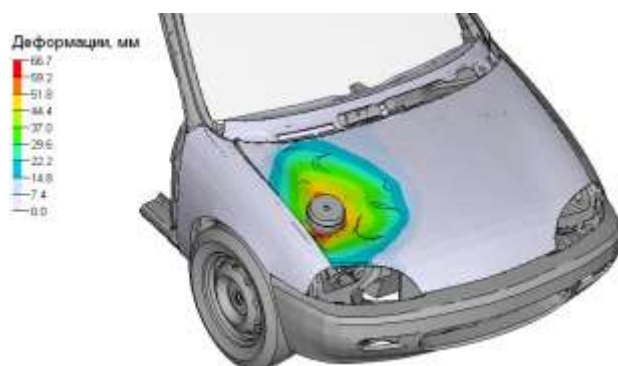
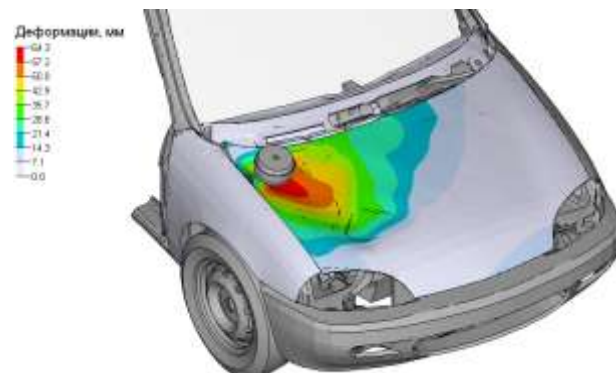
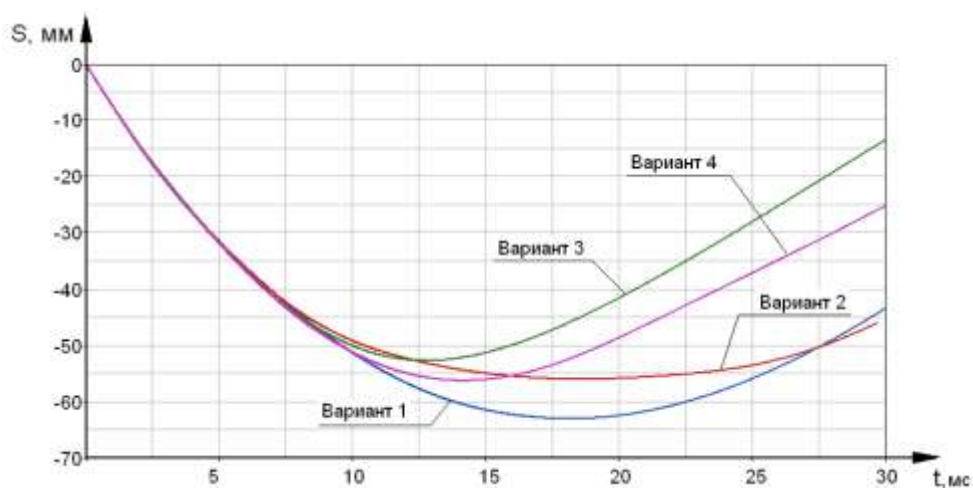
Вариант 1 ($\Delta_{\max} = 80$ мм)Вариант 2 ($\Delta_{\max} = 74$ мм)Вариант 3 ($\Delta_{\max} = 67$ мм)Вариант 4 ($\Delta_{\max} = 80$ мм)

Рис. 6. Деформации капота автомобиля при различных вариантах нагружения

Рис. 7. Графики изменения вертикальных перемещений (S) ударников за время t

На рис. 8 представлены графики изменения ускорений ударников. Видно, что за счет меньших деформаций капота суммарные ускорения ударника в третьем и четвертом вариантах больше, чем в первом и втором. Тем не менее, во всех случаях максимальные суммарные ускорения не превышают 96 g. При расчете КТГ по формуле (1) можно получить следующие значения: вариант 1 – 251; вариант 2 – 307; вариант 3 – 494; вариант 4 – 405.

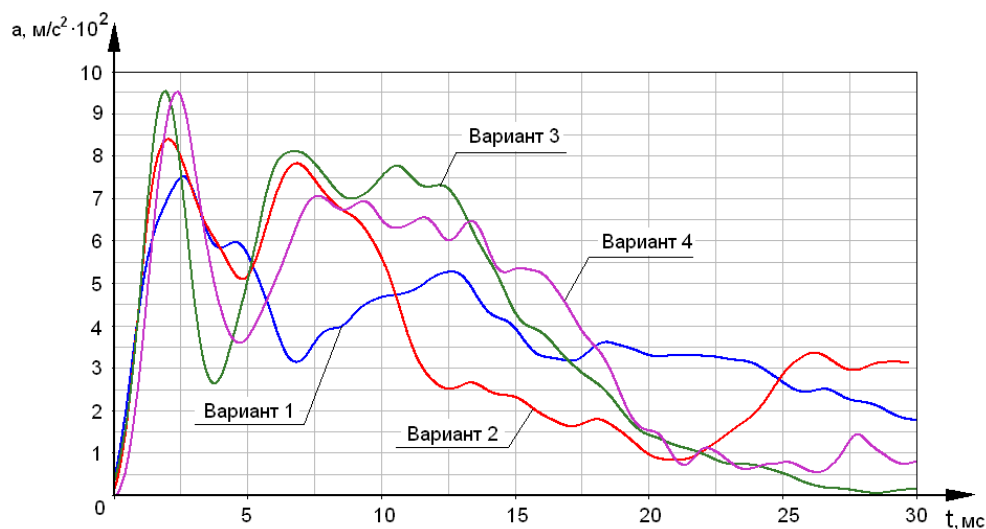


Рис. 8. Графики изменения суммарных ускорений (a) ударников за время t

Выполненные исследования показывают широкий спектр возможностей имитационного моделирования при проведении исследований по повышению пассивной безопасности легковых автомобилей, а также выполнению сравнительных оценок возможных вариантов конструктивных решений.

Результаты выполненной работы имеют важное практическое значение. Разработанная модель ударника головы пешехода может быть использована инженерами-расчетчиками ведущих автопредприятий страны на этапах проектирования и доводки конструкций автомобилей, учеными вузов, а также аспирантами и магистрантами при выполнении расчетно-экспериментальных исследований, направленных на повышение безопасности конструкций легковых автомобилей. Снижение риска травмируемости головы пешехода позволит повысить общий уровень безопасности пешехода и сократить количество тяжелых ДТП с наименее защищенными участниками дорожного движения.

Библиографический список

1. Первая Всемирная министерская конференция по безопасности дорожного движения [Электронный ресурс]: <http://www.kremlin.ru/news/6037>.
2. Jikuang, Yang. Review of Injury Biomechanics in Car -Pedestrian Collisions / Yang Jikuang // Crash Safety Division, Machine and Vehicle Systems, Chalmers University of Technology. February 28, 2002. – 20 p.
3. Заключительный доклад о разработке глобальных технических правил, касающихся безопасности пешеходов // ECE/TRANS/WP.29/GRSP/41/Add.1 ООН. Европейская экономическая комиссия, 2007 – 29 с.
4. Report: D70-UG 5.1 Workshop on pedestrian and cyclist safety. 2006. January 31. – 18 p.
5. Глобальные технические правила №9 Безопасность пешеходов // ECE/TRANS/180/Add.9/Appendix 1, ООН. Европейская экономическая комиссия, 2009. – 31 с.
6. Директива № 2003/102/ЕС. Защита пешеходов и других незащищенных участников движения до и во время столкновения с механическим транспортным средством, а также внесение поправок в Директиву Совета Европы №70/156/ЕЕС.

7. Директива 2004/90/ЕС. Технические предписания по реализации статьи 3 Директивы 2003/102/ЕС Европейского парламента и Совета в отношении защиты пешеходов и других уязвимых участников дорожного движения до и в случае столкновения с транспортным средством и изменяющие Директиву 70/156/ЕЕС // Официальный журнал Европейского сообщества. 2004. – 61 с.
8. **Сивковская, Е.В.** Расчетное сопровождение проектирования автомобиля для обеспечения требований по безопасности пешехода / Е.В. Сивковская, С.А. Курдюк // Будущее технической науки; НГТУ. – Н. Новгород, 2005.

*Дата поступления
в редакцию 25.04.2011*

L.A. Orlov, L.N. Orlov, A.V. Tumasov

THE CALCULATIVE ESTIMATION OF PEDESTRIAN SAFETY IN CASE OF CAR RUNNING-DOWN ACCIDENT

The article presents the results of joint scientific research that was investigated by NNSTU and TSU specialists and was aimed on simulation studying of the collision process of a car with a pedestrian. The description of the detailed finite element model of pedestrian head's impactor as well as simulation test results are presented.

Key words: pedestrian, impactor, passive safety, bonnet, head injury criteria.

УДК 629.01

Ю.И. Палутин

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ГЕРМЕТИЧНОСТИ КУЗОВОВ АВТОМОБИЛЕЙ

Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия

Выведены два критерия, позволяющие производить сравнительную оценку степени герметичности кузовов различных автомобилей. Введено понятие эффективных площадей неплотностей, позволяющее получать количественную оценку уровня герметичности кузовов автомобилей. Приведены полученные расчетным путем значения допустимых и предельных уровней герметичности кузовов.

Ключевые слова: критерии герметичности, эффективная площадь неплотностей, допустимый уровень герметичности.

Критерии оценки степени герметичности кузовов автомобилей

Одной из причин, сдерживающих развитие работ, направленных на повышение герметичности кузовов отечественных автомобилей, является отсутствие объективного критерия, который позволял бы как оценивать эффективность направленных на это мероприятий, так и проводить сравнение между собой герметичности кузовов различных моделей автомобилей. Анализ применяющихся в настоящее время в различных областях науки и техники подобных сравнительных оценок показывает, что они в обязательном порядке являются относительными величинами, причем чаще всего подобные критерии безразмерны. Кроме того, наиболее удачны из них те, которые включают в себя полный набор величин, характеризующих сравниваемые параметры.

Из рекомендуемых в ГОСТ 24054-80 [1] способов определения степени герметичности изделий наиболее полную её оценку можно получить путём измерения падения величины давления в единицу времени, с помощью которой не только оценивается протекание газа или жидкости через неплотности изделия, но и определяется их влияние на состояние параметров среды, заполняющей изделие. Однако для автомобилей, кузова которых малогерметичны, такой метод явно не подходит. Падение давления в них будет происходить за слишком короткий отрезок времени.

Для автомобилей самым приемлемым способом определения степени герметичности является измерение расхода воздуха, поступающего в салон, и величины создаваемого в результате этого подпора давления. Определяющими величинами при этом являются количество воздуха, подаваемого в салон, величина возникающего в салоне подпора давления и плотность воздуха, характеризующая его физические свойства.

Однако оценка герметичности только по этим трем параметрам приводит к получению критерия, который не учитывает размеры салона автомобиля, что явно снижает его ценность, так как равноценное количество неплотностей в кузовах автомобилей, имеющих разные по объёму салоны, оказывает на качество их воздушной среды различное влияние. С помощью такого критерия невозможно сравнивать между собой по герметичности различные модели автомобилей. В критерий, оценивающий степень герметичности кузова, должен в обязательном порядке входить характерный размер салона или величина, учитывающая количество воздуха в нём. В качестве подобной величины можно использовать и площадь поверхности всех ограждающих панелей салона, и величину внутреннего его объема. Найдем и проанализируем оценочный критерий с использованием каждой из этих величин.

В качестве определяющих герметичность салонов автомобилей величин используем следующие пять параметров:

$$W, \Delta P, \rho, V_c, F_k. \quad (1)$$

где W - воздухообмен салона; ΔP - перепад между наружными и внутренним давлением; ρ - плотность воздуха; V_c - внутренний объем салона; F_k - площадь ограждающих панелей салона.

Для поиска безразмерного соотношения определяющих герметичность салона величин воспользуемся теорией размерностей. В соответствии с её π -теоремой из пяти определяющих величин при трех основных физических величинах можно получить две безразмерные их комбинации. Расчет показывает, что одна из этих комбинаций при выборе в качестве размерной характеристики салона его объема представляет собой следующее выражение:

$$k_v = \frac{W \cdot \rho^{0.5}}{V_c^{2/3} \cdot \Delta P^{0.5}}. \quad (2)$$

Другая комбинация при выборе в качестве характерного размера салона величины площади всех ограждающих салон панелей выглядит следующим образом:

$$k_F = \frac{W \cdot \rho^{0.5}}{F_k \cdot \Delta P^{0.5}}. \quad (3)$$

Безразмерную комбинацию величин (2) обозначим символом K_v и назовем её *степенью герметичности (объемной)*, а безразмерную комбинацию величин 3 - символом K_F и назовем её *степенью герметичности (поверхностной)*.

Если проанализировать выражение (2), представляющее собой степень герметичности (объемную), то первый член его числителя является величиной объемного расхода воздуха, подаваемого в салон, а первый член знаменателя – корнем кубическим из величины внутреннего объема салона, возведенной во вторую степень; отношение же этих величин представляет собой определенную долю кратности воздухообмена салона автомобиля. Поэтому физический смысл выражения (2) заключается в том, что оно оценивает ту часть воздуха, выраженный в долях кратности воздухообмена, которая приходится на одну единицу величины давления, поддерживаемого в салоне при данном расходе воздуха.

Если с выражением (3) провести следующие преобразования:

$$k_F = \frac{W \cdot \sqrt{\rho}}{F_k \cdot \sqrt{\Delta P}} = \sqrt{2} \frac{W}{F_k \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}}} = \sqrt{2} \cdot \frac{W}{W_T}, \quad (4)$$

где – W_T теоретически возможный воздухообмен, то из полученного выражения видно, что степень герметичности (поверхностная) представляет собой отношение действительного количества воздуха, выходящего из салона через неплотности под действием перепада давления ΔP , к теоретически возможному количеству воздуха, которое могло бы проходить через площадь, равную сумме площадей всех панелей, ограждающих салон, под действием перепада давления, равного ΔP , при полном отсутствии какого-либо гидравлического сопротивления данному движению. Отношение действительного количества воздуха, проходящего через какое-либо сопротивление, к теоретически возможному количеству воздуха, проходящего при полном отсутствии сопротивления, представляет собой коэффициент расхода воздуха через данное сопротивление [3]. Поэтому физический смысл степени герметичности (поверхностной) равноценен физическому смыслу коэффициента расхода воздуха, проходящего через сечение, равное площади всех поверхностей кузова автомобиля, под действием перепада давления, равного ΔP .

Оба полученные коэффициента, позволяют сравнивать между собой герметичность кузовов различных автомобилей. Оба коэффициента несут много информации о герметичности автомобилей и потому будут полезны в качестве сравнительной оценки герметичности различных автомобилей.

Понятие эффективной площади неплотности

Для получения более полного представления о сущности оценочных критериев герметичности салонов автомобилей раскроем значение величины воздухообмена. Будем считать при этом, что воздух несжимаем. Учитывая, что герметичность салона автомобиля определяют на неподвижном автомобиле, примем, что давление снаружи на все части кузова одинаковое. Давление по всему салону внутри него также будем считать одинаковым.

Для определения величины воздухообмена воспользуемся общеизвестным уравнением, описывающим расход жидкости или газа через какое-либо отверстие, в том числе и через неплотность [3]:

$$W_i = \mu_i \cdot F_i \cdot \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}, \quad (5)$$

где W_i – воздухообмен через отдельную неплотность; μ_i – коэффициент расхода воздуха через неплотность; F_i – площадь отдельной неплотности.

На основе (5) для кузова автомобиля, имеющего обычно большое количество отверстий и неплотностей, суммарный расход воздуха через них можно описать следующим образом:

$$W = \sum_{i=1}^n W_i = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \cdot \sum_{i=1}^n \mu_i \cdot F_i, \quad (6)$$

где n – количество отверстий и неплотностей.

Если в выражениях (2) и (3) с помощью уравнения (6) раскрыть значение величины расхода воздуха, подаваемого в салон, и провести с ними следующие преобразования:

$$k_v = \frac{W \cdot \sqrt{\rho}}{V^{2/3} \cdot \sqrt{\Delta P}} = \frac{\sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}} \cdot \rho \cdot \sum_{i=1}^n \mu_i \cdot F_i}{V^{2/3} \cdot \sqrt{\Delta P}} = \sqrt{2} \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i \cdot F_i}{V_c^{2/3}}, \quad (7)$$

$$k_F = \frac{W \cdot \sqrt{\rho}}{F_K \cdot \sqrt{\Delta P}} = \frac{\sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}} \cdot \rho \cdot \sum_{i=1}^n \mu_i \cdot F_i}{F_K \cdot \sqrt{\Delta P}} = \sqrt{2} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i \cdot F_i}{F_K}, \quad (8)$$

то из полученных выражений видно, что в знаменателе обоих коэффициентов находится член, характеризующий величину салона, а числителем является сумма произведений величины каждой площади неплотности кузова на величину коэффициента расхода через неё воздуха. Рассмотрим физический смысл суммы данных произведений.

Коэффициент расхода воздуха μ , входящий в произведение $\mu \cdot F$, представляет собой известное отношение [3]:

$$\mu = \frac{W}{W_T}, \quad (9)$$

показывающее, какая часть от того теоретически возможного количества воздуха, которое могло бы проходить через отверстие, если бы не было гидравлических потерь, действительно через него проходит. Отсюда произведение площади отверстия на коэффициент расхода че-

рез него воздуха представляет собой ту часть его площади, которой было бы достаточно для прохождения, поступившего через данное отверстие воздуха, если бы он проходил без гидравлических потерь, то есть он показывает, насколько эффективно используется площадь отверстия для прохождения воздуха.

Соответственно, сумма произведений каждой площади неплотности на коэффициенты расхода через неё воздуха представляет собой ту часть суммарной площади всех неплотностей кузова, через которые мог бы пройти весь воздух, если бы он проходил через них без потерь. Поэтому произведение $\mu \cdot F$ можно назвать *эффективной площадью отверстия или неплотности*, а сумму этих произведений $\sum \mu \cdot F$ для кузова автомобиля – *суммарной эффективной площадью неплотностей* [4].

Величину суммарной эффективной площади неплотностей можно использовать в качестве критерия, позволяющего оценивать величину общей герметичности кузова автомобиля, так как её значение достаточно полно характеризует величину неплотностей кузова. Отношение этой величины к величине внутреннего объёма салона или к величине площади всех ограждающих салон панелей, как это следует из выражений (7) и (8), позволяет получить сравнительную объективную оценку степени герметичности кузова автомобиля.

В странах с развитой автомобильной промышленностью для оценки герметичности кузовов нашло применение понятие эффективной площади эквивалентного сечения неплотностей кузова. Если сравнить данное понятие с предлагаемым понятием эффективной площади неплотностей, то выясняется, что они равнозначны. Однако понятие эффективной площади неплотностей кузова более полно отражает физическую сущность движения через них воздуха, поэтому привлекать для него менее понятное название эквивалентного сечения, по-видимому, не имеет смысла.

Сравнительные оценки герметичности кузовов необходимо получать при фиксированных значениях внутреннего давления. Так, при сравнении между собой герметичности кузовов различных автомобилей можно рекомендовать для получения величины степени герметичности кузова давление в салоне, равное 150 Па. В пользу данной величины свидетельствует тот факт, что такого давления в салоне при экспериментальных исследованиях можно достаточно легко достичь даже в не очень герметичном кузове автомобиля. Значение коэффициента расхода воздуха при данном значении перепада давления, как показывают экспериментальные исследования, практически у всех неплотностей является почти постоянной величиной, очень мало изменяющейся при дальнейшем увеличении давления в салоне.

Экспериментальное определение величины эффективных площадей неплотностей кузовов автомобилей

Согласно уравнениям (5) и (6) для оценки воздухообмена через любые отверстия, в том числе и через неплотности, необходимо иметь значения их площадей, коэффициентов расхода воздуха, перепадов давлений и плотности воздуха. Так как величины перепадов давлений и плотности воздуха обычно задаются исходя из условий стоящей задачи, то при расчёте воздухообмена через неплотности кузова автомобиля неизвестными величинами являются площади неплотностей и коэффициенты расходов через них воздуха. Теоретическое определение значений данных величин в настоящее время невозможно. Причём определение значений каждой из этих двух величин по отдельности для большинства неплотностей даже экспериментальными методами является чаще всего не решаемой задачей. Однако значения произведения этих величин, которое является ни чем иным, как эффективной площадью неплотности, определяется очень легко. Для этого достаточно использовать следующее уравнение, полученное из уравнения (5):

$$\mu_i \cdot F_i = \frac{W_i}{\sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P_i}{\rho}}} \quad (10)$$

Уравнение для определения суммарной величины эффективных площадей всех неплотностей кузова, полученное из уравнения (6), выглядит следующим образом:

$$\sum_{i=1}^n \mu_i \cdot F_i = \frac{W_i}{\sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P_i}{\rho}}} . \quad (11)$$

Как видно из уравнений (10) и (11), экспериментальное определение величин эффективной площади отдельных неплотностей и суммарной величины эффективных площадей всех неплотностей кузова не представляет особых трудностей. Для этого необходимо с определённым расходом осуществить подачу воздуха в салон, измерить возникший при этом подпор давления и расчетным путем определить величину суммарной эффективной площади неплотностей.

Величина эффективной площади отверстия не зависит от значений физических параметров воздуха, однако от изменений перепада давлений имеет определённую зависимость. При малых значениях перепада давления при его возрастании значение эффективной площади также возрастает, причём очень быстро. Но после превышения величины перепада давления определённого значения, конкретного для каждого отверстия или неплотности, величина эффективной площади становится постоянной, не изменяющей своего значения при дальнейшем возрастании значений перепадов давлений.

Оценка минимально необходимой герметичности кузовов автомобилей

Возможность проводить расчет воздухообмена через неплотности позволяет провести оценку той минимальной герметичности, которой должен обладать кузов автомобиля, чтобы в нем можно было создать комфортные условия для человека. Для этого необходимо, воспользовавшись уравнением (11), подставить в него значение максимального воздухообмена, который должна обеспечивать вентиляционная система автомобиля, и величину подпора давления, которую необходимо поддерживать в салоне. В результате будет получено то значение суммарной величины эффективных площадей всех неплотностей кузова, превышение которой на реальном автомобиле не позволит его вентиляционной системе поддерживать в салоне запрооектированное давление.

В табл. 1 даны результаты проведенных автором подобных расчётов для различных моделей автомобилей. При этом в качестве допустимого взят воздухообмен для легкового автомобиля малого класса, равный 500 м³/ч [5], для легкового автомобиля среднего класса – равный 600 м³/ч, для автобуса, имеющего два ряда двухместных сидений и высоту потолка в пределах 1900 – 2000 мм, равный – 2000 м³/ч, для кабины грузового автомобиля – равный 300 м³/ч.

В качестве предельного взят воздухообмен для легкового автомобиля малого класса, равный 1000 м³/ч, для легкового автомобиля среднего класса – равный 1200 м³/ч, для автобуса равный – 4000 м³/ч, для кабины грузового автомобиля – равный 600 м³/ч. В качестве величины внутреннего давления в салоне автомобиля выбран подпор давления, равный 150 Па. Данная величина подпора выбрана исходя из того, что такой подпор является вполне реальной, уже достигаемой величиной (Мерседес-Бенс 260Е) и при нем может быть обеспечена защита салона от проникновения, например, через неплотности днища, задней и нижней части боковых панелей автомобиля, вредных веществ до скоростей движения, превышающих 180 км/ч.

Для сравнения значений расчётных величин (табл. 1) с реально существующими величинами суммарных эффективных площадей неплотностей и вытяжных лючков на современных автомобилях в табл. 2 приведены экспериментально определенные автором значения суммарных эффективных площадей неплотностей и вытяжных лючков при подпоре давления в салоне, равном 150 Па. Кроме того, даны значения производительности вентиляцион-

ных установок и подпоров давления в салоне, создаваемого вентиляционными установками некоторых отечественных и зарубежных автомобилей на стоянке.

Таблица 1

Максимально допустимые и предельные значения суммарных площадей неплотностей и вытяжных отверстий, см²

	Воздухообмен	Легковой автомобиль малого класса	Легковой автомобиль среднего класса	Автобус	Грузовой автомобиль
2	Допустимый	90	108	360	45
3	Предельный	180	216	720	90

Таблица 2

Суммарные эффективные площади неплотностей и вытяжных лючков при подпоре давления, равном, 150 Па, производительность вентиляционной установки и подпор давления в салоне на стоянке

	Марка автомобиля	Сумма эффективных площадей неплотностей и вытяжных лючков, см ²	Производительность вентиляционной установки, м ³ /ч	Подпор давления в салоне, Па
2	МЕРСЕДЕС-БЕНС 260 Е	100±7	570±28	150
3	ФОРД-СКОРПИО	100±7	510±25	125
4	АУДИ-200	112±8	450±22	80
5	ГАЗ-3102	136±11	290±15	20
6	ГАЗ-3105	150±14	450±22	40
7	УАЗ-3151 (УАЗ-469)	196±19	200±10	5-10
8	УАЗ-39621 (санитарный)	236±24	в кабине 280 в салоне 210	20
9	ГАЗ-3307	66±3,5	200±10	40
1	ГАЗ-3302	95±7	320±16	50
1	КавЗ-3270	342±35	-	-

Сравнение данных, приведенных в табл. 1 и 2, показывает, что у легковых автомобилей Мерседес-Бенс 260Е и Форд-Скорпио сумма величин эффективных площадей неплотностей вместе с величинами площадей вытяжных проемов обеспечивают высокий подпор давлений в салоне даже при величине воздухообмена меньше допустимого. При допустимой величине воздухообмена значение подпора давления в салоне этих автомобилей будет явно выше 150 Па. На автомобиле Ауди-200 сумма величин эффективных площадей неплотностей и вытяжных лючков несколько превышает допустимую величину суммарных эффективных площадей неплотностей и вытяжных лючков, приведённую в табл. 1. Соответственно, величина воздухообмена в 450 м³/ч, создаваемая его вентиляционной системой на стоянке, позволяет поддерживать подпор давления в салоне хотя и достаточно высокий, но все же на уровне только в 80 Па. Во всех остальных автомобилях величины суммарных эффективных площадей неплотностей их кузовов намного ниже допустимых, приведенных в табл. 1, соот-

ветственно, подпоры давлений, создаваемых в их салонах вентиляционными системами, далеки по величине от необходимых значений.

Приведённые примеры наглядно показывают, насколько существенные результаты можно получить при использовании понятия эффективной площади отверстий и неплотностей кузова автомобиля.

Библиографический список

1. ГОСТ - 24054 - 80. Методы испытаний на герметичность. Общие требования. – М.: Госкомитет СССР по стандартам: Издательство стандартов, 1982.
2. **Палутин, Ю.И.** Способ определения степени герметичности изделий / Ю. И. Палутин [и др.]. Авторское свидетельство СССР N 1796949 G 01 М 3/26 от 8.10.92 г.
3. **Идельчик, И. Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е.Идельчик. М.: Машиностроение, 1975. – 559 с.
4. Пат. РФ RU N 2042108 Способ измерения величин площадей неплотностей / Палутин Ю. И. С1 6 G 01 В 13/20; опубл. 16.02.1993.
5. **Палутин, Ю.И.** Требуемый воздухообмен салона автомобиля. Улучшение технико-эксплуатационных показателей мобильной техники / Ю.И. Палутин [и др.] // Материалы 13-й научно-практической конференции вузов Поволжья и Предуралья. Нижний Новгород, 2003. С. 195–198.

*Дата поступления
в редакцию 25.04.2011*

Yu. I. Palutin

CRITERION OF HERMETIC AUTOMOBILE BODIES

This article shows two criteria helping estimate hermetic bodies of different automobiles. It also introduces the determination “effective space of incompactness” and lists the possible levels of hermetic bodies.

Key words: criteria of hermetic automobile bodies; effective space of incompactness; possible levels of hermetic bodies.

УДК 629.113

А.М. Грошев¹, В.В. Михайлов², В.А. Никольский³, А.В. Тумасов¹**ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТОРМОЗНЫХ СВОЙСТВ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
ООО Торгово-производственное предприятие «ПЕЛЕНГ»²,
НП Институт сертификации автотехники³

Описаны принципиальные схемы программно-аппаратных комплексов, позволяющих оценивать тормозные свойства транспортных средств с пневматической и гидравлической тормозными системами в лабораторных условиях по результатам имитационного моделирования.

Ключевые слова: имитационное моделирование, программно-аппаратный комплекс, тормозные свойства, транспортное средство.

Исследование свойств активной безопасности, в том числе тормозных свойств, является важной задачей на этапах проектирования, доводки и сертификации транспортных средств (ТС). Все большее значение при выполнении работ, направленных на повышение активной безопасности ТС, приобретает имитационное моделирование, представляющее процесс конструирования на ЭВМ модели сложной реальной системы, функционирующей во времени, и постановки экспериментов на этой модели с целью либо понять поведение системы, либо оценить различные стратегии, обеспечивающие функционирование данной системы [1]. Имитационные модели транспортных средств и систем могут быть использованы для оценки их эксплуатационных свойств, определения возможных способов совершенствования их конструкций, оценки влияния определенных конструктивных изменений на управляемость, устойчивость и тормозные свойства.

В последнее время наиболее перспективным является проведение имитационного моделирования движения ТС с использованием программно-аппаратных комплексов (ПАК), включающих в себя реальные компоненты автомобиля, специальный измерительный комплекс, современное программное обеспечение. Такой подход позволяет моделировать поведение транспортных средств с учетом особенностей работы реальных агрегатов и блоков управления [2].

Следует отметить, что применение ПАК имеет важное практическое значение, например, Правилами ЕЭК ООН №13-11 [3], принятыми 10 сентября 2009 г. постановлением Правительства Российской Федерации №720 в составе Технического регламента о безопасности колесных транспортных средств, допускается оценка движения ТС, оснащенного системой электронного контроля устойчивости (ЭКУ), как по результатам натурных испытаний, так и по результатам имитационного моделирования [4]. В связи с этим, оценка эффективности системы ЭКУ с помощью ПАК имеет хорошие перспективы, поскольку полученные результаты могут быть реализованы на практике не только в виде конкретных конструкторских решений, но также использованы при сертификации ТС.

На рис. 1 показана схема ПАК, используемого специалистами компании «Кнорр-Бремзе» при проведении исследовательских работ и позволяющего оценивать эксплуатационные свойства большегрузных транспортных средств.

На стенде могут быть размещены реальные агрегаты пневматической тормозной системы автобуса или тягача и прицепа / полуприцепа. Все агрегаты соединяются между собой соответствующими трубопроводами. Тормозная система питается сжатым воздухом и по-

средством органов управления (главного многосекционного тормозного крана и крана стояночной тормозной системы) приводится в действие.



Рис. 1. ПАК для имитации движения большегрузных ТС

а – стенд с реальными агрегатами тормозной системы; *б* – виртуальная модель ТС

На рис. 2 показана принципиальная схема аналогичного стенда, разработанная специалистами НГТУ им. Р.Е. Алексеева, на котором установлена тормозная система грузового автомобиля с антиблокировочной системой (АБС) и противобуксовочной системой (ПБС). На компьютере (поз. 1) установлено специальное программное обеспечение, которое позволяет создавать модель ТС, учитывающую основные конструктивные особенности: геометрические и инерционные характеристики узлов и агрегатов, характер распределения массы по осям, высоту центра тяжести ТС, параметры двигателя, трансмиссии, подвески, колес, шин и др. При имитационном моделировании может рассматриваться как нагруженное, так и порожнее состояние транспортного средства, при этом в нагруженном состоянии учитываются масса перевозимого груза, характер распределения массы и высота его центра тяжести.

Программное обеспечение позволяет симитировать дорожные условия (микро- и макропрофиль дороги, коэффициент сцепления шин ТС с полотном пути, направление и скорость ветра), а также действия водителя (управляющее воздействие на органах управления). Таким образом, учитываются основные факторы, воздействующие на траекторию движения ТС, способные привести к потере устойчивости или возможному опрокидыванию.

В процессе моделирования движения модель ТС начинает разгоняться и двигаться по определенной траектории. В том случае, если имитируется процесс торможения, то сигнал о начале торможения через преобразователь сигналов (поз. 2) передается на исполнительные цилиндры (поз. 15 и 17), способные привести в действие главный тормозной кран (служебное торможение) и кран стояночного тормоза (аварийное торможение). В то же время сигнал с компьютера передается на электронный блок управления тормозной системой (поз. 14), который получает информацию об угловой скорости вращения «виртуальных» колес модели ТС. Электронный блок анализирует данные о движении автомобиля и управляет режимами работы модуляторов системы АБС (поз. 10), контролируя тем самым давление в тормозных механизмах передней и задней оси.

Штоки тормозных камер (поз. 11 и 19) упираются в специальные упругие элементы, называемые имитаторами тормозных механизмов (поз. 12). При этом характеристики упругих элементов подбираются таким образом, чтобы характеристика имитатора (зависимость усилия сжатия от деформаций) наиболее полным образом соответствовала характеристике реального тормозного механизма. В качестве таких имитаторов могут использоваться резиновые цилиндрические буферы либо стальные пружины.

При срабатывании тормозной системы, в результате нарастающего давления, штоки тормозных камер совершают поступательное движение, которое фиксируется датчиками абсолютных перемещений (поз. 13). Сигнал с датчиков передается в компьютер, где с помощью специальных алгоритмов определяется величина тормозного момента, создаваемого на том или ином колесе модели ТС. После этого на мониторе компьютера отображается пове-

дение ТС с учетом работы агрегатов тормозной системы. Затем процесс передачи данных, характеризующий относительно высокой скоростью передачи сигналов, повторяется.

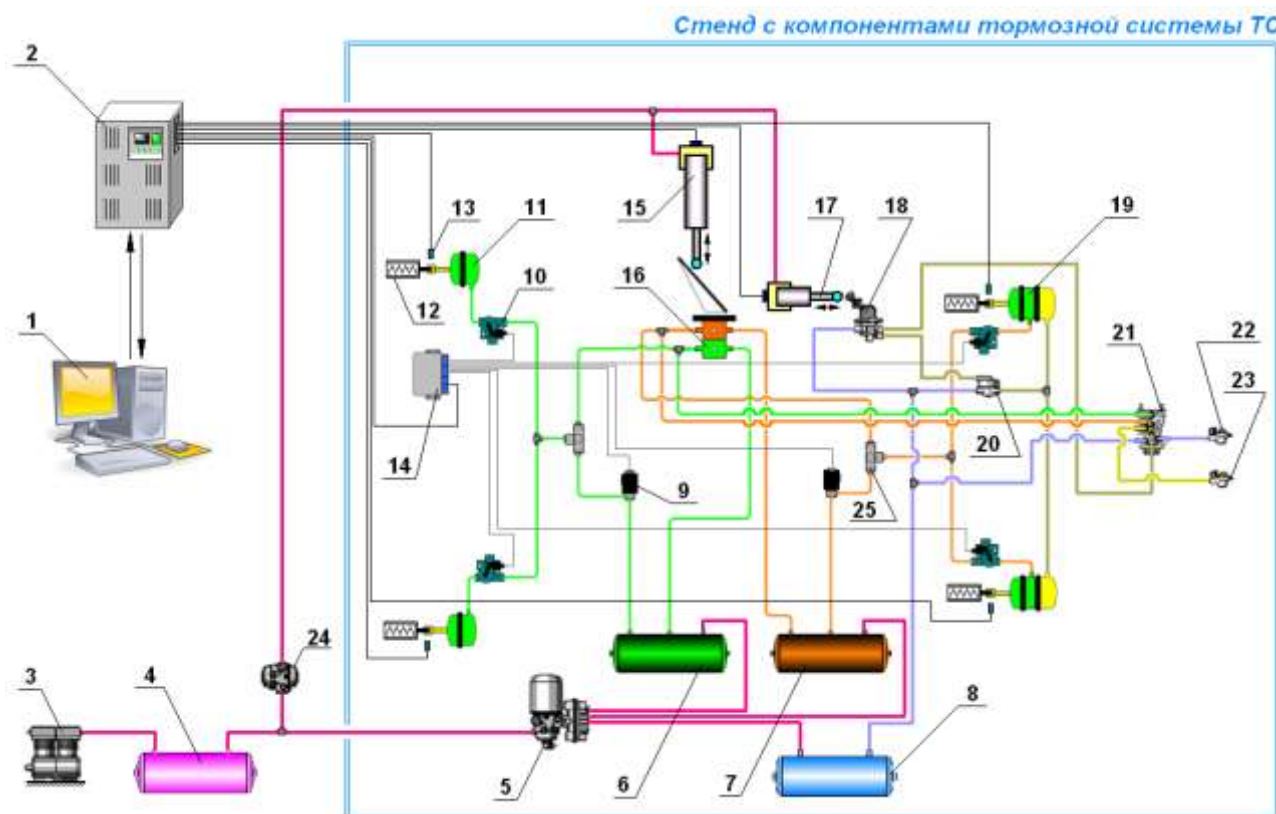


Рис. 2. Принципиальная схема ПАК

1 – компьютер с ПО и виртуальной моделью ТС; 2 – преобразователь сигналов (LABCAR); 3 – компрессор; 4 – ресивер; 5 – модуль подготовки воздуха (осушитель, регулятор давления, многоконтурный защитный клапан); 6 – ресивер переднего контура тормозной системы; 7 – ресивер заднего контура тормозной системы; 8 – ресивер стояночной тормозной системы; 9 – клапан регулирования давления противобуксочной системы; 10 – модулятор (клапан контроля давления); 11 – тормозная камера; 12 – имитатор тормозного механизма (пружина либо резиновый буфер); 13 – датчик перемещения штока тормозной камеры; 14 – электронный блок управления; 15 – исполнительный пневмоцилиндр, воздействующий на главный тормозной кран; 16 – главный тормозной кран; 17 – исполнительный пневмоцилиндр, воздействующий на кран стояночной тормозной системы; 18 – кран стояночной тормозной системы; 19 – тормозная камера с энергоаккумулятором; 20 – ускорительный клапан; 21 – клапан управления тормозами прицепа; 22 – питающая соединительная головка; 23 – управляющая соединительная головка; 24 – регулятор давления исполнительных пневмоцилиндров; 25 – двухмагистральный защитный клапан

Программно-аппаратные комплексы, предназначенные для оценки тормозных свойств транспортных средств с гидравлическими тормозными системами, несколько отличаются от ПАК, показанных на рис. 1 и 2.

Например, имитационный стенд-тренажер, разработанный специалистами ВолгГТУ [5, 6] и предназначенный для проведения виртуальных испытаний тормозных систем легковых автомобилей, включает в себя три соединенных между собой персональных компьютера, реальные компоненты тормозной системы легкового автомобиля, устройство для имитации воздействий на рулевое колесо, устройство сопряжения объектов, энергетическую и измерительную системы. Для исследования характера движения в режиме торможения на имитационном стенде-тренажере перед водителем установлен монитор, при этом на персональном компьютере реализуется построение и отображение дорожной обстановки и динамики изменения дорожной ситуации.

На рис. 3 показана функциональная схема аналогичного ПАК, разработанного специалистами НГТУ им Р.Е. Алексеева и ООО ТПП «ПЕЛЕНГ», предназначенного для оценки эффективности гидравлических тормозных систем ТС, оснащенных системами ЭКУ.

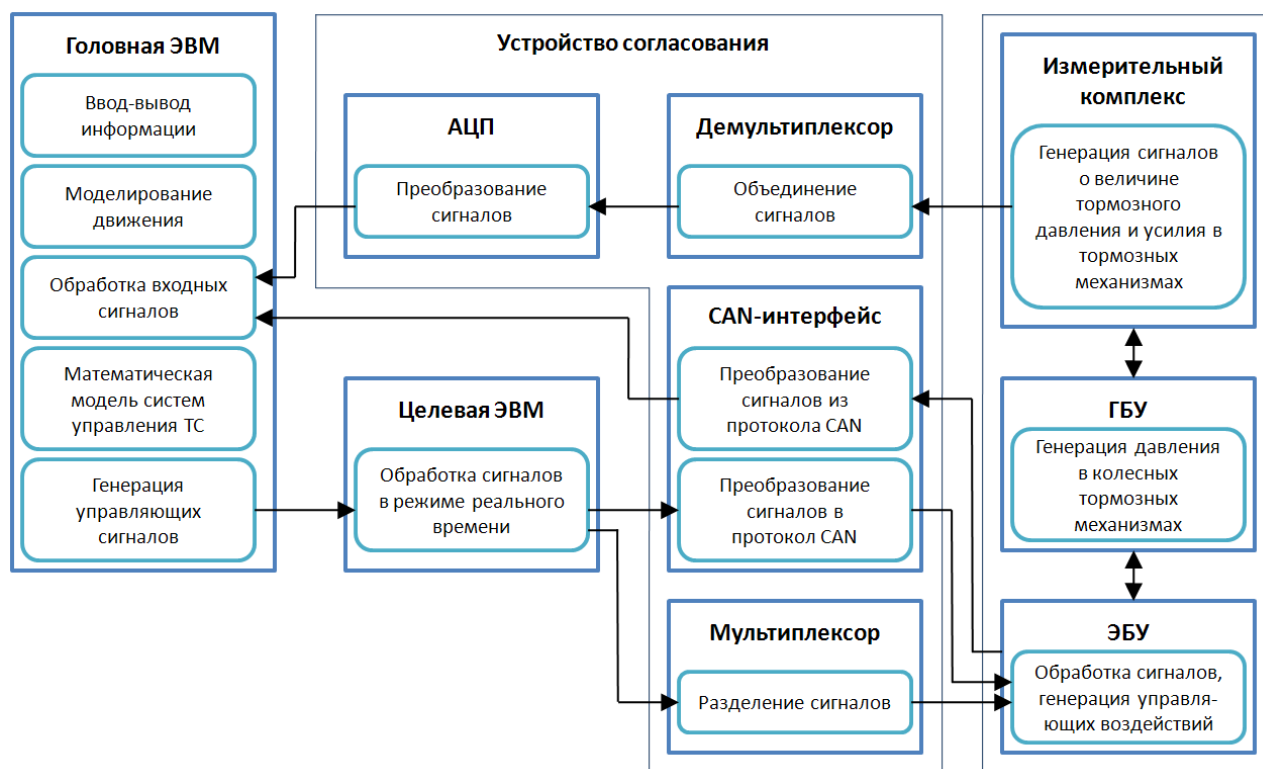


Рис. 3. Функциональная схема ПАК для испытаний тормозных гидравлических систем с ЭКУ

ПАК состоит из вычислительной и физической частей. Вычислительная часть представляет собой две электронные вычислительные машины: головную и целевую. Головная ЭВМ реализует пространственную математическую модель криволинейного движения ТС с использованием среды прикладного графического программирования. Специальное программное обеспечение позволяет моделировать конструктивные параметры ТС, дорожные условия и управляющие воздействия водителя, которые могут быть либо заданы заранее, либо осуществляться оператором ПАК в режиме реального времени путем воздействия на виртуальные органы управления автомобилем для обеспечения требуемых скорости и траектории движения ТС.

Целевая ЭВМ осуществляет обработку в режиме реального времени управляющих сигналов от головной ЭВМ. Целевая ЭВМ передает на физическую часть ПАК (прежде всего на электронный блок управления (ЭБУ) системы ЭКУ) те сигналы, которые физически не могут быть получены на стенде: угловые скорости вращения колес, угол поворота рулевого колеса, продольное и поперечное ускорение ТС, угловое ускорение вращения ТС относительно вертикальной оси (скорость рыскания), а также сигналы от других ЭБУ: двигателя, коробки передач и др. Часть этих сигналов должна быть преобразована в аналоговый вид с помощью мультиплексора, а часть – в протокол CAN посредством соответствующего интерфейса.

Физическая часть представляет собой стенд с установленными на нем реальными компонентами тормозной системы автомобиля: главным тормозным цилиндром (ГТЦ) в сборе с питательным бачком, педалью тормоза и вакуумным усилителем тормозов (ВУТ), интегрированным ЭБУ и гидравлическим блоком управления (ГБУ), рабочими тормозными цилиндрами (РТЦ) с имитаторами колесных тормозных механизмов (ТМ) и трубопроводами соответствующей длины. При этом, как и в случае с ПАК для испытаний тормозных систем с

пневматическим приводом, характеристики упругих элементов имитаторов подбираются таким образом, чтобы наиболее полно соответствовать характеристике реального тормозного механизма.

Кроме того, на стенде установлены вакуумный насос для обеспечения корректной работы ВУТ и измерительный комплекс для регистрации актуальных состояний и реакций системы. Принципиальная схема ПАК представлена на рис. 4.

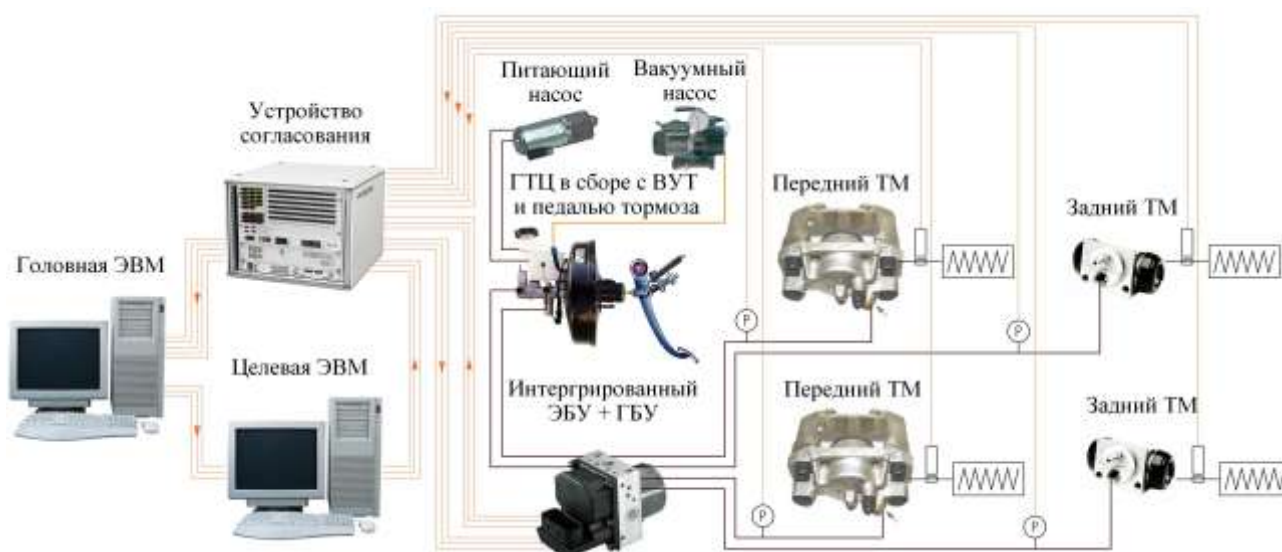


Рис. 4. Принципиальная схема ПАК для испытаний тормозных гидравлических систем с ЭКУ

ЭБУ системы ЭКУ получает сигналы от целевой ЭВМ и генерирует управляющие воздействия на компоненты ТС: модуляторы давления, питающие и отсечные клапаны, возвратный и питающий насосы. Соответствующие изменения в состоянии ТС регистрируются измерительным комплексом, который обеспечивает регистрацию следующих параметров:

- давление в обоих контурах ГТЦ;
- давление в четырех контурах колесных ТМ;
- перемещение исполнительных устройств в колесных ТМ.

С помощью АЦП сигналы датчиков давления и перемещения преобразуются в цифровой вид и передаются в головную ЭВМ для обработки и пересчета в значения тормозных усилий. Также с помощью интерфейса CAN регистрируются и преобразуются исходящие из ЭБУ системы ЭКУ цифровые сигналы, предназначенные для других ЭБУ ТС.

Таким образом, осуществляется непрерывный процесс контроля и взаимодействия между виртуальной и физической составляющими модели.

Необходимо отметить важное отличие при работе системы в режиме торможения и в режиме контроля курсовой устойчивости и управляемости. В режиме торможения давление в системе создается с помощью педали тормоза, а в режиме контроля курсовой устойчивости и управляемости – питающим и возвратным насосами.

Рассмотренные ПАК позволяют в режиме реального времени оценить характер поведения ТС с учетом особенностей работы реальных агрегатов тормозной системы (пневматической или гидравлической).

Следует подчеркнуть, что имитационное моделирование имеет целый ряд преимуществ по сравнению с дорожными испытаниями:

- независимость от погодных условий;
- гибкие возможности по изменению модели и оценки влияния различных конструктивных параметров на динамику движения ТС;

- возможность имитирования практически любых дорожных ситуаций (различных маневров и дорожных условий);
- возможность моделирования отказа отдельных компонентов;
- возможность получения полного массива данных о процессе движения ТС.

Библиографический список

1. **Шеннон, Р.** Имитационное моделирование систем – искусство и наука / Р. Шеннон. – М.: Мир, 1978. – 415с.
2. **Тумасов, А.В.** Применение электронных систем курсовой устойчивости на коммерческом транспорте российского производства / А.В. Тумасов, А.М. Грошев, Л. Палкович // Журнал ассоциации автомобильных инженеров. 2010. №1 (60). С. 34-37.
3. **Правила ЕЭК ООН №13-10** «Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств категорий М, N и O в отношении торможения».
4. **Технический регламент о безопасности колесных транспортных средств.** Постановление Правительства Российской Федерации № 720 от 10.09.2009 г.
5. **Дыгало, В.Г.** Виртуально-физическая технология моделирования в цикле проектирования автоматизированных тормозных систем / В.Г. Дыгало, А.А. Ревин // Известия ВолгГТУ: межвузовский сборник научных статей. Волгоград. 2007. №8 (34). С. 23–27.
6. **Дыгало, В.Г.** Виртуально-физическая технология лабораторных испытаний систем активной безопасности автотранспортных средств: монография / В.Г. Дыгало, А.А. Ревин; ВолгГТУ. – Волгоград, 2006. – 316 с.

*Дата поступления
в редакцию 25.04.2011*

A.M. Groshev, V.V. Mikhailov, V.A. Nikolsky, A.V. Tumasov

APPLICATION OF HARDWARE-SOFTWARE COMPLEXES FOR VEHICLE BRAKING CHARACTERISTICS ESTIMATION ON BASIS OF SIMULATION RESULTS

The article describes principal schemes of hardware-software complexes that could be used for estimation of braking characteristics of vehicles with hydraulic and pneumatic braking systems in laboratory conditions on basis of simulation results.

Key words: simulation, hardware-software complex, vehicle braking characteristics, vehicle

ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ

УДК 629. 5. 001

Нгуен Вьет Хоан

МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ МАЛЫХ ДЕРЕВЯННЫХ РЫБОЛОВНЫХ СУДОВ

Государственный университет, г. Хайфон (Вьетнам)

Разработана математическая модель выбора оптимального варианта малого рыболовного деревянного судна на начальных стадиях проектирования. Сформулированы алгоритм выбора оптимального варианта судна и задача синтеза проектирования.

Ключевые слова: математическая модель, оптимизация, рыболовные суда, деревянные суда.

Деревянное судостроение прошло большую и интересную историю. Возникнув много веков назад, оно развивалось и совершенствовалось вместе с другими отраслями производства. Применение металла привело к быстрому вытеснению дерева в крупном судостроении. Но дерево и в настоящее время продолжает конкурировать с металлом в малотоннажном судостроении, особенно в строительстве маломерных рыболовных судов стран Юго-Восточной Азии.

Для рыболовного флота СРВ за последние 20 лет (1989–2009 гг.) отмечены следующие тенденции:

- ежегодно в СРВ наблюдается существенное пополнение рыболовного флота страны: с 30 (1989 г.) до 81 тыс. судов (2009 г.);
- суммарная мощность главных двигателей и степень оснащения современным оборудованием быстро возрастает: 368 (1989 г.) до 3091 тыс. кВт (2009 г.);
- удельный годовой вылов на один киловатт мощности флота упал в три раза: 1,56 (1989 г.) до 0,5 т/кВт (2009 г.).

Уменьшение удельного вылова на один киловатт, на наш взгляд, можно объяснить двумя основными причинами:

- резким ростом количества судов, который привел к сокращению запасов рыбы, росту конкуренции в традиционных видах рыболовства;
- МДРС проектируются и строятся во Вьетнаме без должных технических и экономических обоснований, следовательно, и неэффективно эксплуатируются.

Обзор методик проектирования МДРС во Вьетнаме показывает, что применяемые методики являются малоэффективными. Постройка МДРС осуществляется по традиционному вьетнамскому опыту судостроения. При этом судостроители не используют каких-либо правил проектирования и расчетов. Недостатком данного подхода является то, что качество построенных судов практически не предсказуемо. Остойчивость таких судов не проверяется, что не гарантирует судам безопасной эксплуатации. Проектирование судов по традиционному способу требует значительных затрат времени, поскольку если остойчивость судна не обеспечивается, то необходимо вернуться к началу процесса проектирования. Экономические факторы проектантами не учитываются, что не гарантирует эффективности эксплуатации флота.

Так называемое оптимизационное проектирование базируется на методе проектирования по традиционному подходу, но с использованием в качестве уравнения проектирования формулы остойчивости, разработанной Нгуен Куанг Минем, что позволяет ускорить процесс проектирования судна. Однако оптимальный вариант по этой методике выбирается не по экономическим критериям, что не гарантирует эффективности эксплуатации спроектированных и построенных судов, а лишь базируется на обеспечении одного мореходного качества - остойчивости.

При обзоре состояния теории проектирования МДРС особое внимание уделено роли уточненного расчета нагрузки масс и координат ЦТ масс судов на начальных стадиях проектирования. Возможность более точного определения и уточнения нагрузки масс и координат ЦТ масс судна на начальных стадиях сокращает время на проверочные расчеты в следующих этапах и предотвращает грубые ошибки при проектировании. Для рыболовных судов ошибки в определении нагрузки масс и координат ЦТ масс приводят к необходимости принятия на судно значительного количества балласта, что лишает МДРС части грузоподъемности.

Из-за недостатка необходимых данных по нагрузке масс построенных и спроектированных МДРС было принято решение о проектировании серии МДРС с традиционной вьетнамской формой обводов. Элементы конструкции корпуса судов серии набраны по Правилам классификации и постройки МДРС Вьетнама. Проекты судов серии разработаны до стадии эскизного проекта.

Дана оценка диапазона изменения главных размерений, их соотношений, коэффициентов полноты МДРС Вьетнама и мира. Проведен анализ архитектурно-конструктивных типов, конструкций и материалов корпусов МДРС Вьетнама. Принятые характеристики серии МДРС представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики судов серии МДРС

Характеристика	Принятые варьируемые величины
Расчетная длина судна L , м	14,0; 18,0; 22,0; 26,0; 30,0
Отношение L/B	2,50; 3,00; 4,00; 5,00
Отношение L/H	5,00; 6,00; 7,00; 9,00
Отношение T/H	0,550; 0,650; 0,750
Коэффициент общей полноты δ	0,490; 0,600; 0,650
Коэффициент продольной полноты φ	0,540; 0,657; 0,720
Длина машинного отделения	0,25L; 0,30L; 0,35L
Длина рубки	0,20L; 0,25L; 0,30L; 0,35L; 0,40L
Система набора корпуса и рубки	Поперечная
Расположение машинного отделения	Кормовое расположение
Расположение рубки	Кормовое расположение
Набор конструкции корпуса	Традиционный однорядный набор
Материал корпуса и рубки	Древесина групп II и III
Практическая шпация a_n , м	0,30; 0,40; 0,50; 0,60

При вариации расчетной длины, соотношений главных размерений, коэффициентов полноты построены 45 вариантов теоретических чертежей серии путем аффинного преобразования обводов судна прототипа. При вариации практической шпации и материала корпуса получены 270 вариантов конструктивных чертежей судов серии. Нагрузка масс МДРС была разбита на 30 статей водоизмещения порожнем и 7 разделов дедвейта. На рис. 1, в качестве примера, представлен чертеж модели №16 серии МДРС.

Алгоритм расчета масс и координат ЦТ статей нагрузки деревянного корпуса судна

базируется на использовании многофакторного регрессионного анализа. Используется разложение в ряд Тейлора:

$$f(x_1, \dots, x_k) = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i x_i + \sum_{i,j=1}^k a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k a_{ii} x_i^2 + \dots, \quad (1)$$

где a_i - коэффициенты уравнения, $x_{i,j}$ - факторы.

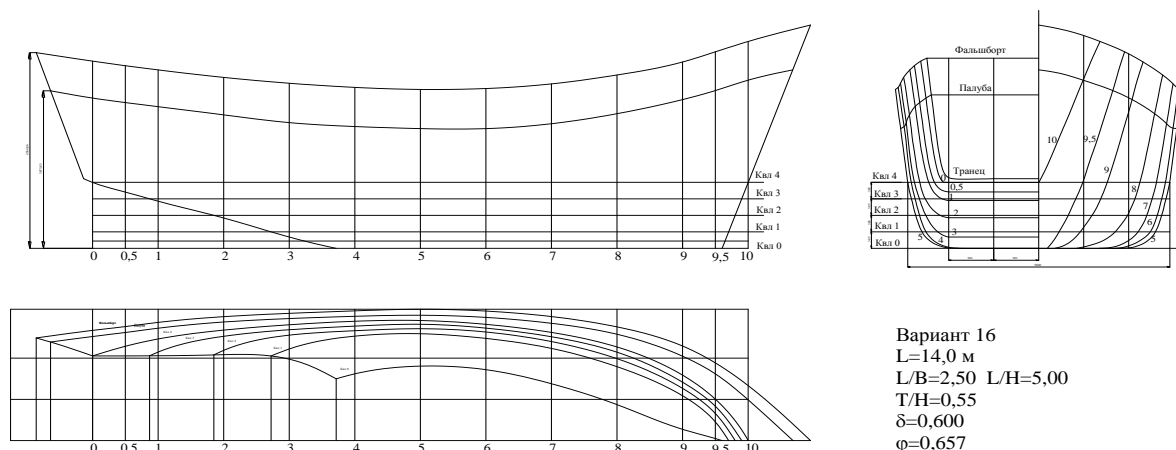


Рис. 1. Теоретический чертеж модели №16 серии МДРС

Масса и координаты ЦТ каждой статьи нагрузки могут быть выражены в зависимости от характеристик судна через (1).

При этом выбор факторов влияния производился путем анализа графиков зависимостей измерителей масс и относительных координат ЦТ статей нагрузки от главных характеристик судна. Математические модели получаются в результате решения системы уравнений вида (1). Количество уравнений вида (1), или количество вариантов судов, требуемых для создания математических моделей, зависит от количества коэффициентов разложения (1). Не используемые в создании математических моделей варианты судов систематической серии МДРС были применены для оценки погрешностей разработанных моделей. Адекватность математических моделей проверена на ряде реальных судов, построенных по тем же правилам проектирования, но в различных конструкторских бюро Вьетнама.

Выявлено, что P_H / L существенно зависит от соотношений главных размерений, коэффициентов полноты и практической шпации. Предлагаемая зависимость для удельной массы наружной обшивки имеет вид

$$P_H / L = f\left(\frac{L}{B}, \frac{L}{H}, \frac{T}{H}, \delta, \varphi, a_{II}\right). \quad (2)$$

Используя уравнение (1) в квадратичной степенной форме получено уравнение регрессии для удельной массы наружной обшивки:

$$\begin{aligned} P_H / L = f\left(\frac{L}{B}, \frac{L}{H}, \frac{T}{H}, \delta, \varphi, a_{II}\right) = & a_0 + a_1 \cdot \frac{L}{B} + a_2 \cdot \frac{L}{H} + a_3 \cdot \frac{T}{H} + a_4 \cdot \delta + a_5 \cdot \varphi + \\ & + a_6 \cdot a_{II} + a_7 \cdot \left(\frac{L}{B}\right)^2 + a_8 \cdot \left(\frac{L}{H}\right)^2 + a_9 \cdot \left(\frac{T}{H}\right)^2 + a_{10} \cdot \delta^2 + a_{11} \cdot \varphi^2 + a_{12} \cdot a_{II}^2 + \\ & + a_{13} \cdot \left(\frac{L}{B}\right) \cdot \left(\frac{L}{H}\right) + a_{14} \cdot \left(\frac{L}{B}\right) \cdot \left(\frac{T}{H}\right) + a_{15} \cdot \left(\frac{L}{B}\right) \cdot \delta + a_{16} \cdot \left(\frac{L}{B}\right) \cdot \varphi + a_{17} \cdot \left(\frac{L}{B}\right) \cdot a_{II} + \\ & + a_{18} \cdot \left(\frac{L}{H}\right) \cdot \left(\frac{T}{H}\right) + a_{19} \cdot \left(\frac{L}{H}\right) \cdot \delta + a_{20} \cdot \left(\frac{L}{H}\right) \cdot \varphi + a_{21} \cdot \left(\frac{L}{H}\right) \cdot a_{II} + a_{22} \cdot \left(\frac{T}{H}\right) \cdot \delta + \\ & + a_{23} \cdot \left(\frac{T}{H}\right) \cdot \varphi + a_{24} \cdot \left(\frac{T}{H}\right) \cdot a_{II} + a_{25} \cdot \delta \cdot \varphi + a_{26} \cdot \delta \cdot a_{II} + a_{27} \cdot \varphi \cdot a_{II} \end{aligned} \quad (3)$$

Для нахождения коэффициентов a_i уравнения (3) было использовано 28 вариантов моделей серии МДРС. Остальные варианты, не использованные при решении (3), применены для определения погрешностей полученной формулы (3). При применении древесины ТАУ (древесина группы II, плотность которой равна $0,85 \text{ т/м}^3$ при влажности 15%) получены коэффициенты уравнения (3), которые представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения коэффициентов уравнения (3)

a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
-544,80	-231,83	3,36	4580,40	23647,09	-21645,33	-2359,71
a_7	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}	a_{13}
-2,07	0,34	-9209,57	-1157486,85	-932556,95	0,61	1,51
a_{14}	a_{15}	a_{16}	a_{17}	a_{18}	a_{19}	a_{20}
945,59	-8,99	8,14	-944,29	-22,25	2,79	-2,54
a_{21}	a_{22}	a_{23}	a_{24}	a_{25}	a_{26}	a_{27}
0,09	91,18	-82,61	9440,11	2078245,61	-36,28	33,36

Среднее квадратичное отклонение, получаемое при использовании формулы (3), для остальных вариантов судов систематической серии МДРС, не задействованных в решении (3), составляет не более 1 %.

Зависимость для относительной аппликаты ЦТ масс наружной обшивки имеет вид

$$(Zg/H)_{н.о.} = f\left(\frac{L}{B}, \frac{L}{H}, \frac{T}{H}, \delta, \varphi, a_{\Pi}\right), \quad (4)$$

где $(Zg/H)_{н.о.}$ - относительная аппликата ЦТ масс наружной обшивки.

Используя уравнение (1) в квадратичной степенной форме, получено уравнение регрессии для аппликаты ЦТ масс наружной обшивки:

$$\begin{aligned} (Zg/H)_{н.о.} = f\left(\frac{L}{B}, \frac{L}{H}, \frac{T}{H}, \delta, \varphi, a_{\Pi}\right) = & a_{0(Zg/H)}^{н.о.} + a_{1(Zg/H)}^{н.о.} \cdot \frac{L}{B} + \\ & + a_{2(Zg/H)}^{н.о.} \cdot \frac{L}{H} + a_{3(Zg/H)}^{н.о.} \cdot \frac{T}{H} + a_{4(Zg/H)}^{н.о.} \cdot \delta + a_{5(Zg/H)}^{н.о.} \cdot \varphi + a_{6(Zg/H)}^{н.о.} \cdot a_{\Pi} + \\ & + a_{7(Zg/H)}^{н.о.} \cdot \left(\frac{L}{B}\right)^2 + a_{8(Zg/H)}^{н.о.} \cdot \left(\frac{L}{H}\right)^2 + a_{9(Zg/H)}^{н.о.} \cdot \left(\frac{T}{H}\right)^2 + a_{10(Zg/H)}^{н.о.} \cdot \delta^2 + \\ & + a_{11(Zg/H)}^{н.о.} \cdot \varphi^2 + a_{12(Zg/H)}^{н.о.} \cdot a_{\Pi}^2 + a_{13(Zg/H)}^{н.о.} \cdot \left(\frac{L}{B}\right) \cdot \left(\frac{L}{H}\right) + a_{14(Zg/H)}^{н.о.} \cdot \left(\frac{L}{B}\right) \cdot \left(\frac{T}{H}\right) + \\ & + a_{15(Zg/H)}^{н.о.} \cdot \left(\frac{L}{B}\right) \cdot \delta + a_{16(Zg/H)}^{н.о.} \cdot \left(\frac{L}{B}\right) \cdot \varphi + a_{17(Zg/H)}^{н.о.} \cdot \left(\frac{L}{B}\right) \cdot a_{\Pi} + a_{18(Zg/H)}^{н.о.} \cdot \left(\frac{L}{H}\right) \cdot \left(\frac{T}{H}\right) + \\ & + a_{19(Zg/H)}^{н.о.} \cdot \left(\frac{L}{H}\right) \cdot \delta + a_{20(Zg/H)}^{н.о.} \cdot \left(\frac{L}{H}\right) \cdot \varphi + a_{21(Zg/H)}^{н.о.} \cdot \left(\frac{L}{H}\right) \cdot a_{\Pi} + a_{22(Zg/H)}^{н.о.} \cdot \left(\frac{T}{H}\right) \cdot \delta + \\ & + a_{23(Zg/H)}^{н.о.} \cdot \left(\frac{T}{H}\right) \cdot \varphi + a_{24(Zg/H)}^{н.о.} \cdot \left(\frac{T}{H}\right) \cdot a_{\Pi} + a_{25(Zg/H)}^{н.о.} \cdot \delta \cdot \varphi + a_{26(Zg/H)}^{н.о.} \cdot \delta \cdot a_{\Pi} + \\ & + a_{27(Zg/H)}^{н.о.} \cdot \varphi \cdot a_{\Pi} \end{aligned} \quad (5)$$

где $a_{i(Zg/H)}^{н.о.}$ - коэффициенты разложения для относительной аппликаты ЦТ масс наружной обшивки. Для нахождения коэффициентов $a_{i(Zg/H)}^{н.о.}$ уравнения (5) требуется использование 28 вариантов серии МДРС. Коэффициенты уравнения (5) представлены в табл. 3 для древесины группы II.

Среднее квадратичное отклонение, получаемое при применении формулы (5) для остальных вариантов судов серии, не принимавших участия в решении (5), не превышает 3,71%.

Таблица 3

Коэффициенты уравнения (5)

$a_{0(Zg/H)}^{н.о.}$	$a_{1(Zg/H)}^{н.о.}$	$a_{2(Zg/H)}^{н.о.}$	$a_{3(Zg/H)}^{н.о.}$	$a_{4(Zg/H)}^{н.о.}$	$a_{5(Zg/H)}^{н.о.}$	$a_{6(Zg/H)}^{н.о.}$
-1223,46	-615,89	11,84	12120,53	235409,20	-215683,89	-6312,47
$a_{7(Zg/H)}^{н.о.}$	$a_{8(Zg/H)}^{н.о.}$	$a_{9(Zg/H)}^{н.о.}$	$a_{10(Zg/H)}^{н.о.}$	$a_{11(Zg/H)}^{н.о.}$	$a_{12(Zg/H)}^{н.о.}$	$a_{13(Zg/H)}^{н.о.}$
7,84	1,09	-24440,64	12747070,94	10304818,95	8,44	5,44
$a_{14(Zg/H)}^{н.о.}$	$a_{15(Zg/H)}^{н.о.}$	$a_{16(Zg/H)}^{н.о.}$	$a_{17(Zg/H)}^{н.о.}$	$a_{18(Zg/H)}^{н.о.}$	$a_{19(Zg/H)}^{н.о.}$	$a_{20(Zg/H)}^{н.о.}$
2531,55	-43,96	40,43	-2522,81	-75,14	18,96	-17,71
$a_{21(Zg/H)}^{н.о.}$	$a_{22(Zg/H)}^{н.о.}$	$a_{23(Zg/H)}^{н.о.}$	$a_{24(Zg/H)}^{н.о.}$	$a_{25(Zg/H)}^{н.о.}$	$a_{26(Zg/H)}^{н.о.}$	$a_{27(Zg/H)}^{н.о.}$
-1,80	350,89	-316,05	25244,36	22925422,18	-319,83	293,72

Зависимость для относительной абсциссы ЦТ масс наружной обшивки имеет вид

$$(Xg/L)_{н.о.} = f\left(\frac{L}{B}, \frac{L}{H}, \frac{T}{H}, \delta, \varphi\right), \quad (6)$$

где $(Xg/L)_{н.о.}$ - относительная абсцисса ЦТ масс наружной обшивки. Используя уравнение (1) в квадратичной степенной форме, получено уравнение регрессии для относительной абсциссы ЦТ наружной обшивки:

$$\begin{aligned} (Xg/L)_{н.о.} = f\left(\frac{L}{B}, \frac{L}{H}, \frac{T}{H}, \delta, \varphi\right) = & a_{0(Xg/L)}^{н.о.} + a_{1(Xg/L)}^{н.о.} \cdot \frac{L}{B} + a_{2(Xg/L)}^{н.о.} \cdot \frac{L}{H} + \\ & + a_{3(Xg/L)}^{н.о.} \cdot \frac{T}{H} + a_{4(Xg/L)}^{н.о.} \cdot \delta + a_{5(Xg/L)}^{н.о.} \cdot \varphi + a_{6(Xg/L)}^{н.о.} \cdot \left(\frac{L}{B}\right)^2 + a_{7(Xg/L)}^{н.о.} \cdot \left(\frac{L}{H}\right)^2 + \\ & + a_{8(Xg/L)}^{н.о.} \cdot \left(\frac{T}{H}\right)^2 + a_{9(Xg/L)}^{н.о.} \cdot \delta^2 + a_{10(Xg/L)}^{н.о.} \cdot \varphi^2 + a_{11(Xg/L)}^{н.о.} \cdot \left(\frac{L}{B}\right) \cdot \left(\frac{L}{H}\right) + \\ & + a_{12(Xg/L)}^{н.о.} \cdot \left(\frac{L}{B}\right) \cdot \left(\frac{T}{H}\right) + a_{13(Xg/L)}^{н.о.} \cdot \left(\frac{L}{B}\right) \cdot \delta + a_{14(Xg/L)}^{н.о.} \cdot \left(\frac{L}{B}\right) \cdot \varphi + \\ & + a_{15(Xg/L)}^{н.о.} \cdot \left(\frac{L}{H}\right) \cdot \left(\frac{T}{H}\right) + a_{16(Xg/L)}^{н.о.} \cdot \left(\frac{L}{H}\right) \cdot \delta + a_{17(Xg/L)}^{н.о.} \cdot \left(\frac{L}{H}\right) \cdot \varphi + a_{18(Xg/L)}^{н.о.} \cdot \left(\frac{T}{H}\right) \cdot \delta + \\ & + a_{19(Xg/L)}^{н.о.} \cdot \left(\frac{T}{H}\right) \cdot \varphi + a_{20(Xg/L)}^{н.о.} \cdot \delta \cdot \varphi \end{aligned} \quad (7)$$

где $a_{i(Xg/L)}^{н.о.}$ - коэффициенты разложения для относительной абсциссы ЦТ масс наружной обшивки. Для нахождения коэффициентов $a_{i(Xg/L)}^{н.о.}$ уравнения (7) требуется 21 вариант моделей серии МДРС. Коэффициенты уравнения (7) представлены в табл. 4 для древесины группы II.

Среднее квадратичное отклонение, получаемое при применении формулы (7), для остальных вариантов судов серии, не принимающих участие в решении (7), составляет не более 2,76 %.

Таблица 4

Коэффициенты уравнения (7)

$a_{0(Xg/L)}^{н.о.}$	$a_{1(Xg/L)}^{н.о.}$	$a_{2(Xg/L)}^{н.о.}$	$a_{3(Xg/L)}^{н.о.}$	$a_{4(Xg/L)}^{н.о.}$	$a_{5(Xg/L)}^{н.о.}$	$a_{6(Xg/L)}^{н.о.}$
-46,00	-0,05	-0,07	1,97	3878,96	-3386,06	0,01
$a_{7(Xg/L)}^{н.о.}$	$a_{8(Xg/L)}^{н.о.}$	$a_{9(Xg/L)}^{н.о.}$	$a_{10(Xg/L)}^{н.о.}$	$a_{11(Xg/L)}^{н.о.}$	$a_{12(Xg/L)}^{н.о.}$	$a_{13(Xg/L)}^{н.о.}$
0,01	-1,00	746041,51	627538,54	-0,02	0,22	10,66
$a_{14(Xg/L)}^{н.о.}$	$a_{15(Xg/L)}^{н.о.}$	$a_{16(Xg/L)}^{н.о.}$	$a_{17(Xg/L)}^{н.о.}$	$a_{18(Xg/L)}^{н.о.}$	$a_{19(Xg/L)}^{н.о.}$	$a_{20(Xg/L)}^{н.о.}$
-9,77	-0,15	-10,57	9,69	107,05	-98,13	-1368615,69

Аналогичным образом разработаны функциональные зависимости для масс и координат ЦТ других 17 статей нагрузки деревянного корпуса.

Зависимости нагрузки масс и относительных координат ЦТ остальных 12 статей нагрузки судна порожнем разработаны путем статистической обработки данных по построенным и спроектированным МДРС СССР. Для разработки таких зависимостей были использованы данные МДРС длиной между перпендикулярами $L = 11,5 \div 26,0$ м, шириной расчетной $B = 3,90 \div 6,10$ м, с высотой борта до верхней палубы $H = 1,50 \div 3,00$ м, мощностью силовой установки $N = 50 \div 300$ л.с. Особенности архитектурно-конструктивного типа всех собранных МДРС являются кормовое расположение машинного отделения под рулевой рубкой и носовое расположение рыбного трюма. В качестве примеров представлены графики зависимостей массы и относительных координат ЦТ якорного устройства (рис. 2–4).

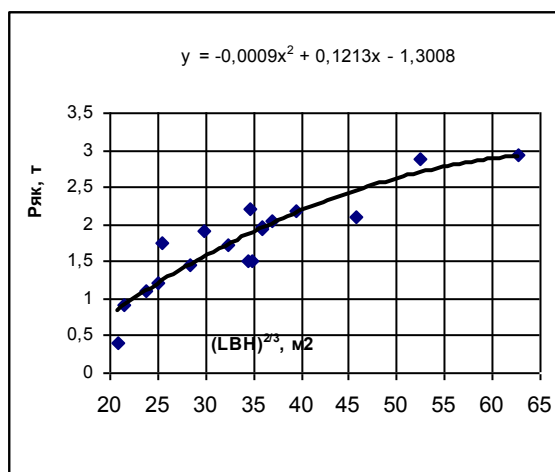


Рис. 2. Зависимость массы якорного устройства от модуля $(LBH)^{2/3}$:

y – масса якорного устройства $P_{як}$, т;
 x – модуль зависимости $(LBH)^{2/3}$

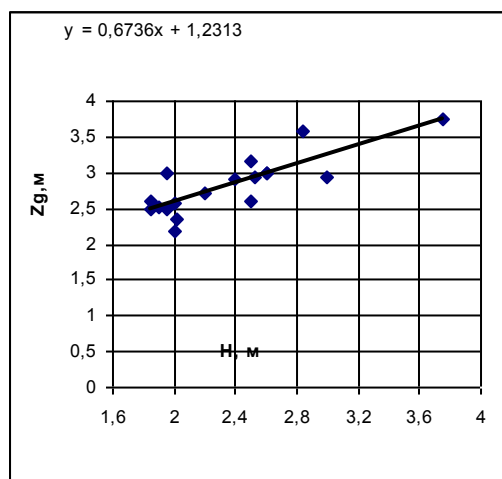


Рис. 3. Зависимость аппликаты центра тяжести масс якорного устройства:

y – аппликата ЦТ якорного устройства Z_g от основной плоскости;
 x – модуль зависимости H

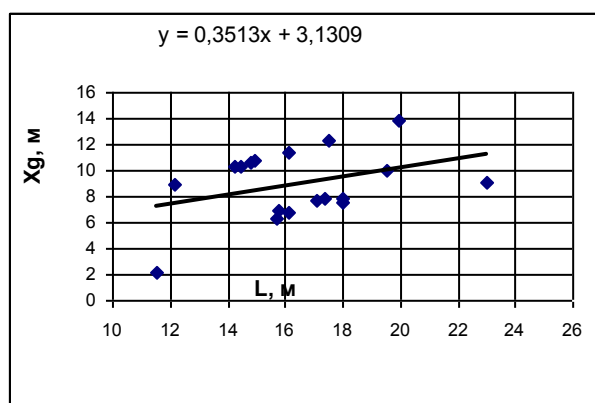


Рис. 4. Зависимость абсциссы центра тяжести масс якорного устройства:

y – абсцисса ЦТ якорного устройства X_g от плоскости мидель - шпангоута, м («+» – в нос, «-» – в корму);
 x – модуль зависимости L

Зависимость для определения массы якорного устройства:

$$P_{\text{як}} = -0,0009 \cdot (LBH)^{4/3} + 0,1213 \cdot (LBH)^{2/3} - 1,301, \text{ т.} \quad (8)$$

Зависимость для подсчета аппликаты ЦТ якорного устройства:

$$Z_G = 0,6736 \cdot H + 1,231, \text{ м.} \quad (9)$$

Зависимость абсциссы ЦТ якорного устройства:

$$X_G = 0,3513 \cdot L + 3,131, \text{ м.} \quad (10)$$

Функциональные зависимости, связывающие массу и относительные координаты ЦТ статей нагрузки дедвейта судна от его основных характеристик, были разработаны для нескольких типовых случаев нагрузки, при которых требуется проверка остойчивости и посадки судна. По правилам Регистра Вьетнама остойчивость рыболовного судна должна быть проверена для следующих случаев нагрузки:

- выход на промысел с полными запасами;
- возвращение с промысла с полным уловом в трюме и 10 % запасов;
- возвращение с промысла с 20 % улова в трюме, с 70 % нормы льда и соли и с 10 % запасов.

Адекватность разработанной методики пересчета масс и координат ЦТ МДРС проверена на реальных проектах судов, построенных различными конструкторскими бюро Вьетнама, путем оценки погрешностей в определении водоизмещения и координат ЦТ судов.

В табл. 5–7 представлены расчеты сравнения и относительные погрешности в определении водоизмещения и координат ЦТ этих судов для различных случаев нагрузки.

Таблица 5

**Сравнение нагрузки масс и координат центра тяжести масс МДРС СРВ
в случае нагрузки «100% улова + 10% запасов»**

Проект	По методике			Проект			Относит. погрешность, %		
	$P, \text{ т}$	$X_G, \text{ м}$	$Z_G, \text{ м}$	$P, \text{ т}$	$X_G, \text{ м}$	$Z_G, \text{ м}$	$\delta P, \%$	$\delta X_G, \%$	$\delta Z_G, \%$
BTH-195-BTS	59,89	0,764	1,528	57,54	0,684	1,570	4,1	11,7	-2,7
BTH-182-BTS	52,32	0,243	1,426	53,10	0,225	1,523	-1,5	7,9	-6,4
BTH-176-BTS	55,49	-0,316	1,407	52,46	-0,363	1,379	5,8	-13,0	2,0
KH-015	71,28	0,596	1,639	73,91	0,624	1,635	-3,6	-4,4	0,3
KH-014	92,89	0,326	1,651	98,74	0,332	1,669	-5,9	-1,6	-1,1
QNg-04-BTS	68,50	0,091	1,688	72,67	0,079	1,712	-5,7	14,4	-1,4
QNg-23-BTS	100,00	0,482	1,690	104,51	0,553	1,742	-4,3	-12,8	-3,0
BRVT-02-BTS	156,46	0,417	2,445	159,36	0,447	2,405	-1,8	-6,6	1,6

Таблица 6

**Сравнение нагрузки масс и координат центра тяжести масс МДРС СРВ
в случае нагрузки «Выход судна на промысел»**

Проект	По методике			Проект			Относит. погрешность, %		
	$P, \text{ т}$	$X_G, \text{ м}$	$Z_G, \text{ м}$	$P, \text{ т}$	$X_G, \text{ м}$	$Z_G, \text{ м}$	$\delta P, \%$	$\delta X_G, \%$	$\delta Z_G, \%$
BTH-195-BTS	52,05	0,276	1,460	51,33	0,257	1,560	1,4	7,4	-6,4
BTH-182-BTS	52,98	0,320	1,747	53,68	0,315	1,880	-1,3	1,7	-7,1
BTH-176-BTS	53,22	-0,329	1,340	52,95	-0,303	1,402	0,5	8,4	-4,4
KH-015	68,23	0,126	1,504	71,86	0,145	1,605	-5,1	-12,9	-6,3
KH-014	89,83	-0,374	1,598	94,23	-0,342	1,671	-4,7	9,4	-4,3
QNg-04-BTS	62,17	-0,047	1,598	65,20	-0,041	1,648	-4,7	13,0	-3,1
QNg-23-BTS	98,15	-0,316	1,645	102,36	-0,274	1,689	-4,1	15,4	-2,6
BRVT-02-BTS	153,50	0,065	2,247	149,19	0,073	2,318	2,9	-11,1	-3,0

Таблица 7

**Сравнение нагрузки масс и координат центра тяжести МДРС СРВ
в случае нагрузки «20% улова + 70% льда + 10% запасов»**

Проект	По методике			Проект			Относит. погрешность, %		
	$P, \text{ т}$	$Xg, \text{ м}$	$Zg, \text{ м}$	$P, \text{ т}$	$Xg, \text{ м}$	$Zg, \text{ м}$	$\delta P, \%$	$\delta Xg, \%$	$\delta Zg, \%$
BTH-195-BTS	47,80	0,125	1,567	45,90	0,116	1,650	4,1	8,2	-5,0
BTH-182-BTS	42,56	0,146	1,471	44,60	0,165	1,554	-4,6	-11,4	-5,3
BTH-176-BTS	47,77	-0,550	1,395	46,36	-0,505	1,418	3,0	9,0	-1,7
КН-015	58,39	0,357	1,682	61,41	0,325	1,681	-4,9	9,7	0,1
КН-014	79,12	-0,159	1,699	82,24	-0,142	1,718	-3,8	12,4	-1,1
QNg-04-BTS	57,08	-0,005	1,699	60,17	-0,006	1,780	-5,1	-14,0	-4,6
QNg-23-BTS	85,24	0,070	1,767	89,21	0,082	1,810	-4,4	-15,2	-2,4
BRVT-02-BTS	129,99	0,055	2,476	124,91	0,051	2,465	4,1	7,5	0,5

По результатам проведенных расчетов можно сделать вывод, что погрешности в определении полного водоизмещения в целом удовлетворяют стадии технического предложения и эскизного проектирования. Максимальные относительные погрешности оценки водоизмещения не превысили – 5,8%, а аппликаты ЦТ – 7,1%. Погрешности в определении абсциссы ЦТ масс для трех случаев нагрузки судов оказались более высокими, достигая -15,4%, однако на этой стадии проектирования начинается разработка эскиза вида общего и существует возможность откорректировать размещение цистерн и трюмов по условиям оптимизации посадки в различных случаях нагрузки. Повышенная погрешность оценки абсциссы ЦТ МДРС объясняется тем, что в разработанной методике начало системы координат для абсцисс ЦТ масс находится на миделе. Поэтому при расположении ЦТ судов в районе миделя относительные погрешности в определении абсцисс ЦТ масс столь высоки, но фактические погрешности оценки абсцисс ЦТ масс не превышают $5 \div 10$ см.

Разработана математическая модель выбора оптимального варианта МДРС на начальных стадиях проектирования. Алгоритм выбора оптимального варианта судна и задача синтеза проектирования МДРС формулируются следующим образом:

$$C(c_1, \dots, c_p); X(x_1, \dots, x_n); (x_i) \min \leq x_i \leq (x_i)_{\max}, \quad i = 1, \dots, n;$$

$$G_j(X, C) \geq Y_j, \quad j = 1, \dots, m; \quad \text{extr } Z(X, C).$$

где $C(c_1, \dots, c_p)$ – вектор параметров задания; $X(x_1, \dots, x_n)$ – вектор искомых характеристик судна; x_{\min} – минимальные и x_{\max} – максимальные допускаемые величины оптимизируемых переменных; G_j – функциональное ограничение; Y_j – заданное требование проектируемого судна к данному j – качеству; Z – критерий эффективности (функция цели).

Элементы вектора параметров задания представляют собой количественные и качественные требования к проекту. Например, его компонентами являются полная грузоподъемность $P_{\text{гр}}$, скорость свободного хода v_s , дальность плавания, срок инвестиций и т.д.

Компонентами вектора искомых характеристик судна являются главные размерения судна, коэффициенты полноты, полная грузоподъемность $P_{\text{гр}}$, скорость свободного хода v_s и т.п. Функциональные ограничения, описанные в виде неравенств, базируются на основных условиях существования и работоспособности проектируемой системы. Критерий эффективности (функция цели) применяется для глобальной оценки соответствия качеств синтезируемой системы. Значение критерия эффективности для наилучшего варианта экстремально. В качестве критерия может использоваться любой экономический критерий, рассчитанный за срок инвестиционного проекта рыбопромышленного бизнеса.

В разработанной математической модели в качестве элементов вектора параметров задания применяются следующие:

- назначение судна (траулер, сейнер или дрифтер);
- удаленность района промысла от берега, миль;

- срок инвестиционного проекта, лет.

В качестве компонентов вектора искомых характеристик судна принимаются:

- P_{GP} , т - полная грузоподъемность судна с учетом тары и льда;
- v_s , уз. - скорость свободного хода;
- L , м – расчетная длина судна;
- L/B – отношение расчетной длины к ширине судна;
- L/H – отношение расчетной длины к высоте борта судна.

В качестве функциональных ограничений принимаются требования обеспечения остойчивости по Правилам регистра Вьетнама для некоторых типовых случаев нагрузки судна, при которых требуется проверка остойчивости.

*Дата поступления
в редакцию 29.04.2011*

Nguyen Viet Hoan

DESIGN OF SMALL WOODEN FISHINGS BOAT

A mathematical model for choosing the optimal design of small wooden fishing boat in the early design stages are created. Formulated the algorithm for selecting the optimal design of the boat and the problem of synthesis problem of design.

Key words: mathematical model, optimization, fishings boat, wooden ship.

УДК. 629.128

В.А. Кравченко

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МОРСКИХ ВЕРТОЛЕТНЫХ ПЛАТФОРМ

Комплексные инновационные технологии

Обсуждаются вопросы создания и использования промежуточных вертолетных морских платформ, предназначенных для посадки вертолетов, совершающих рабочие полеты от портов континентального побережья до мест добычи углеводородов. Посадка производится в аварийных ситуациях, для дозаправки топливом, отдыха экипажей, при внезапной непогоде и т.п.

Ключевые слова: вертолет, морская платформа, углеводороды, проектирование, конструкция.

Проблемы освоения нефтегазовых месторождений шельфа морей и океанов в настоящее время имеют большое народохозяйственное значение.

Решение этой проблемы невозможно без системного подхода ко всем ее составляющим. Перспективы нефтегазоносности морских месторождений предопределили создание морской нефтегазовой индустрии со своей интенсивно развивающейся техникой, технологией и организацией работ [1], в том числе и развитием инфраструктуры.

По современным оценкам [1], 6,2 млн кв. км приходится на перспективные в плане добычи нефти и газа районы. Из них около 2 млн кв.км относится к Западной Арктике (Баренцево и Карское моря), 1 млн кв. км к Восточной Арктике (море Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское моря).

В статье рассмотрены вопросы создания и использования промежуточных вертолетных морских платформ.

Назначение этих платформ – посадка вертолетов, совершающих рабочие полеты от портов континентального побережья до мест добычи углеводородов. Посадка производится в аварийных ситуациях, для дозаправки топливом, отдыха экипажей, при внезапной непогоде и т.п.

В качестве примера рассмотрим функционирование вертолетной платформы в районе Баренцева моря 300 км севернее п. Териберка. Глубина моря в этом районе ~100 м.

При проектировании таких платформ возникает ряд:

- предполагается, что платформа является плавучим сооружением, поэтому ее форма, размеры должны соответствовать проектной нагрузке как постоянной, так и переменной;
- остойчивость платформы должна обеспечивать ее функционирование при ветроволновых воздействиях и воздействиях от течений в заданном районе плавания. При этом статические или динамические наклонения платформы не должны препятствовать посадке или взлету вертолетов;
- конструкция вертолетной платформы должна быть такой, чтобы ее прочность, применительно к внешним условиям в районах эксплуатации в течение всего срока службы была достаточной и соответствовала требованиям [2]. Действующая на корпус и опорные поверхности платформы внешние ветро-волновые нагрузки могут дополняться ледовыми нагрузками от ледяных полей или от дрейфующего битого льда;
- необходимо обеспечить позиционирование платформы с помощью якорных систем или систем динамического позиционирования.

Конструкция, форма и размеры платформы должны обеспечивать ее функционирование в следующих расчетных режимах: перегона к месту базирования, установки, рабочем, экстремальном.

Вид на правый борт

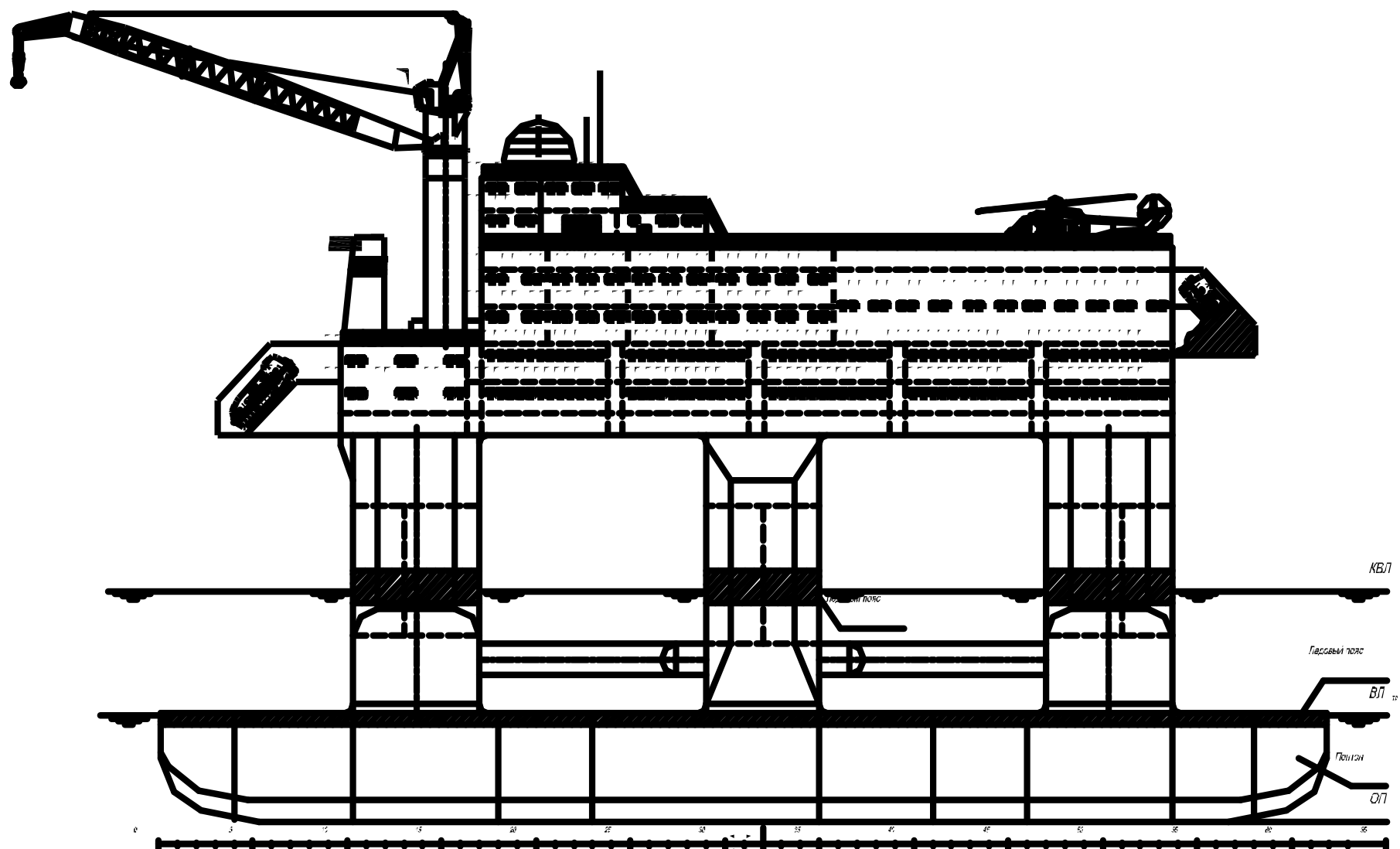


Рис. 1. Схема морской вертолетной платформы

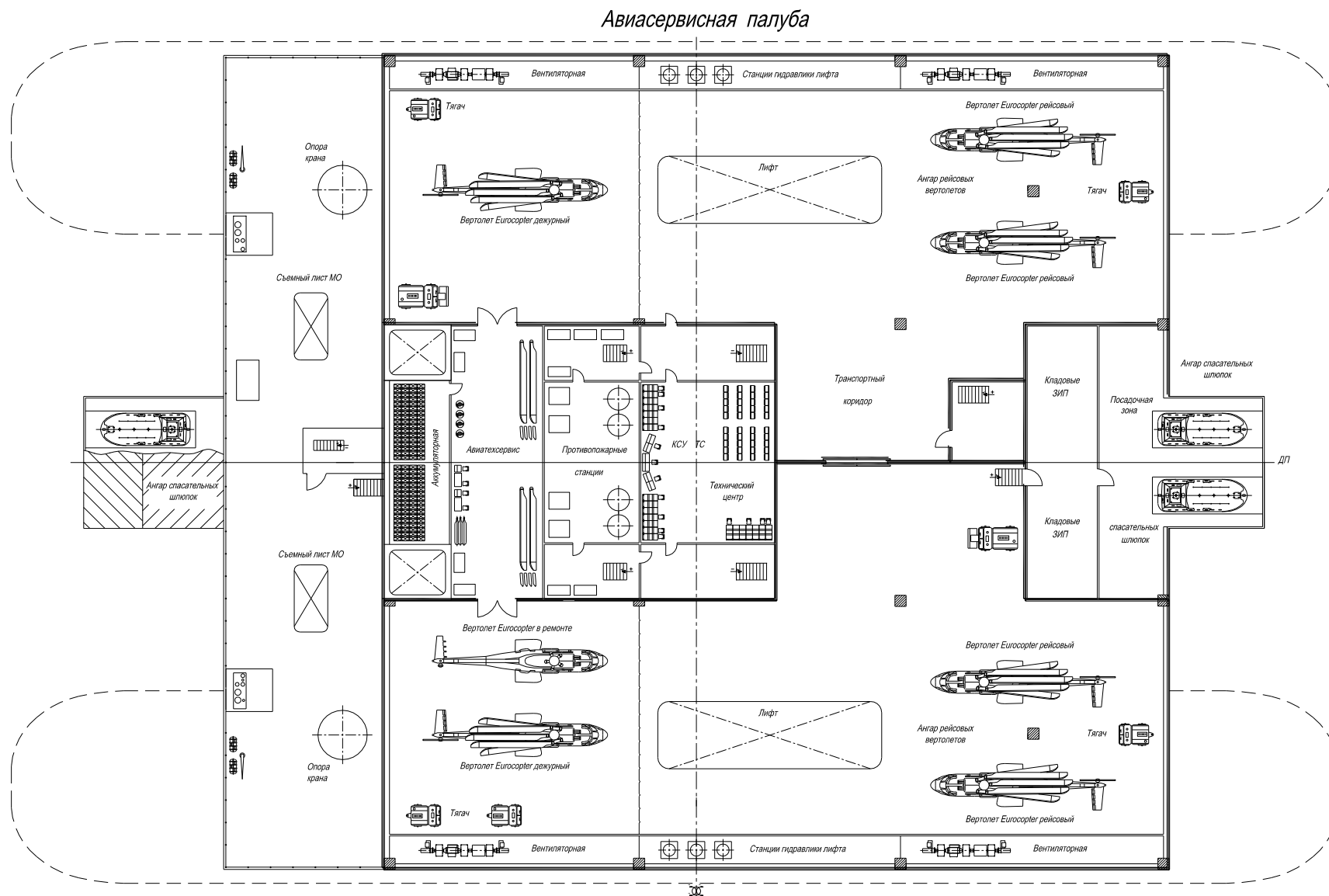


Рис. 2. Схема морской вертолетной платформы

Выполненный проект (техническое предложение) для указанного района представляет двухкорпусный понтон, соединенный мостом, на котором на шести колоннах устанавливается верхнее строение для размещения обслуживающего персонала, механизмов и оборудования, ангара, посадочной площадки.

Основные элементы платформы:

• длина понтонов, м	118,6;
• длина палубы верхнего строения, м	84,5;
• ширина понтона, м	17,2;
• ширина палубы, м	77,7;
• высота расположения верхнего строения от палубы понтонов, м	36,4;
• высота расположения верхнего строения от действующей (рабочей) ватерлинии, м	14,65;
• высота расположения верхнего строения от нижней палубы до верха несъемных частей, м	17,5;
• высота борта понтонов, м	10,15;
• осадка платформы порожнем, м	9,85;
• водоизмещение порожнем, т	~32000;
• осадка эксплуатационная, м	21,5;
• водоизмещение при эксплуатационной осадке, т	55700;
• система позиционирования	Якорная.
• класс КЕ \odot $\boxed{2}$ А1	

С помощью приема жидкого балласта платформа может погружаться до необходимой ватерлинии. Общий вид платформы приведен на рис. 1 и рис. 2.

При оценке ветровых воздействий скорость ветра принималась 46,0 м/с, при этом учитывались порывы ветра и изменение профиля скоростей ветра по высоте.

Значение экстремальной высоты волны 3% обеспеченностью, возможной один раз в 50 лет принималась 19,0 м.

Повторяемость высот волн и скоростей ветра на Баренцевом море принималась:

$h_{3\%}$, м 13-14м – 0,001%;

\bar{v} , м/с 18-20м – 0,001%.

Для оценки волновых воздействий в первом приближении использовалась теория волн Эри. Избыточное давление как сумма гидростатического и гидродинамического давления на подводную часть платформы определялась по зависимости

$$P = \rho g(h - y) + \rho g \frac{h \cdot chky}{2chkh} \cos(kx - wt) ,$$

где ρ – плотность жидкости; h – высота волны; y – текущая ордината; k – волновое число, $k = 2\pi/\lambda$; λ – длина волны, $h = 0,17\lambda^{0.75}$; w – круговая частота волны, $w = 2\pi/T$; T – период волн.

Воздействие течения учитывается только при использовании системы удержания и при суммарной скорости составляющих всех видов течения более 0,5 м/с. В рассматриваемом районе приняты 0,86 м/с в рабочем режиме, 1,01 м/с в штормовом и 1,6 м/с в режиме выживания.

Выполнен расчет действующих сил на вертолетную платформу при пассивном позиционировании.

Библиографический список

1. **Караев, Р.Н.** Океанотехника и морские операции на шельфе / Р.Н. Караев [и др.]. – СПб.: «Моринтех», 2008. – 520 с.
2. Российский Морской Регистр судоходства Правила. – СПб., 2006. – 460 с.

*Дата поступления
в редакцию 29.04.2011*

V.A. Kravchenko

SOME PROBLEMS OF DESIGN MARINE PLATFORMS FOR HELICOPTERS

Discusses the creation and use of intermediate marine platforms for helicopters, intended for landing helicopters performing flights operating from ports in the continental coast to places of hydrocarbon production. Planting should be done in emergency situations, for refueling, rest the crews, with sudden bad weather, etc.

Key words: helicopter, marine platform, hydrocarbons, design, construction.

УДК 629.5.06

В.И. Рудницкий, А.В. Рудницкий, В.С. Виноградов

**ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ
НАДЁЖНОСТЬЮ СУДОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Обоснованы принципы использования информационных технологий для управления надёжностью судового оборудования.

Ключевые слова: надёжность, информационные технологии, судовое оборудование.

Жизненный цикл (ЖЦ) судового оборудования, как и всякого другого изделия, состоит из трёх основных этапов: проектирования, изготовления, эксплуатации.

На этапе проектирования надёжность изделия закладывается расчётным и экспериментальным путём.

На этапе производства надёжность изделия обеспечивается соответствующими технологическими процессами.

На этапе эксплуатации надёжность изделия поддерживается на нормативном (проектном) уровне соблюдением эксплуатационных режимов работы, обеспечением регламентных технических обслуживаний (ТО) и ремонтов.

Обеспечение надёжности судового оборудования на всех этапах ЖЦ требует своевременности, полноты и объективности информации. Информация является определяющим фактором надёжности. Она может формироваться системой менеджмента качества (СМК) проектных, производственных и эксплуатационных предприятий, которая разработана и сертифицирована на соответствие международных стандартов (МС) ISO 9000 и российских стандартов ГОСТ Р ИСО 9000. Затем использоваться для программного инструментария по автоматизированному управлению предприятиями (АСУ) в части обеспечения надёжности.

Рассмотрим принципы использования информационных технологий для обеспечения надёжности изделий.

МС ISO 9000, базирующиеся на принципах всеобщего менеджмента качества (TQM), являются основой производственного партнёрства между проектантами, производителями, эксплуатационниками для обеспечения надёжности судового оборудования при условии развития коммуникаций и умения управления информацией [4].

МС ISO 9000 можно рассматривать как основу:

- для улучшения взаимодействия персонала предприятия, установлению эффективных производственных цепочек;
- построения команд сотрудников по поддержанию информационных потоков;
- распределения необходимой информации по всем процессам внутри предприятия, а также между другими организациями-смежниками;
- мониторинга информационных потоков в целях совершенствования СМК предприятия;
- создания информационного менеджмента, т.е. постоянного совершенствования нормативной документации предприятия;
- формирования непрерывного потока информации.

СМК проектных, производственных и эксплуатационных предприятий на основе МС ISO 9000 являются эффективной информационной технологией, если проводятся следующие корректирующие мероприятия:

- определяются все информационные потоки, связывающие предприятие с организациями-смежниками;

- оценивается степень взаимосвязи информационных потоков после введения СМК на основе стандартов ISO 9000;
- проводится анализ, как стандарты ISO 9000 могут служить основой для информационного потока между организациями-смежниками и обеспечить практические навыки менеджмента.

Рассмотрим применение программного инструментария по управлению предприятием в части обеспечения надёжности изделий. Речи пойдёт об АСУ предприятия, состоящей из организационной и технической систем.

Организационная система включает в себя перечень административных процедур, описывающих процессы планирования, утверждения, принятие решения, контроля, внесения изменений, регламент и форму отчётности.

Техническая система является совокупностью программных и аппаратных средств.

АСУ предприятия реализуется в настоящее время по концепции ERP-систем (Enterprise Resource Planning), решающих задачи автоматизации управления материальными ресурсами, производственными мощностями, финансами, персоналом, сбытом, ТО и ремонтом.

При разработке сложных технических изделий используются PDM-системы (Product Date Management), обеспечивающие доступ к проектной информации и управление процессами проектирования. Основным назначением PDM-систем является управление информацией об изделии на протяжении всего его ЖЦ. С помощью CALS-технологий (Continuous Acquisition and Life – cycle Support) создаётся электронная модель изделия. На основе этой модели должна существовать возможность получения всех данных в процессе эксплуатации изделия: конструкция, регламент ТО и ремонта, отказы и причина их возникновения.

PDM-системы связывают информацию по эксплуатации изделия с системой автоматизированного проектирования (САПР), решающей задачи инженерно-конструкторской подготовки изделия, и ERP-системами предприятий – изготовителей и предприятия, эксплуатирующего изделие. В зависимости от структуры организаций, обеспечивающих проектирование, производство и эксплуатацию изделия, системы PDM, ERP, и САПР могут в комплексе составлять АСУ предприятия.

Использование PDM-систем позволяет отслеживать большие, постоянно обновляющиеся массивы данных и технической информации в ходе жизненного цикла изделия и осуществлять планирование и полный пошаговый автоматизированный контроль за совокупностью данных, описывающих изделие и процессы, с ним связанные. Применяя PDM-системы, можно обеспечить групповую работу над проектом, т. е. возможность одновременного просмотра и совместного использования общих информационных ресурсов предприятия. PDM-системы работают с геометрическими моделями и данными, используемыми производственными линиями, станками с ЧПУ и прочим оборудованием. Исходя из мирового опыта, предприятия, затратившие средства на внедрение PDM-систем, окупают их уже в течение первого года их эксплуатации, благодаря снижению времени простоя конструкторов, сокращению времени внесения изменений в проектные схемы и общей стандартизации цикла внесения изменений в конструкторские проекты, экономя этим трудовые и материальные ресурсы.

В соответствии с международным стандартом ISO9000, качество есть степень, с которой совокупность собственных характеристик выполняет требования. Характеристика каждого изделия отмечает его отличительные свойства. Важнейшей характеристикой судового оборудования является его надёжность. В соответствии с международным стандартом ISO9000, надёжность это собирательный термин, используемый для описания характеристики готовности и влияющих на неё факторов: безотказности, ремонтпригодности и обеспеченности технического обслуживания и ремонта. Современные стандарты, в том числе и ISO9000, требуют от разработчиков и изготовителей доказательств, пусть и формальных, того, что потенциальные неисправности исключены. В свою очередь, своевременное и регулярное поступление информации о состоянии оборудования позволяет специалистам отсле-

живать повторяющиеся происшествия, путём глубокого инженерного анализа выявлять причины отказов и вырабатывать меры по повышению надёжности судна.

Разработка трёхмерной электронной модели, в дополнение ко всему позволяет гораздо более эффективно и рационально воспользоваться и технологиями автоматизированного моделирования надёжности объектов. Среди множества существующих на сегодняшний день методов моделирования надёжности относительно сильно развита технология автоматизированного структурно-логического моделирования надёжности, живучести, безопасности, эффективности и риска функционирования систем [3, 5, 6]. Методика этой технологии стремится обеспечить полную автоматизацию процессов построения математических моделей и расчетов показателей структурных свойств устойчивости сложных объектов в программных комплексах.

Пользователю достаточно подготовить и ввести структурную модель исследуемого свойства устойчивости системы с заданными вероятностными параметрами элементов, чтобы программный комплекс построил математическую модель и на основе этой модели рассчитал различные показатели исследуемого свойства системы. Результаты этих расчетов можно использовать для выработки решений по проектированию и эксплуатации судового оборудования. Такие программные комплексы успешно применялись при расчёте надёжности и рисков некоторых автономных объектов использования атомной энергии на северодвинском предприятии ФГУП «ПО Северное машиностроение». Диапазон задач, решаемых системами автоматизированного моделирования надёжности, на данный момент довольно широк и продолжает развиваться быстрыми темпами.

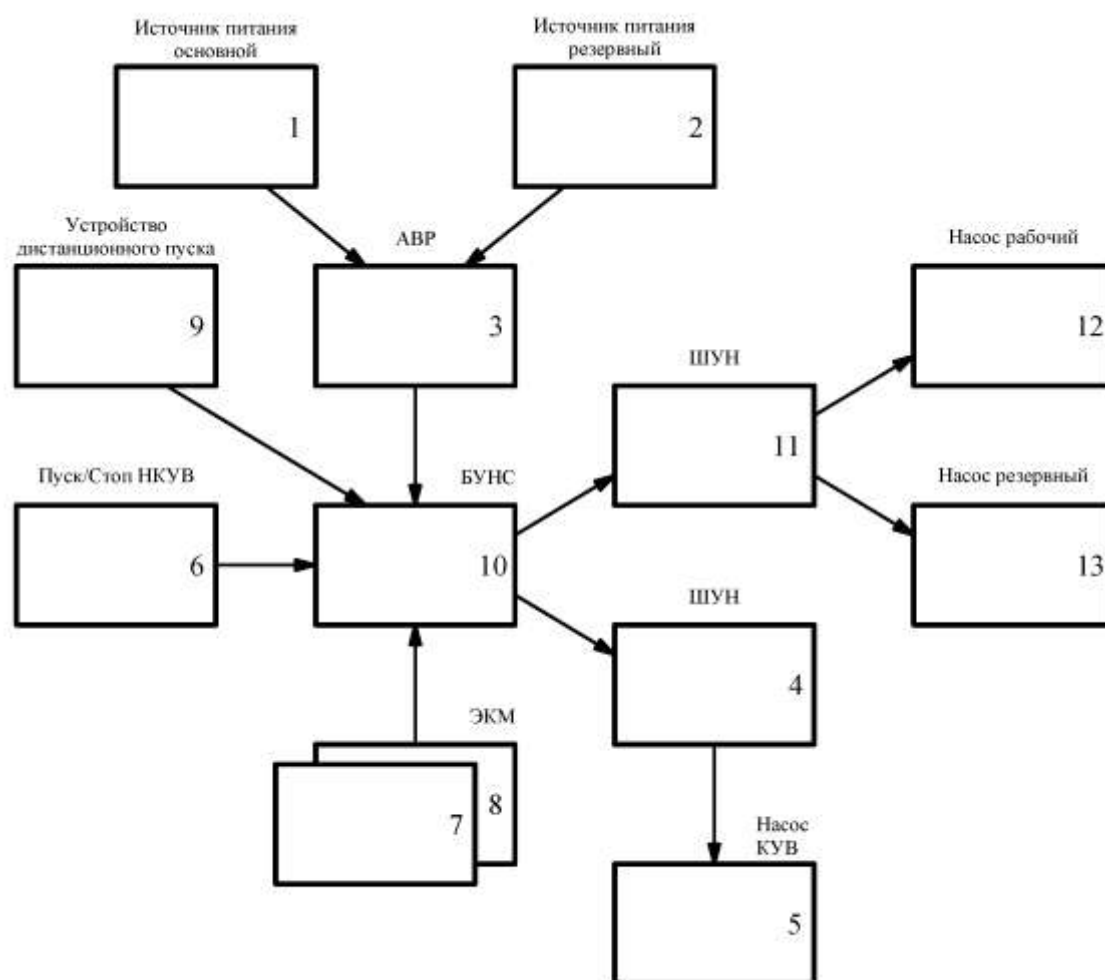


Рис. 1. Функциональная схема насосной станции

Основой технологии автоматизированного структурно-логического моделирования является общий логико-вероятностный метод (ОЛВМ) моделирования и расчета надежности, живучести и безопасности структурно и качественно сложных системных объектов и процессов. В ОЛВМ расчета надежности, аппарат математической логики используется для первичного графического и аналитического описания условий реализации функций отдельными и группами элементов в проектируемой системе, а методы теории вероятностей и комбинаторики применяются для количественной оценки безотказности и/или опасности функционирования проектируемой системы в целом.

В качестве примера расчета рассмотрим определение работоспособности насосной станции для судовой спринклерной установки.

На рис. 1 изображена функциональная схема насосной станции, состоящей из 13 элементов. Основные функции станции реализуются блоком управления насосной станцией (БУНС), обеспечивающим шкафы управления насосами (ШУН), которые, в свою очередь, обеспечивают работу насоса контроля уровня воды (КУВ), рабочего и резервного насосов. Сигнал на подачу воды рабочим насосом поступает в БУНС с устройства дистанционного пуска. Источники питания обеспечивают энергией БУНС, автоматический ввод резерва (АВР) подключает резервный источник питания при неисправности основного. Включение и выключение насоса КУВ и рабочего насоса производится сигналами с датчика «пуск/стоп» НКУВ и дублированного датчика ЭКМ соответственно.

Реализуем методику построения схемы функциональной целостности (СФЦ). Система может быть корректно представлена множеством различных форм ее логического описания и видов СФЦ.

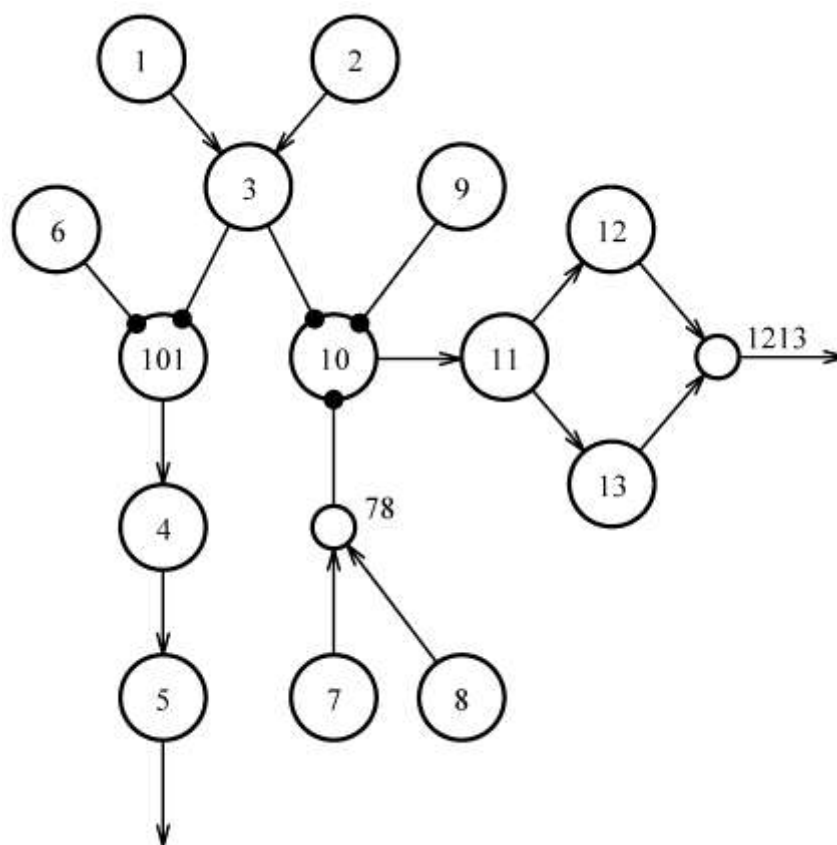


Рис. 2. Схема функциональной целостности

Составленная полная система логических уравнений схемы приведена в табл. 1.

Таблица 1

Полная система логических уравнений СФЦ

Уравнения для прямых выходных функций	Уравнения для инверсных выходных функций
$y_1 = x_1$	$\bar{y}_1 = \bar{x}_1$
$y_2 = x_2$	$\bar{y}_2 = \bar{x}_2$
$y_3 = x_3 \cdot (y_1 \vee y_2)$	$\bar{y}_3 = \bar{x}_3 \vee \bar{y}_1 \cdot \bar{y}_2$
$y_4 = x_4 \cdot y_{101}$	$\bar{y}_4 = \bar{x}_4 \vee \bar{y}_{101}$
$y_5 = x_5 \cdot y_4$	$\bar{y}_5 = \bar{x}_5 \vee \bar{y}_4$
$y_6 = x_6$	$\bar{y}_6 = \bar{x}_6$
$y_7 = x_7$	$\bar{y}_7 = \bar{x}_7$
$y_8 = x_8$	$\bar{y}_8 = \bar{x}_8$
$y_{78} = y_7 \vee y_8$	$\bar{y}_{78} = \bar{y}_7 \cdot \bar{y}_8$
$y_9 = x_9$	$\bar{y}_9 = \bar{x}_9$
$y_{10} = x_{10} \cdot y_{78} \cdot y_3 \cdot y_9$	$\bar{y}_{10} = \bar{x}_{10} \vee \bar{y}_{78} \vee \bar{y}_3 \vee \bar{y}_9$
$y_{101} = x_{10} \cdot y_3 \cdot y_6$	$\bar{y}_{101} = \bar{x}_{10} \vee \bar{y}_3 \vee \bar{y}_6$
$y_{11} = x_{11} \cdot y_{10}$	$\bar{y}_{11} = \bar{x}_{11} \vee \bar{y}_{10}$
$y_{12} = x_{12} \cdot y_{11}$	$\bar{y}_{12} = \bar{x}_{12} \vee \bar{y}_{11}$
$y_{13} = x_{13} \cdot y_{11}$	$\bar{y}_{13} = \bar{x}_{13} \vee \bar{y}_{11}$
$y_{1213} = y_{12} \vee y_{13}$	$\bar{y}_{1213} = \bar{y}_{12} \cdot \bar{y}_{13}$

Строим функцию работоспособности системы (ФРС), используя метод прямой аналитической подстановки. Работоспособность всей системы определяется реализацией выходных функций одновременно двумя элементами: и 5, и 23:

$$\begin{aligned}
 Y_p &= y_5 \cdot y_{1213} = x_5 \cdot y_4 \cdot (y_{12} \vee y_{13}) = x_5 \cdot x_4 \cdot y_{101} \cdot (x_{12} \cdot y_{11} \vee x_{13} \cdot y_{11}) = \\
 &= x_5 \cdot x_4 \cdot x_{10} \cdot y_3 \cdot y_6 \cdot (x_{12} \vee x_{13}) \cdot x_{11} \cdot y_{10} = \\
 &= x_5 \cdot x_4 \cdot x_{10} \cdot x_3 \cdot (y_1 \vee y_2) \cdot x_6 \cdot (x_{12} \vee x_{13}) \cdot x_{11} \cdot x_{10} \cdot y_{78} \cdot y_3 \cdot y_9 = \\
 &= x_5 \cdot x_4 \cdot x_{10} \cdot x_3 \cdot (x_1 \vee x_2) \cdot x_6 \cdot (x_{12} \vee x_{13}) \cdot x_{11} \cdot x_{10} \cdot (y_7 \vee y_8) \cdot x_3 \cdot (y_1 \vee y_2) \cdot x_9 = \\
 &= x_5 \cdot x_4 \cdot x_{10} \cdot x_3 \cdot (x_1 \vee x_2) \cdot x_6 \cdot (x_{12} \vee x_{13}) \cdot x_{11} \cdot x_{10} \cdot (x_7 \vee x_8) \cdot x_3 \cdot (x_1 \vee x_2) \cdot x_9
 \end{aligned} \tag{1}$$

Раскрыв скобки и преобразовав выражение по правилам алгебры логики, получим

$$\begin{aligned}
 Y_p &= x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \cdot x_6 \cdot x_9 \cdot x_{10} \cdot x_{11} \cdot x_1 \cdot x_7 \cdot x_{12} \vee x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \cdot x_6 \cdot x_9 \cdot x_{10} \cdot x_{11} \cdot x_2 \cdot x_7 \cdot x_{12} \vee \\
 &\vee x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \cdot x_6 \cdot x_9 \cdot x_{10} \cdot x_{11} \cdot x_1 \cdot x_8 \cdot x_{12} \vee x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \cdot x_6 \cdot x_9 \cdot x_{10} \cdot x_{11} \cdot x_2 \cdot x_8 \cdot x_{12} \vee \\
 &\vee x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \cdot x_6 \cdot x_9 \cdot x_{10} \cdot x_{11} \cdot x_1 \cdot x_7 \cdot x_{13} \vee x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \cdot x_6 \cdot x_9 \cdot x_{10} \cdot x_{11} \cdot x_2 \cdot x_7 \cdot x_{13} \vee \\
 &\vee x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \cdot x_6 \cdot x_9 \cdot x_{10} \cdot x_{11} \cdot x_1 \cdot x_8 \cdot x_{13} \vee x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \cdot x_6 \cdot x_9 \cdot x_{10} \cdot x_{11} \cdot x_2 \cdot x_8 \cdot x_{13}
 \end{aligned} \tag{2}$$

Построение многочленов вероятностной функции (ВФ) путем двух последовательных преобразований исходной ФРС:

Квазиортогонализация ФРС по одной логической переменной:

$$\begin{aligned}
Y_p = & x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \cdot x_6 \cdot x_9 \cdot x_{10} \cdot x_{11} \cdot x_1 \cdot x_7 \cdot x_{12} \vee \\
& \vee x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \cdot x_6 \cdot x_9 \cdot x_{10} \cdot x_{11} \cdot x_2 \cdot x_7 \cdot x_{12} \cdot \overline{x_1} \vee \\
& \vee x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \cdot x_6 \cdot x_9 \cdot x_{10} \cdot x_{11} \cdot x_1 \cdot x_8 \cdot x_{12} \cdot \overline{x_7} \vee \\
& \vee x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \cdot x_6 \cdot x_9 \cdot x_{10} \cdot x_{11} \cdot x_2 \cdot x_8 \cdot x_{12} \cdot \overline{x_1} \cdot \overline{x_7} \vee \\
& \vee x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \cdot x_6 \cdot x_9 \cdot x_{10} \cdot x_{11} \cdot x_1 \cdot x_7 \cdot x_{13} \cdot \overline{x_{12}} \vee \\
& \vee x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \cdot x_6 \cdot x_9 \cdot x_{10} \cdot x_{11} \cdot x_2 \cdot x_7 \cdot x_{13} \cdot \overline{x_{12}} \cdot \overline{x_1} \vee \\
& \vee x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \cdot x_6 \cdot x_9 \cdot x_{10} \cdot x_{11} \cdot x_1 \cdot x_8 \cdot x_{13} \cdot \overline{x_{12}} \cdot \overline{x_7} \vee \\
& \vee x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \cdot x_6 \cdot x_9 \cdot x_{10} \cdot x_{11} \cdot x_2 \cdot x_8 \cdot x_{13} \cdot \overline{x_{12}} \cdot \overline{x_7} \cdot \overline{x_1}
\end{aligned} \tag{3}$$

Символьный переход к многочлену исходной функции:

$$\begin{aligned}
P_p(t) = & p_F(y_5 \cdot y_{1213}; t) = p_3 \cdot p_4 \cdot p_5 \cdot p_6 \cdot p_9 \cdot p_{10} \cdot p_{11} \cdot p_1 \cdot p_7 \cdot p_{12} + \\
& + p_3 \cdot p_4 \cdot p_5 \cdot p_6 \cdot p_9 \cdot p_{10} \cdot p_{11} \cdot p_2 \cdot p_7 \cdot p_{12} \cdot \overline{q_1} + \\
& + p_3 \cdot p_4 \cdot p_5 \cdot p_6 \cdot p_9 \cdot p_{10} \cdot p_{11} \cdot p_1 \cdot p_8 \cdot p_{12} \cdot \overline{q_7} + \\
& + p_3 \cdot p_4 \cdot p_5 \cdot p_6 \cdot p_9 \cdot p_{10} \cdot p_{11} \cdot p_2 \cdot p_8 \cdot p_{12} \cdot \overline{q_1} \cdot \overline{q_7} + \\
& + p_3 \cdot p_4 \cdot p_5 \cdot p_6 \cdot p_9 \cdot p_{10} \cdot p_{11} \cdot p_1 \cdot p_7 \cdot p_{13} \cdot \overline{q_{12}} + \\
& + p_3 \cdot p_4 \cdot p_5 \cdot p_6 \cdot p_9 \cdot p_{10} \cdot p_{11} \cdot p_2 \cdot p_7 \cdot p_{13} \cdot \overline{q_{12}} \cdot \overline{q_1} + \\
& + p_3 \cdot p_4 \cdot p_5 \cdot p_6 \cdot p_9 \cdot p_{10} \cdot p_{11} \cdot p_1 \cdot p_8 \cdot p_{13} \cdot \overline{q_{12}} \cdot \overline{q_7} + \\
& + p_3 \cdot p_4 \cdot p_5 \cdot p_6 \cdot p_9 \cdot p_{10} \cdot p_{11} \cdot p_2 \cdot p_8 \cdot p_{13} \cdot \overline{q_{12}} \cdot \overline{q_7} \cdot \overline{q_1}
\end{aligned} \tag{4}$$

В ОЛВМ, аналогичные преобразования позволяют получить и многочлен вероятностной функции для критерия неработоспособности (отказа) системы:

$$Q_p(t) = q_F(\overline{y_5} \vee \overline{y_{1213}}; t) \tag{5}$$

В ОЛВМ, кроме многочленов вероятностных функций, разработанными методами возможно получить ещё три формы расчётных вероятностных моделей: логико-статических моделей, некоторых видов марковских и сетевых моделей.

На заключительном этапе рассчитываются системные характеристики с помощью полученных расчётных моделей.

Расчёт средней наработки до первого отказа, являющейся одним из показателей безотказности невосстанавливаемых систем, производится, используя нахождение интеграла от многочлена вероятностной функции надёжности системы:

$$T_{oF} = \int_0^t P_{oF}(t) dt \tag{6}$$

Расчётная формула средней наработки до первого отказа:

$$T_{oF} = \sum_{j=1}^M (3H_j) \frac{1}{\sum_{i \in K_j} \frac{1}{T_{oi}}}, \tag{7}$$

где M – число одночленов в преобразованном многочлене ВФ; $3H_j$ – знак перед j -м одночленом; K_j – множество номеров элементов j , параметры $p_i(t)$ которых вошли в j -й одночлен.

В результате преобразования к прямой форме многочлена (3) и применяя преобразование (6), получим формулу вычисления средней наработки до отказа:

$$T_{op} = \frac{1}{\frac{1}{T_{03}} + \frac{1}{T_{04}} + \frac{1}{T_{05}} + \frac{1}{T_{06}} + \frac{1}{T_{09}} + \frac{1}{T_{10}} + \frac{1}{T_{11}} + \frac{1}{T_{01}} + \frac{1}{T_{07}} + \frac{1}{T_{12}}} +$$

$$+ \frac{1}{\frac{1}{T_{03}} + \frac{1}{T_{04}} + \frac{1}{T_{05}} + \frac{1}{T_{06}} + \frac{1}{T_{09}} + \frac{1}{T_{10}} + \frac{1}{T_{11}} + \frac{1}{T_{02}} + \frac{1}{T_{07}} + \frac{1}{T_{12}}} -$$

$$\dots - \frac{1}{\frac{1}{T_{03}} + \frac{1}{T_{04}} + \frac{1}{T_{05}} + \frac{1}{T_{06}} + \frac{1}{T_{09}} + \frac{1}{T_{10}} + \frac{1}{T_{11}} + \frac{1}{T_{02}} + \frac{1}{T_{08}} + \frac{1}{T_{13}} + \frac{1}{T_{12}} + \frac{1}{T_7} + \frac{1}{T_1}}.$$

Применение рассмотренных методов для анализа реальных структурно-сложных систем невозможно без применения вычислительной техники из-за громоздкости процессов аналитического моделирования.

Информационные технологии позволяют обеспечить достоверность, полноту, периодичность поступления информации о конкретном оборудовании в различных условиях эксплуатации на судах и на основе этой информации вносить коррективы для обеспечения ремонта, техобслуживания и запчастей и разрабатывать эффективные средства обеспечения надёжности выпускаемого оборудования.

Проектирование, изготовление и эксплуатация таких сложных технических объектов, как судно, осуществляется, как правило, не одним предприятием. Поэтому в АСУ предприятия у проектанта будут присутствовать развитые в большей степени PDM и САПР, у производителя и эксплуатационника основное значение будут иметь PDM- и ERP-системы.

Информационная интеграция для всего жизненного цикла изделия позволяет повысить эффективность управления надёжностью судового оборудования.

На рис. 3 представлена структурно-функциональная схема управления надёжностью судовым оборудованием. Её основой явилась модель системы технической эксплуатации энергетического оборудования [1, 2].

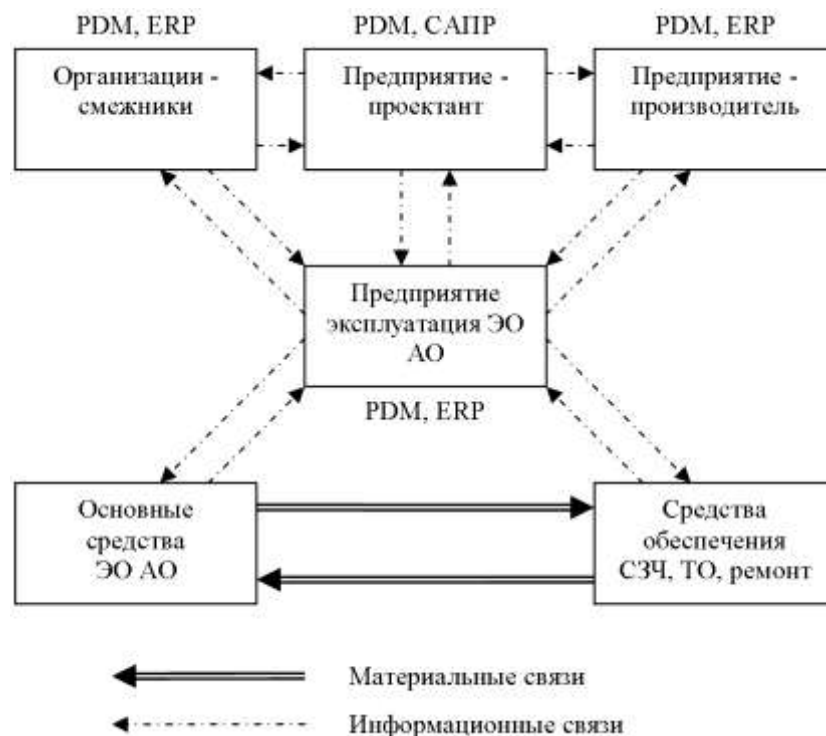


Рис. 3. Структурно-функциональная схема управления надёжностью

Выводы

1. СМК на основе стандартов ISO 9000 позволяет обеспечить полноту информации о судовом оборудовании на всех этапах ЖЦ и таким образом поддерживать требуемый уровень надёжности.

2. Полнота и надёжность хранения информации достигаются при использовании документов преимущественно в электронном виде. Это позволяет существенно снизить затраты на обработку и хранение информации, гораздо более эффективно и рационально воспользоваться технологиями автоматизированного моделирования надёжности объектов.

3. Эффективное управление информационными потоками и оперативное принятие решений по обеспечению надёжности судового оборудования на всех этапах ЖЦ возможно при условии функционирования в проектных, производственных и эксплуатирующих предприятиях автоматизированного управления, содержащего системы PDM, ERP и САПР.

Библиографический список

1. **Рудницкий, А.В.** Модель системы технической эксплуатации энергетического оборудования / А.В. Рудницкий, В.И. Рудницкий, В.Г. Титов // Актуальные проблемы электроэнергетики: труды НГТУ. Н. Новгород. 2007. Т. 66. С. 92-95.
2. **Рудницкий, А.В.** Критерий оценки эффективности оперативного управления надёжностью энергетического оборудования автономных объектов / А.В. Рудницкий, В.И. Рудницкий, В.Г. Титов // Актуальные проблемы электроэнергетики: тезисы докладов XXVI научно-технической конференции». Н. Новгород. 2007. С. 13-15.
3. **Рудницкий, А.В.** Принципы использования информационных технологий для управления надёжностью энергетического оборудования автономных объектов / А.В. Рудницкий, В.И. Рудницкий, В.Г. Титов / НГТУ. – Н. Новгород, 2008.
4. **Алёшин, Б.С.** Философские и социальные аспекты качества: учеб. пособие / Б.С. Алёшин, Л.Н. Александровская, В.Н. Круглов, А.М. Шолом. – М.: Логос, 2004. – 438 с.
5. **Зильбербург, Л.И.** Информационные технологии в проектировании и производстве / Л.И. Зильбербург, В.И. Мелочник, Е.И. Яблочников. – СПб. Политехника, 2008. – 304 с.
6. **Можаев, А.С.** Общий логико-вероятностный метод анализа надёжности сложных систем: учеб. пособие / А.С. Можаев. – Л.: ВМА, 1988. – 68 с.

*Дата поступления
в редакцию 29.04.2011*

A.V. Rudnitsky, V.I. Rudnitsky, V.S. Vinogradov

INFORMATION SUPPORT FOR MANAGEMENT OF SHIPBOARD EQUIPMENT'S RELIABILITY

Principles of use of information technology for management of shipboard equipment's reliability are proved.

Key words: Reliability, IT technology, shipboard equipment.

УДК 629.124: 532

А. Б. Ваганов, А. С. Костюнин

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗИГЗАГООБРАЗНЫХ МАНЕВРОВ СУДНА

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

Проведены исследования параметров движения судна при выполнении зигзагообразных маневров на прямом курсе и при совершении поворота. Даны рекомендации по улучшению характеристик таких маневров.

Ключевые слова: теоретически неустойчивое судно, зигзагообразный маневр, зигзаг Кемпфа, фазовая траектория зигзага.

Управление судном, не обладающим теоретической устойчивостью на заданном курсе, является сложной задачей. Эффективность ее решения зависит от свойств судна как объекта управления, а также от психофизических качеств рулевого, его опыта, внимательности, степени утомления.

Современные морские суда оснащены авторулевыми, однако при движении по каналам и рекам, при заходах в порт судном управляет человек (рулевой). Речные суда практически всегда управляются рулевым, так как судовой ход ограничен по ширине и извилист. При удержании судна, не обладающего теоретической устойчивостью на прямом курсе, рулевой вынужден постоянно переключать руль на правый и левый борт. Таким же образом приходится управлять судном при движении по сложной траектории. Естественно, что судно при этом совершает зигзагообразные движения. Амплитуда таких движений будет зависеть от опыта и степени утомленности рулевого и, конечно, от свойств судна. При этом становятся важными вопросы: какая будет средняя скорость судна на курсе и какая будет ширина занимаемой полосы судового хода?

Проведенные исследования маневров «зигзаг» в работе [1] показали, что скорость движения судна v снижается, и степень снижения скорости зависит от $\Delta\chi_m = f(\alpha_p)$, где $\Delta\chi_m$ - среднее значение максимального угла курса при маневре; α_p - угол перекладки руля.

Для ходкости судна важна средняя проекция скорости на направление движения v_ξ , которая будет еще меньше из-за зигзагообразной формы траектории судна.

Было выполнено моделирование зигзагообразного маневра судна с помощью программы движения для ПЭВМ. Математическая модель управляемости судна и управления рулем при выполнении данного маневра составлена на методической основе и рекомендаций справочников [3, 4], а также учебников по управляемости судов [2, 5].

В качестве базового судна для вычислительных испытаний было выбрано судно, близкое к грузовому судну проекта 19610 со следующими характеристиками:

длина судна $L=121$ м;
ширина судна $B=14,8$ м;
осадка $d=3,33$ м.

Для базового судна были проведены систематические расчеты зигзага при варьировании $\alpha_p = \chi_0 \pm 3^\circ; \pm 5^\circ; \pm 7,5^\circ; \pm 10^\circ; \pm 15^\circ; \pm 20^\circ$. Длительность расчетного времени составляла 2000 с, где χ_0 - угол курса, по достижении которого руль переключается на противоположный борт.

В процессе расчета регистрировались в файле программы следующие результаты:

- угол перекладки рулей $\alpha_p(t)$;
- угол курса $\chi(t)$;

- угол дрейфа $\beta(t)$;
- относительная угловая скорость вращения $\bar{\omega}(t)$;
- координаты центра тяжести $\xi(t), \eta(t)$;
- относительная скорость судна \bar{v} .

Для примера на рис. 1 приведены результаты расчета в форме диаграммы при $\pm \alpha_p = \pm \chi_0 = 7,5^\circ$.

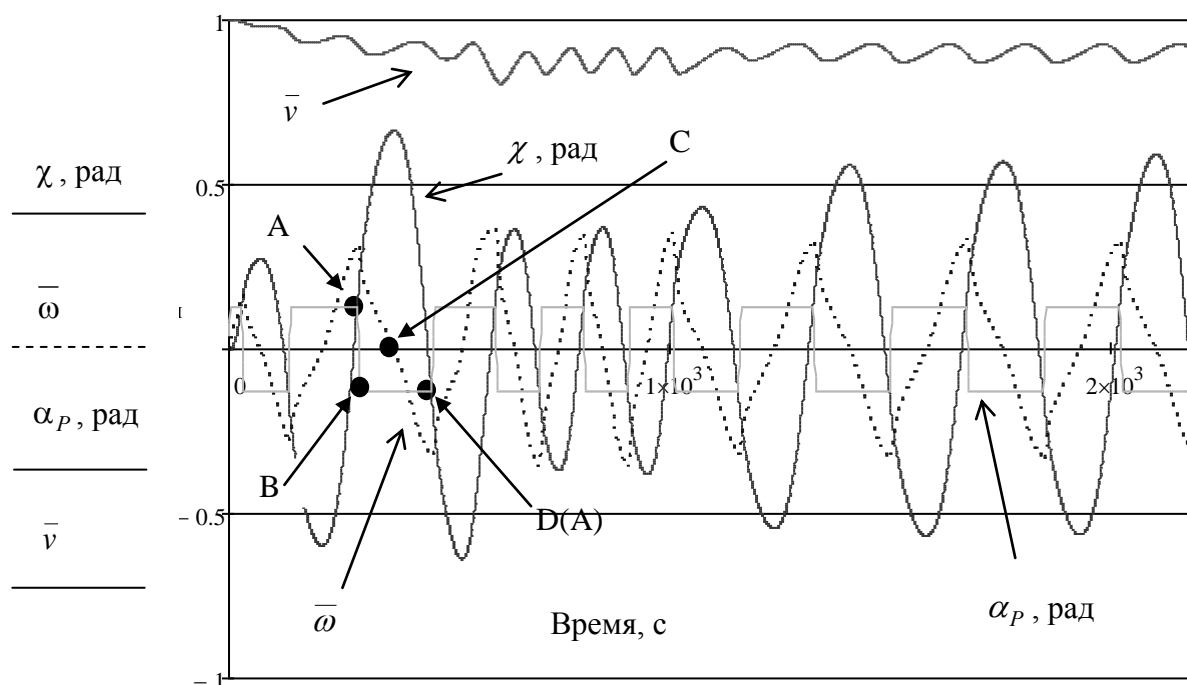


Рис. 1. Параметры зигзага ($\pm \alpha_p = \pm \chi_0 = 7,5^\circ$)

При обработке результатов расчетов (табл. 1) отмечены такие параметры:

- $\Delta\chi_m$ - значение максимального угла курса при маневре;
- ΔT_m - промежуток времени, необходимый для изменения угла курса от максимального угла на один борт до максимального угла на противоположный борт;
- v_ξ - средняя на зигзаге абсолютная скорость судна в направлении курса;
- \bar{v}_{cp} - средняя на зигзаге относительная скорость судна;
- $\Delta\eta$ - значение максимального поперечного смещения судна относительно оси судового хода.

Таблица 1

Параметры зигзага Кемпфа

$\pm \alpha_p = \pm \chi_0, ^\circ$	$\Delta\chi_m, ^\circ$	$\Delta T_m, \text{с}$	$v_\xi, \text{м/с}$	$\bar{v}_{cp}, \text{м/с}$	$\Delta\eta, \text{м}$
3	86	525	1,81	0,94	1260
5	41	249	4,33	0,92	290
7,5	33	171	4,67	0,91	150
10	31	148	4,37	0,88	120
15	33	126	4,10	0,82	100
20	38	121	3,62	0,72	100

Критерии оценки зигзага (табл. 2):

- частота переключений рулей в минуту $n = \frac{60}{\Delta T_m}$;
- потеря скорости $\Delta v_\xi = v_0 - v_\xi$;
- критерий $\Delta \bar{v}_\xi = \Delta v_\xi / v_0$
- ширина занимаемой полосы судового хода $2 \Delta \eta$;

Таблица 2

Значения критериев оценки зигзагов

$\pm \alpha_P = \pm \chi_0, ^\circ$	$n = \frac{60}{\Delta T_m}, \text{мин}^{-1}$	$\Delta v_\xi = v_0 - v_\xi, \text{м/с}$	$\Delta \bar{v}_\xi = \Delta v_\xi / v_0$	$2 \Delta \eta, \text{м}$
3	0,114	3,69	0,67	2520
5	0,241	1,17	0,21	580
7,5	0,351	0,83	0,15	300
10	0,405	1,13	0,20	240
15	0,476	1,40	0,25	200
20	0,500	1,88	0,34	200

Рассмотрение табл. 1-2 показывает, что применение технологии управления судном по типу «зигзага Кемпфа» с параметрами $\pm \alpha_P = \pm \chi_0$ невыгодно по критериям потери скорости и значительной ширины занимаемой полосы судового хода.

Оптимальным из рассмотренных вариантов следует признать $\pm \alpha_P = 7,5-10^\circ$.

Для дальнейшей оптимизации движения судна целесообразно рассмотреть вариант зигзага при $\pm \chi_0 = 3 \div 5^\circ$.

Выполнен расчет зигзага с параметрами: $\pm \alpha_P = 10^\circ$; $\pm \chi_0 = 3^\circ$. Результаты приведены в табл. 3

Таблица 3

Критерии оценки зигзага с параметрами $\pm \alpha_P = 10^\circ$; $\pm \chi_0 = 3^\circ$

$\pm \alpha_P, ^\circ$	$\pm \chi_0, ^\circ$	$n = \frac{60}{\Delta T_m}, \text{мин}^{-1}$	$\Delta v_\xi = v_0 - v_\xi, \text{м/с}$	$\Delta \bar{v}_\xi = \Delta v_\xi / v_0$	$2 \Delta \eta, \text{м}$
10	3	0,50	0,69	0,125	140

На рис. 2 приведена фазовая траектория для данного варианта действий судоводителя. Проанализируем взаимодействие и перегруппировку сил в течение маневра.

Слева и в точке *A* (начало переключки рулей на левый борт рис. 1) позиционный момент M_K^{Π} совпадает по знаку с углом дрейфа и поворачивает судно вправо. В том же направлении действует момент от рулей. В противоположную сторону направлен демпфирующий (вращательный) момент M_K^{Π} , имеющий знак, противоположный знаку угловой скорости. Результирующий момент в этих точках вращает корпус вправо.

В точке *B* (окончание переключки рулей на левый борт) позиционный момент M_K^{Π} по-прежнему поворачивает судно вправо. Момент от рулей изменил знак на противоположный и значительно возрос по величине из-за того, что угол переключки $-\alpha_P$ совпал по знаку с потерянным углом атаки $-\beta_P$. На левый борт по-прежнему направлен демпфирующий (вращательный) момент M_K^{Π} . Результирующий момент изменяет знак и поворачивает судно влево.

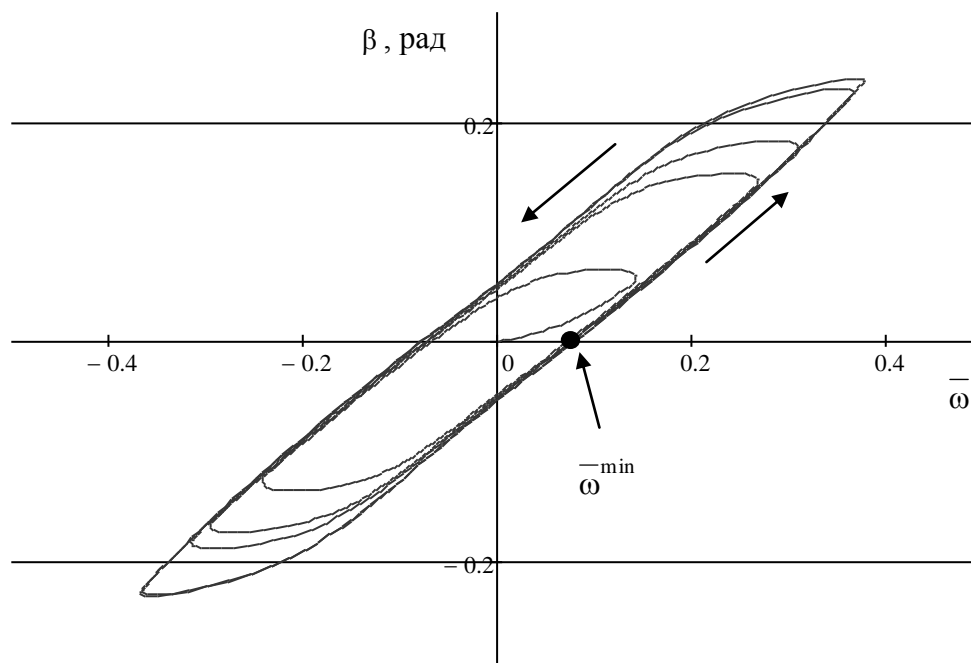


Рис. 2. Фазовая траектория зигзага ($\pm \alpha_p = 10^\circ$; $\pm \chi_0 = 3^\circ$)

Угловая скорость уменьшается и в точке С становится равной нулю, а угол курса достигает максимума. Далее угловая скорость меняет знак и становится отрицательной. Корпус меняет направление вращения влево, однако угол курса остается положительным, хотя и уменьшается.

В технологии маневра Кемпфа следующая перекладка руля начнется, когда угол курса сменит знак и его величина превысит $-\chi_0$. До этого момента корпус будет поворачиваться влево, набирая угловую скорость вращения под действием рулевого момента и позиционного момента, который также будет действовать влево, поскольку угол дрейфа вскоре после прохождения точки С сменил знак с положительного на отрицательный. Происходит своеобразный разгон по вращению до точки D(A) инерцию которого после принятия судоводителем решения об обратной перекладке руля по условию ($|\chi| > \pm \chi_0$) вновь придется гасить рулевым моментом.

С точки зрения устойчивости движения судна на прямом курсе, накопленную на этом этапе кинетическую энергию следует считать вредной и ее следует минимизировать.

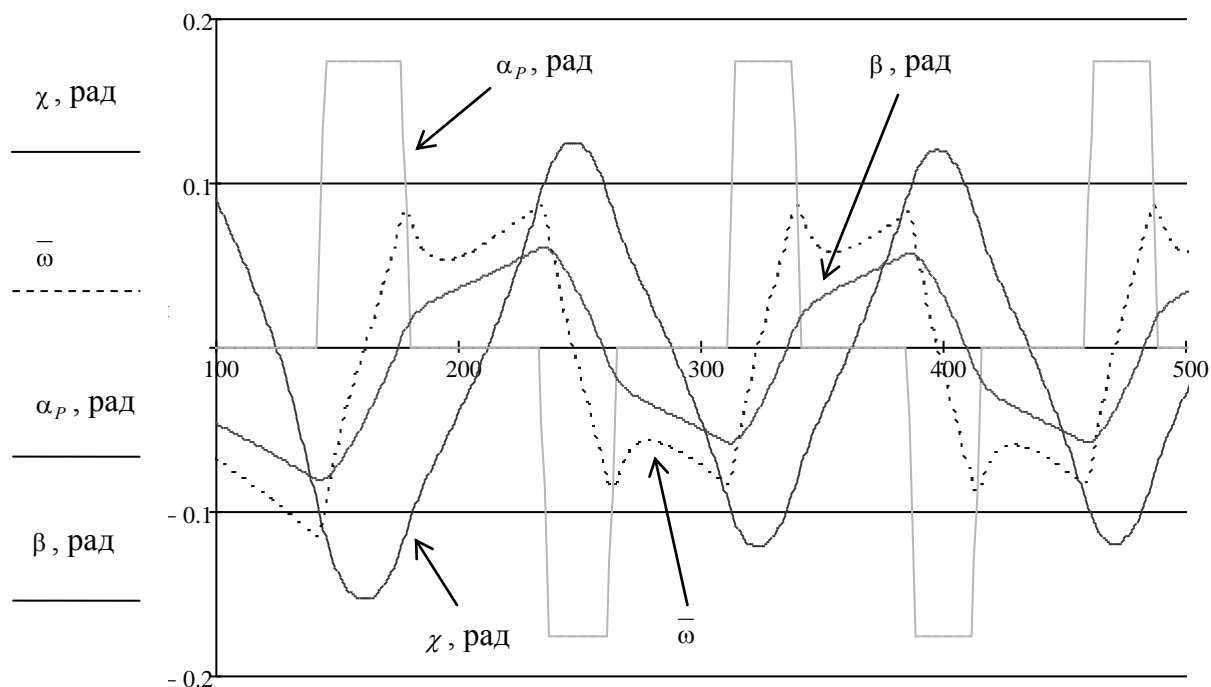
Для этой цели решение об обратной перекладке руля следует принять раньше, например, после смены знака угловой скорости по достижении ей некоторого минимально достаточного значения $\pm \bar{\omega}^{\min}$.

Как показывает рассмотрение фазовой траектории $\beta(\bar{\omega})$, значение $\pm \bar{\omega}^{\min}$ можно принять по моменту смены знака угла дрейфа, чтобы не получить возврата судна к прежнему направлению вращения.

Определили по графику $\beta(\bar{\omega})$ (рис. 2), что для базового судна $\pm \bar{\omega}^{\min} = 0,078$.

Можно рекомендовать неопытному рулевому в этот момент положить рули в ДП или $\alpha_p = 0$. Это приведет в дальнейшем к уменьшению угловой скорости вращения корпуса. Продолжая вращение корпуса влево, угол курса достигнет значения $(-\chi_0)$, и тогда уже рули переключать на правый борт из нуля в положение $\alpha_p = +\alpha_p$.

На рис. 3 приведены зависимости параметров такого зигзага, характеризуемого двухступенчатой перекладкой рулей и с выдержкой рулей в нулевом положении.



**Рис. 3. Параметры движения при зигзаге ($\pm \alpha_p = 10^\circ$; $\pm \chi_0 = 3^\circ$)
с реагированием на $\pm \bar{\omega}^{\min} = 0,078$**

В табл. 4 приведены параметры данного зигзага.

Таблица 4

**Критерии оценки зигзага с параметрами
($\pm \alpha_p = 10^\circ$; $\pm \chi_0 = 3^\circ$) с реагированием на $\pm \bar{\omega}^{\min} = 0,078$**

$\pm \alpha_p, ^\circ$	$\pm \chi_0, ^\circ$	$n = \frac{60}{\Delta T_m}, \text{мин}^{-1}$	$\Delta v_\xi = v_0 - v_\xi, \text{м/с}$	$\Delta \bar{v}_\xi = \Delta v_\xi / v_0$	$2 \Delta \eta, \text{м}$
10	3	1,20	0,15	0,027	16

Как показывают расчеты, данный алгоритм с реагированием рулевого на значение угловой скорости вращения корпуса весьма эффективен.

Параметры «зигзага Кемпфа» при совершении поворота судна по курсу:

Угол поворота генерального курса приняли 30° на правый борт.

Параметры зигзага приняли следующими:

1. $\pm \alpha_p = 5^\circ$; $\pm \chi_0 = 3^\circ$ - зигзаг с малой амплитудой перекладки рулей;
2. $\pm \alpha_p = 10^\circ$; $\pm \chi_0 = 3^\circ$ - зигзаг с оптимальной амплитудой перекладки.

Выполнен расчет данного маневра. В точке принятия решения о повороте на новый курс $\chi_{00} = 30^\circ$, через определенное время принималось решение о возвращении на прежний курс $\chi_{00} = 0^\circ$. Перекладки рулей $\pm \alpha_p$; $\pm \chi_0$ осуществлялись так же, как и на прямом курсе.

Траектория поворота при 1-м зигзаге приведена на рис. 4, при 2-м зигзаге – на рис. 5.

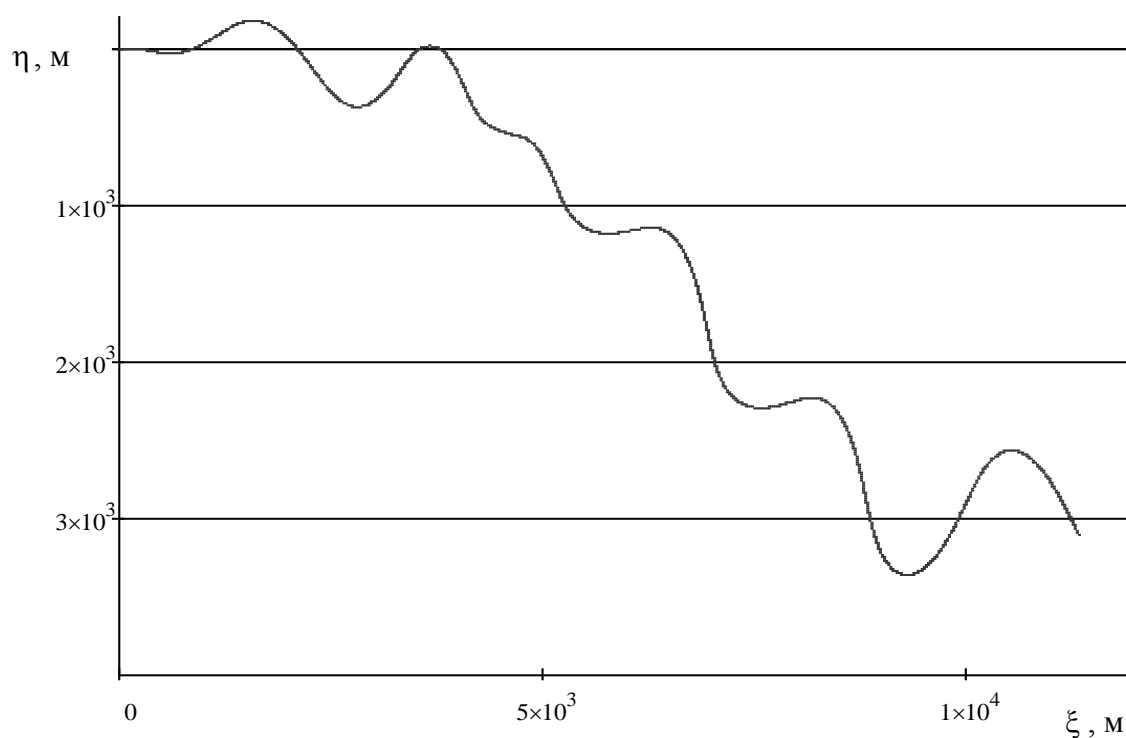


Рис.4. Траектория поворота при зигзаге ($\pm \alpha_p = 5^\circ$; $\pm \chi_0 = 3^\circ$)

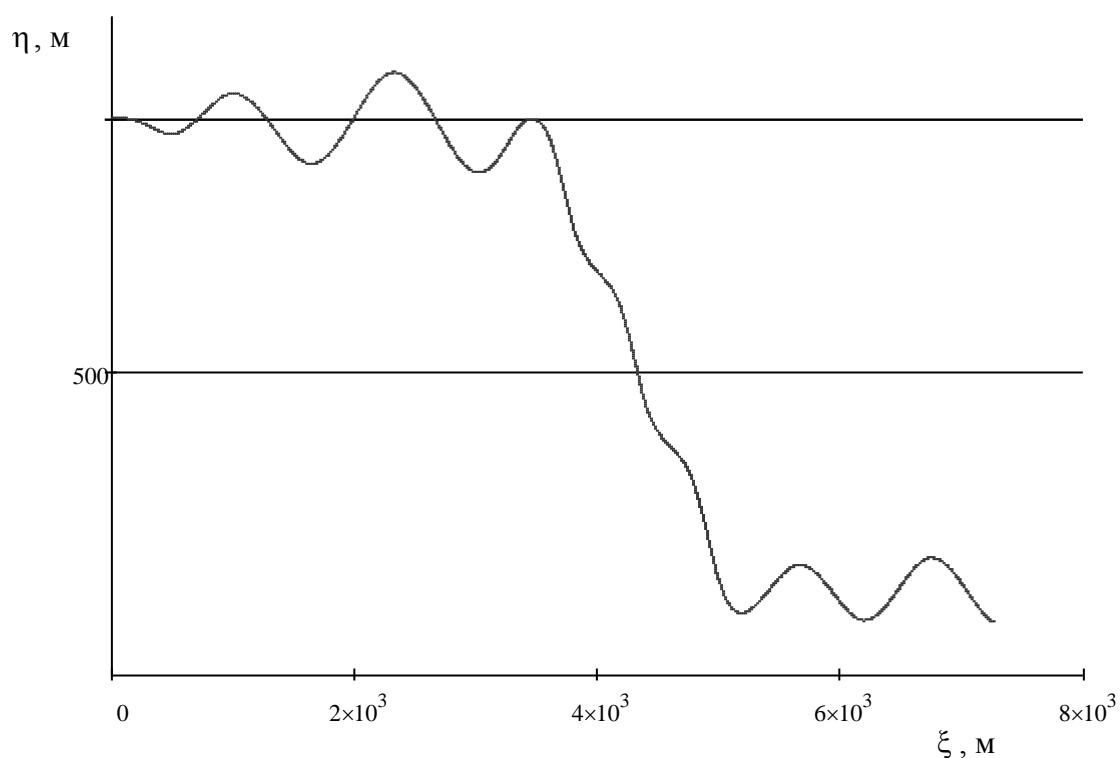


Рис. 5. Траектория поворота при зигзаге ($\pm \alpha_p = 10^\circ$; $\pm \chi_0 = 3^\circ$)

Анализ результатов расчетов показывает, что второй зигзаг более четко выражен и может быть рекомендован судоводителю.

Первый зигзаг характеризуется большими амплитудами отклонения по курсу и как бы размыт, занимая широкую полосу судового хода.

Подтверждаются выводы, сделанные ранее об оптимальных значениях $\pm \alpha_p = 10^\circ$; $\pm \chi_0 = 3^\circ$ для базового судна.

Библиографический список

1. **Ваганов, А.Б.** Анализ управляемости судна при выполнении зигзагообразных маневров / А.Б. Ваганов [и др.] // Современные технологии в кораблестроительном и авиационном образовании, науке и производстве: доклады Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 75-летию факультета морской и авиационной техники / Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева 17-20 ноября 2009 г. - Нижний Новгород, 2009. С. 131-134.
2. **Васильев, А. В.** Управляемость судов / А. В. Васильев. – Л.: Судостроение, 1989. – 328 с.
3. **Гофман А.Д.** Теория и расчет поворотливости судов внутреннего плавания / А.Д. Гофман. – Л.: Судостроение. 1978. – 258 с.
4. **Першиц, Р.Я.** Управляемость и управление судном / Р.Я. Першиц. – Л.: Судостроение. 1983. – 272 с.
5. **Соболев, Г.В.** Управляемость корабля и автоматизация судовождения / Г. В. Соболев. – Л.: Судостроение, 1976. – 477 с.
6. Справочник по теории корабля. В 3т. Т.3. Управляемость водоизмещающих судов. Гидродинамика судов с динамическими принципами поддержания / под ред. Я.И. Войткунского. – Л.: Судостроение, 1985. – 544 с.

*Дата поступления
в редакцию 29.04.2011*

A.B. Vaganov, A.S. Kostyunin

RESEARCH OF SHIP'S ZIGZAG MANEUVER

Researches of ship's movement's parameters during zigzag maneuver on straight course and on-turn are made. Recommendations for improvement of such maneuvers are made.

Key words: theoretically unstable ship, zigzag maneuver, Kempf zigzag, phase trajectory of zigzag.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 62-83:621.31

А.Ю. Смирнов

ВОПРОСЫ КЛАССИФИКАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОГО СИНХРОННОГО ПРИВОДА

ОАО «ОКБМ Африкантов»

Рассматривается классификация электрических машин для бесконтактного синхронного привода, детализированная с учётом возможности создания одной обмоткой машины двух полей одновременно. Приведены конкретные конструкции, поясняющие отдельные пункты классификации, ссылками на результаты экспериментальных и расчётных исследований показана важность правильного определения типа бесконтактной синхронной машины.

Ключевые слова: бесконтактный синхронный привод, классификация электрических машин, реактивная машина, индукторная машина.

Теория и практика применения электрических машин в бесконтактном синхронном приводе настоятельно диктуют требование правильной их классификации.

Однако в отечественной научно-технической литературе, в том числе в публикациях последних лет, многие авторы весьма вольно употребляют термины, относящиеся к названиям бесконтактных синхронных машин, не учитывая, что за каждым из них стоит определённый физический смысл. В отечественной технической литературе нередко применяют такие малоинформативные названия, как “параметрическая” машина, “редукторный” двигатель. Можно встретить и вовсе неправильное “электромагнитный” двигатель. Термин “шаговый двигатель” применяется без учёта того, что это определение относится к электродвигателю с преобразователем, т.е. к электроприводу, а не к самой машине. В качестве шагового двигателя может быть использована не только любая синхронная машина, но даже и асинхронная. Достаточно подключить только эти устройства к источнику импульсного напряжения, без обратной связи по положению ротора.

К вопросам классификации бесконтактных синхронных машин настоятельно возвращались в своих трудах такие заслуженные теоретики и практики в области электропривода, как проф. Борис Алексеевич Ивоботенко и проф. Михаил Григорьевич Чиликин [1].

Наиболее полно возможные модификации принципиальных исполнений электрических машин переменного тока, в том числе бесконтактных синхронных, рассмотрены в фундаментальном труде по электрическим машинам проф. А.В.Иванова-Смоленского [2]. Кроме деления на реактивные и индукторные, в зависимости от того, одну или две обмотки содержит машина, классификация учитывает зубчатость магнитопроводов статора и ротора – зубчатый или гладкий каждый из них, и полюсность каждой из обмоток – одноимённо-полюсная или переменного-полюсная.

В настоящей статье приводится классификация на основе [1] и [2], детализированная с учётом того, что в зависимости от режима питания единственная обмотка однообмоточной машины может выполнять функции сразу двух обмоток: и обмотки якоря, и обмотки возбуждения.

В зависимости от наличия индуктора, признаков его конструкции и особенностей соз-

даваемого им потока возбуждения все бесконтактные синхронные машины можно отнести к одной из четырёх категорий:

- с постоянными магнитами на роторе (магнитоэлектрические);
- реактивные;
- индукторные;
- индукторно-реактивные.

К первой категории относятся машины, индуктор которых выполнен с включением в магнитную цепь ротора участков из магнитотвёрдого материала - постоянных магнитов. Они образуют по окружности ротора полюса чередующейся полярности так же, как и в машине с электромагнитным возбуждением со стороны ротора. Всего таких конструкций три:

- с радиально намагниченными магнитами литого или составного звездообразного индуктора, образованного призматическими магнитами (рис. 1, а);
- коллекторного типа, с тангенциально намагниченными магнитами (рис. 1, б).
- с когтеобразным магнитопроводом, полюса которого образованы полюсными выступами фланцев, примыкающим к торцевым поверхностям одного или нескольких постоянных магнитов, намагниченных в осевом направлении магнитами (рис. 1, в).

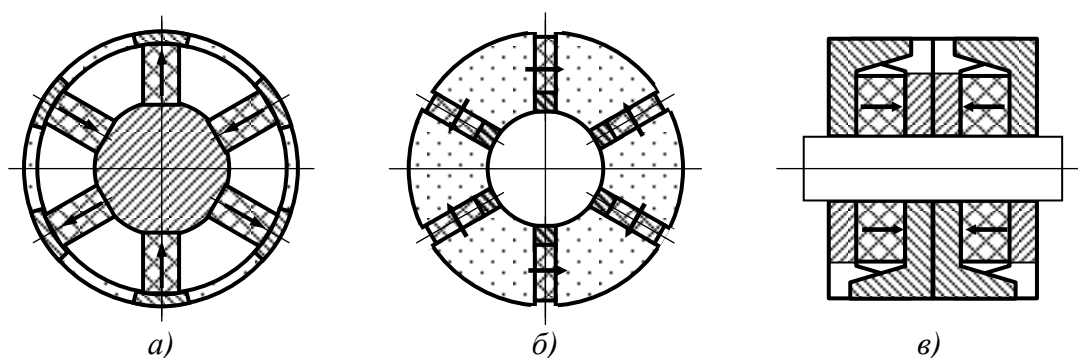


Рис. 1. Схемы конструкции магнитоэлектрического ротора

Как разновидность машин с постоянными магнитами на роторе можно рассматривать гистерезисные двигатели. Но магниты в них представлены материалом со значительно менее широкой петлёй гистерезиса (викаллой). В результате ротор гистерезисного двигателя, представляющий собой постоянный магнит цилиндрической формы, приобретает способность намагничиваться и размагничиваться под действием вращающегося поля обмотки якоря. При пуске материал ротора перемагничивается, и двигатель развивает асинхронный момент, приблизительно равный пусковому. С набором скорости частота перемагничивания ротора уменьшается. На подсинхронной скорости ротор перестаёт перемагничиваться и втягивается в синхронизм.

Помимо бесконтактности, достоинствами синхронных машин с постоянными магнитами являются пониженное потребление реактивной мощности и отсутствие электрических потерь на возбуждение.

К недостаткам магнитоэлектрических синхронных машин относятся температурная зависимость и сложность регулирования потока возбуждения, высокая стоимость энергонасыщенных магнитотвёрдых материалов.

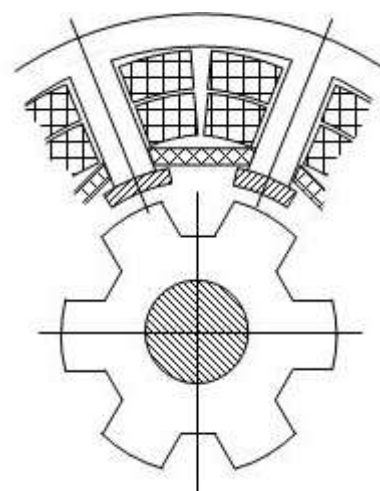


Рис. 2. Фрагмент конструкции машины с зубчатым статором и ротором

По последней причине верхним экономически целесообразным пределом единичной мощности машин с постоянными магнитами является уровень порядка 100 кВт.

Большой интерес к магнитоэлектрическим машинам возник в связи с интенсивной разработкой в настоящее время *гибридного привода автомобилей*. Совместное применение электродвигателя и бензинового двигателя позволяет уменьшить вредные выбросы, увеличить экономию топлива и обеспечить автомобилю абсолютно плавный ход. Электродвигатель обладает жёсткой механической характеристикой, поэтому его вращающий момент с ростом частоты вращения остаётся приблизительно постоянным. Вращающий момент бензинового двигателя растёт с увеличением частоты вращения, поэтому он наилучшим образом обеспечивает движение с высокой постоянной скоростью, а электродвигатель более подходит при движении на малой скорости и с ускорением. Переключением с одного двигателя на другой управляет компьютер таким образом, что электродвигатель используется при пуске и движении на невысоких скоростях. Обеспечивая необходимую тягу, он не сжигает топливо, не даёт вредных выбросов и работает бесшумно.

С увеличением скорости компьютер блока управления запускает бензиновый двигатель и отключает электродвигатель при движении с постоянной скоростью. Если необходимо резкое ускорение, например при обгоне, блок управления запускает и бензиновый двигатель, и электродвигатель, чтобы обеспечить максимальный вращающий момент.

Ко второй категории – реактивным машинам – следует отнести машины с единственной обмоткой – обмоткой якоря, в том случае, если во внешних электрических цепях, связанных с ней, отсутствуют источники постоянного напряжения, тока или выпрямительные устройства.

Действие реактивной машины основано на различии магнитного сопротивления явнополусного ротора при замыкании магнитного потока по продольной и поперечной осям:

$$X_d > X_q.$$

Максимальный электромагнитный момент

машина развивает при угле нагрузки $\theta = \pm \frac{\pi}{4}$ радиан. В пренебрежении активным сопротивлением обмотки максимальный момент реактивной машины составит

$$M_{\max} = \frac{m_1 U^2}{2\omega} \left(\frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_q} \right).$$

Наибольшую разницу сопротивлений X_d и X_q , обеспечивающую высокие значения развиваемого электромагнитного момента и мощности, можно получить при равенстве числа явно выраженных полюсов (зубцов) на роторе Z числу полюсов обмотки:

$$Z = 2p. \quad (1)$$

С полным основанием к реактивным машинам можно отнести обычную явнополусную синхронную машину с обесточенной обмоткой возбуждения на роторе, обмотка якоря которой подключена к промышленной трёхфазной сети переменного тока и не имеет других подключений.

Другую группу конструкций реактивной машины составляют машины с зубчатым статором (рис. 3), числа зубцов на статоре Z_1 и на роторе Z которых удовлетворяют соотношению

$$Z_1 \pm Z = 2p. \quad (2)$$

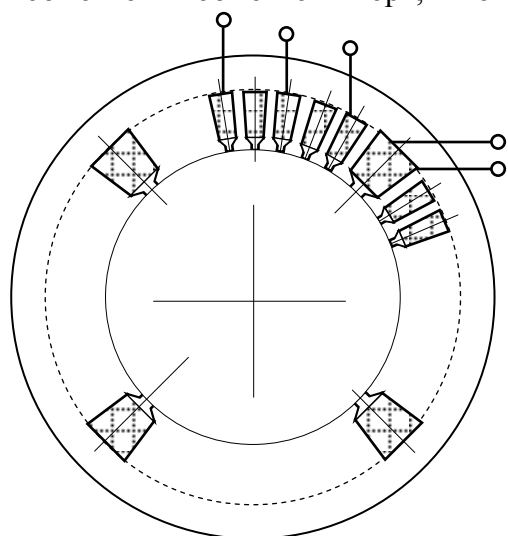


Рис. 3. Схема конструкции статора разнотипно-полюсной индукторной машины

Наличие электрических цепей постоянного или выпрямленного тока, замкнутых на статорную обмотку, постоянных магнитов, не связанных с образованием на роторе полюсов чередующейся полярности, указывает на вероятную принадлежность конструкции к следующей категории бесконтактных синхронных машин – индукторным. Особенностью индукторных машин является то, что в большинстве из них и обмотка якоря, и обмотка возбуждения располагаются на статоре.

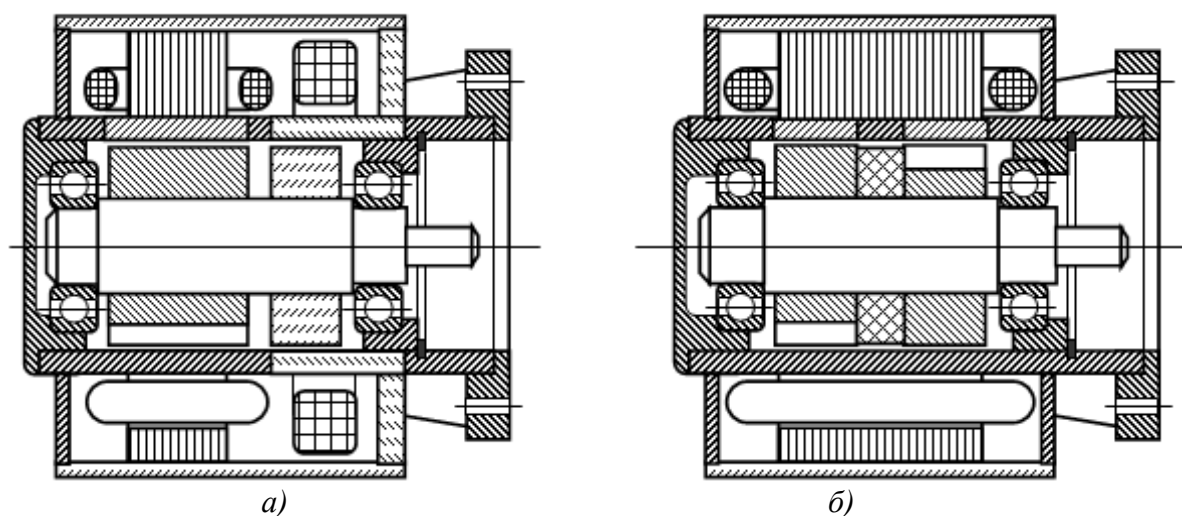


Рис. 4. Одноимённо-полюсная индукторная машина с электромагнитным возбуждением со стороны статора (а) и с магнитоэлектрическим возбуждением со стороны ротора (б)

Контур возбуждения индукторной машины может быть разноимённо-полюсным, с замыканием потока возбуждения в плоскости статорных листов, или одноимённо-полюсным, с замыканием потока возбуждения в радиально-осевом направлении.

В статоре разноимённо-полюсной индукторной машины, наряду с пазами под обмотку якоря, выполнены пазы большего размера под обмотку возбуждения (рис. 3).

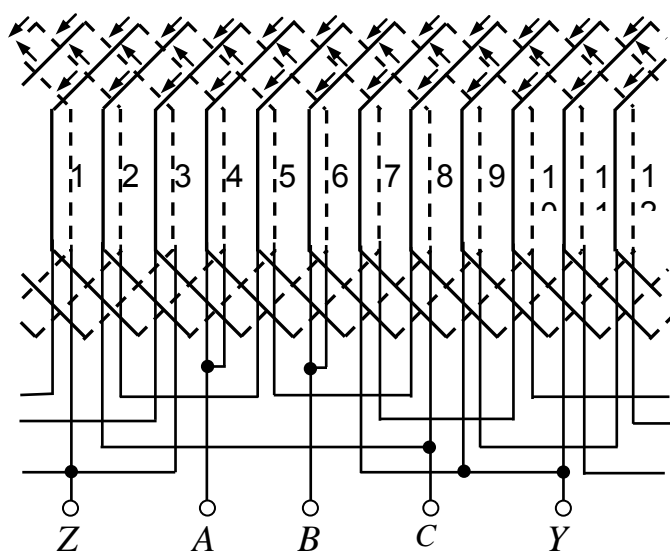


Рис. 5. Трёхфазно-однофазная четырёхполюсно-униполярная совмещённая обмотка одноимённо-полюсной индукторной машины

Поток возбуждения одноимённо-полюсной индукторной машины создаётся отдельной катушкой тороидальной формы или постоянным магнитом с размещением на статоре (рис. 4, а) или на роторе (рис. 4, б) [3, 4]. Левый и правый пакеты ротора повернуты относительно друг друга на половину зубцового деления.

Поток возбуждения катушки или постоянного магнита замыкается в аксиально-радиальном направлении через внешезамкнутый магнитопровод (элементы внешезамкнутого магнитопровода показаны на рисунках более светлой штриховкой).

Следует отметить, что для создания потока в одноимённо-полюсной машине с электромагнитным возбуждением вовсе необязательно использовать отдельную обмотку. Для этой цели мож-

но применить совмещённую обмотку якоря (рис. 5). При питании зажимов Y и Z постоянным током эта обмотка создаёт поток, который замыкается в аксиально-радиальном направлении вокруг лобовых частей [5].

Условие однонаправленного преобразования энергии в индукторной машине с гладким статором:

$$Z = p_1 \pm p_2, \quad (3)$$

где Z – число зубцов на роторе; p_1 – число полюсов якоря; p_2 – число полюсов индуктора для одноимённо-полюсной машины, принимаемое равным нулю.

Индукторную машину можно выполнить также с зубчатым статором, чтобы преобразование энергии осуществлялось на одной из зубцовых гармоник. Условие такого преобразования

$$Z_2 - Z_1 = p_2 \pm p_1. \quad (4)$$

Наконец, машины, числа зубцов и полюсов которых одновременно удовлетворяют условиям преобразования энергии и в индукторной, и в реактивной, относятся к индукторно-реактивным.

К этой категории относятся машины:

- во-первых, с зубчатым статором, число зубцов которых равно числу зубцов ротора

$$Z_1 = Z_2, \quad (5)$$

с единственной обмоткой, получающей питание через выпрямительное устройство. В этом случае единственная обмотка является и обмоткой возбуждения, поскольку по ней протекает постоянная составляющая выпрямленного тока, и обмоткой якоря, поскольку по ней протекает переменная составляющая выпрямленного тока;

- во-вторых, индукторные машины, основная гармоника МДС обмотки якоря которых удовлетворяет условию работы индукторной машины (3), а одна из высших гармоник МДС, например, зубцовая, – условию однонаправленного преобразования энергии в реактивной машине (2).

Индукторные и индукторно-реактивные двигатели нередко используются в непосредственном приводе машин и механизмов с поступательным движением рабочего органа.

Кроме того, и теоретически, и практически возможно выполнить *индукторно-индукторную* машину, которая по составу зубцовых зон одновременно удовлетворяет условиям преобразования энергии и в переменно-полюсной машине, и в одноимённо-полюсной. Естественно, она должна быть снабжена внешнезамкнутым магнитопроводом.

Для того чтобы и переменно- и одноимённо-полюсные машины были способны работать в общем магнитопроводе, необходимо, чтобы при зубчатом статоре с явно выраженными полюсами переменно-полюсной обмотки возбуждения на статоре каждая из них удовлетворяла условию (4). Создать индукторно-индукторную машину при гладком статоре невозможно, так как система из двух уравнений (3), записанных для одноимённо-полюсной и для переменно-полюсной машины, не имеет решения.

Классифицировав машину, можно верно оценить её электромагнитную постоянную времени, смоделировать работу в составе электропривода. Так, индуктивность фазы одного и того же двигателя, с единственной обмоткой, имеющей несколько фаз, но в вариантах с включением катушек в фазах по схеме индукторного двигателя и по схеме индукторно-реактивного двигателя характеризуется разными связями и описывается заметно отличающимися аналитическими выражениями [1].

Если в индукторно-реактивной машине взаимоиндуктивные связи между фазами многофазной обмотки отсутствуют, то в индукторной они обеспечивают её работоспособность. Немаловажным является также и то свойство, что в индукторной машине симметрия полей пазового рассеяния в машине с единственной обмоткой обеспечивается только при чётном числе фаз, а в индукторно-реактивной – только при нечётном. Экспериментальными и расчётными методами получено и подтверждено, что асимметрия полей рассеяния может повлечь серьёзное ухудшение показателей качества движения машины в частотном приводе:

усиление автоколебаний в области высоких частот вращения. Автоколебания вызывают снижение верхней границы диапазона рабочих частот привода [6].

Для различных типов бесконтактного синхронного двигателя в частотном и шаговом приводе фазы обмотки статора переключают независимо от текущего положения ротора. В таком приводе отсутствует обратная связь между выходной величиной – положением ротора и входной величиной – состоянием ключей инвертора. Такой привод является *разомкнутым*.

Предположим теперь, что ключи $K1 - K3$ в цепи обмотки якоря той же самой трёхфазной синхронной машины переключаются не самостоятельно, а по сигналам датчика положения, который закреплён на одном валу с ротором двигателя. Одна из многих возможных конструкций такого датчика представляет собой систему магнитоуправляемых контактов, число которых соответствует числу фаз обмотки якоря. Магнитоуправляемые контакты замыкаются под воздействием потока постоянного магнита, установленного на роторе (рис. 6).

При включении двигателя один из магнитоуправляемых контактов $B1 - B3$ приведёт в действие (замкнёт) соответствующий ключ $K1$, $K2$ или $K3$, подавая напряжение источника на фазу обмотки двигателя. Ротор придёт во вращение в направлении пространственной оси фазы, находящейся под напряжением. По достижении им некоторого углового положения магнит датчика разомкнёт первоначально замкнутый магнитоуправляемый контакт и замкнёт следующий. Эти контакты обесточат первую включённую фазу и подадут напряжение на следующую.

В результате этого переключения ротор продолжит вращение в направлении пространственной оси очередной включённой фазы до тех пор, пока магнит датчика положения не разомкнёт её магнитоуправляемый контакт и не замкнёт магнитоуправляемый контакт третьей фазы. Движение ротора будет продолжено теперь уже в направлении этой фазы до нового замыкания магнитоуправляемого контакта и ключа исходной фазы.

Для того чтобы ротор никогда не достигал положений с нулевым значением вращающего момента, магнитоуправляемые контакты датчика расположены под таким углом относительно пространственных осей фаз, что при приближении ротора к оси включённой фазы контакт размыкается и включается следующая по направлению вращения фаза обмотки якоря.

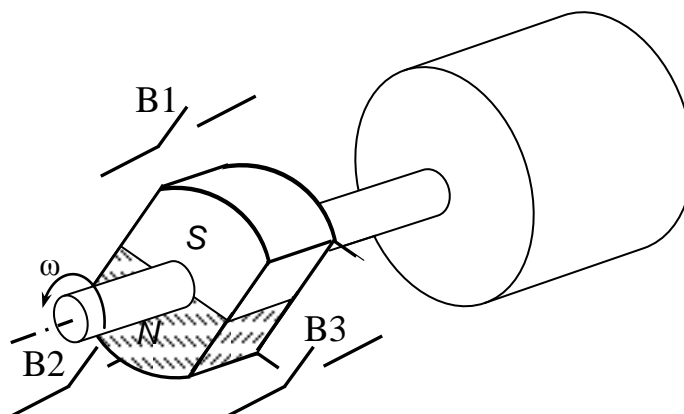


Рис. 6. Схема конструкции датчика положения ротора и его расположение на валу двигателя

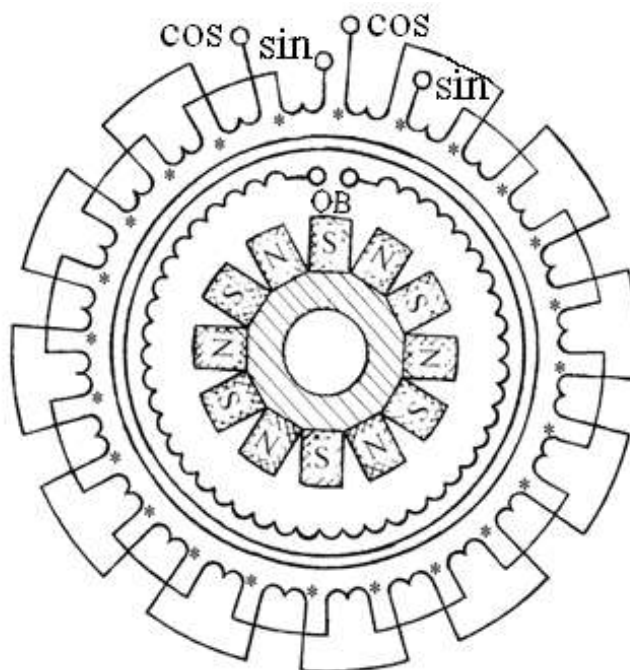


Рис. 7. Схема конструкции датчика насыщения для двух-четырёхфазной бесконтактной машины постоянного тока с восьмиполюсной обмоткой якоря

Нетрудно заметить, что с помощью датчика в таком двигателе контролируется состояние ключей, подающих напряжение на фазы. Датчик здесь выполняет функцию обратной связи по положению ротора. Без достижения ротором определённых угловых положений переключения фаз не произойдёт. Такой привод является *замкнутым*.

Наиболее надёжными являются датчики индуктивного типа. Их действие основано на изменении индуктивности фаз датчика при изменении положения ротора. Число фаз датчика всегда выбирается равным числу фаз двигателя. Можно выделить индуктивные датчики переменной проводимости воздушного зазора и датчики насыщения. Первые представляют вариант индукторной или реактивной синхронной машины. Во вторых под влиянием внешнего поля, связанного с ротором, изменяется проводимость ферромагнитных участков магнитной цепи. Основное достоинство датчиков насыщения – способность передавать сигнал через весьма большой зазор между ротором и статором, в том числе через герметичные перегородки толщиной 10 мм и более.

На кольцеобразный сердечник такого датчика (рис. 7) намотаны катушки обмотки возбуждения (ОВ) и нескольких, по числу фаз двигателя, сигнальных обмоток. Для двух-четырёхфазной машины их может быть две: синусная (\sin) и косинусная (\cos). Сердечник навит из ленты ферромагнитного материала, обладающего прямоугольной петлёй гистерезиса (пермаллоя).

Обмотка возбуждения получает питание от источника выпрямленного напряжения частотой несколько МГц. Катушки синусной и косинусной обмоток намотаны поверх ОВ, имеют одинаковые числа витков и чередуются между собой по окружности сердечника. Общее число катушек каждой из этих обмоток равно числу полюсов обмотки якоря двигателя. Такое же число полюсов имеет подвижная часть датчика. Она представляет собой многополюсный постоянный магнит. Его поле проникает в сердечник статора и замыкается в нём в противоположных направлениях: по часовой стрелке или против неё. В той части сегментов сердечника, где поле постоянной составляющей ОВ совпадает с направлением поля многополюсного постоянного магнита, материал сердечника дополнительно намагничивается и насыщается. Вследствие насыщения взаимоиндуктивная связь между ОВ и расположенными поблизости катушками синусной или косинусной обмотки оказывается на минимальном уровне. На минимальном уровне оказывается и напряжение, наведённое переменной составляющей тока возбуждения в обмотке (синусной или косинусной), катушки которой находятся в области насыщенных сегментов сердечника.

В сегментах сердечника, где поле постоянной составляющей тока ОВ направлено встречно потоку полюсов постоянного магнита, сердечник размагничивается. Взаимоиндуктивная связь ОВ с расположенными в области этих сегментов катушками синусной или косинусной обмоток возрастает, что вызывает увеличение напряжения, наведённого на этой обмотке переменной составляющей тока ОВ.

Поворот магнита вместе с ротором на одно полюсное деление обеспечивает смену максимума и минимума напряжения, наведённого в фазах синусной и косинусной обмоток.

Для работы с трёх- или шестифазной синхронной машиной датчик насыщения содержит три обмотки, катушки которых так же, как и в двух - четырёхфазном датчике, чередуются между собой с общим числом катушек каждой фазы, равным числу полюсов обмотки якоря двигателя.

Электромашинная (без датчика) часть бесконтактного синхронного двигателя ничем не отличается от аналогичного узла обращённой машины постоянного тока с расположением якоря на статоре (размещение его на роторе не обеспечивает бесконтактности). В связи с этим вполне уместно утверждать, что синхронная машина в замкнутом по положению ротора электроприводе является бесконтактной машиной постоянного тока.

Помимо места расположения обмотки якоря, отличие бесконтактной машины постоянного тока от контактной, с механическим коллектором, состоит в числе фаз – секций обмотки якоря. В контактной машине постоянного тока общепромышленного назначения чис-

ло секций весьма велико. По сути, они представляют собой фазы обмотки якоря синхронной машины, сопряжённые между собой в замкнутый многоугольник, поэтому пульсации момента в такой машине практически отсутствуют.

В бесконтактной машине число секций-фаз ограничено разумным числом каналов полупроводникового преобразователя, осуществляющего их переключение. Если учесть, что на переключение одной фазы требуется один усилитель, то нетрудно наложить ограничение: число фаз бесконтактной машины постоянного тока не должно превышать 4 – 6. Они должны быть соединены в звезду, так легче обеспечить независимое регулирование токов. Следствием ограниченного числа секций-фаз в приводе с синхронной машиной, работающей в качестве бесконтактного двигателя постоянного тока, являются значительные пульсации момента. Однако это отличие обусловлено особенностями конструкции обмотки якоря бесконтактной и коллекторной машин постоянного тока, а не принципом их действия.

Выводы

Правильное определение типа бесконтактной синхронной машины в соответствии с классификацией, разработанной усилиями советских и российских учёных-электро-механиков, является вопросом не терминологии, а верного отражения процессов электро-механического преобразования энергии, а значит, и качества разработки. Ей должен предшествовать анализ конструктивных параметров машины и характера её взаимодействия с внешними устройствами, входящими в электропривод.

Библиографический список

1. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями /под ред. М.Г. Чиликина. - М.: Энергия, 1971. – 624 с.
2. Иванов-Смоленский, А.В. Электрические машины: учебник для вузов /А.В.Иванов-Смоленский. - М.: Энергия, 1980. – 928 с.
3. А.с.1510670 СССР, МПК⁷ H02K 19/18. Индукторная машина. / А.Ю.Смирнов, С.Д.Истомин, В.С.Пронин (СССР). - №4329134/07; заявл.17.11.87; опубл.27.05.02. Бюл. №15 (II ч.).
4. А.с.1591709 СССР, МПК⁷ H02K 19/06, 19/18, 21/20, 1/27. Индукторная машина / А.Ю.Смирнов (СССР). №4337584/07; заявл.07.12.87; опубл.27.05.02. Бюл. №15 (II ч.).
5. Смирнов, А.Ю. Матричный синтез и анализ многоугольников МДС трёхфазных обмоток машин переменного тока // Электричество. 2009. №5. С. 42–45.
6. Смирнов А.Ю. Влияние асимметрии полей пазового рассеяния на предельные механические характеристики индукторной машины в частотном приводе: труды НГТУ. – Н. Новгород. 2008. Т. 70. С. 44–48.

*Дата поступления
в редакцию 26.04.2011.*

A.Yu. Smirnov

THE ASPECTS OF ELECTRIC MACHINES FOR BRUSHLESS SYNCHRONOUS DRIVE CLASSIFICATION

Classification of electric machines for the brushless synchronous drive, detailed is considered in view of an opportunity of creation by one winding of the machine of two fields simultaneously. The concrete designs explaining separate items of classification are resulted, references to results of experimental and settlement researches show importance of correct definition such as the brushless synchronous machine.

Key words: brushless synchronous drive, classification of electric machines, reluctance self-inductive machine, reluctance mutual-inductive machine.

УДК 621.314

Е.А. Копелович

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ТРАНЗИСТОРНО-КОНДЕНСАТОРНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ ДЛЯ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Институт прикладной физики РАН

Рассмотрены условия эффективной работы высоковольтных источников питания (ВВИП) на базе полумостового транзисторного преобразователя постоянного напряжения с дозирующими конденсаторами. Исследовано влияние индуктивности рассеивания и паразитной емкости высоковольтного трансформатора на величину выходной мощности ВВИП. Показана перспективность двухтрансформаторного варианта исполнения преобразователя. Приведены примеры практической реализации ВВИП на его основе.

Ключевые слова: высоковольтный источник питания, электрофизическая установка, дозирующий конденсатор, преобразователь, трансформатор.

Современные мощные электрофизические установки (ЭФУ) представляют собой крупные энергетические комплексы, выполненные на базе различных типов мощных СВЧ-приборов (гиротронов, магнетронов, ЛОВ и др.) или лазеров (газовых, твердотельных и др.). СВЧ-установки позволяют получать электромагнитное излучение частотой $1\div 200$ ГГц мегаваттного уровня мощности как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режимах. Рекордные значения мощности излучения лазерных комплексов на сегодняшний день достигли уровня 1 пВт (10^{15} Вт) в моноимпульсном режиме при длительности импульса порядка 50 фс ($50\cdot 10^{-15}$ с).

Одними из основных компонентов мощных ЭФУ, в значительной степени определяющих их технико-экономические характеристики, являются высоковольтные источники питания (ВВИП), которые обеспечивают создание ускоряющего электрического поля в мощных СВЧ-приборах или зарядку до заданного напряжения промежуточных емкостных накопителей энергии импульсных твердотельных и газовых лазеров. Требуемые значения выходного напряжения таких источников питания находятся в диапазоне $5\div 70$ кВ при выходной мощности до сотен киловатт.

Анализ существующих технических решений ВВИП, а также опыт их разработки, накопленный за последние десять лет в отделе высоковольтной техники Института прикладной физики РАН (Н.Новгород), позволяют сделать вывод о перспективности выполнения ВВИП для мощных ЭФУ на базе полумостового транзисторного преобразователя постоянного напряжения с промежуточным емкостным дозированием передаваемой в нагрузку энергии и трансформаторным выходом (рис. 1) [1, 2].

Ключевыми достоинствами данного варианта построения ВВИП являются:

- простота схемотехнической реализации на различные уровни выходного напряжения и мощности при одновременной возможности унификации конструкции преобразовательной и высоковольтной частей источника питания;
- высокая устойчивость функционирования на нагрузки различного типа в рабочем и аварийном режимах за счет постоянства дозы энергии, передаваемой в нагрузку за такт работы ВВИП;
- малые коммутационные потери в силовых полупроводниковых приборах, благодаря колебательному характеру тока через них в широком диапазоне выходных напряжений, что позволяет обеспечить высокую ($20\div 50$ кГц) частоту преобразования.

Принцип действия данного варианта транзисторно-конденсаторного преобразователя (ТРКП) заключается в поочередной передаче энергии из дозирующих конденсаторов (ДК) $C1$, $C2$ че-

рез полумостовой транзисторный модуль $VT1, VT2$, высоковольтный трансформатор $TV1$ и выпрямитель HVD в нагрузку Z_H , параллельно которой подключен емкостной фильтр C_H .

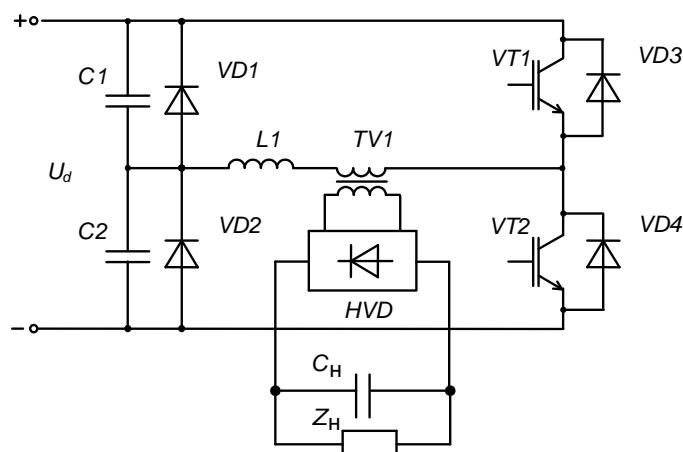


Рис. 1. Схема полумостового транзисторного преобразователя с дозирующими конденсаторами

На полупериоде работы преобразователя $T/2$ можно выделить три основных интервала непрерывности. Схемы замещения ТРКП на них и форма импульсов тока i , протекающих в первичной обмотке $TV1$ при различных напряжениях на нагрузке $U_{H1} \leq U_{H2} \leq U_{H3}$, приведены на рис. 2, где $C = C1 = C2$ - емкость ДК; $U_H^* = 2U_H / kU_d$ - относительное значения выходного напряжения ВВИП (напряжения на емкостном фильтре C_H), приведенное к первичной обмотке трансформатора; $L = L_1 + L_S$ и R - соответственно суммарная индуктивность и эквивалентное активное сопротивление контура передачи энергии ДК в нагрузку; k, L_S - соответственно коэффициент трансформации и индуктивность рассеивания $TV1$.

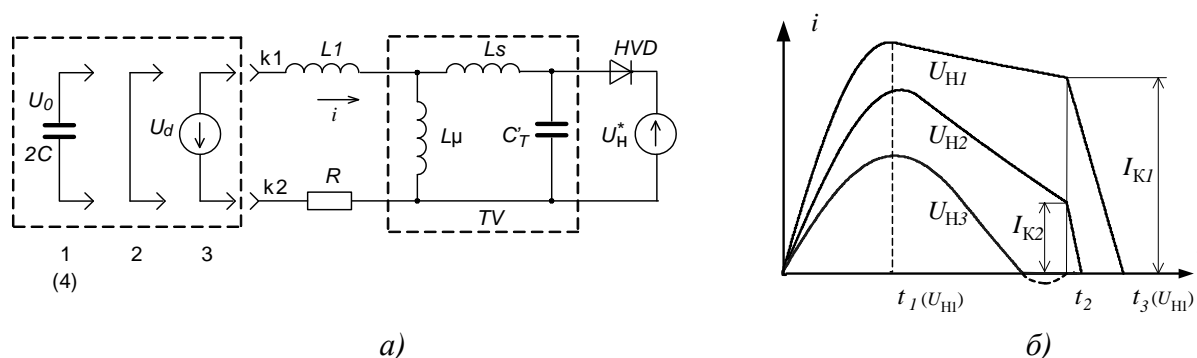


Рис. 2. Схема замещения ТРКП на интервалах непрерывности (а) и форма импульсов тока в первичной обмотки $TV1$ при различных значениях напряжения на нагрузке (б)

С учетом выполняющегося на практике соотношения $C \ll k^2 C_H$ напряжение на нагрузке в течение одного рабочего такта ТРКП принято постоянным и равным U_H^* .

Рассмотрим основные процессы в ТРКП без учета паразитных параметров высоковольтного трансформатора: индуктивности рассеивания L_S и приведенной к первичной обмотке собственной емкости его вторичных обмоток $C_T' = k^2 C_T$, а также считая индуктивность намагничивания трансформатора L_μ бесконечно большой.

На первом интервале непрерывности ($0 \leq t \leq t_1$) происходят разряд дозирующего конденсатора $C1(C2)$ на противо-ЭДС U_H^* через транзистор $VT1(VT2)$ и одновременно заряд конденсатор $C2(C1)$ от входного источника постоянного напряжения U_d (в схеме замещения рис. 2, а на интервале 1 к точкам $K1-K2$ подключен дозирующий конденсатор с эквивалентной емкостью $2C$, заряженный до напряжения $U_0 = U_d$).

В момент равенства нулю напряжения ДК ($t = t_1$ для $U_H^* = U_{H1}^*$ рис. 2, б) включается диод $VD1(VD2)$, и начинается второй интервал ($t_1 \leq t \leq t_2$), на котором точки $K1-K2$ (рис. 2, а) закорочены, при этом происходит передача энергии из дросселя L в нагрузку.

На третьем интервале, который начинается в момент времени t_2 по окончании импульса управления силовым транзистором длительностью t_y , энергия из дросселя L передается в нагрузку и частично возвращается во входной источник питания ТРКП через диоды $VD1(VD2)$ и $VD4(VD3)$. Процессу возврата энергии соответствует подключение к точкам $K1-K2$ (рис. 2, а) входного источника постоянного напряжения U_d .

ВВИП обеспечивает постоянство передаваемой в нагрузку мощности

$$P = P_{\max} \approx 2\eta C U_d^2 / T \quad (1)$$

и бестоковую коммутацию силовых транзисторов и диодов в диапазоне напряжений на нагрузке

$$U_{\text{гр}}^* \leq U_H^* \leq U_{H\max}^*, \quad (2)$$

где η – КПД преобразователя; $U_{\text{гр}}^*$ – относительное значение граничного выходного напряжения, при превышении которого исчезает третий интервал работы ТРКП и вся энергия ДК полностью передается в нагрузку. Напряжение $U_{\text{гр}}^*$ определяется из соотношения

$$t_y^* = \frac{t_y}{\sqrt{2LC}} = \arccos\left(\frac{U_{\text{гр}}^*}{U_{\text{гр}}^* - 2}\right) + Q \cdot \ln\left(1 + \frac{2 \cdot \sqrt{1 - U_{\text{гр}}^*}}{Q \cdot U_{\text{гр}}^*}\right), \quad (3)$$

которое нетрудно получить из условия равенства нулю тока i в момент времени $t = t_y$, где $Q = \sqrt{L/2C} / R$ – добротность контура передачи энергии ДК в нагрузку.

Величина максимального выходного напряжения ВВИП $U_{H\max}^*$, при котором обеспечивается полная передача энергии из ДК в нагрузку, может быть найдена из условия одновременного равенства нулю напряжения на дозирующем конденсаторе u_C и тока i в момент времени $t = t_1 = \pi\sqrt{2LC}$:

$$U_{H\max}^* = \frac{2}{1 + \exp(\pi/2Q)}. \quad (4)$$

Дальнейшее увеличение выходного напряжения ВВИП будет происходить при неполной разрядке ДК и, следовательно, неэффективной работе источника. Используя метод разностных уравнений, можно показать, что рост выходного напряжения ВВИП закончится при $U_{H\max}^* = 1$, когда начальное напряжение на ДК уменьшится до значения $U_d/2$ и ток в контуре нагрузки i станет равным нулю.

В диапазоне выходных напряжений ВВИП $U_H^* < U_{\text{гр}}^*$ включение силовых транзисторов происходит при нулевом токе, а выключение при токе, равном

$$I_K = \frac{U_d}{\sqrt{L/2C}} \cdot \left[(\sqrt{1-U_H^*} + \frac{QU_H^*}{2}) \cdot \exp(\frac{1}{Q} \arccos \frac{U_H^*}{U_H^*-2} - \frac{t_y^*}{Q}) - \frac{QU_H^*}{2} \right]. \quad (5)$$

В результате, при $U_H^* < U_{гр}^*$ выходная мощность ВВИП меньше максимального значения P_{\max} и равна

$$P^* = \frac{P}{P_{\max}} = 1 - \frac{1}{1+0,5U_H^*} [(\sqrt{1-U_H^*} + \frac{Q \cdot U_H^*}{2}) \cdot \exp(-\frac{t_2^*}{Q}) - \frac{QU_H^*}{2}]^2, \quad (6)$$

где $t_2^* = t_y^* - \arccos \frac{U_H^*}{U_H^*-2}$.

Рассмотрим теперь влияние индуктивности рассеивания L_S и собственной емкости вторичных обмоток C_T высоковольтного трансформатора на значение максимальной мощности ВВИП P_{\max} .

Очевидно, что длительность импульсов запуска силовых транзисторов не может быть меньше величины

$$t_y^{\min} = \pi\sqrt{2LC}, \quad (7)$$

что соответствует $U_{гр}^* = 1$.

Следовательно, минимально возможное значение периода работы ТРКП с учетом соотношения $t_3 = T/2 = t_y + \sqrt{2LC}$, определяющего длительность импульса тока i на первом рабочем такте при $U_H^* = 0$, равно

$$T = 2(1+\pi)\sqrt{2LC}. \quad (8)$$

Тогда из выражений (1) и (8) следует, что при выбранной рабочей частоте преобразователя $f = 1/T$ для получения требуемой выходной мощности ВВИП P_{\max} величина индуктивности рассеивания высоковольтного трансформатора должна удовлетворять условию

$$L_S \leq \frac{\eta U_d^2}{f P_{\max} (\pi+1)^2}. \quad (9)$$

Наличие собственной емкости C_T^{\prime} вторичных обмоток высоковольтного трансформатора приводит к тому, что после окончания основного импульса тока i начинается разряд C_T^{\prime} , который заряжен до текущего значения выходного напряжения U_H^* , на разряженный ДК $C1(C2)$ (интервал 4 на схеме замещения рис. 2, а). Ток разряда имеет практически синусоидальную форму и протекает через обратный диод транзисторного модуля $VD3(VD4)$.

Характерная для ВВИП с выходным напряжением $U_{H\max} \geq 25$ кВ осциллограмма тока i в первичной обмотке $TV1$ при величинах выходного напряжения, близких к максимальному значению, приведена на рис. 3.

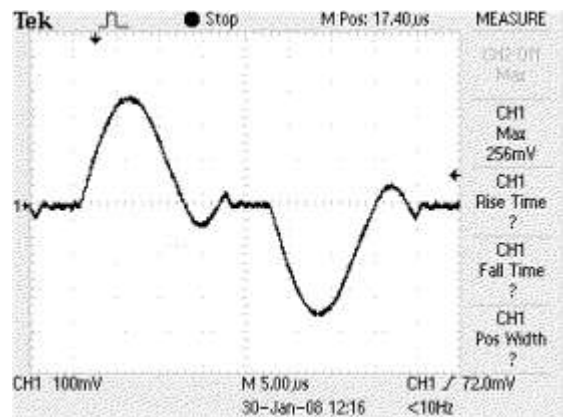


Рис. 3. Осциллограмма тока в первичной обмотке $TV1$ ($U_H^* \approx 1$)

Так как обычно $C_T' = k^2 C_2 \ll 2C$, то ДК заряжается до напряжения

$$U_D = U_d U_H^* C_T' / C, \quad (10)$$

что приводит к уменьшению начального напряжения на другом ДК до величины

$$U_0 = U_d (1 - U_H^* C_T' / C). \quad (11)$$

В связи с этим, выходная мощность ВВИП снижается до величины

$$P_{\max} \approx 2\eta C U_d^2 (1 - U_H^* C_T' / C)^2 / T. \quad (12)$$

Таким образом, для повышения величины P_{\max} необходимо стремиться к максимальному снижению индуктивности рассеивания и собственной емкости вторичных обмоток высоковольтного трансформатора $TV1$. С этой целью в работах [3, 4] был предложен двухтрансформаторный вариант выполнения ТРКП (рис. 4).

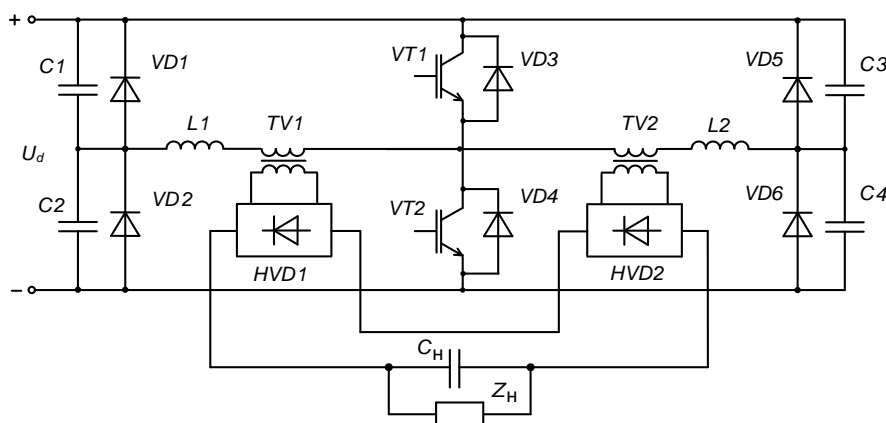


Рис. 4. Схема двухтрансформаторного ТРКП

В нем ДК $C1 \div C4$ имеют в два раза меньшую емкость, по сравнению с вариантом схемы на рис. 1, что существенно снижает требования к величине индуктивности рассеивания высоковольтных трансформаторов $TV1, TV2$. Кроме того, за счет последовательного включения высоковольтных выпрямителей $HVD1, HVD2$ в два раза снижается коэффициент трансформации каждого трансформатора, что, помимо уменьшения емкости вторичных обмоток, приводит к упрощению конструкции трансформаторов $TV1, TV2$ и улучшает условия их охлаждения.

На базе двухтрансформаторного ТРКП в Институте прикладной физики РАН (Н.Новгород) за последние десять лет разработано и изготовлено значительное количество ВВИП для различных мощных ЭФУ:

- ВВИП технологических магнетронных установок для напыления алмазных пленок с выходным напряжением 5 кВ мощностью 18 кВт;
- серия ВВИП с выходным напряжением 15÷25 кВ мощностью 15÷60 кВт для гиротронных комплексов исследовательского и прикладного назначения, работающих в режиме непрерывной или импульсно-периодической генерации СВЧ излучения;
- ряд ВВИП для зарядки емкостных накопителей энергии моноимпульсных лазерных установок с выходным напряжением 50÷70 кВ мощностью 0,5÷70 кВт.

В качестве примера на рис. 5 приведен внешний вид двух из находящихся в эксплуатации высоковольтных источников питания:

- ВВИП 25 кВ 60 кВт для гиротронного комплекса, генерирующего в непрерывном режиме мощность порядка 15 кВт на частоте 28 ГГц (рис. 5, а);

- ВВИП 70 кВ 8 кВт, использующегося для зарядки секции емкостного накопителя энергии сверхмощного газового лазера (рис. 5, б).



а)



б)

Рис. 5. Внешний вид ВВИП 25 кВ 60 кВт (а) и ВВИП 70 кВ 8 кВт (б)

Библиографический список

1. **Копелович, Е.А.** Концепция построения высоковольтных источников питания для мощных электрофизических установок // Актуальные проблемы электроэнергетики: труды НГТУ. – Н.Новгород, 2009. Т. 77. С. 32–36.
2. **Курчик, Б.З.** Преобразователь для заряда емкостных накопителей энергии / Б.З. Курчик, А.Д. Покрывайло, А.Н. Шварц // Приборы и техника эксперимента. 1990. №4.
3. **Kopelovich, E.A.** High voltage power supplies for high power vacuum electron devices / E.A. Kopelovich, A.U. Novikov, A.G. Razumov, M.M. Troitsky, F.A. Flat // Proceedings of the 8-th IEEE International Vacuum Electronics Conference. Kitakyushu International Conference Center, Japan, 2007. P. 339-340.
4. Патент на полезную модель № 94089 РФ, МПК Н 03 К 3/53. Зарядное устройство накопительного конденсатора / Копелович Е.А. Оpubл. в Бюллетене «Изобретения, полезные модели», 2010. № 13.

Дата поступления
в редакцию 26.04.2011

Е.А. Kopelovich

HIGH VOLTAGE TRANSISTOR-CAPACITOR POWER SUPPLIES FOR POWER ELECTROPHYSICAL INSTALLATIONS

The conditions of the operating benefits of the high voltage power supplies (HVPS) based on the half-bridge transistor converter with dosaging capacitors effective operation are considered. The impact of the high voltage transformer stray parameters on the HVPS output power is investigated. It is shown the attraction of the two transformer converter variant. The realized HVPS examples based on this converter variant are reported.

Key words: high voltage power supply, electro physical installation, dosaging capacitor, converter, transformer.

УДК 502.3:621.311.23

О.В. Маслеева

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МИНИ-ТЭЦ НА УРОВЕНЬ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Дана экологическая оценка загрязнения атмосферного воздуха при строительстве мини-ТЭЦ с тремя различными видами двигателей: газопоршневыми, газотурбинными и дизельными. Рассчитаны максимальные приземные концентрации при различной высоте дымовых труб.

Ключевые слова: экология, мини-ТЭЦ, загрязняющие вещества, приземные концентрации, ПДК.

В работах [1, 2] показана целесообразность строительства на промышленных предприятиях собственных мини-ТЭЦ мощностью от 1 до 20 МВт. Достоинствами мини-ТЭЦ являются:

- низкая стоимость вырабатываемой электроэнергии и тепла;
- быстрая окупаемость;
- низкий расход топлива, большой моторесурс и долговечность;
- экологическая безопасность.

Экономические показатели сооружения мини-ТЭЦ подробно описаны в работе [2].

Охрана природной среды для объектов энергетики включает в себя решение ряда вопросов, таких как охрана воздушной среды, уменьшение или исключение сбросов вредных веществ в водоемы, уменьшение действия шума, рекультивация земель и т.д. Основное внимание уделяется выбросам загрязняющих веществ в атмосферу.

Отрицательное влияние загрязнения атмосферы выражается в ухудшении здоровья людей и животных, снижении урожайности сельскохозяйственных культур и продуктивности животных. Воздействию вредных веществ подвержены лесные угодья. Загрязнение атмосферы влияет на коррозионные процессы строительных конструкций, ускорение износа зданий и оборудования.

Основным источником загрязнения воздушного бассейна городов являются вредные для здоровья людей вещества, содержащиеся в продуктах сгорания. При работе мини-ТЭЦ с газопоршневыми и газотурбинными двигателями на природном газе в атмосферу будут выбрасываться следующие вредные вещества: оксиды азота и оксид углерода. Для мини-ТЭЦ с дизельными двигателями: оксиды азота, оксид углерода, углеводороды, сажа, диоксид серы, формальдегид, 3,4 бензапирен.

Двуокись углерода образуется при полном сгорании углерода и не оказывает вреда для здоровья. Состав продуктов неполного сгорания в большой степени зависит от состава топлива и метода сжигания. При неполном сгорании топлива продукты сгорания содержат оксид углерода, углеводороды и сажу. Оксид углерода изменяет состав крови и приводит к нарушению нервной системы. Также при недостаточном количестве кислорода, подаваемого в зону горения, в диапазоне температур 973 – 1073 К образуется полициклический углеводород 3,4 бензапирен ($C_{20}H_{16}$), обладающий канцерогенными свойствами.

При сжигании органических топлив азот, содержащийся в воздухе и топливе, становится реакционноспособным и, соединяясь с кислородом, образует оксиды NO, NO₂, N₂O. Основная доля оксидов азота (более 95 %) приходится на монооксид азота NO. В атмосфере NO превращается в NO₂ (сильный яд, поражающий нервную систему, при соединении с водой из него образуется азотистая кислота). При окислении атмосферного азота воз-

духа, расходуемого при сжигании топлива, образуются так называемые «термические» и «быстрые» оксиды азота, а оксиды азота, образующиеся при окислении азотсодержащих составляющих топлива, называются *топливными*.

Термические оксиды азота образуются при горении любых видов топлива в области высоких температур (более 1500°C). На выход оксидов азота наибольшее влияние оказывают температура в зоне горения, время пребывания газов в зоне горения и коэффициент избытка воздуха. «Быстрые» оксиды азота образуются в корневой части факела при температурах 900... 1300°C. Образование «быстрых» оксидов азота также зависит от избытка воздуха. Доля «быстрых» оксидов азота в суммарном выбросе NO обычно не превышает 10... 15 %.

Азотсодержащие соединения, входящие в состав жидкого топлива, являются источником образования топливных оксидов азота. В природном газе не содержится азота, входящего в состав органических соединений, поэтому при сжигании природного газа образуются только термические оксиды азота.

Автором были проведены расчеты валовых и удельных выбросов, а также приземных концентраций загрязняющих веществ для мини-ТЭЦ с тремя различными видами двигателей: газопоршневыми, газотурбинными (при их работе на природном газе) и дизельными (при использовании дизельного топлива).

Исходными данными для расчета являлись: паспортные данные двигателя, концентрации загрязняющих веществ в дымовых газах и объем сжигаемого газа (для мини-ТЭЦ с газопоршневыми и газотурбинными двигателями), расход дизельного топлива (для мини-ТЭЦ с дизельными двигателями).

Расчет валовых и удельных выбросов, концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе выполнен на основании следующих нормативных документов: Методического пособия по расчету, нормированию и контролю выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, ОНД-86 Методики расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий.

Валовые (т/год) и удельные выбросы (кг/кВт ч) загрязняющих веществ оксидов азота (NO₂ и NO), оксида углерода (CO) были рассчитаны для газопоршневых двигателей и газотурбинных двигателей мощностью 1 МВт российских и иностранных производителей. Концентрации загрязняющих веществ в дымовых газах для газопоршневого двигателя производства РУМО получены при проведении испытаний на заводе. Результаты расчета для двух видов двигателей приведены в табл. 1, а данные этих двигателей – в табл. 2).

Таблица 1

**Валовые и удельные выбросы загрязняющих веществ для мини-ТЭЦ
с газопоршневыми и газотурбинными двигателями**

Вид и модель двигателя	Концентрации загрязняющих веществ в дымовых газах, мг/м ³				Валовые выбросы, т/год			Удельные выбросы, г/кВт ч		
	NO _x	NO ₂	NO	CO	NO ₂	NO	CO	NO ₂	NO	CO
Газопоршневые										
8Г4Н22/28	997	798	150	481	44	8	26	46	9	28
G3516-TA(H)	500	400	65	650	15	3	25	17	3	28
Газотурбинные										
TB3-117	50	40	6,5		10	1,6		1,04	0,17	
SB5	25	20	3,25		3,3	0,5		0,34	0,056	

Согласно Методики расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных дизельных установок, расчет выбросов был выполнен для следующих вредных веществ, поступающих в атмосферу с отработавшими газами стационарных дизельных устано-

вок: оксида углерода (CO), оксидов азота (NO₂ и NO), углеводородов (CH), сажи (C), диоксида серы (SO₂), формальдегида (CH₂O), бензапирена (C₂₀H₁₂).

Валовый выброс загрязняющего вещества за год (т/год) стационарной дизельной установкой определялся исходя из нормативных величин удельных выбросов (г/кг топлива), которые приведены в табл. 3, и данных двигателей (табл. 4).

Таблица 2

Паспортные данные газопоршневых и газотурбинных двигателей

Производитель двигателей	Модель двигателя	Мощность двигателя, кВт	Расход газа, н.м ³ /с	Расход дымовых газов, м ³ /с
Газопоршневые				
РУМО	8Г4Н22/28	1090	0,0869	1,733
Caterpillar	G3516-TA(H)	1015,8	0,0835	1,22
Газотурбинные				
Завод им. В.Я. Климова	ТВ3-117	1100	0,164	7,95
Mitsui Engineering	SB5	1100	0,108	5,25

Расчет валовых и удельных выбросов загрязняющих веществ был проведен для дизельных двигателей мощностью 1 МВт российских и иностранных производителей. Результаты расчета для двух типов двигателей приведены в табл. 5.

Таблица 3

Нормативные величины удельных выбросов дизельных двигателей

Модель двигателя	Группа	Выброс, г/кг топлива						
		CO	NO _x	CH	C	SO ₂	CH ₂ O	C ₂₀ H ₁₂
8ДМ-21С	Г	30	45	15	2,5	5	0,6	5,5 · 10 ⁻⁵
КТА50G1	Г	15	18	4,3	0,71	5	0,17	1,6 · 10 ⁻⁵

Таблица 4

Паспортные данные дизельных двигателей

Производитель двигателей	Модель двигателя	Мощность, кВт	Частота вращения, об/мин	Расход топлива, т/год
Дизельные				
Уральский дизель-моторный завод	8ДМ-21С	1080	1500	1724
Cummins Inc.	КТА50G1	1000	1500	1521

Таблица 5

Валовые и удельные выбросы вредных веществ для мини-ТЭЦ с дизельными двигателями

Модель двигателя	Загрязняющие вещества							
	CO	NO ₂	NO	CH	C	SO ₂	CH ₂ O	C ₂₀ H ₁₂
Валовые выбросы, т/год								
8ДМ-21С	51,7	62,1	10,1	25,9	4,3	8,6	1,0	9,5E-05
КТА50G1	22,8	21,9	3,6	6,52	1,09	7,6	0,26	2,4E-05
Удельные выбросы, кг/кВт ч								
8ДМ-21С	5,47	6,56	1,07	2,73	0,46	0,91	0,109	1,0E-05
КТА50G1	2,6	2,50	0,41	0,74	0,12	0,87	0,030	2,7E-06

Валовые выбросы (т/год) загрязняющих веществ были рассчитаны для 122 газопоршневых двигателей мощностью от 0,1 до 9 МВт, для 171 газотурбинных двигателей мощностью 0,1–20 МВт, для 549 дизельных двигателей мощностью 0,1 до 7,36 МВт российских и иностранных производителей.

На основе проведенных расчетов для оценки влияния мощности и типа двигателя были построены графические зависимости «Валовые выбросы от мощности мини-ТЭЦ» для каждого загрязняющего вещества. Графики представлены на рис. 1.

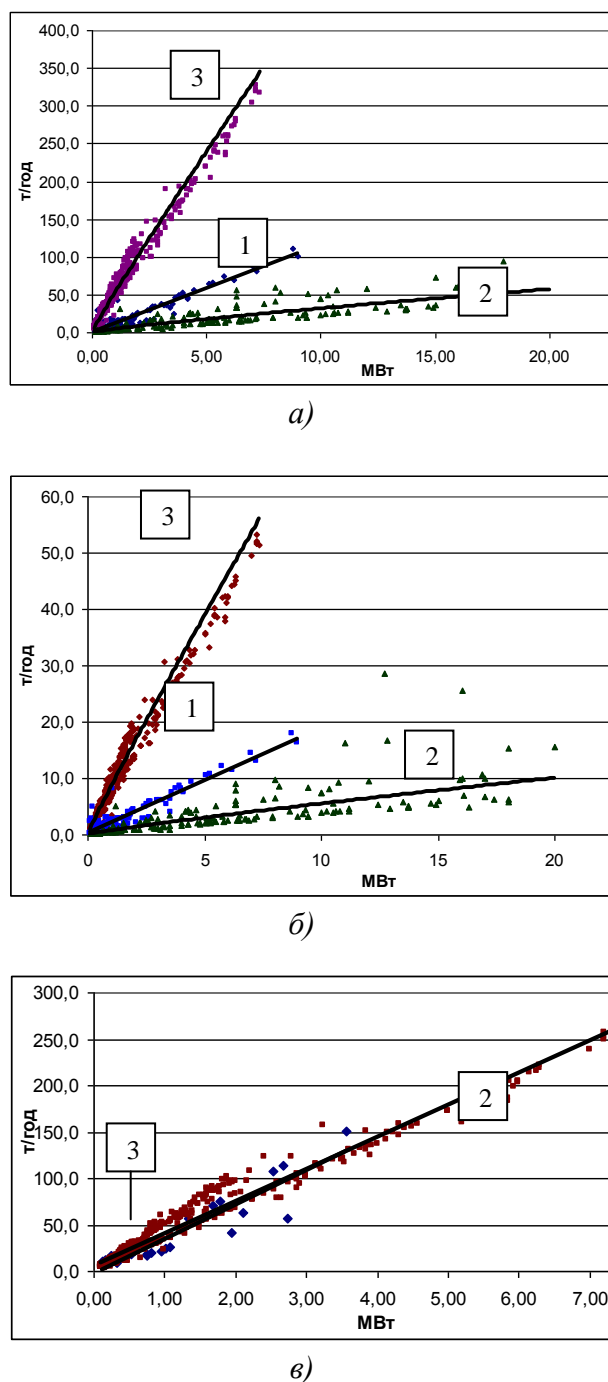


Рис. 1. Валовые выбросы NO₂, NO, CO в зависимости от мощности для газопоршневых (1), газотурбинных (2) и дизельных (3) двигателей:

а – NO₂; *б* – NO; *в* – CO

Для непосредственной оценки влияния мини-ТЭЦ на здоровье человека были рассчитаны приземные концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, построены

поля рассеивания и определены точки с максимальной концентрацией. Мини-ТЭЦ состоит из двигателей мощностью 1 МВт в количестве от 1 до 10 штук. Результаты расчета представлены в табл. 6 для мини-ТЭЦ с газопоршневыми двигателями РУМО 8Г4Н22/28, Caterpillar G3516-ТА(Н) при различной высоте дымовой трубы (от 10 до 35 м), диаметр трубы - 0,325 м и с газотурбинными двигателями завод им. В.Я. Климова ТВ3-117, Mitsui Engineering SB5 высота трубы – 10 м, диаметр трубы – 1,35 м. Температура дымовых газов принималась 110°C. Расчеты проведены для климатической зоны г. Н. Новгород.

Таблица 6

**Предельно допустимые концентрации загрязняющих веществ
в атмосферном воздухе населенных мест**

№ код	Наименование вещества	Формула	Величина ПДК (мг/м ³)		Класс опасности
			максимальная разовая	средне-суточная	
4	Азота диоксид	NO ₂	0,2	0,04	2
6	Азот (II) оксид	NO	0,4	0,06	3
48	Бензапирен	C ₂₀ H ₁₂	-	10 ⁻⁶	1
463	Сера диоксид	O ₂ S	0,5	0,05	3
520	Углерод	C	0,15	0,05	3
521	Углерод оксид	CO	5	3	4
541	Формальдегид	CH ₂ O	0,035	0,003	2

Таблица 7

**Максимальные приземные концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе для мини-ТЭЦ
с газопоршневыми и газотурбинными двигателями в зависимости от высоты трубы**

Высота трубы, м	Тип мини-ТЭЦ	Загрязняющее вещество	Приземные концентрации загрязняющих веществ, доли ПДК, для мини-ТЭЦ мощность, МВт					
			1	2	4	6	8	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	РУМО 8Г4Н22/28 (1 МВт)	NO ₂	0,261	0,522	1,044	1,566	2,088	2,61
		NO	0,0246	0,0492	0,0984	0,148	0,197	0,246
		CO	0,0063	0,0126	0,0252	0,0378	0,0504	0,063
	Caterpillar G3516-ТА(Н) (1 МВт)	NO ₂	0,245	0,49	0,98	1,47	1,96	2,45
		NO	0,246	0,492	0,984	1,476	1,968	2,46
		CO	0,02	0,04	0,08	0,12	0,16	0,2
	Завод им. В.Я. Климова ТВ3-117	NO ₂	0,0302	0,0604	0,1208	0,181	0,242	0,302
		NO	0,0050	0,010	0,0200	0,030	0,040	0,050
		CO		0	0	0	0	0
	Mitsui Engineering SB5	NO ₂	0,0182	0,0364	0,0728	0,1092	0,146	0,182
		NO	0,0015	0,0030	0,0059	0,0089	0,0118	0,0148
		CO						
15	РУМО 8Г4Н22/28 (1 МВт)	NO ₂	0,29	0,58	1,16	1,74	2,32	2,9
		NO	0,0273	0,0546	0,1092	0,164	0,218	0,273
		CO	0,0070	0,0140	0,0280	0,0421	0,0561	0,0701
	Caterpillar G3516-ТА(Н) (1 МВт)	NO ₂	0,162	0,324	0,648	0,972	1,296	1,62
		NO	0,0132	0,0264	0,0528	0,0792	0,106	0,132
		CO	0,0105	0,021	0,042	0,063	0,084	0,105
20	РУМО 8Г4Н22/28 (1 МВт)	NO ₂	0,216	0,432	0,864	1,30	1,728	2,16
		NO	0,0203	0,0406	0,0812	0,122	0,162	0,203
		CO	0,0052	0,0104	0,0209	0,0313	0,0418	0,0522
	Caterpillar G3516-ТА(Н) (1 МВт)	NO ₂	0,12	0,24	0,48	0,72	0,96	1,2
		NO	0,119	0,238	0,476	0,714	0,952	1,19
		CO	0,0097	0,0194	0,0388	0,0582	0,0776	0,097

Окончание табл. 7

1	2	3	4	5	6	7	8	9
25	ПУМО 8Г4Н22/28 (1 МВт)	NO ₂	0,171	0,342	0,684	1,026	1,368	1,71
		NO	0,0161	0,0322	0,0644	0,0966	0,129	0,161
		CO	0,0041	0,0083	0,0165	0,0248	0,0330	0,0413
	Caterpillar G3516-TA(H) (1 МВт)	NO ₂	0,0934	0,187	0,374	0,560	0,747	0,934
		NO	0,093	0,186	0,372	0,558	0,744	0,93
		CO	0,0076	0,0151	0,0302	0,0454	0,0605	0,0756
30	ПУМО 8Г4Н22/28 (1 МВт)	NO ₂	0,14	0,28	0,56	0,84	1,12	1,4
		NO	0,0132	0,0264	0,0528	0,0792	0,106	0,132
		CO	0,0034	0,0068	0,0136	0,0203	0,0271	0,0339
	Caterpillar G3516-TA(H) (1 МВт)	NO ₂	0,0749	0,150	0,300	0,449	0,599	0,749
		NO	0,0061	0,0122	0,0243	0,0365	0,0486	0,0608
		CO	0,0049	0,0097	0,0195	0,0292	0,0390	0,0487
35	ПУМО 8Г4Н22/28 (1 МВт)	NO ₂	0,118	0,236	0,473	0,709	0,946	1,182
		NO	0,0111	0,0222	0,0444	0,0666	0,0888	0,1110
		CO	0,0029	0,0057	0,0114	0,0171	0,0228	0,0285
	Caterpillar G3516-TA(H) (1 МВт)	NO ₂	0,0607	0,121	0,243	0,364	0,486	0,607
		NO	0,0049	0,0099	0,0197	0,0296	0,0394	0,0493
		CO	0,0039	0,0079	0,0158	0,0236	0,0315	0,0394

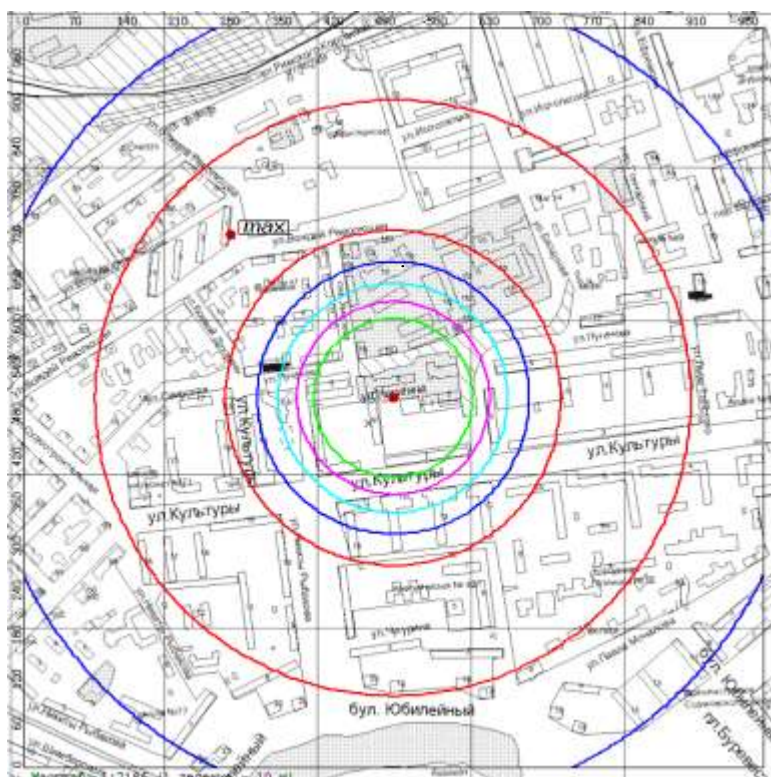


Рис. 2. Изолинии приземных концентраций выбросов NO₂ для мини-ТЭЦ с 4 газопоршневыми двигателями ПУМО 8Г4Н22/28 мощностью 1 МВт высота трубы Н=35 м:
 координаты точки с максимальной приземной концентрацией– $X=200\text{м}$, $Y=500\text{ м}$;
 максимальная приземная концентрация – $C_{\text{max}}=0,473$ ПДК

Цвет изолиний приземных концентраций	Доли ПДК
	0,20
	0,26
	0,32
	0,38
	0,44

Основные климатические характеристики, необходимые для расчетов приземных концентраций вредных веществ, приняты по СНиП 23-01-99 "Строительная климатология". Расчетный прямоугольник имеет размеры 1000х1000м, шаг расчета рассеяния загрязняющих веществ выбран 50 м.

Перечень загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферу мини-ТЭЦ, и санитарно-гигиенические характеристики загрязняющих веществ представлены в табл. 6. Предельно допустимые концентрации приняты согласно ГН 2.1.6.1338-03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест».

На рис. 2 построены изолинии приземных концентраций основного вредного вещества (NO_2), которые показывают распределение концентраций в долях ПДК, и точка с максимальной приземной концентрацией, которая составляет 0,473 ПДК, а также приведен вариант расчета для газопоршневой мини-ТЭЦ с 4 двигателями РУМО с трубой 35 м, расположенной в жилом районе.

Выводы

1. Из трех видов агрегатов наибольшие выбросы загрязняющих веществ дают дизельные двигатели.

2. Расстояние от мини-ТЭЦ до жилых районов (санитарно-защитная зона) должно быть не менее 50 м.

3. Для мини-ТЭЦ с газопоршневыми двигателями должны выполняться следующие экологические требования:

- при мощности мини-ТЭЦ 1 и 2 МВт (при мощности одного двигателя 1 МВт) высоту дымовой трубы можно брать 10 м, при этом концентрации всех вредных веществ не превышают ПДК;
- при мощности мини-ТЭЦ 4 МВт (при мощности одного двигателя 1 МВт) высоту дымовой трубы можно брать 20 м, при этом концентрации всех вредных веществ не превышают ПДК;
- при мощности мини-ТЭЦ 6 МВт (при мощности одного двигателя 1 МВт) высоту дымовой трубы можно брать 30 м, при этом концентрации всех вредных веществ не превышают ПДК.

4. Для мини-ТЭЦ с газотурбинными двигателями достаточно строительство дымовой трубы высотой 10 м.

Библиографический список

1. Вагин, Г.Я. К вопросу о повышении надежности систем электроснабжения промышленных предприятий // Промышленная энергетика. 2006 № 3.
2. Вагин, Г.Я. Технические и экономические критерии выбора мини-ТЭЦ на промышленных предприятиях / Г.Я. Вагин [и др.] // Промышленная энергетика. 2006. № 4-5.
3. Вагин, Г.Я. Мини-ТЭЦ в экологическом аспекте / Г.Я. Вагин [и др.] // АКВА-ТЕРМ. 2006. №6.

Дата поступления
в редакцию 26.04.2011

O.V. Masleeva

THE INFLUENCE OF MINI-POWER-STATION ON THE LEVEL OF ATMOSPHERIC AIR POLLUTION

The environmental assessment of air pollution during the construction of mini-power stations with three different types of engines: gas-piston, gas turbine and diesel is given. The maximum surface concentrations at different height of chimneys are calculated.

Key words: ecology, mini-CHP, pollutants, ground-level concentrations, MPC.

УДК 621.039, УДК 621.314

С.М. Дмитриев¹, Е.Ю. Анишев², Е.В. Рошин²**СНИЖЕНИЕ УРОВНЯ КРУТИЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ВАЛОПРОВОДОВ
ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ НАСОСОВ АЭС
С ЧАСТОТНОРЕГУЛИРУЕМЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ**Нижегородский государственный технический институт им. Р.Е. Алексеева¹,
ОАО «ОКБМ Африкантов»²

Рассмотрена возможность снижения крутильных деформаций валопровода насосов регулированием гармонического состава тока и момента асинхронного электродвигателя при питании его от преобразователя частоты и тактирования выпрямленного тока.

Ключевые слова: крутильные деформации, валопроводы, насосы, преобразователи частоты, тактирование тока.

Мощный частотнорегулируемый электропривод благодаря стремительному совершенствованию элементной полупроводниковой базы в последние годы получил главенствующее значение в силовом электроприводе, в том числе в атомной энергетике для привода главных циркуляционных насосов (ГЦН). Высоковольтные преобразователи частоты (ПЧ) существенно отличаются между собой по структурному построению и схемным решениям. Современные ПЧ решают проблемы стабилизации электромагнитного момента, формируя в асинхронном двигателе (АД) квазисинусоидальный ток и напряжение.

Благодаря топологии силовой структуры и совершенствованию системы управления ПЧ имеют функциональные возможности, позволяющие регулировать гармонический состав токов и моментов. Теоретическая часть такой коррекции гармонического состава электромагнитных величин привода была рассмотрена достаточно давно, когда силовая часть ПЧ, включая выпрямитель и инвертор, была выполнена на других, менее функциональных силовых элементах [1].

В [2, 3] было показано, что преобразователи с промежуточным контуром выпрямленного тока позволяют с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ) тактировать токи и целенаправленно использовать в токе статора АД некоторую долю высших гармоник (ВГ) и, тем самым, влиять на вращающий момент машины.

Электрически развиваемый АД вращающий момент [2]

$$m_1 = \frac{1}{1 + \sigma_2} I_m (\psi_2 \cdot i_1^*), \quad (1)$$

где σ_2 – потери рассеяния ротора; ψ_2 – потокосцепление ротора; i_1^* – ток статора.

Выпрямленный ток $i_d(t)$ промежуточного контура в общем виде изменяется по закону (рис. 1)

$$i_d(t) = I_d + \sum_{\mu=2}^{\infty} I_{d\mu} \cos(\omega_\mu t + \varphi_\mu), \quad (2)$$

где $\omega_\mu = 2\pi\mu f_N$; I_d , $I_{d\mu}$ – постоянная и переменные составляющие тока $i_d(t)$.

Используя преобразования с помощью коэффициентов ряда Фурье и выражений функции переключения фаз во временные промежутки в [2, 3] получены приближенные выражения электрически развиваемых вращающих моментов АД и их частот:

$$m_p = \begin{cases} m_1 \frac{i_{d\mu}}{I_d}, & f_p = f_{\mu\omega}; \\ \frac{m_1}{f_{n(1)}} \sqrt{\left(\frac{f_{n(6g+1)}}{6g+1} - \frac{f_{n(-(6g-1))}}{6g-1}\right)^2 + \left(\frac{f_{n(6g+1)}}{6g+1} + \frac{f_{n(-(6g-1))}}{6g-1}\right)^2 \tan^2 \varphi_2}, & f_p = 6gf_1; \\ \frac{m_1}{f_{n(1)}} \frac{i_{dn}}{2I_d} \sqrt{\left(\frac{f_{n(6g+1)}}{6g+1} - \frac{f_{n(-(6g-1))}}{6g-1}\right)^2 + \left(\frac{f_{n(6g+1)}}{6g+1} + \frac{f_{n(-(6g-1))}}{6g-1}\right)^2 \tan^2 \varphi_2}, & f_p = 6gf_1 \pm f_{\mu\omega}; \end{cases} \quad (3)$$

$g=1, 2, 3, \dots$

В (3) m_1 представляет амплитудное значение полезного асинхронного момента АД, создаваемый основной гармоникой статорного тока [3].

$$m_1 \approx \left(\sqrt{\frac{3}{2}} \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d f_{n(1)} \right)^2 \frac{x_1(1-\sigma)}{2}; \quad (4)$$

$$\tan \varphi_2 = \frac{1}{\omega_{R1} T_{20}}, \quad (5)$$

где φ_2 – внутренний фазный угол между основными гармониками напряжения ротора, приведенным к статору, и током статора; T_{20} – постоянная времени роторной цепи; ω_{R1} – круговая частота системы ротора.

Крутильные колебания распределены на три группы [2]. Колебания каждой группы имеют собственную причину своего возникновения. Дополнительные крутильные колебания группы 1 ($f_p=f_{\omega\mu}$) пропорциональны моменту нагрузки, и причиной их возникновения служат колебания электрической мощности с частотой, кратной частоте питающей сети. Они не зависят от тактирования тока.

Колебания группы 2 ($f_p=6gf_1$) зависят от нагрузки статора при его тактировании. Колебания группы 3 ($f_p=6gf_1 \pm f_{\omega\mu}$) получаются в результате модуляции тока двигателя переменной составляющей тока промежуточного контура и имеют частоты, являющиеся смесью частот статора и сети.

Цель тактирования – снизить наиболее интенсивные резонансы в пределах каждой зоны тактирования до минимально возможного уровня. Влияние пульсирующего тока в промежуточном контуре постоянного тока на электромеханические характеристики привода, питаемого от инвертора, представлено на примере сравнения экспериментальных резонансных моментных характеристик в функции питающей частоты статора $m=f(f_1)$ при идеальном и сглаженном пульсирующем токе (при 5-кратном тактировании) промежуточного контура (рис. 2). Пятикратное тактирование при определенных углах коммутации позволяет минимизировать гармоники частоты сети f_1 5-го и 7-го порядка. При этом могут появиться гармоники более высокого порядка, которые в слабодемпфированных системах привода могут вызвать побочные дополнительные резонансы.

Практически все современные ПЧ включают в себя ШИМ-инверторы тока или напряжения, методики по корректировке гармонического состава ВГ сетевых и выходных электрических параметров. Применение ШИМ-инвертора тока, формирующего в асинхронном двигателе квазисинусоидальные ток и напряжение, обеспечивает отличный от каскадных приводов характер электромагнитных и электромеханических процессов.

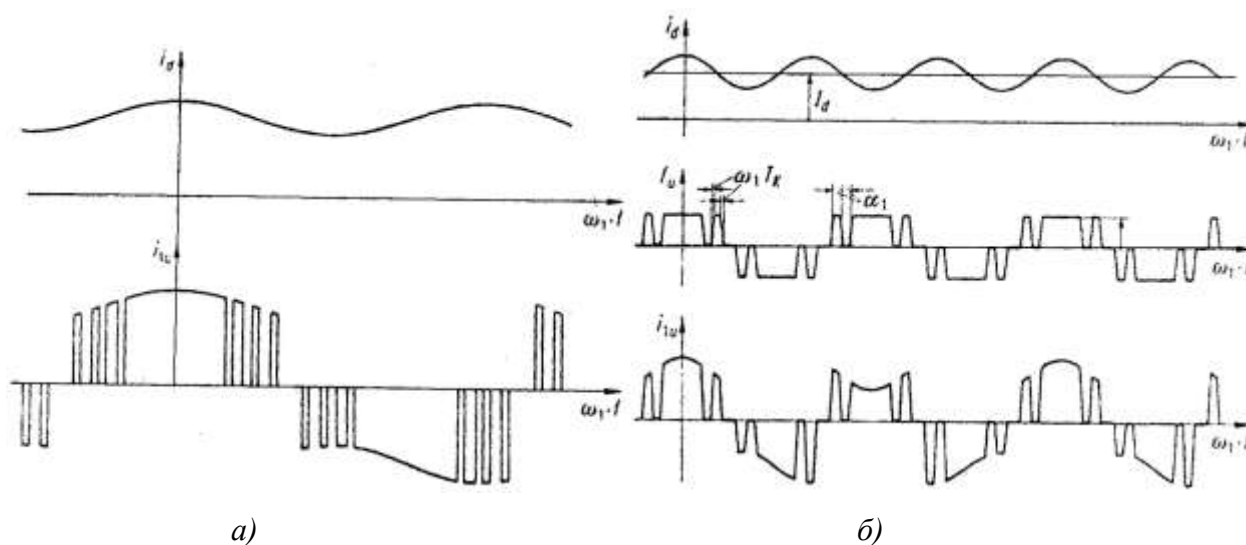


Рис. 1. Преобразование выпрямленного тока в фазные токи машины (пример) при тактировании с учетом пульсации тока в промежуточном контуре:
 $a - N_p = 7$; $b - N_p = 3$

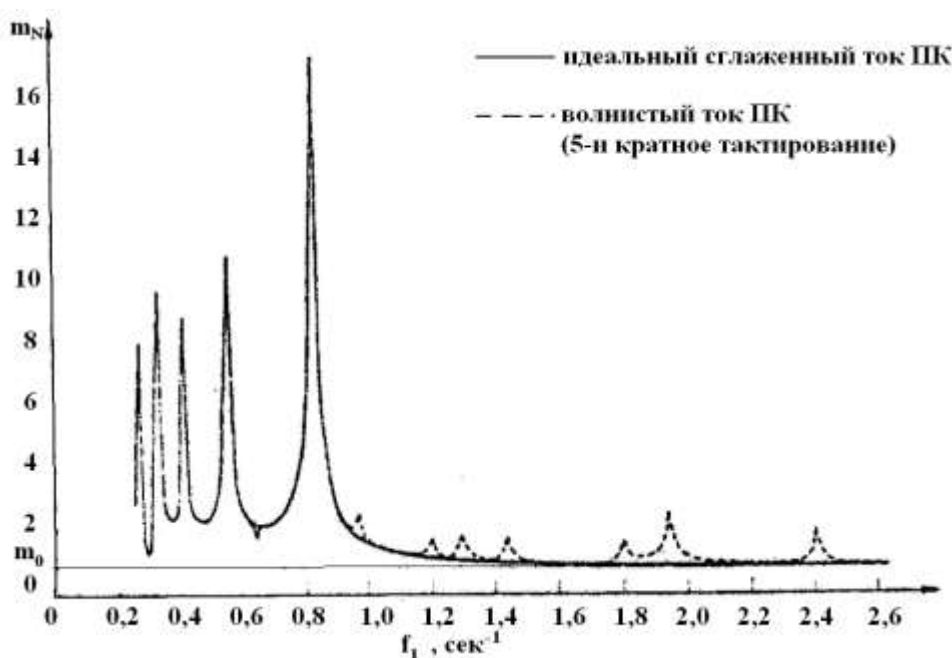


Рис. 2. Пульсации момента электромеханической 2-массовой системы с идеально сглаженными и волнистыми токами промежуточного контура

Наиболее доступные на сегодняшнем рынке технологии высоковольтной преобразовательной техники используют многообмоточный трансформатор для подавления нежелательных гармоник за счет сдвига фаз вторичных обмоток трансформатора. В зависимости от топологии привода такой трансформатор может иметь до 15 наборов вторичных обмоток.

Рассмотрим работу ПЧ с ШИМ на базе мощных регулируемых электроприводов серии PowerFlex7000 фирмы Rockwell Automation [4].

ШИМ-выпрямитель требует формирования специальной последовательности импульсов управления для переключения полностью управляемых тиристоров так, как это имеет место в инверторе. В рабочем диапазоне выходной частоты использован метод селективного исключения гармоник (SHE – Selective Harmonics Elimination) [4].

Выбирается диаграмма с определённым числом переключений на полупериод выходного тока $N_P = 5, 7, 9, 11 \dots$. Число переключений определяется в зависимости от частоты выходных токов инвертора, с учётом запрограммированной максимальной частоты модуляции. Значение максимальной частоты переключений по умолчанию 440 Гц. Число переключений на полупериод в рабочей зоне $N_P < 19$ (рис. 3, а).

Пример диаграммы проводящих состояний для каждого плеча инвертора показан на рис. 3, б. Проводящие состояния представлены в зависимости от углового положения вектора выходного тока инвертора i_M – в функции угла χ между направлением вектора i_M и осью α статора.

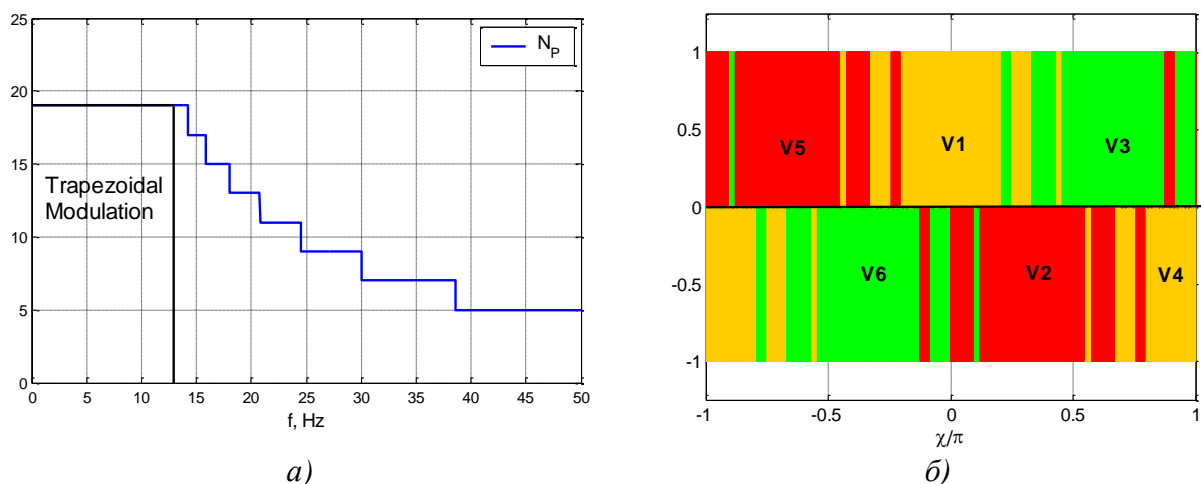


Рис. 3. Диаграмма переключений ключей инвертора:

а – по числу переключений на полупериод как функции частоты статора;
б – по проводящему состоянию плеч, $N_P = 5$

Как уже отмечалось, необходимость ограничения пульсаций электромагнитного момента определяет выбор высоковольтного ПЧ для регулирования асинхронного двигателя ГЦН, поэтому важным было исследовать пульсации электромагнитного момента двигателя 5 МВт, подключенного к автономному инвертору тока с ШИМ.

Исследования предварительно проводятся путем моделирования на виртуальном испытательном стенде. В состав стенда входит шкаф управления серийного ПЧ PowerFlex 7000. Шкаф управления соединён с компьютерной моделью силовой части электропривода. В её состав входят модели механизма, электродвигателя, силовой части ПЧ, системы электроснабжения. Компьютерная модель функционирует в реальном масштабе времени. Схема стенда представлена на рис. 4.

На вход компьютерной модели из шкафа управления поступают дискретные команды проводящего состояния для плеч ПЧ. От компьютерной модели в шкаф управления поступают аналоговые сигналы обратной связи по токам и напряжениям. Соответствие процессов виртуального стенда процессам реального электропривода подтверждено натурными исследованиями процессов на ряде конкретных объектов.

Исследования частотнорегулируемого электропривода на виртуальной модели показали:

- при периодических токах статора асинхронного двигателя в электромагнитном моменте имеют место гармоники с частотами $6 f_s$, $12 f_s$, в токах статора – непериодические составляющие, возникающие под действием ШИМ (рис. 5, а, б);
- наибольшая амплитуда пульсаций электромагнитного момента на валу асинхронного двигателя соответствует частоте его вращения $\omega = 0,9$ (осциллограмма на рис. 5, в);

- в диапазоне частот 0–350 Гц имеет место сплошной спектр момента. Максимумы спектра приходятся (рис. 5, *з*) на частоты примерно 150 Гц и 250 Гц;
- относительные амплитуды гармоник отклонения момента от среднего значения ΔM , рассчитанные с шагом по частоте $\Delta f = 0,2$ Гц, для $\omega = 0,9$ показаны на рис. 5, *з*.

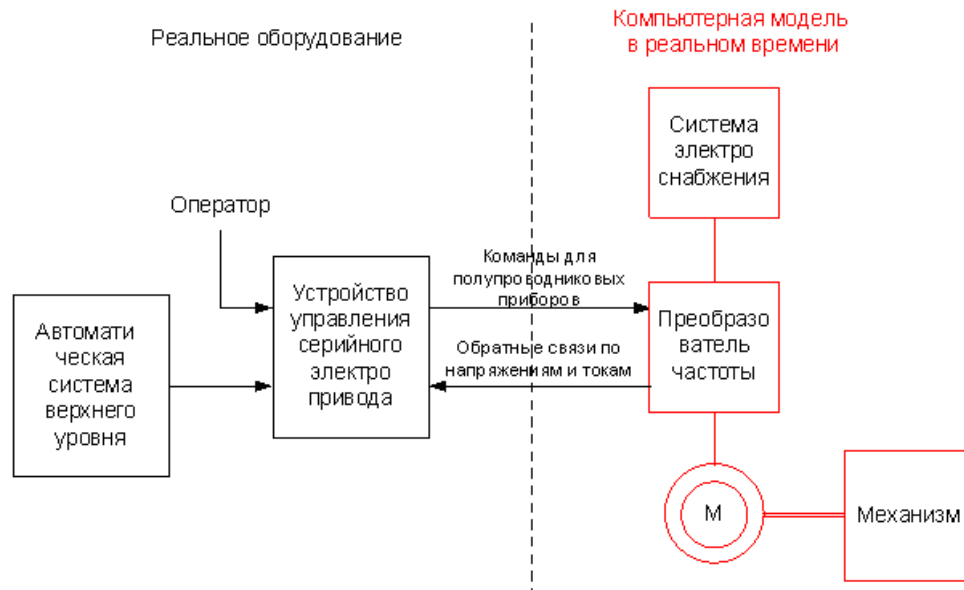


Рис. 4. Виртуальный стенд для механизмов режимов высоковольтных регулируемых электроприводов

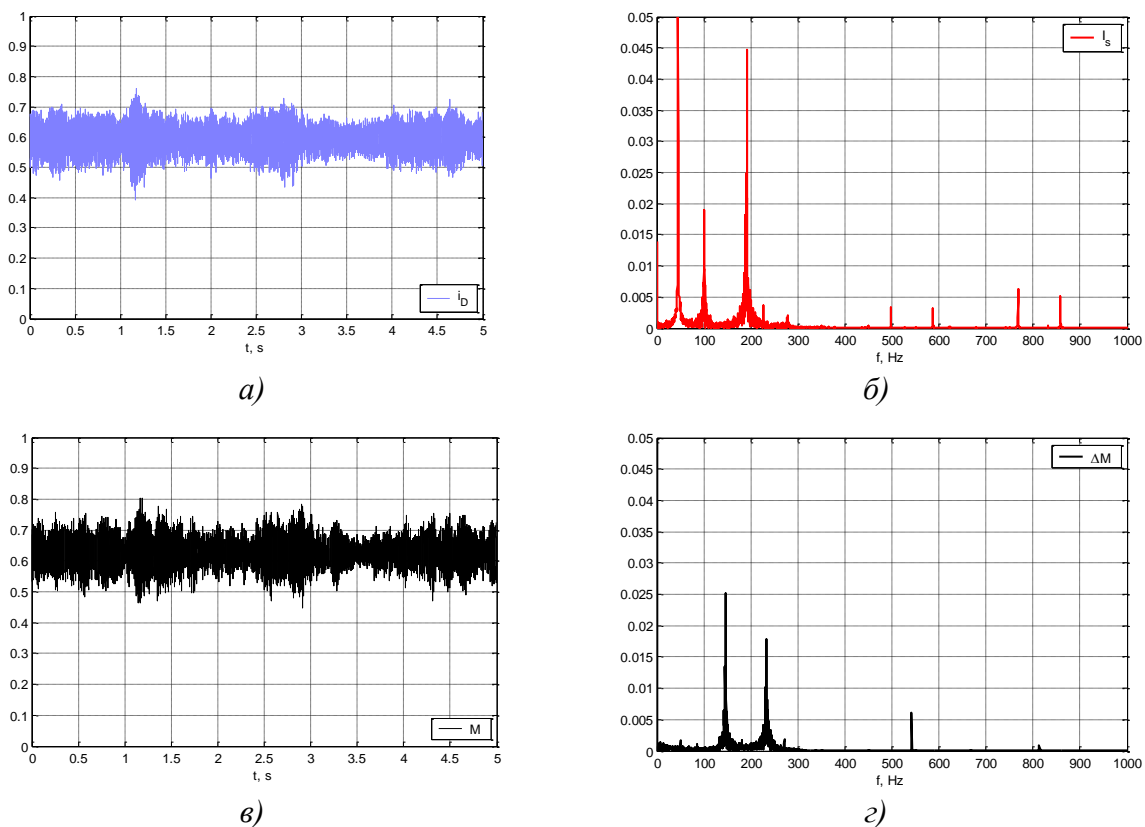


Рис. 5. К моделированию токов и моментов частотнорегулируемого электропривода ГЦН 5 МВт на частоте вращения $\omega=0,9$:
а – выпрямленный ток; *б* – ток статора; *в* – электромагнитный момент;
г – амплитуды гармоник отклонения момента от среднего значения

В табл. 1 приведены расчетные значения среднеквадратичных и максимальных отклонений электромагнитного момента от среднего значения, а также максимальных пульсаций момента на валу двигателя для нескольких значений частоты вращения ω .

Таблица 1

ω , о.е.	ΔM_{\max} , о.е.	$\Delta M_{M\max}$, о.е.	M_{av} , о.е.
0,996	0,1	0,011	0,7452
0,99	0,12	0,013	0,7380
0,9	0,15	0,017	0,6260
0,8	0,1	0,011	0,5142

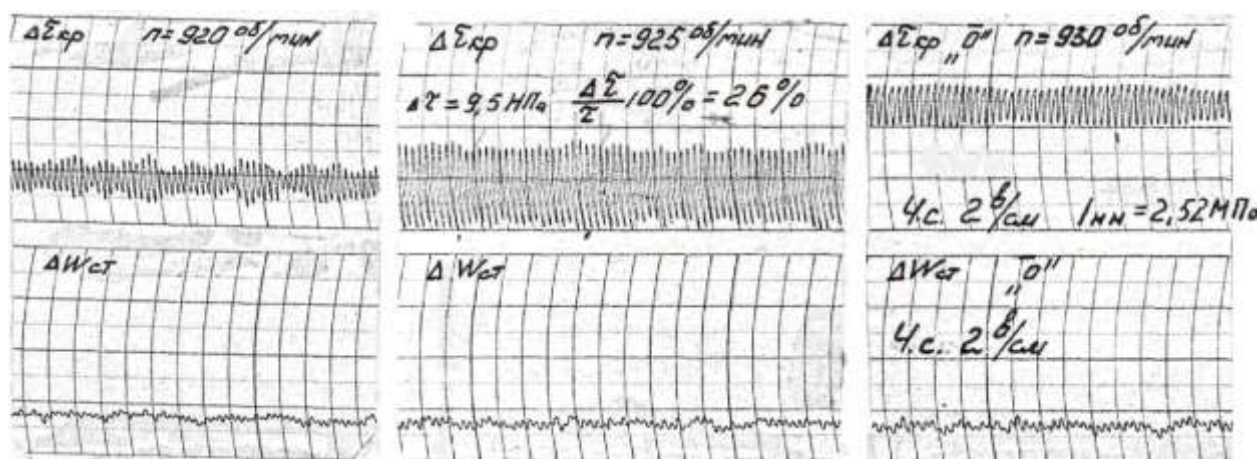
В расчетах учитывалось соотношение моментов инерции насоса и насосного агрегата в целом, показывающие, какая доля момента пульсаций передается на вал ГЦН:

$$\Delta M_M \approx (J_{\text{мех}} / J_{\Sigma}) \cdot \Delta M, \quad (6)$$

где $\Delta M = M - M_{av}$.

Как видно из табл. 1, наибольшая амплитуда пульсаций момента на валу двигателя $\Delta M_{M\max} = 0,017$ имеет место при частоте вращения $\omega = 0,9$. Амплитуда пульсаций электромагнитного момента ΔM_{\max} довольно существенна - до 15 % номинального момента, однако, как показывают исследования [4], можно с большой степенью вероятности полагать, что пульсации момента такой высокой частоты вряд ли вызовут резонансные крутильные деформации вертикального валопровода ГЦН с частотнорегулируемой системой электропривода.

Для сравнения на рис. 6 показаны экспериментальные осциллограммы колебаний деформации валопровода ГЦН $\Delta \tau_{кр}$ в резонансной зоне, где частоты колебаний момента каскадного электропривода $\Delta W_{ст}$ весьма близки к собственной частоте крутильных колебаний валопровода f_m . Снижение амплитуды деформаций валопровода $\Delta \tau_{кр}$ происходит в очень узкой зоне только благодаря незначительному смещению частоты колебаний момента ($f/f_m \neq 1$). Собственные частоты тихоходных насосов главных контуров циркуляции АЭС достаточно низкие (12-35 Гц) и могут находиться в рабочем диапазоне частот вращения при плавном регулировании расхода теплоносителей [5].



$n=920$ об/мин, $f_m=20$ Гц $n_{рез}=925$ об/мин, $f_m=18,5$ Гц, $f_c=49,5$ Гц $n=930$ об/мин, $f_m=17,5$ Гц

Рис. 6. Экспериментальные осциллограммы электромагнитного момента ($\Delta W_{ст}$) каскадного электропривода ГЦН 3,5 МВт и деформации валопровода ГЦН ($\Delta \tau_{кр}$) в резонансной зоне крутильных колебаний

Несмотря на проводимое моделирование на виртуальном стенде проводятся полно-масштабные стендовые испытания насосов комплектно с электроприводами.

Стенды целесообразно оснастить бесконтактными тензометрическими датчиками момента, способными снять резонансные частотные характеристики. Следует максимально точно расчетно определить частоты вращения ГЦН, в которых осуществляются внутренние переключения тактовых импульсов ШИМ, чтобы проверить наличие возможного возбуждения автоколебаний в моменты изменений тактовых импульсов. Такие автоколебания возможны, если частота тактовых импульсов соизмерима и кратна собственной частоте крутильных колебаний валопровода ГЦН [3].

Следует учесть, что сервис современных ПЧ позволяет внести запретные частоты в его систему управления, чтобы по результатам предварительных расчетов или диагностики имелась возможность обходить эти запретные зоны.

Таким образом, приведенные материалы показывают теоретически и практически, что применение частотного электропривода, позволяющего использовать методы влияния на пульсации электромагнитного момента и соответственно крутильные колебания систем, можно считать одним из условий, защищающих мощные электроприводы ГЦН атомных станций от резонансов крутильных деформаций электроприводов.

Библиографический список

1. **Сандлер, А.С.** Тиристорные инверторы и широтно-импульсной модуляцией / А.С. Сандлер, Ю.М. Гусяцкий. – М.: Энергия, 1968. – 96 с.
2. **Harders, H.** Pendelmomentent – wicklung beider stromrichter gespeisten asynchron-maschine mit berücksichtigung des welligen zwischenkreisstroms / H. Harders, B.Weidemann // Archiv Elektrotechnische. Berlin. 1981. 64. N5. P. 297–305.
3. **Andresen, E.Ch.** Pendelmomente und wellenbeanspruchungen von drehstrom-käfigläufermotoren bei frequenzumrichterspeisung / E.Ch. Andresen, K. Bienick, K. Pfeiffer // ETZ Archiv, Bd4. 1982, P. 1.
4. **Анишев, Е.Ю.** «Особенности применения преобразователей частоты в мощном электроприводе циркуляционных насосов / Е.Ю. Анишев, Г.Б. Лазарев // Электротехника. 2007. №10. С. 64–68.
5. **Анишев, Е.Ю.** Резонансные крутильные колебания в электромагнитных системах «асинхронный электропривод – насос» большой мощности // Приводная техника. 2009. №1. С. 2–6.

*Дата поступления
в редакцию 26.04.2011*

S.M. Dmitriev, E.Y. Anishev, E.V. Roschin

DECREASE OF A LEVEL OF TORSION DEFORMATIONS OF SHAFTINGS OF CIRCULATING PUMPS OF THE ATOMIC POWER STATION WITH FREQUENCY REGULATION ELECTRIC DRIVE

The opportunity of decrease of torsion deformations of the shafting of pumps is observed by regulating of harmonious composition of a current and the moment of the induction motor at its feed from the frequency converter and clocking of a rectified current.

Key words: torsion deformations, shaftings, pumps, frequency converter, clocking of a current.

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 534.222+539.24

К.В. Курашкин, В.В. Мишакин

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛА НА АКУСТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

Нижегородский филиал Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН

В целях разработки алгоритма безнулевой акустической тензометрии исследовано влияние структурного состояния сталей 15 и 08 пс на их акустические характеристики. Показано, что между параметрами структурной текстуры зерен и акустической анизотропии существует высокая корреляционная связь. Найденная связь может использоваться для оценки механических напряжений на элементах конструкций без их разгружения. Конструкции должны быть выполнены из тех же материалов, что и исследуемые образцы, и иметь схожую термическую и пластическую обработку.

Приведены результаты исследования сварного образца из стали 14ХГС, подвергнутого пластическому деформированию при одноосном растяжении. Показано, что в основном металле параметр акустической анизотропии и коэффициент затухания монотонно возрастают с увеличением пластической деформации. Изменение затухания и акустической анизотропии вблизи шва позволило оценить ширину зоны термического влияния.

Ключевые слова: структурное состояние, параметры упругих волн, оптический и акустический методы контроля.

Введение

В настоящее время для определения напряженного состояния элементов металлических конструкций успешно применяется акустический метод контроля, отличающийся простотой, эффективностью, низкой стоимостью и безопасностью. Применение ультразвука для определения напряженного состояния материала основано на эффекте акустоупругости, который отражает нелинейную связь между механическими напряжениями и деформациями и, как следствие, влияние напряжений на скорости распространения упругих волн [1–3].

Существующие методики определения значений механических напряжений через соотношения акустоупругости [4] требуют измерения начальных акустических параметров объекта в разгруженном состоянии. Зачастую разгружение конструкции не представляется возможным ввиду условий эксплуатации. В связи с этим, весьма перспективной является разработка метода акустической тензометрии, при котором посредством дополнительных исследований структурной текстуры материала, находящегося в нагруженном состоянии, оценивается величина начальной акустической анизотропии [5]. Величина начальной акустической анизотропии зависит в первую очередь от кристаллографической текстуры [3, 6], которая формируется при пластической и термической обработке материала. В пластически деформированном материале акустическая анизотропия изменяется вследствие формирования кристаллографической текстуры деформации. Термическое воздействие, например при сварке, также влияет на текстуру материала. На разных участках сварного соединения значения акустической анизотропии могут существенно отличаться. Влияние термического и пластического воздействия на параметр анизотропии упругих волн необходимо учитывать при оценке механических напряжений.

Факторы, определяющие влияние структурного состояния материала на его акустические свойства

В случае одноосного напряженного состояния величина напряжения может быть выражена через параметр акустической анизотропии [3, 5]:

$$\sigma = K_A (A_\sigma - A_0), \quad (1)$$

где A_σ – величина акустической анизотропии в нагруженном материале; A_0 – начальное значение параметра анизотропии в разгруженном материале; K_A – коэффициент, выражаемый через упругие модули второго и третьего порядков.

Для определения механических напряжений акустическим методом необходимо учитывать значение A_0 , связанное со структурным состоянием материала.

В отсутствии механических напряжений упругие свойства конкретного материала зависят от его структурного состояния: фазового состава, плотности микродефектов, текстуры, размера зерен и других факторов [7].

В ортотропном материале, каким являются катаные листовые сплавы, могут распространяться две поперечные и одна продольная объемные волны. В отсутствии напряжений скорости объемных упругих волн в ортотропном материале определяются следующими уравнениями [3]:

$$\begin{aligned} \rho V_1^2 &= \mu - \frac{16\sqrt{2}\pi^2}{35} c(W_{400} - \sqrt{\frac{5}{2}}W_{420}), \\ \rho V_2^2 &= \mu - \frac{16\sqrt{2}\pi^2}{35} c(W_{400} + \sqrt{\frac{5}{2}}W_{420}), \\ \rho V_3^2 &= \lambda + 2\mu + \frac{32\sqrt{2}\pi^2}{35} cW_{400}, \end{aligned} \quad (2)$$

где V_1, V_2 – скорости поперечных волн, поляризованных вдоль и поперек направления проката соответственно; V_3 – скорость продольной волны; λ, μ – константы Ламе, упругие модули поликристаллического материала, c – параметр анизотропии кристаллитов; W_{400}, W_{420} – коэффициенты функции распределения ориентировок; ρ – плотность материала.

Параметр акустической анизотропии определяется соотношением скоростей поперечных упругих волн:

$$A = \frac{2(V_1 - V_2)}{(V_1 + V_2)}. \quad (3)$$

В случае, когда измерения скоростей V_1 и V_2 проводятся при одной и той же толщине, например эхо-импульсным методом, относительную величину A можно с большой точностью определять через значения времен распространения упругих волн:

$$A = \frac{2(t_2 - t_1)}{t_2 + t_1}, \quad (4)$$

где t_1, t_2 – времена распространения поперечных волн, поляризованных вдоль и поперек направления проката соответственно.

Из уравнений (2) и (3) нетрудно получить, что величина анизотропии упругих волн в ортотропном материале пропорциональна коэффициенту функции распределения ориентировок W_{420} :

$$A = kW_{420}, \quad (5)$$

где k – коэффициент пропорциональности.

Кристаллографическая текстура изменяется при пластическом и термическом воздействии на материал как при его производстве, так и в процессе эксплуатации готового изделия.

Процесс производства листового проката связан обычно с интенсивной пластической и термической обработкой материала. Структура металла при этом претерпевает сильные изменения: изменяются размеры и форма зерен, плотность микродефектов. Сложные процес-

сы деформирования и фрагментации зерен формируют как кристаллографическую, так и структурную текстуру. При устойчивом технологическом процессе изготовления листа следует, в рамках конкретного материала, ожидать связь между параметрами кристаллографической и структурной текстуры. Мы предполагаем, что между значениями структурной текстуры зерен и акустической анизотропии в прокатном материале может существовать корреляционная связь, которая может быть использована для оценки напряженного состояния конструкции из данного материала без разгружения.

Многие металлические конструкции имеют сварные соединения. В процессе сварки прилегающий ко шву металл нагревается до температуры, при которой происходят структурные изменения. Наряду с тепловым воздействием, материал сварного соединения, как правило, претерпевает и пластическую деформацию. Структура металла, сформировавшаяся на различных участках сварного соединения в результате нагрева и последующего остывания, определяет его свойства, в том числе акустические. Значения акустической анизотропии основного металла, металла зоны термического влияния и металла сварного шва могут существенно отличаться. Для большинства сварных соединений также характерно более значительное, по сравнению с основным металлом, рассеяние в околошовной зоне.

Исследование влияния пластических деформаций и термического влияния сварки на значение начальной акустической анизотропии позволит повысить эффективность контроля напряженного состояния с помощью предлагаемого алгоритма.

Объекты исследования и методика измерений

В работе исследовались образцы сталей 15, 08 пс и 14ХГС.

Образцы стали 08 пс были вырезаны из разных листов проката толщиной от 1,8 до 4,0 мм. Сталь 08 пс – качественная конструкционная углеродистая сталь, предназначенная для изготовления прокладок, шайб, вилок, труб, а также деталей, подвергаемых химико-термической обработке – втулок, проушин, тяг. Химический состав стали 08 пс (ГОСТ 1050-74): 0.05-0.11% С, 0.05-0.17% Si, 0.35-0.65% Mn, не более 0.25% Ni, не более 0,04% S, не более 0.035% P, не более 0.1% Cr, не более 0.25% Cu, не более 0.08% As.

Пять образцов стали 15 были вырезаны поперек проката из одного листа толщиной 4,5 мм, затем четыре образца были деформированы при одноосном растяжении на 4%, 6%, 11% и 16%. Направление растяжения образцов было перпендикулярно направлению проката. Сталь 15 – качественная конструкционная углеродистая сталь, предназначенная для изготовления болтов, винтов, крюков и других деталей, к которым предъявляются требования высокой пластичности, работающих при температуре от 40 до 450°C. Химический состав образцов из стали 15: 0.154-0.158% С, 0.27% Si, 0.56% Mn, 0.066% Ni, 0.013% S, 0.012% P, 0.087% Cr, 0.091% Cu, 0.02% Al.

Образец стали 14ХГС был вырезан из листа поперек проката. Толщина образца составляла около 7 мм. В середине образца с помощью электродуговой сварки было выполнено соединение встык. Образец был подвержен одноосному растяжению до разрушения. Направление растяжения образца было перпендикулярно направлению проката. Сталь 14ХГС – конструкционная низколегированная сталь для сварных конструкций, предназначенная для изготовления электросварных труб магистральных газопроводов высокого давления, сварных конструкций, листовых, клапанных конструкционных деталей. Химический состав стали 14ХГС (ГОСТ 19282-73): 0.11-0.16% С, 0.4-0.7% Si, 0.9-1.3% Mn, не более 0.3% Ni, не более 0,04% S, не более 0.035% P, 0.5-0.8% Cr, не более 0.3% Cu, не более 0.08% As.

На всех образцах были проведены измерения параметров структуры и акустических характеристик.

Акустические исследования проводились эхо-импульсным методом с помощью пьезоэлектрических преобразователей, возбуждающих продольные и поперечные объемные упругие волны, распространяющиеся перпендикулярно поверхности материала. Использовались преобразователь поперечных волн V156 Panametrics частотой 5 МГц и диаметром 6 мм

и преобразователь продольных волн П111-5.0-КН частотой 5 МГц и диаметром 10 мм. Для обеспечения ввода упругих волн в материал поверхность образца в месте установки преобразователя шлифовалась, обезжиривалась спиртом и смазывалась эпоксидной смолой или глицерином. Исследования проводились при комнатной температуре. Для получения амплитудно-временной диаграммы серии отраженных импульсов использовался цифровой осциллограф PCS500 Velleman. Измерения в каждой точке повторялись от 3 до 10 раз для разных образцов. Полученные данные были обработаны в программе MathCad.

Время распространения упругих волн измеряли между первым и четвертым отраженными импульсами. Относительная погрешность измерения времени распространения поперечных волн составляла $0.01 \div 0.06\%$, продольных волн – $0.02 \div 0.1\%$.

Для всех исследованных образцов по формуле (4) рассчитывали значение параметра акустической анизотропии. Погрешность измерения параметра акустической анизотропии не превышала 0,0008.

В образце из стали 14ХГС измеряли также коэффициент затухания продольной волны:

$$\alpha = \frac{1}{2h} \ln \frac{|S_i|}{|S_{i+1}|} - \alpha_d, \quad (6)$$

где S_i, S_{i+1} – амплитудно-частотные характеристики i -го и $i+1$ -го отраженных импульсов; h – толщина образца в зоне измерений; α_d – дифракционная поправка, которая рассчитывалась следующим образом:

$$\alpha_d = \frac{1}{2h} \ln \frac{\left| \sin \frac{\pi \cdot f \cdot r^2}{2 \cdot C \cdot x_i} \right|}{\left| \sin \frac{\pi \cdot f \cdot r^2}{2 \cdot C \cdot x_{i+1}} \right|}, \quad (7)$$

где $f = 5$ МГц – центральная частота ультразвуковых колебаний; $C = 6000$ м/с – скорость продольной волны для стали [8]; $r = 5$ мм – радиус преобразователя; x_i, x_{i+1} – длина акустического пути для i -го и $i+1$ -го отраженных импульсов.

Дифракционная поправка определялась на основании формул, приведенных в [8], для расчета поля излучения преобразователя с круглой пластиной. Для измерения затухания в дальней зоне выбирались 3 и 4 отраженные импульсы. Погрешность измерения затухания составляла $1 \div 3$ Нп/м.

Металлографические исследования проводились с помощью переносного металлографического комплекса СПЕКТР МЕТ. На поверхности образцов в месте установки датчика упругих волн с помощью шлифовальной машинки Akkuro! были подготовлены шлифы. Для выявления границ зерен шлифы несколько секунд травились в 10%-ном спиртовом растворе HNO_3 . Фотографирование осуществлялось под микроскопом с помощью цифровой фотокамеры.

В образцах из стали 08пс и стали 15 определяли средний размер зерен в направлениях вдоль и поперек проката. В образце из стали 14ХГС оценили средний размер зерен в направлении растяжения образца. Измерения производили методом секущих по ГОСТ 5639-82 с помощью программного пакета металлографического анализа MicroconMet 5.7. В результате получали статистическое распределение количества зерен по баллам. Количество зерен, обрабатываемых при измерении в одном направлении, составляло не менее 300. Средний размер зерен в нужном направлении вычисляли на основе статистического распределения. Среднеквадратическое отклонение размеров зерен от среднего не превышало 1 мкм для стали 08 пс и 0,4 мкм для стали 15. Для исследованных образцов сталей 15 и 08 пс была также определена величина структурной текстуры:

$$D = \frac{2(d_1 - d_2)}{d_1 + d_2}, \quad (8)$$

где d_1 , d_2 – средний размер зерен в продольном и поперечном направлениях в плоскости проката. Погрешность определения параметра структурной текстуры не превышала 0,1 для стали 08 пс и 0,04 для стали 15.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены фотографии структуры нескольких образцов стали 08 пс с различными значениями акустической анизотропии. Структура состоит в основном из феррита, количество перлита весьма мало. Зерна феррита имеют неправильную форму. Как можно видеть, чем больше величина акустической анизотропии, тем заметнее вытянутость зерен.

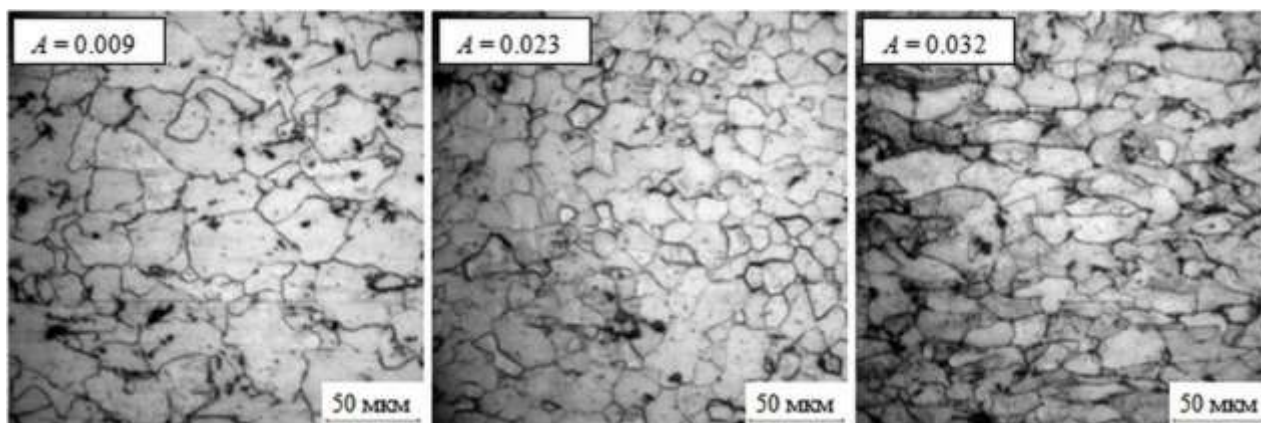


Рис. 1. Структура образцов стали 08 пс

Результаты металлографических и акустических исследований, представленные на рис. 2, показывают, что между параметрами акустической анизотропии и структурной текстурой существует корреляционная связь. Эта связь хорошо описывается (коэффициент корреляции 0.995) уравнением

$$D = k_{DA} A^2, \quad (9)$$

где k_{DA} – коэффициент пропорциональности. Для стали 08пс $k_{DA} = 580 \pm 20$.

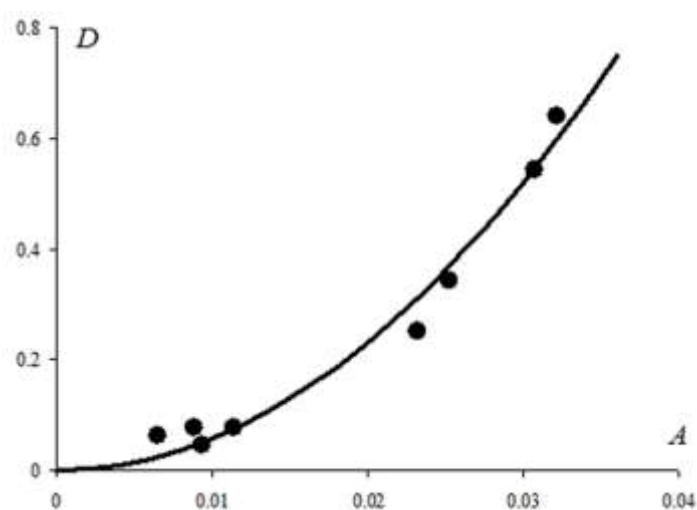


Рис. 2. Связь параметров структурной текстуры и акустической анизотропии для стали 08 пс

Формоизменение зерен, возникающее в результате пластической обработки при прокатке, на порядок выше, чем формоизменение под влиянием механических напряжений.

Таким образом, определение величины структурной текстуры на нагруженной конструкции позволяет оценить по формуле (9) начальное значение акустической анизотропии.

На рис. 3 представлены фотография структуры стали 15 и статистические распределения зерен по баллам для образцов разной деформации. Структура (рис. 3, а) состоит в основном из зерен феррита неправильной формы, между которыми находится небольшое количество перлита. На рис. 3, б при увеличении деформации средний размер зерен вдоль оси растяжения растет. Он увеличивается с 9 до 13 мкм.

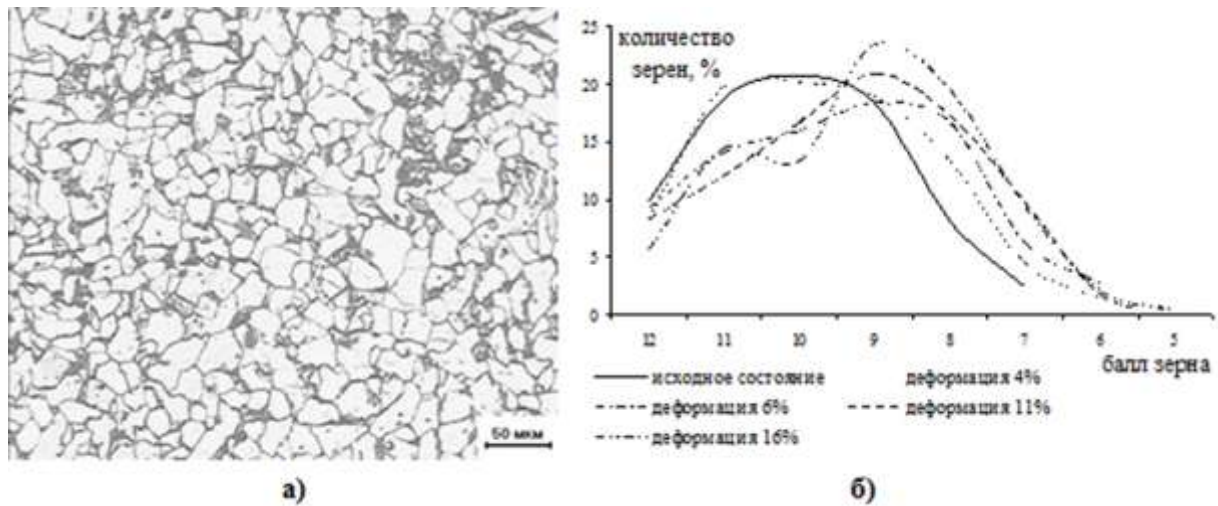


Рис. 3. Структура стали 15 и статистические распределения зерен по баллам

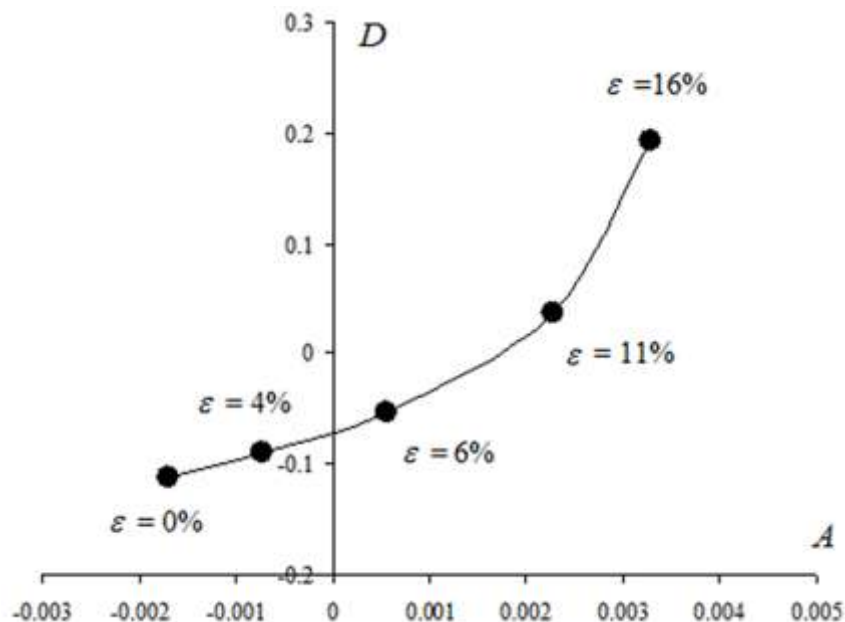


Рис. 4. Параметры структурной текстуры и акустической анизотропии стали 15 при разной деформации

На рис. 4 представлены результаты акустических и металлографических исследований образцов стали 15 разной деформации. Как видно из графика, параметры акустической анизотропии и структурной текстуры монотонно изменяются с ростом величины пластической деформации. Связь между параметрами акустической анизотропии и структурной текстурой для исследованных образцов хорошо аппроксимируется (коэффициент корреляции 0,989) полиномом второго порядка:

$$D = 14168A^2 + 33.48A - 0.0854. \quad (10)$$

Найденная связь может использоваться для оценки параметра начальной акустической анизотропии, связанного со структурным состоянием материала, по результатам металлографического анализа.

Металлографические и акустические исследования сварного образца из стали 14ХГС показали существенные изменения размера зерна, анизотропии и затухания упругих волн в основном металле в результате пластического деформирования, а также выявили различия структуры и акустических свойств основного металла, металла зоны термического влияния и металла сварного шва. Измерение структурно чувствительных акустических характеристик – параметра анизотропии и коэффициента затухания – позволило выявить границы зоны термического влияния сварного шва. Ширина зоны термического влияния составила приблизительно 20 мм, что подтверждается проведенным металлографическим анализом.

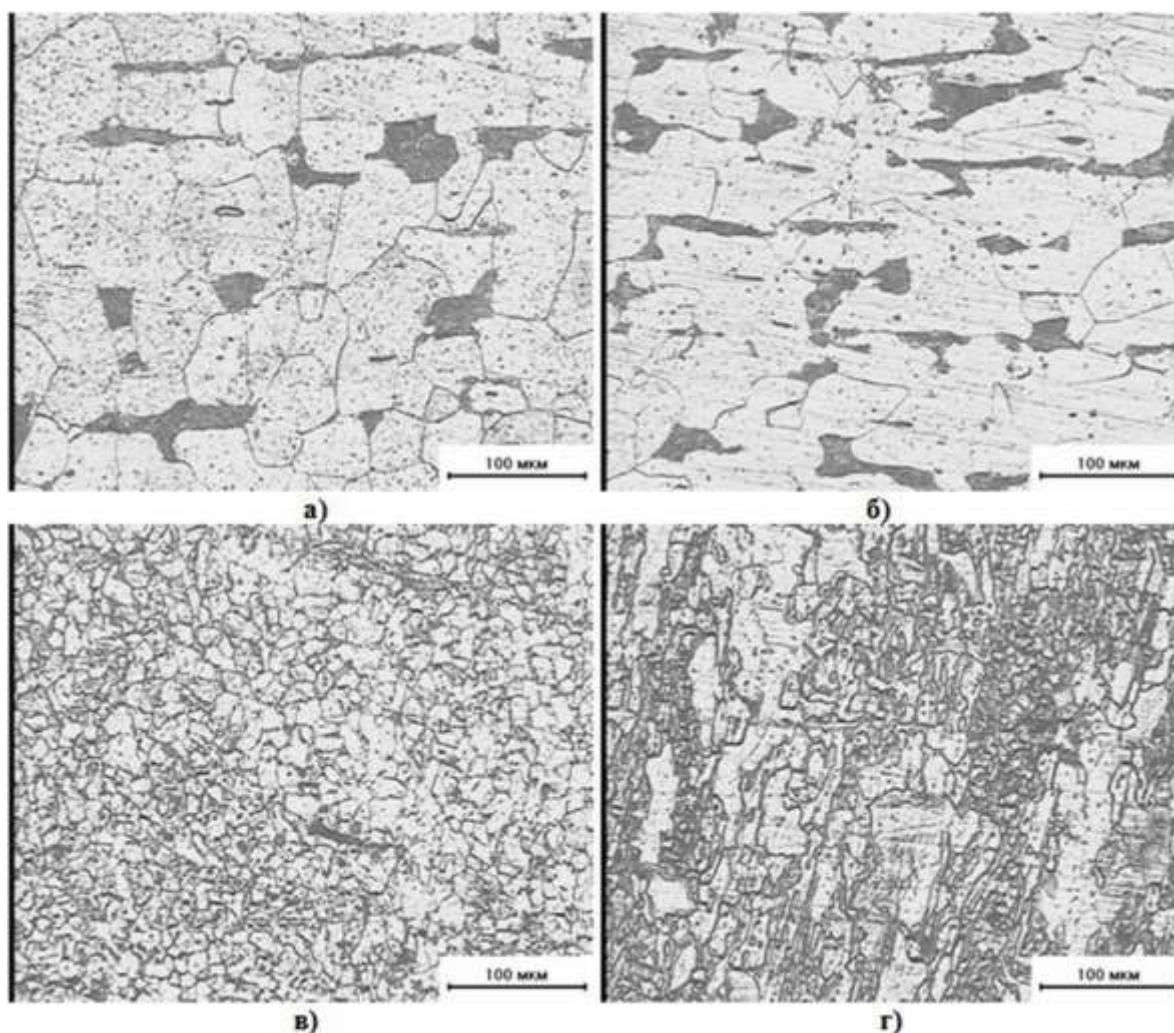


Рис. 5. Структура стали 14ХГС в зоне захвата (а), зоне разрушения (б), зоне термического влияния (в), структура сварного шва (г)

На рис. 5 представлены фотографии структуры в не подверженной деформированию зоне (зоне захвата), зоне разрушения, зоне термического влияния и в зоне сварного шва. Структура основного металла (рис. 5, а и 5, б) состоит из крупнозернистого феррита и больших островков перлита. В результате пластического деформирования зерна вытягиваются вдоль направления растяжения. Средний размер зерен в этом направлении увеличивается с 45 в зоне захвата до 80 мкм в зоне разрушения. Структура материала в зоне термического влияния на расстоянии 10 мм от сварного шва (участок нормализации) отличается меньшим, по сравнению с основным металлом, зерном (средний размер зерен – 15 мкм). В сварном шве

наблюдается неоднородная структура, которая возникла в результате перегрева металла в процессе сварки и последовавшего продолжительного остывания.

На рис. 6 представлены результаты акустических исследований сварного образца из стали 14ХГС.

Значение параметра акустической анизотропии основного металла (рис. 6, а) монотонно растет с увеличением деформации: от -0.001 в зоне захвата до 0.003 в зоне разрушения. Изменение величины акустической анизотропии отражает формирование кристаллографической текстуры деформации. В сварном шве и вблизи него анизотропия отличается от анизотропии основного металла (рис. 6, в).

Рис. 6, б и 6, г позволяет судить об изменении коэффициента затухания продольной волны частотой 5 МГц при увеличении пластической деформации. Величина коэффициента затухания в зоне захвата составила 10 Нп/м, в зоне разрушения – 20 Нп/м, в сварном шве и околошовной зоне – 17 Нп/м. В зоне сварного соединения величина затухания больше, чем в основном металле, что связано с сильной неоднородностью структуры, сформировавшейся в процессе сварки. Наибольшее затухание наблюдается в зоне разрушения, что объясняется увеличением концентрации микродефектов и изменением размеров и формы зерен вследствие сильной пластической деформации.

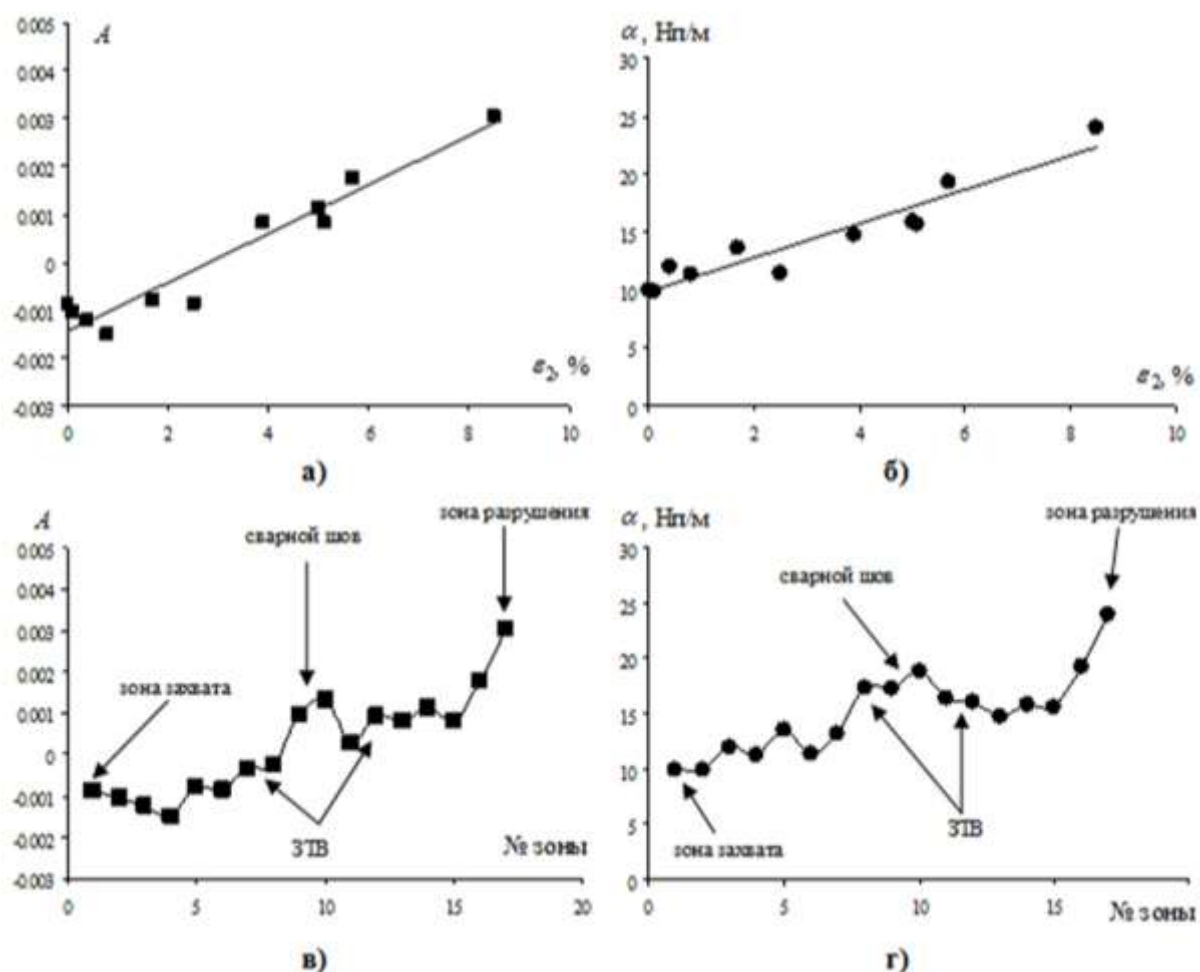


Рис. 6. Результаты акустических исследований сварного образца из стали 14ХГС

Выводы

В рамках решения задачи осуществления безнулевой акустической тензометрии предложен алгоритм, позволяющий определить на нагруженной конструкции значение параметра акустической анизотропии, связанное со структурным состоянием материала. Подход основан на использовании связи между параметрами акустической анизотропии и структурной

текстуры. Определение связи выполняется после акустических и металлографических исследований на образцах. Найденная связь может использоваться при оценке механических напряжений на элементах конструкций, выполненных из тех же материалов, что и исследуемые образцы, и имеющих схожую термическую и пластическую обработку. Параметр структурной текстуры может определяться непосредственно на объекте с помощью переносного металлографического комплекса. Для оценки напряжений с помощью предлагаемого алгоритма в зонах материала, подвергшихся термическому и пластическому воздействию, необходимо проводить дополнительные исследования на образцах, имеющих соответствующую технологическую обработку.

Показано, что параметр акустической анизотропии и коэффициент затухания монотонно возрастают с увеличением пластической деформации. Измерение затухания и акустической анизотропии металла в зоне термического влияния сварного соединения позволило оценить ее ширину.

Библиографический список

1. **Зарембо, Л.К.** Введение в нелинейную акустику / Л.К. Зарембо, В.А. Красильников. – М.: Наука, 1966. – 519 с.
2. **Chatellier, J.-Y.** A new method for determining acoustoelastic constants and plane stresses in textured thin plates / J.-Y. Chatellier, M. Touratier // J. Acoust. Soc. Am. 1988. V. 83. № 1. P. 109–117.
3. **Allen, D.R.** The Measurement of Residual Stress in Textured Steel Using an Ultrasonic Velocity Combinations Technique / D.R. Allen, C.M. Sayers // Ultrasonics. 1984. V. 22. P. 179–188.
4. **ГОСТ Р 52731-2007.** Контроль неразрушающий. Акустический метод контроля механических напряжений. Общие требования. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 27 с.
5. **Курашкин, К.В.** О возможности использования характеристик структуры материала для осуществления безнулевой акустической тензометрии / К.В. Курашкин, В.В. Мишакин // Прикладная механика и технологии машиностроения: сб. научных трудов. – Н. Новгород: издательство общества «Интелсервис». 2010. № 2 (17). С. 236–242.
6. **Sayers, C.M.** Ultrasonic velocities in anisotropic polycrystalline aggregates // J. Phys. D: Appl. Phys. 1982. V. 15. P. 2157–2167.
7. **Труэлл, Р.** Ультразвуковые методы в физике твердого тела / Р. Труэлл, Ч. Эльбаум, Б. Чик. – М.: Мир, 1972. – 488 с.
8. **Неразрушающий контроль и диагностика: справочник** / под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1995.

*Дата поступления
в редакцию 25.04.2011*

K.V. Kurashkin, V.V. Mishakin

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF MATERIAL'S STRUCTURE ON ACOUSTIC PARAMETERS

In order to develop an algorithm of nonzero acoustic tensometry the influence of the structural condition of steels 15 and 08pc on their acoustic characteristics was investigated. It is shown, that there is a high correlation between the parameters of structural textures of grains and acoustic anisotropy. Obtained relationship can be used to evaluate the mechanical stresses on the elements of constructions without their unloading. Constructions should be made from the same material as the investigated samples, and should have the similar thermal and plastic processing.

The results of investigations of the welded sample from steel 14HGS, subjected to plastic deforming under uniaxial tension are given. It is shown, that the parameter of acoustic anisotropy and the coefficient of attenuation increase monotonically with increasing deformation in basic metal. Change of attenuation and acoustic anisotropy near the weld allowed us to estimate the width of the heat affected zone.

Keywords: structural condition, parameters of elastic waves, optical and acoustic method of testing.

УДК 669.621.74.

В.А. Коровин, Р.Н. Палавин, И.О. Леушин, С.В. Костромин

МИКРОЛЕГИРОВАНИЕ ЛИТОЙ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены вопросы выбора элементов для микролегирования и изменения структуры и механических свойств микролегированной литой конструкционной стали. Микролегирование, т.е. воздействие на расплав малыми количествами активных элементов, является мощным фактором, изменяющим условия кристаллизации сплава. Микролегирование расплава обеспечивает повышение качества получаемого металла и изделий из него, выражающееся в получении более благоприятной микроструктуры и повышении физико-механических свойств отливок.

Ключевые слова: расплав, микролегирование, литая сталь, микроструктура, механические свойства, химический состав, качество.

В настоящее время не существует деталей или конструкций, которые не нуждаются в повышении качества и не испытывают циклического нагружения. Периодически действующие нагрузки могут быть представлены сменами высокого и низкого давления, термоциклированием, эксплуатационными нагрузками различной частоты и асимметрии цикла нагружения. За прошедшее время были достигнуты значительные успехи в повышении качества ответственных деталей и в построении различных теорий, объясняющих природу процессов, происходящих при получении отливки и в конструкционном материале при периодическом воздействии на него нагрузок различного рода. Однако из года в год в работах разных авторов продолжают появляться выводы о том, что законченной картины описания процессов происходящих в жидком расплаве и процессов накопления повреждений в металлическом материале при периодическом нагружении получить пока не удастся. При этом в большом количестве работ, посвященных исследованию данной проблемы, авторы обращают внимание на перспективность и возможность создания комплексной технологии получения высокопрочных чугунов и сталей, взаимосвязанной с информацией об усталости металлов и сплавов на основе междисциплинарных позиций и приемов, на основе привлечения методологии системного анализа и синергетики. В настоящие годы становится все более интенсивным интерес исследователей к литой структуре чугунов и сталей, обеспечивающей в литом состоянии не только высокие прочностные свойства, но высокую пластичность и ударную вязкость. Это особенно важно для литых деталей, работающих в условиях больших нагрузок и термоциклирования. Наследственные параметры литой структуры, обусловленные различными видами ликвации, образованием неметаллических включений в жидком металле, крупных нитридов при кристаллизации, являются весьма устойчивыми и оказывают обычно отрицательное действие как на прочностные свойства стали и чугуна, связывая определенное количество микродобавок, так и на пластичность и вязкость, выделяясь по границам зерен и охрупчивая их. Известно, что зерно в литье значительно больше по размеру, чем в деформированном состоянии, имеет более толстые, обогащенные примесями и частицами вторых фаз, границы. Кроме того, металл отливок содержит микропоры и имеет повышенную химическую и структурную неоднородность. Литые детали, особенно крупногабаритные или сложной конфигурации, нельзя получить прокаткой или штамповкой, во многих случаях для них не применима закалка с отпуском из-за опасности коробления. Следовательно, оптимальную структуру и фазовый состав заготовок необходимо формировать в литом состоянии. Значение закономерностей формирования литой структуры и создание активной технологии позволяет прогнозировать микроструктуру сплава и конечные свойства.

Вводом в состав стали микродобавок (до 0,2%) высокоактивных элементов можно достичь улучшения структуры и свойств материала. В качестве таких элементов использовались V, Mo, Zr, B.

Опытные плавки стали проводились в индукционной тигельной печи с кислой футеровкой. Шихту, состоящую из стальных отходов, передельного чугуна загружали в печь, расплавляли и доводили до требуемого химического состава. Добавки элементов вводили за 15–20 мин до выдачи расплава из печи в виде соответствующих ферросплавов. Выдачу расплава в ковш производили при температуре 1650–1700°C. Раскисление стали осуществлялось алюминием. Заливались образцы Ø 30 мм в стержневые формы для определения механических свойств и исследования микроструктуры. Химический состав опытных плавок приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав опытных плавок

№	C	Si	Mn	S	P	V	Mo	Zr	B
1	0,37	0,38	0,46	0,019	0,024	-	-	-	-
2	0,37	0,39	0,43	0,021	0,022	0,1	-	-	-
3	0,37	0,42	0,44	0,020	0,024	-	0,2	-	-
4	0,37	0,37	0,43	0,018	0,021	-	-	0,05	-
5	0,36	0,34	0,45	0,020	0,023	-	-	-	0,005

Ванадий непрерывно растворяется в α -Fe в твердом состоянии и является сильным карбидообразующим элементом. Уже при содержании ванадия 0,1% образуется карбид ванадия, который выделяется при 500–550°C [1]. Это подавляет превращение в перлитной области, но не влияет на начало превращения в промежуточной области, и способствует очень тонкому распределению карбидов в перлите. Малые добавки ванадия способствуют измельчению зерна и повышают вязкость. Ванадий является раскислителем и дегазатором, связывая газы в оксиды и нитриды, формируя комплексные соединения – карбонитриды [2]. Отличительной особенностью нитридов и карбонитридов V является их гомогенное зарождение и выделение непосредственно из твердого раствора. Преимущественное место выделения, как фазы идентичной α -Fe по типу и близкой по параметрам решетки – дислокации и границы субзерен [3,4].

Реакция взаимодействия ванадия с кислородом имеет следующий вид:



Константа реакции взаимодействия имеет вид:

$$K_p = a_{V_2O_3} / a_{[V]}^2 a_{[O]}^3$$

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln a_{V_2O_3} / a_{[V]}^2 a_{[O]}^3$$

Активность алюминия в расплаве стали состава, масс. %: C = 0,35; Mn = 0,67; Si = 0,36; S = 0,03; P = 0,03 при вводе его в количестве 0,1 % составляет $a_{[Al]} = 0,064$. Активность кислорода равна $a_{[O]} = 0,054$.

Изменение энергии Гиббса реакции при T = 1873 К составляет $\Delta G = 33583$ Дж/моль. Таким образом, образование V_2O_3 как самостоятельной фазы при данных условиях не происходит.

Реакция взаимодействия ванадия с азотом в расплаве стали имеет вид:



При T = 1873 К изменение энергии Гиббса реакции составляет $\Delta G = 95038$ Дж/моль, что свидетельствует о невозможности протекания реакции в данных условиях.

Таким образом, при вводе в конструкционную нелегированную сталь ванадий (в количестве 0,1 %) самостоятельных оксидных и нитридных фаз не образует.

Легирование стали ванадием увеличивает дисперсность дендритной структуры, измельчает на 1–2 балла аустенитное зерно (сечения 20–50 мкм), уменьшает зону столбчатых кристаллов. Также ванадий уменьшает дендритную ликвацию других элементов [6]. В работе [6] приводятся данные о том, что при легировании ванадием в количествах 0,06–0,15% прочностные свойства углеродистых сталей 15Л – 45Л после нормализации возрастали на 10–25%. Ввод более 0,15% V приводит к охрупчиванию стали за счет усиления дендритной ликвации. Причем добавка 0,1% V повышает прочность стали в несколько раз сильнее, чем вводимые в том же количестве Mn, Si, Cr или Ni. В работе [5] указывается, что упрочняющее действие ванадия заключается главным образом в его способности образовывать устойчивые высокодисперсные карбиды MC, препятствующие развитию сдвиговых процессов при пластических деформациях.

Молибден благотворно влияет на свойства сталей из-за его присутствия в твердом растворе [6]. При 1450°C растворяется около 37,5%, при 700°C – 9%, при 20°C – 4% [1]. Упрочнение твердого раствора связывают также и с его способностью уменьшать диффузионную подвижность атомов и тем самым снижать переползание дислокаций [7]. Мо при введении в сталь растворяется в цементите с образованием соединений $(\text{MoFe})_{23}\text{C}_6$ и $(\text{MoFe})_6\text{C}$, значительно снижает критическую скорость закалки, что позволяет увеличить прокаливаемость стали, дает равномерную и мелкозернистую структуру, также способствует образованию тонкодисперсных специальных карбидов. Молибден тормозит процесс роста и коагуляции включений карбидов [1].

Бор повышает прокаливаемость стали, относится к элементам внедрения и имеет очень малую растворимость в твердом растворе ($< 0,003\%$), в δ -железе растворяется 0,15% при 1381°C [1]. Оптимальные содержания бора в стали составляют, как правило, 0,001–0,005%; при содержании бора более 0,006% сталь становится красноломкой [8, 9]. Бор, обладая высоким сродством к азоту и кислороду, образует мелкодисперсные соединения. В то же время указывается [8, 10], что бор имеет невысокую раскислительную способность, но образует прочные нитриды.

Рассмотрим реакции взаимодействия бора с кислородом и азотом:



Константа реакции взаимодействия имеет вид:

$$K_p = a_{\text{B}_2\text{O}_3} / a_{[\text{B}]}^2 a_{[\text{O}]}^3$$

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln a_{\text{B}_2\text{O}_3} / a_{[\text{B}]}^2 a_{[\text{O}]}^3$$

Активность бора в расплаве стали, при его вводе в количестве 0,005%, составляет $a_{[\text{B}]} = 0,0044$, коэффициент активности $f_{[\text{B}]} = 0,88$. Изменение энергии Гиббса реакции при $T = 1873 \text{ K}$ составляет $\Delta G = 27029 \text{ Дж/моль}$.



При $T = 1873 \text{ K}$ изменение энергии Гиббса реакции составляет $\Delta G = 110481 \text{ Дж/моль}$.

Таким образом, термодинамические расчеты показывают, что бор при вводе в конструкционную нелегированную сталь в количестве 0,005% не вступает во взаимодействие ни с кислородом, ни с азотом.

В работе [11] высказывается мнение, что благоприятное влияние B как микролегирующей добавки реализуется только той его частью, которая находится в твердом растворе. При повышенных количествах бора в стали ($> 0,006\%$) по границам зерен выделяется борсодержащая фаза, представляющая собой карбобориды типа $\text{Fe}_{2,3}(\text{CB})_6$ и $\text{Fe}_3(\text{C,B})$ [11], которая вызывает охрупчивание стали. Для предотвращения выделения бористой фазы микролеги-

рующие добавки бора целесообразно вводить в сталь совместно с медью, значительно повышающей растворимость бора в аустените [10].

Цирконий при вводе в сталь образует соединения карбидов и нитридов, которые по прочности, стойкости и устойчивости к распаду превосходят соединения Ti, V, Mo и уступают только Hf [12].

Рассмотрим реакции взаимодействия циркония с кислородом и азотом:



Константа реакции взаимодействия имеет вид:

$$K_p = a_{\text{ZrO}_2} / a_{[\text{Zr}]} a_{[\text{O}]}^2$$

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln a_{\text{ZrO}_2} / a_{[\text{Zr}]} a_{[\text{O}]}^2$$

Активность циркония в расплаве стали, при его вводе в количестве 0,05%, составляет $a_{[\text{Zr}]} = 0,044$, коэффициент активности $f_{[\text{Zr}]} = 0,88$. Изменение энергии Гиббса реакции при $T = 1873 \text{ K}$ составляет $\Delta G = -221699 \text{ Дж/моль}$.



При $T = 1873 \text{ K}$ изменение энергии Гиббса реакции составляет $\Delta G = 19249 \text{ Дж/моль}$. Реакция в прямом направлении при данных условиях не идет. Термодинамические расчеты показывают, чтобы происходило взаимодействие Zr с N, растворенным в расплаве, концентрация циркония должна быть более 0,17 %.

Таким образом, анализ реакция взаимодействия циркония с кислородом и азотом показывает, что в данных условиях в прямом направлении будет идти только реакция образования оксида циркония, что говорит о большой раскисляющей способности элемента.

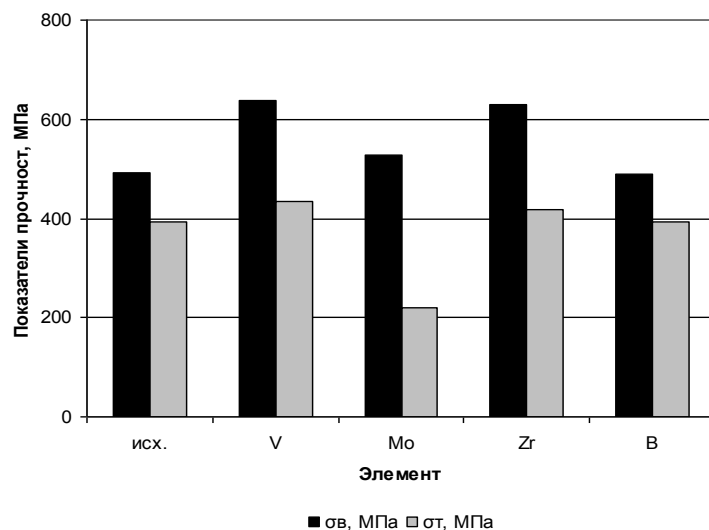
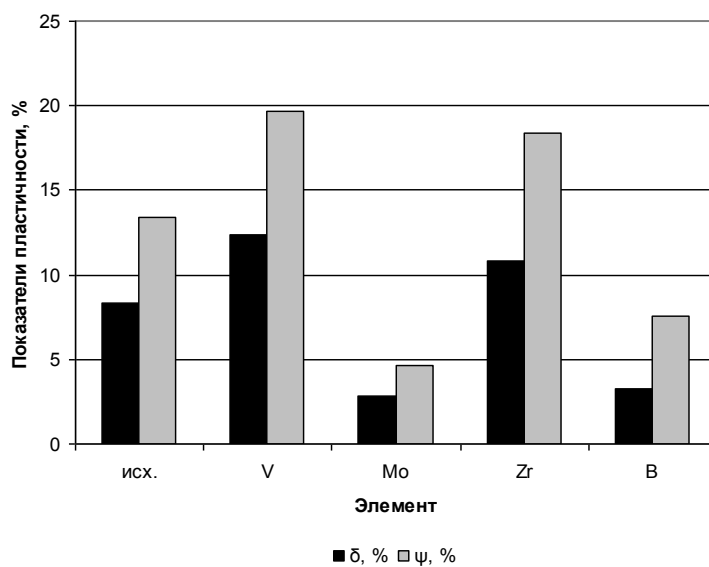
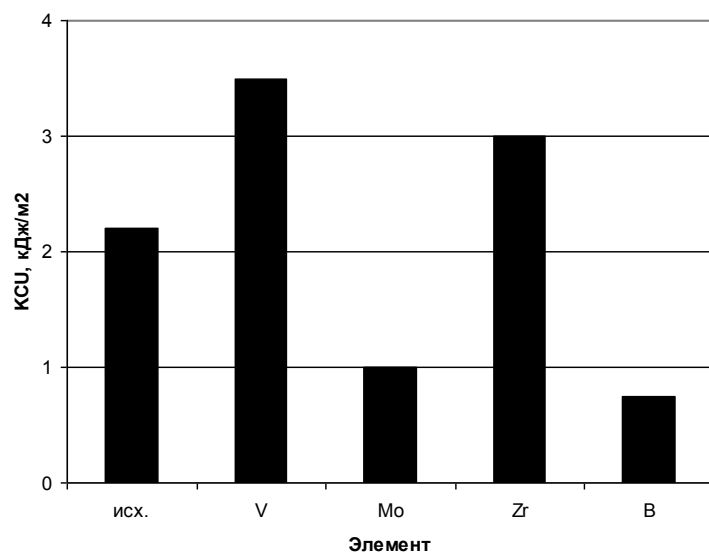
Zr в количестве до 0,4% используется для повышения прочности, вязкости, износостойкости, прокаливаемости, свариваемости, обрабатываемости, сопротивления коррозии стали [19, 14, 15]. Используется цирконий и для сталей работающих при повышенных температурах для увеличения предела ползучести, а также для снижения склонности к старению [10]. Известно также [16, 13, 17] о высоком химическом сродстве Zr к газам (O_2 , N_2) и сере и о его благотворном влиянии на морфологию и распределение неметаллических включений в стали с образованием, в основном, оксида ZrO_2 и сульфида переменного состава (от ZrS_2 до ZrS) [8]. Указывается также [6] на большее сродство Zr к азоту по сравнению с алюминием. Рекомендуемое содержание циркония в стали - от 0,03 до 0,3 %, в зависимости от назначения [9, 18, 19].

Структура и механические свойства микролегированной литой конструкционной стали исследовались в литом состоянии. Микроструктуру изучали на травленных шлифах. Изготавливались образцы на растяжение и определение ударной вязкости. Результаты исследований приведены в табл. 2 и рис. 1–8.

Таблица 2

Механические свойства опытных плавок

№	Временное сопротивление при растяжении $\sigma_{\text{в}}$, МПа	Предел текучести $\sigma_{\text{т}}$, МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %	Ударная вязкость КСУ, кДж/м ²	Твердость НВ
1	493	394	8,3	13,4	221	163
2	637	434	12,4	19,7	352	156
3	529	220	2,8	4,6	107	177
4	630	419	10,8	18,4	300	170
5	490	392	3,3	7,6	75	179

**Рис. 1. Влияние элементов на прочностные свойства****Рис. 2. Влияние элементов на пластические свойства****Рис. 3. Влияние элементов на ударную вязкость**

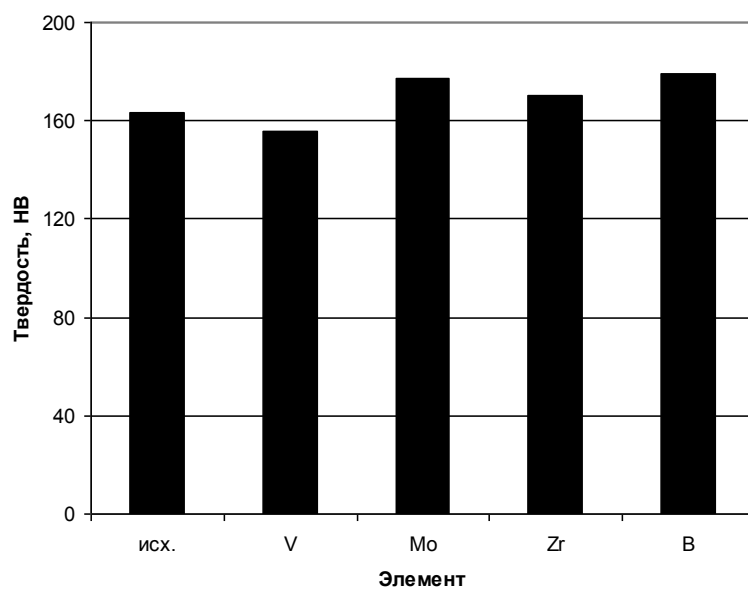


Рис. 4. Влияние элементов на твердость

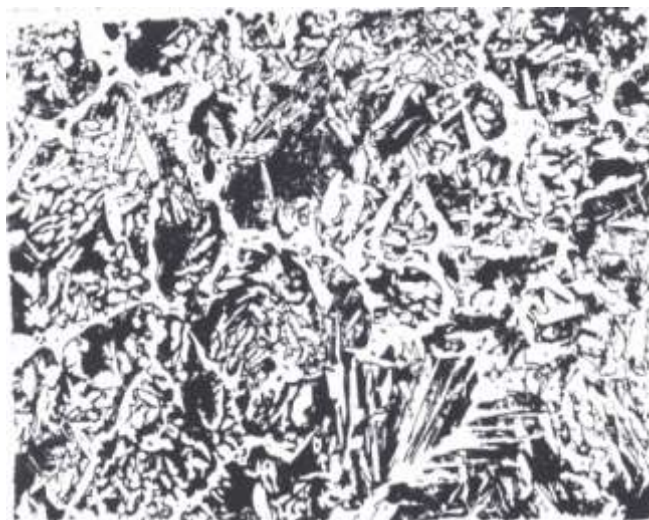


Рис. 5. Микроструктура исходной литой стали, $\times 100$

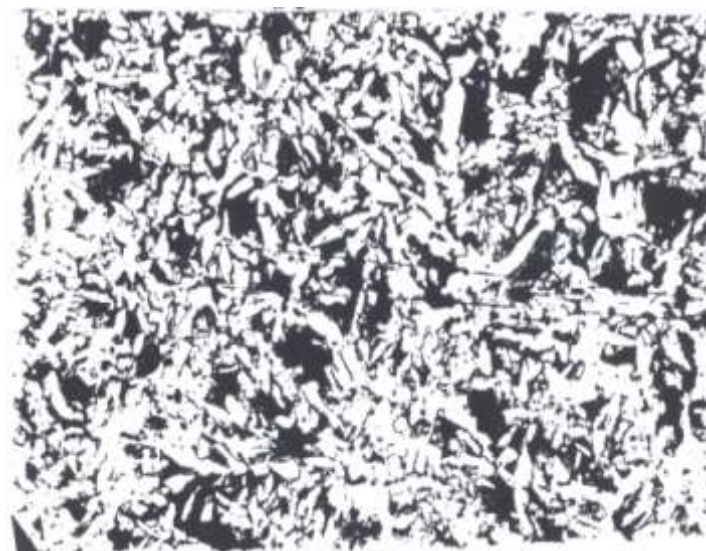


Рис. 6. Микроструктура литой стали с 0,1% V, $\times 100$



Рис. 7. Микроструктура литой стали с 0,2% Мо, $\times 100$

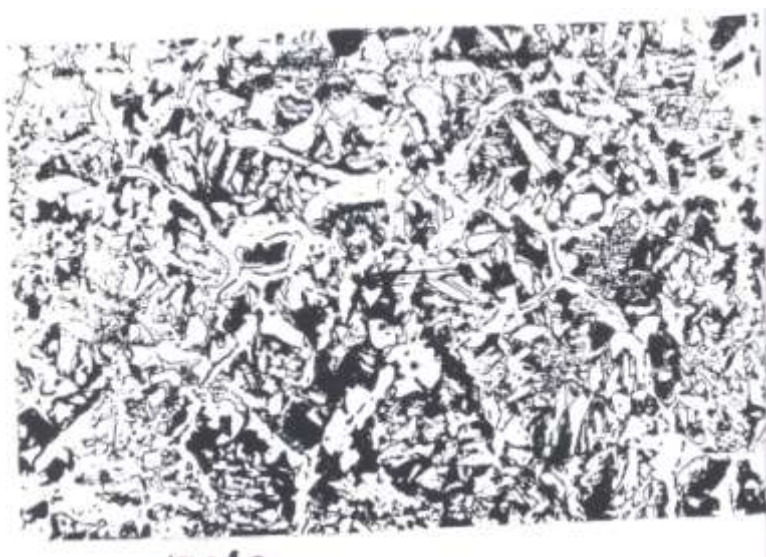


Рис. 8. Микроструктура литой стали с 0,005% В, $\times 100$

Как видно из рис. 6, микролегирование стали ванадием в количестве 0,1% приводит к равномерному измельчению зерна в литом состоянии. Следствием этого является заметное изменение механических свойств по сравнению с исходным вариантом без ввода ванадия. Так, временное сопротивление при растяжении увеличилось на 29,2%, предел текучести – на 10,2%, относительное удлинение и сужение повысились на 49,4% и 47% соответственно, ударная вязкость возросла на 59,3%, твердость изменилась незначительно (- 4,3%). Ванадий, являясь сильным карбидо- и нитридообразующим элементом, при вводе в сталь формирует мелкодисперсные тугоплавкие соединения типа $Me(C,N)$ ($T_{пл} VC = 2830^{\circ}C$, $T_{пл} VN = 2050^{\circ}C$), которые, располагаясь по границам, тормозят рост зерна и способствуют тем самым измельчению структуры. В работе [6] высказывается мнение, что оксикарбонитриды ванадия образуются в отдельных объемах расплава и при дальнейшей его гомогенизации растворяются не в полной мере. В результате эти центры и вызывают размельчение структуры литого металла при кристаллизации. Таким образом, ванадий способствует измельчению зерна и увеличивает показатели прочностных и пластических свойств конструкционной нелегированной стали.

Воздействие циркония в количестве 0,05% аналогично действию ванадия. Схожая картина по механическим свойствам (рост σ_b на 27,8%, σ_T на 6,3%, δ на 30,1%, ψ на 37,3%, КСЧ на 36,4%). Zr, как и V, при вводе в сталь образует тугоплавкие соединения типа $Me(C,N,O)$ ($T_{пл.}ZrC = 3550^\circ C$, $T_{пл.}ZrN = 2980^\circ C$), располагающиеся по границам зерен. Но цирконий имеет высокое сродство к кислороду, значительно большее, чем ванадий. Это приводит к дополнительному раскислению расплава. Таким образом, Zr и V оказывают схожее воздействие на структуру и механические свойства стали. Различие в уровне механических свойств можно объяснить неодинаковым количеством введенных элементов ($V = 0,1\%$; $Zr = 0,05\%$) и более значительным химическим сродством циркония к кислороду, что влечет за собой расходование некоторой части элемента на связывание кислорода.

Ввод молибдена в количестве 0,2% привел к значительным изменениям в структуре стали – она стала более мелкой и приобрела игольчатый характер (рис. 7). В результате временное сопротивление при растяжении повысилось на 7,3%, твердость возросла на 8,6%, но остальные показатели механических свойств значительно снизились: σ_T на 44,2%, δ на 66,2%, ψ на 65,7%, КСЧ на 51,6% по сравнению с исходным вариантом. Мо при вводе в сталь в количествах до 2% растворяется в цементите и не образует собственных соединений, измельчение структуры происходит за счет увеличения прокаливаемости материала, т.е. механизм измельчения структуры кардинально отличается от влияния Zr и V. В результате σ_b и НВ возросли незначительно, а пластические свойства значительно понизились.

Бор в количестве 0,005% оказал отрицательное влияние на пластические свойства и ударную вязкость стали. Снижение составило: относительное удлинение – 60,2%, относительное сужение – 43,3%, ударная вязкость – 66,1%. Прочностные показатели остались практически на исходном уровне. Как видно из рис. 8, произошло некоторое измельчение зерна стали, но по границам кристаллов произошло выделение борсодержащей фазы, предположительно Fe_2B , обладающей высокой твердостью ($HV = 1800-2000$) и хрупкостью [11], что отрицательно повлияло на пластические свойства стали, но повысило значения твердости на 9,8%.

Таким образом, актуальность проблемы создания эффективных технологических процессов литья заготовок из стали является перспективным направлением, и микролегирование занимает в этом ведущую роль.

Библиографический список

1. Материалы в машиностроении: справочник. Т 2 Конструкционная сталь / под общей ред. И.В. Кудрявцева. – М.: Машиностроение, 1967. – 496 с.
2. Солнцев, Ю.П. Хладостойкие стали и сплавы / Ю.П. Солнцев. – СПб.: Химиздат, 2005. – 480 с.
3. Гольдштейн, М.И. Дисперсионное упрочнение стали / М.И. Гольдштейн, В.М. Фарбер. – М.: Металлургия, 1979. – 208 с.
4. Устиновщиков, Ю.И. Вторичное твердение конструкционных легированных сталей / Ю.И. Устиновщиков. – М.: Металлургия, 1982. – 127 с.
5. Ланская, К.А. Жаропрочные стали / К.А. Ланская. – М.: Металлургия, 1969. – 247 с.
6. Ланская, К.А. Микролегирующие и примесные элементы в низколегированной хромомолибденованадиевой стали / К.А. Ланская, Л.В. Куликова, В.В. Яровой. – М.: Металлургия, 1989. – 176 с.
7. Адамович, В.К. Влияние содержания молибдена на свойства перлитных жаропрочных сталей / В.К. Адамович // МИТОМ. 1977. № 11. С. 30–35.
8. Явойский, В.И. Теория процесса производства стали / В.И. Явойский. – М.: Металлургия, 1973. – 816 с.
9. Дурер, Р. Металлургия ферросплавов / Р. Дурер, Г. Фолькерт. – М.: Металлургия, 1976. – 480 с.
10. Пилюшенко, В.П. Научные и технологические основы микролегирования стали / В.П. Пилюшенко [и др.]. – М.: Металлургия, 1994. – 384 с.
11. Гольдштейн, Я.Е. Модифицирование и микролегирование чугуна и стали / Я.Е. Гольдштейн, В.Г. Мизин. – М.: Металлургия, 1986. – 272 с.

12. **Гольдштейн, М.И.** Специальные стали / М.И. Гольдштейн, С.В. Грачев, Ю.Г. Векслер. – М.: МИСИС, 1999. – 408 с.
13. **Кнюппель, Г.К.** Раскисление и вакуумная обработка стали; Ч 1 Термодинамические и кинетические закономерности: [пер. с немец.]/ Г.К. Кнюппель. – М.: Metallurgiya, 1972. – 312 с.
14. Справочник по электротехническим процессам / Б.И. Емлин, М.И. Гасик. – М.: Metallurgiya, 1978. – 288 с.
15. **Неймарк, В.** Модифицированный стальной слиток / В. Неймарк. – М.: Metallurgiya, 1977. – 200 с.
16. **Казачков, И.П.** Легирование стали / И.П. Казачков. – Киев: Техника. 1982. – 120 с.
17. **Куликов, И.С.** Раскисление металлов / И.С. Куликов. – М.: Metallurgiya, 1975. – 504 с.
18. **Явойский, В.И.** Metallurgiya стали / В.И. Явойский [и др.]. – М.: Metallurgiya, 1973. – 816 с.
19. **Слуцкая, Т.М.** Переход примесей элементов из проволоки в наплавленный металл при сварке в смеси углекислого газа с кислородом / Т.М. Слуцкая [и др.] // Автоматическая сварка. 1974. №11. С. 68.

*Дата поступления
в редакцию 25.04.2011*

V.A. Korovin, R.N. Palavin, I.O. Leushin, S.V. Kostromin

MICROALLOYING OF THE MOLTEN STRUCTURAL STEEL

In article questions of a choice of elements for a microalloying and change of structure and mechanical properties of the microalloyed molten structural steel are considered. The microalloying, i.e. influence on melt by small quantities of active elements, is the powerful factor changing conditions of crystallisation of an alloy. The melt microalloying provides improvement in quality of received metal and products from it, expressed in reception of more favorable microstructure and increase of physicommechanical properties of casts.

Key words: melt, a microalloying, a cast steel, a microstructure, mechanical properties, a chemical compound, quality.

УДК 621.74

И.Е. Илларионов, Н.В.Петрова

**ЖИДКОСТЕКОЛЬНЫЕ СМЕСИ, ОТВЕРЖДАЕМЫЕ
ПРОДУВКОЙ УГЛЕКИСЛЫМ ГАЗОМ**

Чебоксарский политехнический институт (филиал) ГОУ ВПО МГОУ

Рассмотрены процессы отверждения жидкостекольных смесей с применением различных материалов и при продувке углекислым газом. Проведен анализ изменения прочности жидкостекольных смесей в зависимости от количества, применяемого жидкого стекла, влажности кварцевого песка и применения отработанной смеси огнеупорной глины и бентонита.

Ключевые слова: жидкое стекло, модуль и плотность жидкого стекла, жидкостекольная смесь, отвердители, продувка углекислым газом, глина, бентонит, отработанная смесь.

В настоящее время в литейном производстве из числа неорганических связующих наиболее доступным и дешевым связующим является жидкое стекло. Однако его применение сдерживается из-за его плохой выбиваемости из отливок и низкой регенерируемости, что существенно отражается на расширении области его применения для получения отливок из черных и цветных металлов и сплавов. Отверждение жидкостекольных смесей возможно различными путями. Одним из прорывных направлений внедрения жидкостекольных смесей является разработка наиболее приемлемого технологического процесса отверждения, обеспечивающего требуемые физико-механические и технологические свойства, а также качество изготавливаемых отливок из черных и цветных металлов и сплавов.

Прочность смесей с жидким стеклом является функцией адгезионной прочности связующего к поверхности зерен песка и когезионной прочности пленки самого связующего. На адгезионную прочность оказывают влияние следующие факторы: поверхностное натяжение жидкого стекла; пористость и шероховатость зерен наполнителя; физические свойства пленки жидкого стекла: прочность при растяжении, срезе, сжатии, модуль упругости; толщина пленки связующего и вязкость; полярность жидкого стекла и поверхности зерен наполнителя; процессы полимеризации, образование побочных продуктов и изменение молекулярного веса; вода, образующаяся при полимеризации связей; наличие в пленке связующего адсорбированных паров и газов; испарение и диффузия летучих из пленки связующего; величина водородного показателя (рН) на границе раздела пленки жидкого стекла с наполнителем.

Жидкое стекло характеризуется как хороший адгезив, чем и объясняется его широкое распространение в различных областях техники.

Как химические соединения жидкие стекла являются нестабильными продуктами. Одним из продуктов разложения является многокремниевая кислота SiOH_4 , которая может полимеризоваться до поликремниевых кислот. Полимеризация продолжается до превращения в полимеры или гели. Вновь образованный гель легко адгезируется на поверхности зерен кварцевого песка.

В сочетании с жидким стеклом в различных областях техники часто используются следующие материалы, улучшающие отдельные технологические свойства композиций: глицерин, алкиларилсульфонат, малеиновый ангидрид, канифоль, этиленгликоль, сорбитол, синтетические или натуральные смолы, глина, карбонат кальция, мел, крахмал, декстрин, сахар, казеин, альбумин, брикетированные остатки после получения растительных масел (соевого, льняного, хлопкового и т.п.), бихроматы, сульфат и хлорид алюминия, борная кислота, фториды, бораты, алюминаты и др. Известно, что добавка 1% тринатрийфосфата значительно улучшает прочность огнеупоров, связанных жидким стеклом. Повышение прочности в

три раза отмечается при введении 2% бикарбоната натрия, хлората натрия (соль хлорноватой кислоты), нитрата и карбоната натрия, нитрата, бикарбонатов натрия. При производстве химически стойких покрытий из Al_2O_3 или карбида кремния жидкое стекло смешивается в различных пропорциях со следующими материалами: ZnO, MgO, CuO, SrO, BaO, HgO, TiO, Fe₂O₃, Cr₂L₃ и NiO. Для отверждения жидкого стекла наиболее широко используется кремнефторид натрия, а также газообразный CO₂, кислые и щелочноземельные фосфаты, гидроокисиды кальция, гидроокисиды амфотерных металлов с силикофторидом, фториды кальция и магния, фтористоводородная кислота, силикат цинка и аммония, водные растворы солей кислот, сульфат и ацетат аммония и некоторые другие органические соединения, медленно гидролизующиеся с выделением кислоты. Применим этилацетат в количестве 120 по объему от жидкого стекла, метил-, пропил- и гликоляцетаты. Гексаметиленetetрамин, который выделяет аммиак при нагреве, также можно использовать для этих целей. В табл. 1 представлены отвердители, наиболее успешно используемые в настоящее время для отверждения связующих на основе жидкого стекла в формовочных смесях [1].

Затвердевание жидкого стекла может происходить при обезвоживании, поглощении твердыми материалами, химических реакциях с жидкими или твердыми реагентами, понижении температуры или комбинации нескольких из указанных факторов. В формовочных смесях можно отметить два механизма твердения: 1) превращение жидкой фазы в твердую при потере воды; 2) образование в результате химических реакций продуктов, обладающих связующей способностью.

Таблица 1

Отвердители жидкого стекла

Материал 1.	Химическая формула 2.	Физическое состояние 3.
Этиленгликоляацетат	$CH_3CO_2CH_2CH_2O_2CCH_3$	Жидкость
Гликоколпропинат	$[CH_2OCOC_2H_5]_2$	То же
Глиоксаль	CHOCHO	Порошок
Силикофторид натрия	Na_2SF_6	То же
Металлургический шлак с высоким содержанием двухкальциевого силиката	$2CaO \cdot SiO_2$	
Синтетический двухкальциевый силикат	$2CaO \cdot SiO_2$	
Цемент	Среднее содержание компонентов, %: CaO – 64; SiO ₂ -21; Al ₂ O ₃ -6; Fe ₂ O ₃ -3; MgO-2,5	
Ферросилиций	Fe и Si в различных соотношениях	
Моноацетин	$C_3H_5(OH)_2OOCCH_3$	Жидкость
Диацетин	$C_3H_5(OH)-(OOCCH_3)_2$	То же
Триацетин	$C_3H_5(OOCCH_3)_3$	
Органический эфир	Смесь указанных выше ацетинов	
Диэтиленгликольдиацетат	$[CH_3COO-CH_2CH_2O]_2$	Порошок
Гуминовая кислота	Источники: леонарид, лигнит	Порошок
Кремний	Si	То же
Карбид кальция	CaC_2	
Алебастр	$CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$	

Исходя из анализа данных табл. 1 в дальнейшем будем рассматривать смеси, отверждаемые продувкой углекислым газом.

CO₂ -процесс основан на упрочнении смеси, содержащей жидкое стекло в качестве связующего, под действием углекислого газа, продуваемого через форму или стержень. Используется жидкое стекло с модулем от 2,0 до 3,0. Высокомодульное жидкое стекло более чувствительно к продувке CO₂ и требует меньшего времени для продувки.

CO₂ -процесс широко используется для отверждения стержней. При этом стержни предпочтительно готовить на пескодуювно-пескострельных пневматических машинах.

Имеется также положительный опыт изготовления данным процессом литейных форм. Так, в Англии блочную форму для коробки скоростей собирают из отдельных стержней, получаемых CO₂ -процессом. Такая технология обеспечивает большую точность отливов при выполнении работ менее квалифицированными рабочими. При длине нижней части коробки скоростей 2286 мм, ширине 914 мм и высоте 1778 мм корпус подшипника в коробке скоростей выполняется с допуском 3,2 мм.

CO₂ -процессы с успехом применяются для изготовления отливок из чугуна, углеродистой и марганцовистой аустенитной сталей. При этом развес отливок практически не ограничен. Так, на заводе «Сибэлектротяжмаш» этим методом готовятся формы для крупных стальных отливок массой до 30 т. В Чехии и Словакии стержни для чугунных изложниц изготавливаются под слитки, в Англии крупные стальные отливки шаровых соединений для трубопроводов. По данным немецкой практики для крупных отливок массой свыше 100 кг целесообразно производить твердые формы CO₂.

Главные преимущества CO₂ -процесса: простота осуществления, повышенная точность стержней и отливок, сокращение расхода каркасов, снижение количества литейных пороков, сокращение производственного цикла на 30-50% при одновременном улучшении использования формовочной площади, снижение трудоемкости и себестоимости 1 т литья на 10-20%, отсутствие вредных выделений, повышение производительности труда на 30% благодаря высокой скорости отверждения. По данным английской практики, точность отливок при использовании CO₂ -процесса в 1,5-2 раза выше, чем отливок, получаемых в обычных песчаных формах.

К другим преимуществам CO₂ -процесса, как и других процессов обработки форм и стержней внешними реагентами, относятся возможность применения смесей, сохраняющих длительное время пластическое состояние и исключительно быстро затвердевающих после продувки углекислого газа, а также высокая точность получаемых форм и стержней. Стержни, изготовленные CO₂ -процессом, в течение многих лет успешно применялись в массовом производстве автомобильного литья, но этот процесс в таких условиях уступает процессу изготовления стержней в нагреваемой оснастке.

К недостаткам процесса относится повышенный расход CO₂, приводящий к удорожанию способа. Кроме того, высокий расход CO₂ приводит к изменению качественного состава продуктов химического отверждения, а именно: образующийся при разложении силиката натрия карбонат натрия превращается в бикарбонат, способствующий увеличению массы смеси в форме. Это приводит к возникновению напряжений и трещин в формах. Другой причиной растрескивания стержней и форм может быть неудовлетворительное качество жидкого стекла, которое необходимо проверять на плотность и модуль.

Недостатками процесса являются также ограниченный срок хранения стержней (снижение общей и поверхностной прочности при длительном хранении), особенно в условиях повышенной влажности, и затрудненная выбиваемость стержней из отливок. Срок хранения увеличивается при использовании низкомодульного жидкого стекла, повышении содержания жидкого стекла в смеси, добавкой в смесь водорастворимых органических компонентов, применением более крупных песков, отказом от введения сахаров для улучшения выбиваемости.

мости и «недодувом» CO_2 , в результате чего начальная прочность снижается, но повышается стабильность при хранении. В ряде случаев выбиваемость определяют по прочности на сжатие охлажденных образцов. Опыты последних лет показали, что максимальная прочность на сжатие, соответствующая минимальной выбиваемости, наблюдается при температурах 300...900 °С.

В Англии для облегчения выбиваемости стержней, изготовленных CO_2 -процессом, в ряде случаев используют высокомодульное жидкое стекло с добавкой сахаристых материалов.

Основными недостатками являются: неудовлетворительная выбиваемость и сложность регенерации обработанной смеси, в связи с чем этот процесс утратил перспективность, хотя имеются попытки в том или ином виде его сохранить. Так, в Японии предложен способ изготовления оболочных форм путем обработки кварцевого песка щелочным раствором фенольной смолы и жидкого стекла с последующей продувкой углекислым газом. В качестве щелочи используется едкий натр. Продувка форм CO_2 позволяет исключить отверждение при нагреве. Разработаны также методы с использованием других реагентов, обеспечивающих затвердевание форм и стержней при комнатной температуре (табл. 2 и 3). Состав смесей для чугунного и стального по данным Л.М. Мариенбаха [2] приведены в табл. 3.

Смеси для CO_2 -процесса имеют в среднем прочность на сжатие (10-22) 105 Н/м², на растяжение (3-4,2), 105 Н/м². Повышение прочности на сжатие до 37·105 Н/м² может быть обеспечено заменой части песка (менее 15% по массе) огнеупорным волокнистым материалом, например, минеральной ватой из окиси алюминия. При этом одновременно уменьшается скорость охлаждения отливок. С целью выявления возможности удешевления формовочных смесей для CO_2 -процесса были проведены работы по использованию сырых кварцевых песков и отработанных смесей. В результате установлена возможность применения сырых кварцевых песков при влажности не выше 1%. В противном случае наблюдается значительное снижение газопроницаемости, прилипание смеси к моделям и образование плен на поверхности отливок.

Таблица 2

Область применения смесей	Составы смесей, %					
	кварцевый песок	каменно-угольная пыль	молотая глина	нафталин	жидкое стекло $\rho=1,53$ г/см ³	конечная влажность, %
I Чугунное литье						
Формы и простые стержни	97	3	—	—	3	1,8-2,5
Формы с хорошей выбиваемостью	93-95	5-7	—	—	3	1,8-2,5
Формы с высокой выбиваемостью	95	3	2	—	3,0-3,5	2,2-2,5
Формы с очень высокой выбиваемостью	92	5	3	—	3,0-3,5	2,5-3,0
Быстротвердеющие стержни (тепловая обработка) с очень высокой выбиваемостью	94-97	2-5	—	1	3,0-4,0	2,5-3,0
II Стальное литье						
Формы и стержни для стального литья	97-98	—	2-3	—	3,0-3,5	2,2-2,5
Формы и стержни для стального литья с хорошей выбиваемостью	95-97	1-2	2-3	—	3,0-3,5	2,5-3,0

Таблица 3

**Составы и свойства формовочных смесей на жидком стекле
(по данным Л.М. Мариенбаха) [2]**

Зерновая часть смеси, в процентах по массе				Связующие материалы, в процентах к массе зерновой части смеси			Общее глиносодержание, %	Физико-механические свойства				
Песок кварцевый	Отработанная смесь	Глина упорная	Маршалит	Жидкое стекло	10% - ный раствор М=2,4-2,5 NaOH	Древесный песок		Прочность на сжатие, бсж ·105, Н/м 2			Газопроницаемость, не менее ед.	Влажность, %
								Сырые образцы	Образцы продутые СО ₂ (60с)	Образцы, высушенные при 200°С в течение 10 мин		
95-97	—	3-5	—	6,5-0,7	0,5-1,5	—	0,5-2,0	0,10-0,20	12	80	150	3,0-4,5
100	—	—	—	6,0-7,0	0,5-1,5	—	до 2,5	0,04-0,07	10	80	200	3,0-4,0
70-85	30-50	—	15-30	6,0-7,0	0,5-1,5	—	—	0,15-0,25	16	100	90	3,5-5,0
50-70	30-50	—	—	6,0-7,0	0,5-1,5	—	3,5-5,0	0,12-0,25	14	90	80	3,5-5,0
95-97	—	3-5	—	6,7-7,0	0,5-1,5	2-3	3,5-5,0	0,12-0,20	12	70	120	3,0-4,5

Установлено, что при продувке CO_2 сухая отработанная смесь с жидким стеклом не твердеет. Добавка влаги устраняет этот недостаток. Отработанная смесь с влажностью 0,75% дает в этом случае хорошие результаты. Чтобы обеспечить такую влажность, смешивают из 80% сухой отработанной смеси, 20% сырого кварцевого песка с влажностью не выше 3,5-4,0% и 4% жидкого стекла с модулем (М), равным 2. При этом первоначально смешивают отработанную смесь и свежий кварцевый песок в течение 5 мин, а затем добавляют жидкое стекло и смесь перемешивают дополнительно 2,5-3 мин.

На прочность смесей немалое влияние оказывает продолжительность перемешивания. Так, по данным Ю.Ф. Боровского [3], прочность песчано-жидкостекольных смесей при перемешивании после обработки углекислым газом возрастает, достигает максимума по прочности 2,5 мин, а затем начинает падать с $40 \cdot 10^5$ до $30 \cdot 10^5$ Н/м² (на срез).

Возрастание прочности в первой период перемешивания связано с формированием жидкостекольной оболочки на зернах песка и началом кристаллизации метасиликата натрия $Na_2O \cdot SiO_2 \cdot 6H_2O$, что увеличивает прочность жидкостекольной оболочки. Снижение прочности при дальнейшем перемешивании смеси обусловлено механическим разрушением указанного кристаллогидрата.

Имеются опытные данные о зависимости образования газовых раковин от влажности форм, продуваемых CO_2 .

По результатам английской практики, получение стальных отливок без плен возможно при содержании отработанной смеси не более 12,5%. При этом прочность смесей на сжатие в сыром состоянии должна составлять около $0,5 \cdot 10^5$ Н/м². На прочность продутых форм и стержней отрицательно влияет бентонит, в меньшей степени огнеупорная глина, которые вводятся в ряде случаев для повышения прочности смесей во влажном состоянии. Вместе с тем, бентонит и глина, как и маршаллит, увеличивают осыпаемость стержней и форм при CO_2 процессе.

Библиографический список

1. **Илларионов, И.Е.** Формовочные материалы и смеси / И.Е. Илларионов, Ю.П. Васин. – Чебоксары: Изд-во при Чуваш. ун-те, 1995. Ч. 2. – 288 с.
2. **Мариенбах, Л.М.** Сушка и химическое твердение форм и стержней / Л.М. Мариенбах. – М.: НТО Машпрома, 1958.
3. **Боровский, Ю.Ф.** Формовочные и стержневые смеси / Ю.Ф. Боровский, М.И. Шадских. – Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1980. – 86 с.

*Дата поступления
в редакцию 25.04.2011*

I.E. Illarionov, N.V. Petrova

LIQUID GLASS MIXTURES, HARDENED BY BLOW-DOWN BY CARBON DIOXIDE

Hardening processes liquid glass жидкостеколных mixtures with application of various materials are observed and at blow by a carbon dioxide. The assaying of alteration of strength liquid glass mixtures depending on the amount, applied soluble silicate, damp of arenaceous quartz and application of the completed mixture, underearth and bentonite is carried out.

Key words: liquid glass, the modulus and liquid glass gravity, liquid glass mixture, hardeners, blow by a carbon dioxide, clay, the bentonite, the completed mixtu.

ХИМИЯ, ХИМИЧЕСКИЕ И БИОТЕХНОЛОГИИ

УДК 661.25:661.242.8:66.092.41:661.248

А.А. Перетрутов, М.Н. Чубенко, П.П. Ким

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПИРИТНОГО ОГАРКА В КАЧЕСТВЕ КАТАЛИЗАТОРА ПОЛУЧЕНИЯ СЕРНИСТОГО АНГИДРИДА ИЗ ОТРАБОТАННОЙ СЕРНОЙ КИСЛОТЫ

Дзержинский политехнический институт (филиал) НГТУ им. Р.Е. Алексеева

Исследован процесс термолиза отработанных растворов серной кислоты на пиритном огарке. Рассмотрены совместный теплоперенос и массоперенос в реакторе. Установлено, что процесс находится во внутридиффузионной области. Определены кинетические характеристики: степень разложения, константы скорости некаталитической и каталитической реакции, активность катализатора.

Ключевые слова: кислота серная отработанная, термолиз, разложение каталитическое, ангидрид сернистый, огарок пиритный.

Термическое разложение отработанных серных кислот, в том числе и на катализаторах, глубоко изучено в работах [1-11]. Доказано, что эффективным катализатором является оксид железа Fe_2O_3 , активность которого в нанесенном состоянии 5 % Fe_2O_3 на Al_2O_3 сравнима с активностью платины, нанесенной в количестве 5 % на Al_2O_3 .

Нами были установлены каталитические свойства пиритного огарка, проявляемые в процессе термолиза серной кислоты [12], при этом появляется возможность получения сер-

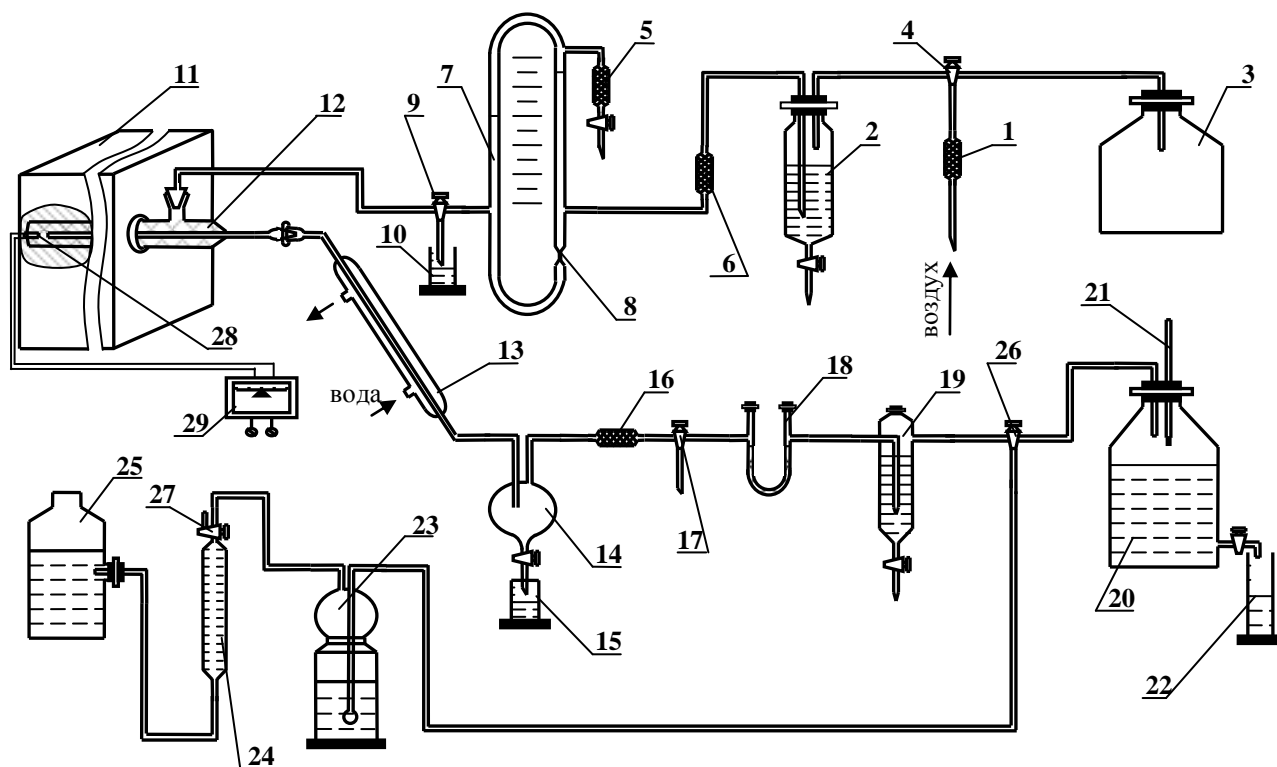


Рис. 1. Схема установки термолиза серной кислоты на пиритном огарке

нистого ангидрида высокой концентрации (40,8–46,4 %) без применения восстановителя. Состав и свойства огарка приведены в [13].

Термическое разложение серной кислоты было изучено на установке, изображенной на рис. 1, при температуре в диапазоне 773 – 1373К, при заданном расходе кислоты в реактор 12, расположенный в трубчатой печи 11 с регулируемым нагревом и контролем температуры с помощью термопары 28 и лагометра 29, на катализатор (пиритный огарок). Количество пиритного огарка, загруженного в реактор, по объему составляло $72,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ со средним размером частиц $1 - 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, свободный объем катализатора составлял $26,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$.

Удельная наружная поверхность, рассчитанная по формуле

$$S = \frac{6V(1 - \varepsilon)}{d}, \quad (1)$$

где V – объем, занимаемый катализатором, м^3 ; $(1 - \varepsilon)$ – степень заполнения объема; ε – порозность массы; d – средний диаметр частиц катализатора, м ; составляла $27,592 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$.

Расход серной кислоты, передаваемой на разложение из сосуда 2 воздухом из ресивера 3, регулировали по U -образному расходомеру 7. Градуировку капилляра проводили для каждой серии опытов при изменении концентрации кислоты и типа органического восстановителя. Из реактора смесь газов и водяного пара поступала в холодильник 13, и образовавшийся кислотный конденсат собирался в каплеуловителе 14. Далее смесь кислорода, сернистого и серного ангидридов через трубку со стекловатой 16 поступала на раздельное улавливание: серного ангидрида прокаленным хлоридом натрия в U -образной трубке 18, а сернистого в поглотителе с 4 % пероксидом водорода 19. Оставшийся кислород после осушки в поглотителе с крепкой серной кислотой 23 собирали в газомерной трубке 24.

Концентрацию серного ангидрида определяли титрованием образовавшейся серной кислоты при растворении в воде хлорида натрия из U -образной трубки 18, сернистого – титрованием кислоты, образованной при окислении SO_2 пероксидом водорода, из поглотителя 19.

Степень термоллиза серной кислоты на катализаторе в отсутствие восстановителя определяли по количеству выделившегося кислорода, измеренного газомерной трубкой, по формуле

$$U = (2n_{\text{O}_2} / n_{\text{SO}_3}) \cdot 100\% = (2V_{\text{O}_2} / \tau \cdot 22,4 \cdot 10^3 \cdot n_{\text{SO}_3}) \cdot 100\%, \quad (2)$$

где U – степень разложения серного ангидрида, %; n_{O_2} – количество грамм-молей кислорода, выделившихся за единицу времени; n_{SO_3} – количество грамм-молей серного ангидрида, поступающих в реактор за единицу времени; τ – время опыта, мин; V_{O_2} – объем кислорода, приведенный к нормальным условиям, мл.

За время опыта принимали время пребывания SO_3 в зоне реакции, при этом условно считали за объем реактора его часть, заполненную катализатором.

В данной серии опытов было проведено несколько экспериментов с целью определения зависимости степени разложения серного ангидрида от расхода серной кислоты и температуры. Результаты сведены в табл. 1.

Увеличение скорости подачи серной кислоты приводит к снижению степени разложения SO_3 , что объясняется эндотермическим эффектом процесса разложения серной кислоты, вызывающим локальное охлаждение поверхности катализатора и торможение реакции в зоне поверхностного контактирования газов с охлажденным катализатором. Увеличение температуры на 100° приводит к увеличению степени разложения в среднем на 20–30%.

Были рассчитаны объемные скорости газа в реакторе как отношение объема газа к объему катализатора и построены зависимости степени разложения от объемной скорости. Объемная скорость находится в пределах $1500\text{--}2000 \text{ час}^{-1}$. Увеличение объемной скорости газа приводит к снижению степени разложения серной кислоты до сернистого ангидрида. Увеличение объемной скорости связано с увеличением и линейной скорости. Поскольку увеличение линейной скорости вызывает незначительное увеличение скорости процесса, можно предположить о нахождении процесса в кинетической или внутридиффузионной области. Для процесса термического разложения SO_3 в SO_2 на катализаторе в отсутствие восстанови-

теля рассчитаны константы скорости. Для расчета констант скорости результаты эксперимента были обработаны по уравнению необратимой реакции первого порядка для потока. Формула для расчета константы скорости [1]:

$$K = n_{\text{SO}_3} \frac{RT}{PV} \left[- \left(1,5 + \frac{n_{\text{H}_2\text{O}}}{n_{\text{SO}_3}} \right) \ln(1 - \alpha) - 0,5\alpha \right], \text{ мин}^{-1}. \quad (3)$$

Величины константы скорости, рассчитанные по данному уравнению, представлены в табл. 1. Как видно из таблицы константа скорости реакции не является величиной постоянной и помимо температуры зависит от среднего времени контакта. (Подобные зависимости были получены в исследованиях Белорусского технологического института им. С.М. Кирова) [7].

Таблица 1

Термическое разложение чистой серной кислоты на пиритном огарке в зависимости от среднего времени контакта для семи температур эксперимента

Т, К	$n_{\text{SO}_3} \cdot 10$, г·моль/мин	V, час ⁻¹	α , %	K, мин ⁻¹	$\tau_{\text{усл}}$, мин
773	0,297	1535,38	35,49	13,53	0,038
	0,327	1690,34	33,51	13,78	0,034
	0,374	1933,29	32,68	15,35	0,030
	0,423	2186,58	32,62	17,33	0,026
	0,462	2388,18	31,62	18,11	0,024
873	0,297	1535,38	51,92	43,23	0,033
	0,327	1690,34	49,64	44,86	0,030
	0,374	1933,29	47,75	47,29	0,026
	0,423	2186,58	46,05	52,53	0,023
	0,462	2388,18	45,68	56,22	0,021
973	0,297	1535,38	60,12	63,26	0,030
	0,327	1690,34	57,09	63,999	0,027
	0,374	1933,29	54,26	66,90	0,024
	0,423	2186,58	53,71	75,04	0,021
	0,462	2388,18	52,71	80,45	0,019
1073	0,297	1535,38	65,59	80,94	0,027
	0,327	1690,34	62,05	81,50	0,025
	0,374	1933,29	58,60	84,68	0,022
	0,423	2186,58	55,65	88,11	0,019
	0,462	2388,18	54,46	95,53	0,017
1173	0,297	1535,38	68,32	94,96	0,025
	0,327	1690,34	64,54	96,74	0,023
	0,374	1933,29	59,79	96,98	0,020
	0,423	2186,58	56,64	103,42	0,017
	0,462	2388,18	55,31	104,69	0,016
1273	0,297	1535,38	69,91	110,71	0,023
	0,327	1690,34	65,54	109,72	0,021
	0,374	1933,29	60,86	112,08	0,018
	0,423	2186,58	58,52	116,44	0,016
	0,462	2388,18	57,04	117,08	0,015
1373	0,297	1535,38	72,60	116,29	0,021
	0,327	1690,34	68,38	119,52	0,019
	0,374	1933,29	62,99	126,48	0,017
	0,423	2186,58	60,41	132,39	0,015
	0,462	2388,18	58,79	134,75	0,014

Константа скорости реакции увеличивается при увеличении скорости подачи серной кислоты во всем диапазоне температур конверсии серного ангидрида. Табличные результаты показывают, что увеличение подачи кислоты в 1,6 раза уменьшает время пребывания реакционных газов в зоне катализатора на 37–33%, снижает степень разложения на 4–14% и увеличивает константу скорости при этом на 25,3–13,7%. Одной из причин зависимости константы скорости реакции от среднего времени контакта является влияние массо- и теплопереноса. Действительно, вычисленные константы по приведенному ранее уравнению включают допущения, что каждый элементарный газовый объем находится одинаковое время (τ) в зоне катализа при постоянной температуре, что невозможно при одинаковом массовом расходе, но разных температурах опыта; температурный градиент возможен вследствие локального охлаждения катализатора в месте контакта с серной кислотой, подаваемой на разложение.

Совместное рассмотрение теплопереноса и массопереноса представляется весьма сложным и не является в данном случае целью работы, в связи с этим нами были рассчитаны только числа Рейнольдса для характеристики гидродинамического режима. Расчет проводили с использованием фиктивной линейной скорости газовой смеси в свободном сечении реактора с учетом массового расхода, температуры, исходной концентрации кислоты, степени разложения. При условии полного разложения серного ангидрида до сернистого мольная масса газовой смеси, рассчитанная по формуле $\mu = \sum_i n_i c_i$, составляет 35,854 кг/кмоль, динамическая вязкость $11,94 \cdot 10^{-6}$ Па·с, плотность $1,6006$ кг/м³. При диаметре реактора $24 \cdot 10^{-3}$ м и линейной скорости 0,042 м/с (расход SO₃ 0,0297 гмоль/мин) $Re = 135,1$, а для расхода 0,0462 гмоль/мин SO₃ линейная скорость составляет 0,056 м/с и число Рейнольдса соответственно - 180,2. Из приведенных результатов следует, что режим ламинарный.

Ввиду того, что используемый лабораторный реактор работал при низких числах Рейнольдса и незначительном изменении линейной скорости потока, следует предположить, что теплоотдача при вынужденном движении смеси газов мало зависела от массового расхода в изученном интервале объемной скорости потока. Процесс теплоотдачи в данном случае сводился к передаче теплоты от разогретого катализатора к капельной жидкости и далее по слою катализатора к газовой смеси теплопроводностью при непосредственном контакте с поверхностью катализатора и в виде лучистой энергии. Теплота в этом случае расходуется на нагревание и испарение кислоты, термическую диссоциацию кислоты на SO₃ и H₂O, нагревание реагентов и термическую диссоциацию триоксида серы. Стационарный процесс может быть осуществлен при равенстве теплоты, отдаваемой катализатором, и суммарного эндотермического теплового эффекта физических процессов и химических превращений.

Расчет термодинамических функций превращения серной кислоты и триоксида серы при высокой температуре выполнен в докторской диссертации Б.Е. Шенфельда [1], там же проведены сравнения с ранее выполнявшимися расчетами, приведенными в «Справочнике сернокислотчика» под редакцией К.М. Малина [14]. Ввиду некоторых расхождений в результатах расчетов мы посчитали целесообразным использовать данные Б.Е. Шенфельда. Так для температуры 1173 К изменение энтальпии реакции диссоциации серной кислоты составляет 84,376 кДж/моль, изменение энтальпии реакции диссоциации триоксида серы 96,962 кДж/моль. Остальные данные для расчета взяты из Справочника химика [15]: скрытая теплота парообразования серной кислоты 50,1 кДж/моль, то же для воды 2,259 кДж/моль, теплоемкость серной кислоты 0,14 кДж/моль·град, то же для воды 0,075 кДж/моль·град, теплоемкость SO₃ принята как теплоемкость смеси диоксида серы и кислорода в соотношении 2:1. При расходе 0,297 моль/мин SO₃ эквивалентное количество серной кислоты участвует в процессе, эквивалентное количество молей образуется SO₂, 0,1485 молей кислорода и 0,141 моль воды. Секундный расход теплоты на нагревание серной кислоты (Q_s) до температуры кипения (283,2°C) составит 268,99 Вт, то же на испарение серной кислоты $Q_{si} = 53,27$ Вт, на диссоциацию серной кислоты $Q_{sd} = 615,945$ Вт, на нагревание продуктов диссоциации

серной кислоты до 900°C $Q_{dp} = 536,15$ Вт, на диссоциацию триоксида серы $Q_{dm} = 479,962$ Вт. Суммарно затраты теплоты составят: $Q_1 = Q_s + Q_{si} + Q_{sd} + Q_{dp} + Q_{dm} = 2154,317$ Вт.

Подводимая теплота при стационарном процессе должна быть равна $Q_2 = \alpha \cdot F(t_2 - t_1)$, где α - коэффициент теплоотдачи от поверхности катализатора к капельной жидкости при нагреве кислоты и ее испарении, к газопаровой фазе при диссоциации кислоты, к газопаровой фазе при нагревании до температуры диссоциации триоксида серы и к газопаровой фазе при диссоциации триоксида. F - поверхность катализатора, м². Поскольку характер теплообмена сложный, можно предположить, что происходит взаимно-перпендикулярное движение естественной и вынужденной конвекции. Интенсивность теплоотдачи от катализатора к реакционной среде в этом случае следует определять по критериальному уравнению, соответствующему вязкостно-гравитационному режиму [16].

$$Nu_{\text{жд}} = 0,15 Re_{\text{жд}}^{0,33} Pr_{\text{ж}}^{0,43} Gr_{\text{жд}}^{0,1} (Pr_{\text{ж}} / Pr_{\text{ст}})^{0,25}. \quad (4)$$

Коэффициент теплоотдачи определяется из выражения числа Нуссельта $\alpha = \frac{Nu_{\text{ж}} \lambda}{d}$,

где $\lambda = \frac{\sum y_i \lambda_i \mu_i^{1/3}}{\sum y_i \mu_i^{1/3}}$ - коэффициент теплопроводности реакционной смеси, Вт/мК; d - определяющий размер - эквивалентный диаметр транспортных пор катализатора, м. За эквивалентный диаметр можно принять удвоенный гидравлический радиус пор, который в свою очередь может быть определен из отношения пористости катализатора к удельной поверхности

$r_{\text{гидр}} = \varphi / S_{\text{уд}}$; $S = \frac{6V(1-\varepsilon)}{d}$. Удельная внутренняя поверхность частиц огарка размером 1 мм составляет 9,16 м²/см³. Вся теплоотдающая поверхность определяется из выражения:

$F = S \cdot h \cdot S_{\text{уд}}$ и составляет 1242,54 м². Критерий Прандтля $Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda}$, определенный для смеси газов при средней температуре между температурой кипения кислоты и температурой опыта, составил 0,7740 для 973К и 0,7737 для 1173 К. Критерий Рейнольдса $Re = \frac{wd\rho}{\mu}$ для этих

же температур 138,5 и 127,3 соответственно, критерий Грасгоффа $Gr = \beta \frac{gd^3 \rho^2}{\mu^2} \Delta t$ составляет

$3,061 \cdot 10^4$ и $3,041 \cdot 10^4$, число Нуссельта 1,92 и 1,87, коэффициенты теплоотдачи 4,16 и 4,53 Вт/м²К. Тепловой поток, передаваемый от огарка реакционной смеси, в первом случае составляет 2066,4 кВт, а во втором 3379,6 кВт. Сравнивая численные значения теплоты, необходимой на протекание процесса и передаваемой огарком с помощью конвекции, можно сделать вывод, что поддержание температуры реакционной смеси теплоотдачей от внутренней поверхности катализатора обеспечено, стационарность режима - тоже. Теплоотдача от наружной поверхности (5,652 м²) для частиц размером 1мм естественно значительно ниже, она составляет для 973 и 1173 К соответственно 4900 и 7896 Вт, что более, чем в два-три раза превышает потребляемую в процессе энергию.

Количество отдаваемой теплоты излучением определяли из уравнения

$$Q_{\text{л}} = \varepsilon c_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F, \quad (5)$$

где ε - приведенный коэффициент теплового излучения системы тел; c_0 - излучательная способность абсолютно черного тела, Вт/м²К⁴.

При температуре опыта 700°C тепловой поток, передаваемый излучением от внутренней поверхности, составляет порядка 53 кВт, а при 900°C 128 кВт, а от внешней поверхности 0,46 кВт и 0,97 кВт соответственно. Как следует из расчетов, большая часть тепловой энергии передается за счет конвекции. Суммарный тепловой поток 5360 и 8866 Вт даже при низком коэффициенте конвективной теплоотдачи обеспечивает проведение процесса термораз-

ложения отработанной серной кислоты даже при значительно больших скоростях подачи кислоты.

Увеличение константы скорости разложения от температуры в изученном диапазоне многократно: в среднем от 15,8 до 125,5 мин⁻¹. Приведенные результаты, экспериментальные и расчетные, свидетельствуют о возможности применения кинетического уравнения реакции первого порядка (уравнение Аррениуса $\ln K = A/T + B$) для данного реактора.

Используя численные значения констант скорости разложения для различных температур, были вычислены значения A и B , построена зависимость $\ln K$ от $1/T$, определена энергия активации ($E_{\text{кат}}$), величина которой показывает, что процесс находится в диффузионной области. Если принять, что предэкспоненциальный множитель k_0 каталитической реакции остается таким же, как и в некаталитической, то отношение констант каталитической реакции к некаталитической будет характеризовать ускорение процесса: $A = k_{\text{окат}}/k_{\text{онекат}} = e^{\Delta E/RT}$. В качестве меры активности катализатора принято применять разность скоростей химических реакций в присутствии катализатора ($u_{\text{кат}}$) и без него (u) с учетом доли объема реакционного пространства $\phi_{\text{кат}}$, занимаемого катализатором и недоступного для реагирующих веществ: $A = u_{\text{кат}} - u(1 - \phi_{\text{кат}})$ [17]. Скорость каталитической реакции, отнесенная к единице объема зерна катализатора u' , зависит от скорости реакции u_s , отнесенной к единице поверхности катализатора (u_s называют удельной каталитической активностью), от поверхности $S'_{\text{уд}}$ и ее доступности. Доступность характеризуют степенью использования внутренней поверхности η .

$$u' = u_s S'_{\text{уд}} \eta = u_{\text{кат}}. \quad (6)$$

Степень использования внутренней поверхности характеризуется модулем Тиле (ψ): во внутридиффузионной области катализа $\eta = 1/\psi$.

$$\psi = L \left[\frac{3(1 - \phi_{\text{св}})u_s}{\phi_{\text{св}} D_3 r C} \right]^{0,5}, \quad (7)$$

где L - расстояние от периферии до центра зерна, равное 0,5 мм; C - концентрация основного компонента у поверхности зерна катализатора, моль/м³; D_3 - эффективный коэффициент диффузии, м²/час. Для бинарной смеси газов, состоящей из SO₃ и H₂O коэффициент молекулярной диффузии по Арнольду [17] рассчитывали по формуле:

$$D = \frac{0,00837 T^{5/2} \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}}}{P(v_A^{1/3} + v_B^{1/3})^2 (T + C_{A+B})}, \quad (8)$$

где M_A - молярная масса SO₃, равная 80 г/моль; M_B - молярная масса H₂O, равная 18 г/моль; P - общее давление, 0,1 МПа; v_A - молярный объем SO₃, см³/моль; v_B - молярный объем H₂O, см³/моль; C_{A+B} - константа Сезерленда: $C_{A+B} = 1,47 \phi (T'_A T'_B)^{0,5}$, где T'_A - температура кипения

SO₃, T'_B - температура кипения H₂O; $\phi = 8 \frac{(v_A v_B)^{0,5}}{v_A + v_B}$. Константа Сезерленда равна 1268,8;

$\phi = 2,76$; v_A и v_B , рассчитанные по атомным диффузионным объемам с учетом структурных составляющих [18], соответственно равны 92 и 14,8 см³/моль; коэффициент молекулярной диффузии D при этом равен $5,93 \cdot 10^{-6}$ м²/с, а для температуры опыта 1173 К он составляет $8,68 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Для пористости катализатора с размером частиц 1 мм 0,38 и удельной внутренней поверхности 9,16 м²/см³ гидравлический радиус составит: $r_{\text{гидр}} = 0,38 / 9,16 \cdot 10^4 = 0,041$ мкм = 41 нм, длина свободного пробега молекул диаметром 0,2 нм составляет примерно 10² нм. Таким образом, поры катализатора можно охарактеризовать как переходные, а область катализа как внутридиффузионную при практическом равенстве удвоенного радиуса пор длине свободного пробега молекул. Эффективный коэффициент диффузии $D_3 = D(1 - e^{-2r/\lambda})$, так как $\lambda \approx 2r$, где λ - длина свободного пробега молекул, а r - радиус пор. $D_3 = 5,93 \cdot 10^{-6} (1 - e^{-82/100}) = 3,32 \cdot 10^{-6}$ м²/с и $D_3 = 4,86 \cdot 10^{-6}$ м²/с для 973 и 1173 К соответственно, а модуль Тиле, рассчитанный по формуле

(7), составил 4,6 и 3,77. Таким образом, считается подтвержденным, что процесс для сферического катализатора протекает во внутридиффузионной области со степенью использования внутренней поверхности от 0,22 до 0,26, а скорость каталитического процесса, равная скорости отнесенной к единице объема катализатора, соответственно равна $12,74 \cdot 10^3$ и $15,24 \cdot 10^3$ моль/м³ час.

Для сравнения кинетических характеристик терморазложения серной кислоты с использованием катализатора и без него были выполнены расчеты энергии активации обоих вариантов термолиза. С этой целью в реакторе с кварцевой насадкой, представляющей собой кварцевую трубку диаметром 30 мм и высотой 300 мм, осуществили термическое разложение серного ангидрида, полученного предварительным испарением серной кислоты различной концентрации, в области температур 973–1273 К. Константу скорости рассчитывали по уравнению 3. Результаты некаталитического процесса разложения SO₃ приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты термолиза серной кислоты

T, К	1/T·10 ³	степень разложения, %		Константа скорости, мин ⁻¹		ln K	
		некатал	катал	некатал	катал	некатал	катал
973	1,03	24,11	55,58	14,6	69,93	2,68	4,25
1073	0,93	37,50	59,27	27,9	86,15	3,33	4,47
1173	0,85	46,21	60,92	40,6	99,36	3,70	4,60
1273	0,79	47,51	62,37	45,9	113,21	3,83	4,73

Зависимость константы скорости от температуры для обоих процессов представили в Аррениусовских координатах. Определены энергии активации по уравнениям $y = -4876,5x + 7,7739$ и $y = -3261x + 7,3438$, которые численно равны $E_{\text{кат}} = 27111,9$ Дж/моль и $E_{\text{некат}} = 40343,2$ Дж/моль. $\Delta E = 40343,2 - 27111,9 = 13431,2$ Дж/моль. Таким образом, ускорение процесса термолиза обеспечено понижением энергетического барьера разложения SO₃ на SO₂ и O₂. Каталитическая активность, определяемая как разность скоростей каталитической и некаталитической реакции при одинаковой текущей концентрации SO₃ в объеме, будет равна $A = u_{\text{кат}} - u(1 - \phi_{\text{кат}})$, $u_{\text{кат}} = K_{\text{кат}} \cdot C_0(1 - \alpha_{\text{кат}})$, $u = K_{\text{некат}} \cdot C_0(1 - \alpha_{\text{некат}})$, $A = 69,93 \cdot 136,8 \cdot (1 - 0,5558) - 14,6 \cdot 136,8 \cdot (1 - 0,2411) \cdot (1 - 0,62) = 4249,4 - 1515,7 \cdot (1 - 0,62) = 3673,4$ моль/м³ мин = 220406,04 моль/м³ час.

Механизм гетерогенного катализа окислительно-восстановительной реакции на пиритном огарке многостадийный: без учета диффузионных этапов на первой стадии идет активированная адсорбция SO₃ с образованием соединения Кат-О- SO₂, на второй стадии под действием высокой температуры происходит отщепление SO₂ с образованием промежуточного соединения Кат-О-, следующая стадия – регенерация катализатора при взаимодействии соседних активных центров с освобождением молекулы кислорода.

Библиографический список

1. Шенфельд, Б.Е. Научные основы переработки сернокислотных отходов, содержащих органические примеси: дисс. ... док. техн. наук. – Пермь: ППИ, 1990. – 399 с.
2. Каталитическое разложение сернокислотных отходов / В.М. Перфильев [и др.] // Нефтепереработка и нефтехимия. 1980. № 3. С. 31–32.
3. А.С.1010010 СССР, МКИ С 01 В 17/50. Способ получения сернистого ангидрида / В.М. Перфильев, Б.Т. Васильев, В.С. Суцев. – 3 с.
4. Перфильев, В.М. Термохимическое разложение отработанных серных кислот на катализаторе / В.М. Перфильев [и др.] // Химия и технология топлив и масел. 1985. № 7. С. 38–39.
5. А.С. 990647 СССР, МКИ С 01 В 17/58. Способ получения сернистого ангидрида из отработанной серной кислоты / А.А. Перетрутов [и др.]. – 3 с.
6. А.С.1096204 СССР, МКИ С 01 В 17/58. Способ получения сернистого ангидрида / А.А. Перетрутов [и др.]. – 3 с.

7. Термолиз серной кислоты на неплатиновых катализаторах в термоэлектрохимическом цикле получения водорода / В.А. Таранушич [и др.] // *Вопр. атом. науки и техн. Атомно-водородная энерг. и техн.* - 1982. №3 . С. 41–42.
8. **Масленников, Б.М.** Каталитический термолиз серной кислоты на неплатиновых катализаторах / Б.М. Масленников, Б.Т. Васильев, Н.В. Спиридонова // *Вопр. атом. науки и техн. атомно-водородная энерг. и техн.* 1981. №2 . С. 23–26.
9. А.С.1243811 СССР, МКИ 01 J 27/188. Катализатор для разложения серной кислоты / Б.Т. Васильев , В.Е. Сороко, В.Н Ковалев и др. – 2 с.
10. А.С.1404105 СССР, МКИ С 01 J 27/188. Катализатор для разложения серной кислоты / В.Н. Ковалев, Е.В.Иванова, А.Ф. Петропавловский и др. – 3с.
11. А.С.1467032 СССР, МКИ С 01 В 3/04. Катализатор для разложения серной кислоты / В.Н Ковалев, А.В. Форсов, А.Ф. Петропавловский и др. – 4 с.
12. А.С.1142161 СССР, МКИ В 01 J 23/74. Катализатор для термолиза серной кислоты / А.А. Перетрутов , П.П. Ким, Е.Н. Корнишина и др. –3 с.
13. **Перетрутов, А.А.** Физико-химические и механические свойства пиритного огарка как сырья для производства красного железо-окисного пигмента и отмывка его от соединений цинка и меди / А.А. Перетрутов [и др.] // *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2010. № 1 (80). С. 236 - 242*
14. Справочник сернокислотчика / под ред. К.М. Малина. – М.: - Химия. – 1971. – 744 с.
15. Справочник химика / под ред. В.П.Никольского. – М-Л.: Химия, 1965. Т. 3. С. 1005.
16. **Нашекин, В.В.** Техническая термодинамика и теплопередача / В.В. Нашекин. – М.: Высш. школа, 1980. – 469 с.
17. Технология катализаторов / И.П. Мухленов [и др.]; под ред. И.П. Мухленова. –2-е изд., перераб. – Л.: Химия, 1979. – 328 с.
18. **Рид, Р.** Свойства газов и жидкостей: справочное пособие: [пер с англ.] / Р. Рид, Дж. Праусниц, Г. Шервуд; под ред. В.Н. Соколова. – 3-е изд., перераб и доп. – Л.: Химия, 1982. – 592 с.

*Дата поступления
в редакцию 23.04.2011*

A.A. Peretrutov, M.N. Chubenko, P.P. Kim

UTILIZATION OF A PIRITE CINDER AS A CATALYST OF GETTING SULFUR DIOXIDE FROM SULFURIC WASTE ACID

Thermolysis of sulphuric acid waste solutions on pyrite cinder has been investigated. Simultaneous heat and mass tranfer in the reactor have been considered. The process is stated to take place in intradiffusion area. Kinetic characteristics such as: degree of decomposition, rate constants of non-catalytic and catalytic reactions, and catalytic activity have been defined.

Key words: waste sulphuric acid, thermolysis, catalytic decomposition, sulfurous anhydride and pyrite cinder.

УДК 661.631

М.И. Никандров, И.С. Никандров

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРИГОТОВЛЕНИЯ СОДОВОЙ СУСПЕНЗИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ФОСФАТОВ НАТРИЯ

Дзержинский политехнический институт (филиал НГТУ им. Р.Е. Алексеева)

Изучена кинетика растворения соды в воде и растворе динатрийфосфата, и взаимодействие соды с фосфорной кислотой. Получен технологический режим процесса

Ключевые слова: сода, растворение, нейтрализация, скорость, массопередача.

При получении фосфатов натрия для нейтрализации фосфорной кислоты применяют соду. При этом соду чаще всего предварительно растворяют в воде с получением суспензии, содержащей 430-470 т/л карбоната натрия. Доля твердой фазы в такой суспензии составляет 12% (Ж:Т=(7-8):1). Для исключения необходимости упарки нейтрализованного раствора динатрий-фосфата или тринатрийфосфата целесообразно использовать более концентрированную суспензию доля карбоната натрия в которой достигает 520-540 т/л. Это позволяет выделять фосфаты в виде более концентрированных десятиводного тринатрия и семиводного динатрийфосфатов вместо двенадцативодных солей [1, 2].

Сведения о скоростях растворения соды в растворах фосфатов отсутствуют. Расчет материальных балансов нейтрализации показано, что для получения десятиводного тринатрий фосфата растворение соды следует вести в растворе динатрий фосфата концентрацией 15-20%.

Исследование кинетики изотермического растворения соды при температурах 40-90°C показало, что растворимость карбоната натрия совместно в растворах с фосфатом натрия по сравнению с водой снижается незначительно. Как видно из рис. 1 растворение карбоната натрия, как и в воде, завершается при 80°C за 40-50 мин.

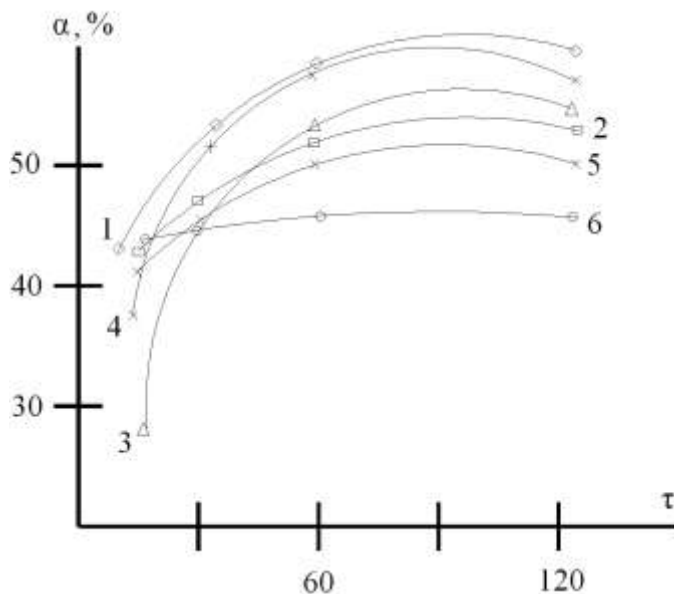


Рис. 1. Влияние времени растворения соды (τ , мин) на степень растворения навески α :
 1 – в воде при 80°C; 2 – в растворе динатрийфосфата (ДНФ) 11% 80°C; 3 – в растворе динатрийфосфата (ДНФ) 20% 40°C; 4 – в растворе динатрийфосфата (ДНФ) 20% 60°C; 5 – в растворе динатрийфосфата (ДНФ) 20% 80°C; 6 – в растворе динатрийфосфата (ДНФ) 20% 90°C

Влияние температуры на скорость растворения заметно сказывается только на первых 30-40 мин. При времени растворения 50-70 мин концентрация соды в растворе приближается к равновесной растворимости. Более низкая степень растворения при температуре 80-90°C (линии 5 и 6 на рис. 1) по сравнению с 40-60°C объясняется снижением равновесной растворимости соды, характерной для нее [3].

Судя по величине температурного коэффициента скорости растворения соды, равного 1,03, процесс проходит по диффузионному механизму (рис. 2). Скорость растворения лимитируется диффузией ионов от поверхности в растворяемых кристаллов в объем раствора.

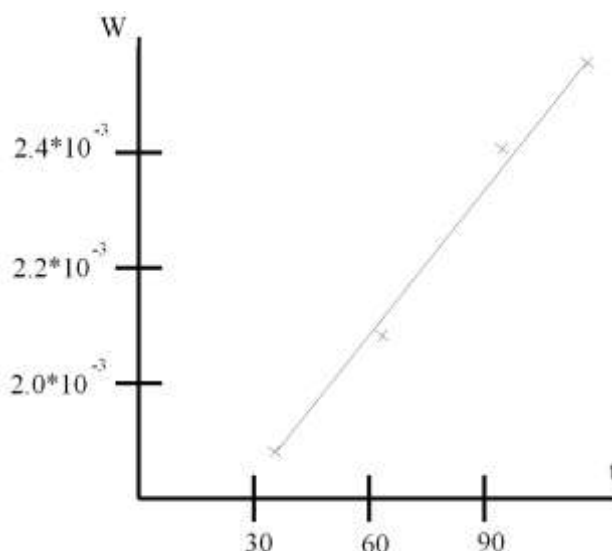


Рис. 2. Влияние температуры ($t, ^\circ\text{C}$) на скорость растворения соды в 20%-ном растворе динатрий фосфата (W , кмоль/(м³сек) за 20 мин

По мере роста концентрации карбоната натрия в растворе скорость растворения, как видно из рис. 3, повышается. Так, при растворении соды в воде при температуре 80°C на первой минуте скорость растворения равна $3,43 \cdot 10^{-3}$ кмоль/(м³сек), в среднем за 20 мин она равна $2,33 \cdot 10^{-3}$ кмоль/(м³сек), а за 60 мин, когда достигается практически полное насыщение раствора содой, скорость снижается до $0,86 \cdot 10^{-3}$ кмоль/(м³сек).

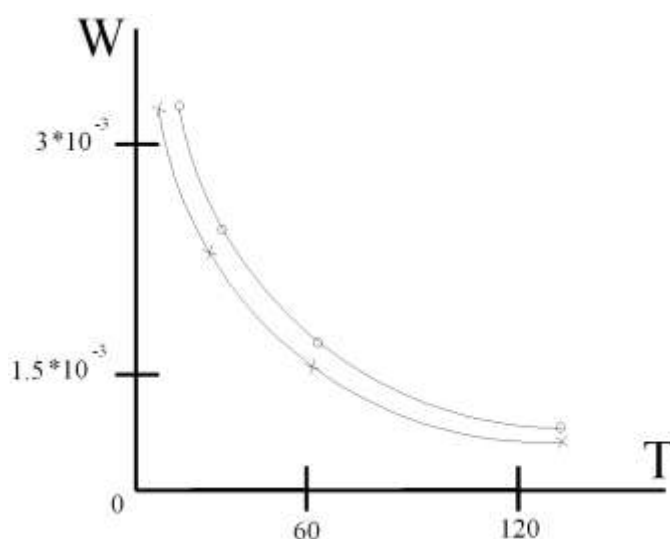


Рис. 3. Влияние времени на скорость растворения соды при температуре 80 °C

При растворении соды в растворе фосфата скорость растворения аналогична падает с $3,18 \cdot 10^{-3}$ до $0,8 \cdot 10^{-3}$ кмоль/сек*м² к 60-й минуте растворения. Следовательно, присутствие в

растворе динатрия фосфата мало влияет на скорость растворения карбоната натрия. Анализ гранулометрического состава исходным содой, приведенный на рис. 4, показывает, что основную часть соды сост. кристаллы размером 63-320 микрометров. Для частиц размером более 320 микрометров составляют 6 %, а доля частиц с 40 и менее микрометров не превышает 3%.

Для выявления изменения размера частиц соды по мере их растворения через определенное время с начала растворения из суспензии отделяли на фильтровальной бумаге нерастворившийся остаток. Остаток на фильтре промывали ацетоном, сушили при комнатной температуре и 100 гр. сухого остатка рассевали. Исследование показало, что после 60 мин растворения навески, однократно загруженной в раствор в течение 1 мин, основная часть частиц в твердой фазе суспензии имеет размер 40-125 микрометров. Доля частиц размером 40 и менее микрометров возрастает до 25%, а частицы 200 и более микрометров отсутствуют. При внесении той же навески в течение 20-30 мин доля частиц размером 40 и менее снижается до 12-17%. Одновременно в суспензии остаются более крупные частицы размером более 200 микрометров в кол-ве 14-17%. Таким образом, при более медленной, растянутой во времени дозировке соды на растворение суспензия становится менее однородной по размерам частиц, взвешенных после завершения растворения.

При получении содовой суспензии с долей карбоната натрия 420-460 гр/л отношение фаз (Ж:Т) в ней равно 7-8. В содовой суспензии, содержащей 520-540 гр/л карбоната, отношение (Ж:Т) равно 3,5-4,6. Такая суспензия сохраняет хорошую текучесть.

Для описания процессов, скорость которых лимитируется диффузией, обычно используют уравнение вида:

$$\alpha = 1 - e^{-K_1 T^n}, \quad (1)$$

где α - степень растворения за время T , K – константа скорости растворения.

Применяют для этой цели часто и уравнения Б.В. Ерофеева, используемое для описания топохимических превращений:

$$1 - (1 - \alpha)^{2/3} = K_2 T \quad (2)$$

Прямолинейность кинетических кривых подтверждает правомерность применения данных уравнений описания процесса растворения (рис. 5).

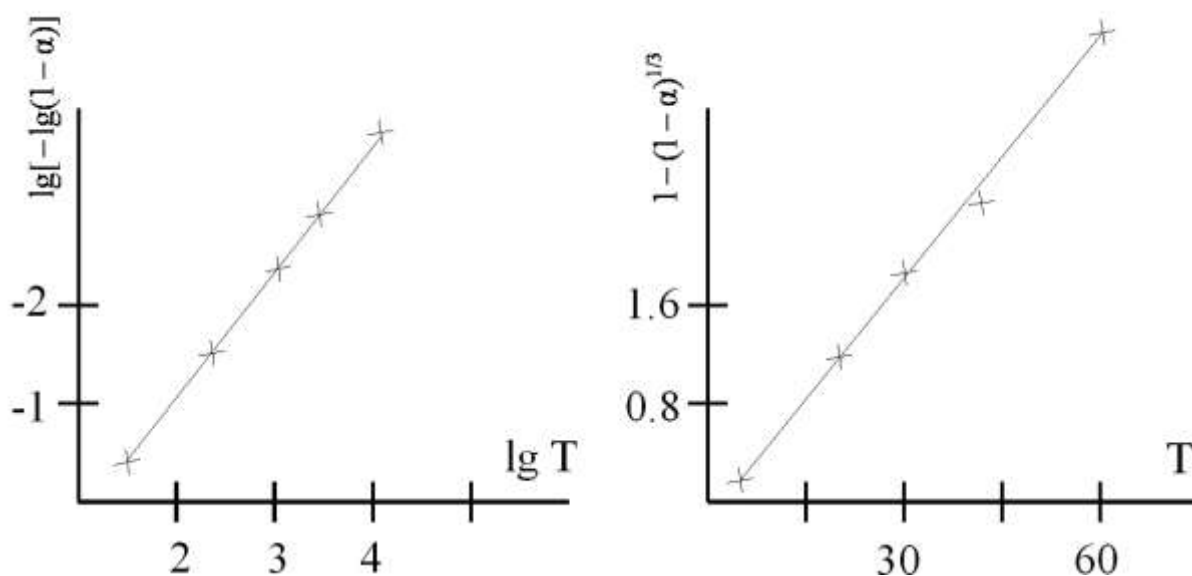


Рис. 5. Зависимость степени растворения соды (α) от времени взаимодействия при 80 °С

Сходимость значений констант скорости растворения, найденных по уравнениям 1 и 2, достаточно приемлема ($K_1=1,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 \text{сек/кмоль}$, $K_2=1,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \text{сек/кмоль}$).

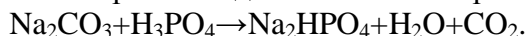
Расчет по упрощенному, более удобному в расчетах, уравнению 3:

$$\alpha = K_3 \cdot T, \quad (3)$$

дает значение константы скорости растворения, равное $2,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 \text{сек/кмоль}$, что для практических расчетов вполне удовлетворительно.

Поскольку для разогрева раствора в реакторе приготовления содовой суспензии подадут глухой пар, то целесообразно исключить затраты на нагрев за счет проведения в реакторе реакции, идущей с выделением тепла. Это может быть достигнуто подачей в реакторе приготовления содовой суспензии взамен раствора динатрий фосфата эквивалентного количества фосфорной кислоты. Для этого до подачи соды кислоту необходимо разбавить водой, подаваемой на содорастворение. На эту величину расход фосфорной кислоты на стадии нейтрализации необходимо уменьшить. Это одновременно позволит снизить затраты на охлаждение раствора при нейтрализации и сократить время нейтрализации.

Выполнено лабораторное исследование нейтрализации 13% фосфорной кислоты содой в адиабатических условиях по скорости выделения газов по реакции:



В реактор заливали 500 гр 13% фосфорной кислоты с температурой 20°C , затем в течение 5-60 мин в раствор равномерно добавляли соду в количестве 370 гр, и измеряли объем выделяющегося газа и температуру в реакторе.

При времени дозирования соды 5 мин высота устойчивого пенного слоя в реакторе составляла 80-110 мм при высоте раствора, полученного в конце опыта, 73 мм. При увеличении времени дозирования соды до 30 мин высота пенного слоя снижалась до 50-70 мм. Высота пены снизилась до 30-35 мм только при добавлении в воду 60% необходимой кислоты до начала подачи соды, что соответствовало концентрации раствора кислоты 8,2 %. Остальную часть кислоты добавляли через 30 мин после начала подачи соды. При этом наблюдалось и меньшее значение газовыделения. Как видно из рис. 6, скорость газовыделения при взаимодействии кислоты с содой составляет $0,3-10,3 \text{ мин}^{-1}$. При загрузке всей нормы соды в течение 5 мин, скорость газовыделения достигает 10 мин^{-1} . Температура в реакторе в результате возрастает до $90-100^\circ\text{C}$.

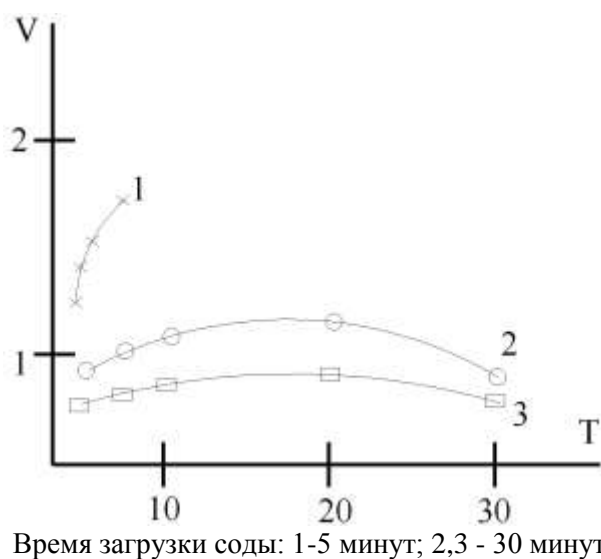


Рис. 6. Изменение скорости газовыделения ($V, \text{мин}^{-1}$) от времени содорастворения ($T, \text{мин}$)

При испытании в действующем производстве было установлено, что при заливке в реактор воды и эквивалентного количества фосфорной кислоты (образуется раствор 13,8 %

кислоты) при последующей подаче соды наступает интенсивное вспенивание. Для снижения пенообразования был проверен режим, при котором в воду добавлялось ~60 % требуемой нормы кислоты (раствор 8-8,2 % кислоты), а остальную часть кислоты добавляли через 40 мин после начала подачи соды. Кроме того в первые десятки минут скорость подачи соды снизили в два раза, выключая дозатор на 1 минуту через каждую минуту остановки.

При таком режиме приготовление содовой суспензии проходило без значительного пенообразования и завершалось за 120 мин. Температура в реакторе не превышала 85 °С. При необходимости в змеевик реактора подают обратную воду.

Использование данного приема позволило сократить затраты пара на производство тринатрий фосфата на 28 %, а расход воды на охлаждение на 16%.

Библиографический список

1. Позин, М.Е. Технология минеральных солей / М.Е. Позин. – 4-е изд. – П.: Химия, 1974. – 860 с.
2. Левинский, М.Е. Хлористый водород и соляная кислота / М.Е. Левинский, А.Ф. Мазанко, И.Н. Новиков. – М.: Химия, 1985. – 160 с.
3. Мельник, Б.Д. Инженерный справочник по технологии неорганических веществ / Б.Д. Мельник. – М.: Химия, 1973. – 544 с.

*Дата поступления
в редакцию 13.05.2011*

M.I. Nikandrov, I.S. Nikandrov

INVESTIGATION OF THE COOKING SODA SUSPENSION IN THE PRODUCTION OF SODIUM PHOSPHATES

Of velocity's solution sodium carbonate is go studding. Influence of concentration disodium phosphate of the rate solution is giving.

Key words: sodium carbonate, solution, velocity, dusodium phosphate, influence.

УДК 547.305:547.385:544.18

Л.И. Бажан¹, И.В. Бодриков¹, В.Е. Стацюк²

АМБИВАЛЕНТНОСТЬ СИСТЕМ ТИОЛ - АМИН КАК ИНВЕРТОР РЕАКЦИОННОЙ СПОСОБНОСТИ ТИОЛОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С АЦЕТИЛЕНАМИ

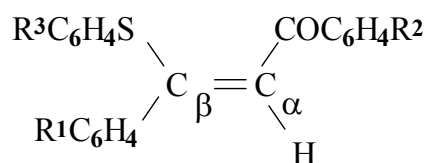
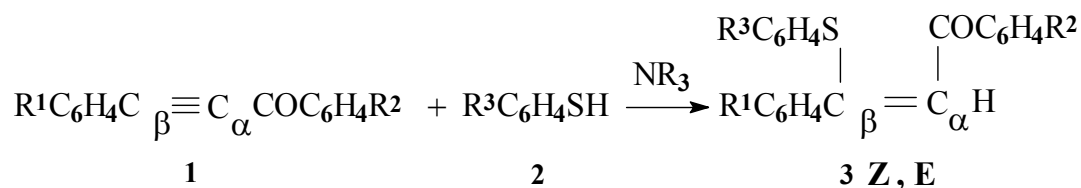
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Тольяттинский государственный университет²

Квантовохимическими методами (MNDO, MNDO/M) определены наиболее вероятные формы активированных аминами тиолов в растворителях и влияние соотношения тиол/катализатор, а также заместителей в ароматическом ядре реагентов на энергетические барьеры Ad_N -реакций тиолов с диарилпропинами. Найдены две формы активированных аминами тиолов (амбивалентность) в Ad_N -реакциях с пропинами: Н-комплексы и тиолят-анионы, электронные свойства заместителей в которых оказывают противоположное влияние на энергетические барьеры реакций с пропинами.

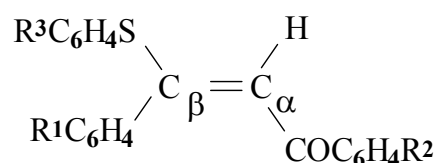
Ключевые слова: амины, инверсия, инвертор, квантовохимические расчеты, комплексы с водородной связью, пропины, реакционная способность, тиолы, тиолят-анионы.

Инверсия реакционной способности реагентов при варьировании значимых характеристик реакций является одним из интригующих явлений в химии. Случаи обращения знака влияния электронных свойств заместителей на реакционную способность, селективность и другие характеристики реагентов наблюдается в некоторых Ad_E -реакциях непредельных соединений [1], в процессах радикального [2] и нуклеофильного [3] типа. Однако, несмотря на многочисленность случаев реализации инверсии, стимуляторы (инверторы) этого явления до настоящего времени систематически не изучались.

Ранее нами установлено [3], что при взаимодействии диарилпропинов (1) с тиолами (2) в метаноле образуются β -арилтиовинилкетоны (3) Z- и E-конфигурации, при этом изменение концентрации амина (катализатор) обуславливает инверсию реакционной способности тиолов: при низких концентрациях амина реакция ускоряется акцепторными заместителями в тиоле, при высоких - донорными:



Z-изомер



E-изомер

3

$R^1 = H$, $R^2 = 4-OCH_3$ (а), $4-CH_3$ (б), H (в), $4-Cl$ (г), $4-NO_2$ (д);

$R^3 = 4-NO_2$ (а), $4-Cl$ (б), H (в), $4-CH_3$ (г), $4-OCH_3$ (д);

Учитывая принципиальную теоретическую и практическую важность явления инвер-

сии, настоящая работа посвящена выявлению сути инвертора, ответственного за обращение знака электронного влияния заместителей в тиолах (обращение знака реакционной константы ρ) на скорость Ad_N -реакций с диарилпропинонами при варьировании соотношения реагент/катализатор. Контроль за характером трансформации реагирующих систем в ходе реакции проводился нами полуэмпирическими квантовохимическими методами MNDO [4] и MNDO/M [5] по программе [6]. Определены квантовохимические характеристики систем тиол-катализатор и реакций этих систем с 1,3-диарил-1-пропин-3-онами (**1**) без учета среды и в метаноле.

Модельным катализатором в расчетах взят аммиак, который по характеру действия на тиолы не отличается принципиальным образом от триэтиламина, используемого в работе [3].

Как и в экспериментальной работе [3], в качестве растворителя использовался метанол, молекула которого включалась в системы с тиолами и аммиаком (приближение супермолекулы). Общее же влияние среды в различных состояниях систем реагент-субстрат оценивалось в рамках псевдоконтинуальной модели методом точечных диполей [7].

Для исходных тиолов (**2**) и пропинонов (**1**) нами рассчитаны длины связи $S-H$ (R_{S-H}), заряды на атомах S и H , энергия высшей заполненной молекулярной орбитали (ВЗМО), вклады атомной орбитали (АО) серы в ВЗМО арилтиолов (табл. 1), энергии ВЗМО и низшей вакантной молекулярной орбитали (НВМО), заряды на атомах тройной связи и карбонильной группы диарилпропинонов (табл. 2). Эти характеристики являются наиболее информативными для суждения о свойствах изучаемых систем.

Таблица 1

Квантовохимические характеристики арилтиолов (**2**) в метаноле

R^3	$R_{SH}, \text{\AA}$	W_{S-H}	Заряды на атомах, ед. е		$E_{ВЗМО}, \text{эВ}$	Вклад p_z АО атома серы в ВЗМО, %
			S	H		
4- OCH_3	1.3021	0.9909	0.118	- 0.011	- 8.78	29.83
4- CH_3	1.3021	0.9909	0.116	- 0.011	- 8.97	36.82
H	1.3021	0.9909	0.115	- 0.011	- 9.01	39.27
4-Cl	1.3024	0.9909	0.137	- 0.011	- 9.11	39.95
4- NO_2	1.3025	0.9910	0.170	- 0.004	- 9.39	52.77

Таблица 2

Квантовохимические характеристики пропинонов (**1**)

R^2	Энергия граничных орбиталей, эВ		Заряды на атомах, ед. е			
	ВЗМО	НВМО	C_β	C_α	C	O
4- OCH_3	- 9.35	- 0.57	0.030	- 0.238	0.429	- 0.340
4- CH_3	- 9.41	- 0.57	0.030	- 0.238	0.426	- 0.340
H	- 9.41	- 0.58	0.029	- 0.238	0.426	- 0.340
4-Cl	- 9.39	- 0.57	0.038	- 0.242	0.424	- 0.333
4- NO_2	- 9.32	- 1.48	0.050	- 0.245	0.419	- 0.318

Поскольку заместители R^2 в пропинонах не оказывают значительное влияние на квантовохимические характеристики пропинонов (табл. 2), сечения поверхности потенциальной энергии (ППЭ) рассчитаны для реакций серии тиолов в системах тиол-катализатор с базисным соединением изучаемой серии ацетиленов – 1,3-дифенил-1-пропин-3-оном (**1в**).

Согласно экспериментальным данным [8], внутреннее вращение $S-H$ связи в арилтиолах (**2**) происходит практически свободно. Однако угол внутреннего вращения $S-H$ связи

влияет на уровни ВЗМО в арилтиолах (**2**) довольно значительно (рис. 1), что, по-видимому, обуславливает репульсивное взаимодействие заполненных молекулярных орбиталей субстратов и реагентов при их сближении [9]. Это является одним из факторов, препятствующим взаимодействию пропионов с неактивированными тиолами.

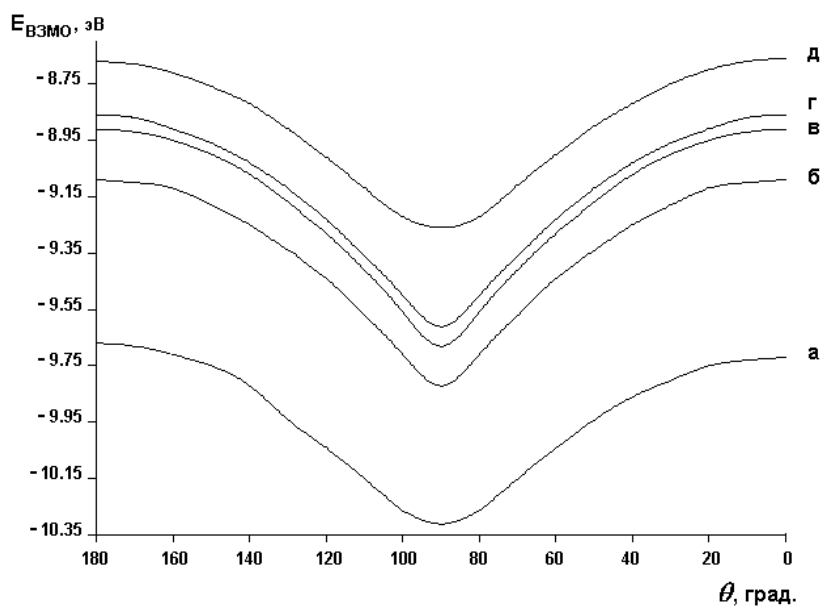
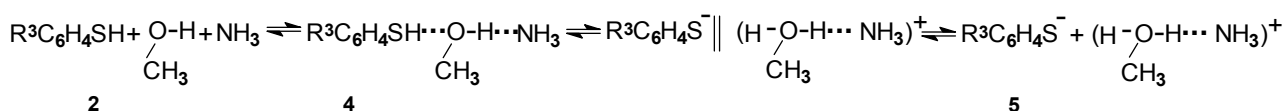


Рис. 1. Зависимость уровней ВЗМО тиолов (**2**) от двугранного угла θ связи S–H

Поэтому, как и в работе [3], изучаемый аддитивный процесс стимулировался предреакционным растяжением связи S–H в реагенте основанием, обеспечивающим увеличение энергетической щели между ВЗМО реагента и субстрата и уменьшение энергии между взаимодействующими орбиталями π^* - МО субстрата и $2p_z$ АО тиолов.

В принципе в системе арилтиол-амин в метаноле может возникнуть ансамбль состояний от сольватированных комплексов с водородной связью (Н-комплексов) реагент - катализатор, реагент - растворитель - катализатор до тиолят-анионов:



Из этого ансамбля состояний в настоящей работе нами приводятся квантовохимические характеристики наиболее принципиально отличающихся форм системы реагент-катализатор в метаноле – Н-комплексов (**4**) (табл. 3) и тиолят-анионов (**5**) (табл. 4).

Таблица 3
Квантовохимические характеристики Н-комплексов (**4**) в метаноле

R^3	$E_{\text{ВЗМО}}, \text{эВ}$	Заряды на атомах, ед. е		Вклад p_z АО атома серы в ВЗМО, %
		S	H	
4-OCH ₃	- 8.82	0.071	0.038	31.69
4-CH ₃	- 8.99	0.070	0.040	39.94
H	- 9.03	0.067	0.041	41.88
4-Cl	- 9.14	0.074	0.050	41.89
4-NO ₂	- 9.45	0.107	0.051	52.76

Таблица 4
Квантовохимические характеристики тиолят-анионов (5) в метаноле

R ¹	E _{ВЗМО} , эВ	Заряд на атоме, ед. е	Вклад p _z АО атома серы в ВЗМО, %
		S	
4-OCH ₃	- 6.42	- 0.719	58.94
4-CH ₃	- 6.48	- 0.715	61.40
H	- 6.49	- 0.715	62.56
4-Cl	- 6.76	- 0.679	61.40
4-NO ₂	- 7.18	- 0.604	59.90

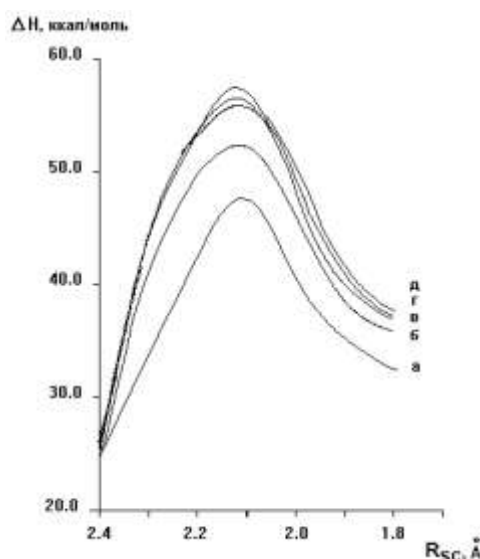
Характеристики взаимодействия Н-комплексов (4) и тиолят-анионов (5) с базисным субстратом (1в) приведены в табл. 5 и 6 соответственно.

Таблица 5
Квантовохимические характеристики ПС реакций Н-комплексов (4) с пропиноном (1в)

R ³	Энергии граничных орбиталей, эВ		Заряды на атомах, ед.е					
	ВЗМО	НВМО	C _β	C _α	C	O	S	H
4-OCH ₃	- 7.21	0.08	0.192	- 0.478	0.450	- 0.368	- 0.479	0.365
4-CH ₃	- 7.08	0.08	0.199	- 0.478	0.450	- 0.368	- 0.479	0.365
H	- 7.10	0.06	0.199	- 0.478	0.451	- 0.369	- 0.479	0.365
4-Cl	-7.22	0.02	0.195	- 0.466	0.449	- 0.367	- 0.472	0.363
4-NO ₂	- 7.41	- 1.09	0.183	- 0.440	0.445	- 0.362	- 0.449	0.360

Таблица 6
Квантовохимические характеристики ПС реакций тиолят-анионов (5) с пропиноном (1в)

R ³	Энергии граничных орбиталей, эВ		Заряды на атомах, ед.е				
	ВЗМО	НВМО	C _β	C _α	C	O	S
4-OCH ₃	- 6.22	0.56	0.198	- 0.468	0.457	- 0.382	- 0.529
4-CH ₃	- 6.22	0.59	0.199	- 0.470	0.457	- 0.382	- 0.530
H	- 6.24	0.58	0.199	- 0.466	0.457	- 0.382	- 0.530
4-Cl	- 6.14	0.52	0.185	- 0.596	0.475	- 0.409	- 0.331
4-NO ₂	- 6.30	0.55	0.181	- 0.552	0.468	- 0.400	- 0.322



**Рис. 2. Влияние заместителя (R³) в реагенте на барьеры реакций
Н-комплексов (4) с пропиноном (1в) в метаноле**

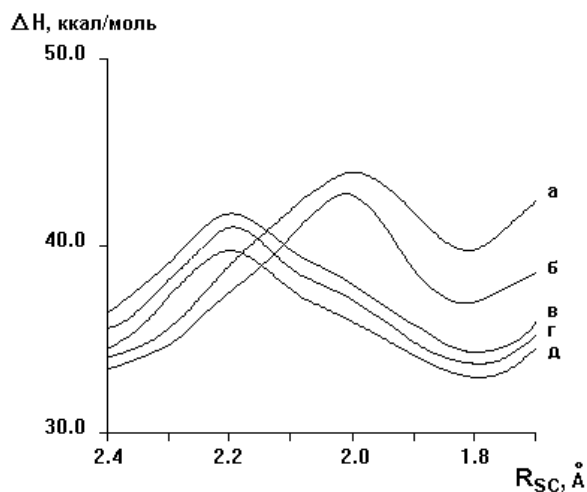


Рис. 3. Влияние заместителя (R^3) в реагенте на барьеры реакций тиолят-анионов (5) с пропионом (1в) в метаноле

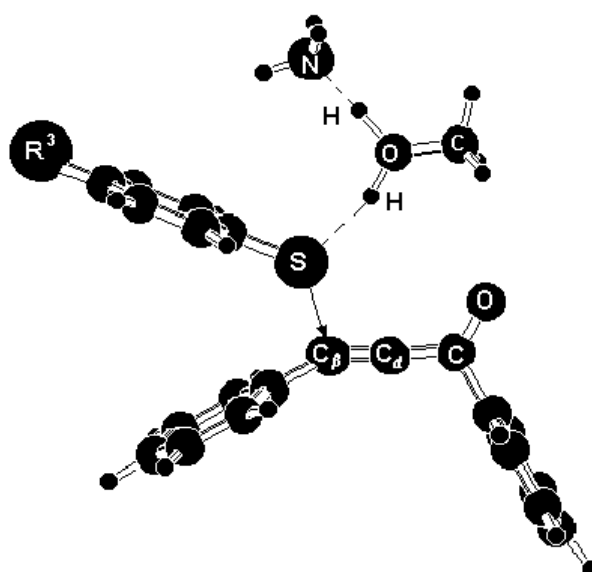


Рис. 4. Структура переходного состояния реакций Н-комплексов (4) с пропионом (1в) в метаноле

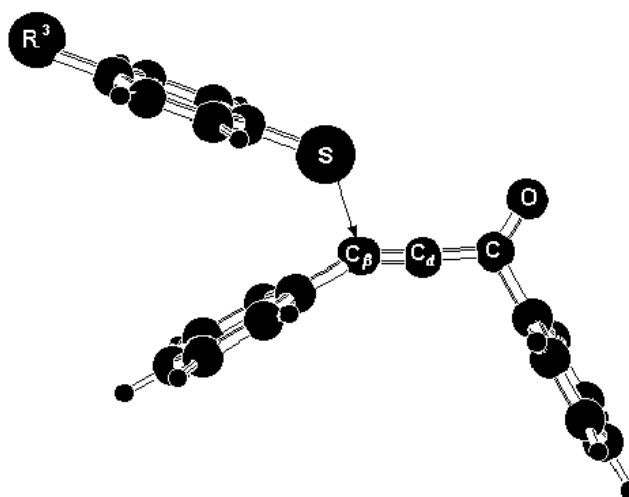


Рис. 5. Структура переходного состояния реакций тиолят-анионов (5) с пропионом (1в) в метаноле

Сечения ППЭ реакций Н-комплексов (4) и тиолят-анионов (5) с пропином (1в) представлены на рис. 2 и 3 соответственно.

Структуры переходных состояний реакций Н-комплексов (4) и тиолят-анионов (5) с пропином (1в) представлены на рис. 4 и 5 соответственно.

Из данных, представленных на рис. 2 и 3, видно, что для реакции тиолов в форме Н-комплексов и тиолят-анионов четко прослеживаются различия в энергетических барьерах при взаимодействии их с пропином.

В реакциях пропинов с тиолами в форме Н-комплексов энергетические барьеры профилей ППЭ, соответствующие лимитирующей стадии присоединения тиола по тройной связи субстратов (рис. 2), снижаются с ростом акцепторной способности заместителей (R^3) в тиолах (увеличение активности тиолов). Обратная картина наблюдается для реакций пропинов с тиолами в форме тиолят-анионов: энергетические барьеры присоединения реагентов по тройной связи снижаются с ростом донорной способности заместителей в тиолах (рис. 3).

Таким образом, впервые показано, что роль инвертора реакционной способности нуклеофилов в реакциях с активированными карбонильной группой ацетиленами выполняет амбивалентность (двойственность) форм систем реагент-катализатор. Из данных табл. 3 и 4 видно, что в реагентах Н-комплексного типа рост акцепторной способности заместителей R^3 хотя и обуславливает некоторое снижение уровня ВЗМО, но рост вклада $2p_z$ АО атома серы в ВЗМО, очевидно, компенсирует первый неблагоприятный фактор и обеспечивает в целом активацию реагента. В тиолах в форме тиолят-анионов другое влияние заместителей на реакционную способность реагентов: рост донорной способности заместителей в реагенте обеспечивает значительное повышение энергетического уровня в ВЗМО и увеличение отрицательного заряда на атоме серы реагента.

Таким образом, в первой ситуации в активацию реагента больше вносит орбитально-контролируемая составляющая, в то время как в реагенте в форме тиолят-аниона реализуется как составляющая орбитального контроля (повышение уровня ВЗМО), так и зарядового контроля (рост заряда на реакционном центре нуклеофила).

Библиографический список

1. Bodrikov, I.V. Inversion of the substituent effects on the rate of $ArSCl$ Ad_E -reactions with styrenes / I.V. Bodrikov [et al.] // *Tetrahedron Lett.* 1980. V. 21. N 1. P. 115 - 118.
2. Giese, B. Grundlagen und Grenzen des Reaktivitäts-Selektivitätsprinzips // *Angew. Chem.* 1977. V. 89. S. 162–173.
3. Giese, B. Basis and Limitations of the Reactivity-Selectivity Principle // *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 1977. V. 16. P. 125–136.
4. Giese, B. The isoselective relationship // *Acc. Chem. Res.* 1984. V. 17. 438–442.
5. Коршунов, С.П. Инверсия реакционной способности тиолов в Ad_N -реакциях ацетиленов / С.П. Коршунов [и др.] // *ЖОрХ.* 1988. Т. 24. Вып. 4. С. 679–682.
6. Dewar, M.J.S., Thiel W. Ground states of molecules. 38. The MNDO method. Applications and parameters // *J. Am. Chem. Soc.* 1977. Vol. 99 N 15. P. 4899 - 4907.
7. Dewar, M.J.S., Thiel W. Ground states of molecules. 39. MNDO results for molecules containing hydrogen, carbon, nitrogen and oxygen // *J. Am. Chem. Soc.* 1977. Vol. 99. N 15. P. 4907 - 4917.
8. Близняк, А.А. Исследование комплексов с водородными связями методом MNDO / М. / А.А. Близняк, А.А. Войтюк // *ЖСХ.* 1988. Т. 29. № 2. С. 31 - 37.
9. Близняк, А.А. Комплекс программ MNDO-85 для расчета электронной структуры, физико-химических свойств и реакционной способности молекулярных систем полуэмпирическими методами MNDO, MNDOS и AM1 / А.А. Близняк, А.А. Войтюк // *ЖСХ.* 1986. Т. 27. № 4. С. 190–191.
10. Бурштейн, К.Я. Квантовохимические расчеты в органической химии и молекулярной спектроскопии / К.Я. Бурштейн, П.П. Шорыгин. – М.: Наука, 1989. – 104 с.
11. Schaefer, T. The rotational angle dependence of $^5J_m^{H,SH}$ in benzenethiol / T. Schaefer, T.A. Wildman, R. Sebastian // *Canad. J. Chem.* 1982. Vol. 60. N 15. P. 1924–1927.

12. Бодриков, И.В. Квантовохимический критерий и синтетический аспект ассоциативных и диссоциативных процессов в химии непредельных соединений // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 1986. Т. 29. Вып. 5. С. 118–120.

*Дата поступления
в редакцию 13.05.2011*

L.I Bazhan, I.V. Bodrikov, V.E. Statsyuk

**AMBIVALENCE OF THE SYSTEM THIOL-AMINE AS INVERTOR
OF REACTIVITY OF THE THIOLS AT THE INTERACTION WITH ACETHYLENES**

The most probable forms of the activated by amines thiols in solvents and the effect of the ratio of thiol/catalyst and the substituents in the aromatic ring of the reagents on the energy barriers of the Ad_N -reactions of the thiols with the diarylpropinones are determined by the quantum-chemical methods (MNDO, MNDO/M). Two forms of activated by amines thiols (ambivalence) in Ad_N -reactions with propinones: H-complexes and thiolate anions, the electronic properties of the substituents of which have opposite effects on the energy barriers of reactions with propinones are founded.

Key words: amines, inversion, invertor, quantum-chemical calculations, complexes with hydrogen bond, propinones, reactivity, thiols, thiolate.

ЭКОНОМИКА, ИННОВАЦИИ И МЕНЕДЖМЕНТ

УДК 338.242.2

А.А. Шарова

ИЗУЧЕНИЕ ОПЫТА ЗАРУБЕЖНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ В СФЕРЕ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ (НА ПРИМЕРЕ ПРЕДПРИЯТИЙ ХИМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ)

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Анализ и сравнение основных принципов и подходов в международной и отечественной практике риск-менеджмента показывает наличие как схожих позиций, так и ряд принципиальных отличий. В статье приведен сравнительный анализ управления рисками крупнейших химических организаций России и Германии («СИБУР» и «BASF»), выделены основные особенности и перспективы развития риск-менеджмента на отечественных предприятиях химической промышленности.

Ключевые слова: риск-менеджмент, риск-менеджмент на предприятии, предприятия химической промышленности.

Химическая промышленность является одной из ведущих отраслей индустрии, которая наиболее быстро обеспечивает внедрение продуктов научно-технического прогресса во все сферы жизнедеятельности человека. К основным параметрам отраслевой специфики химических предприятий, определяющим уникальные риски, следует отнести высокую энергоемкость и водоемкость (что, в первую очередь, влияет на требования размещения химических производств и обеспечение необходимой инфраструктурой), высокую капиталоемкость и зависимость от сырьевых ресурсов (что значительно повышает риски зависимости от прямой внешней среды), а также экологические проблемы (экологический риск на постоянной основе входит в список значимых угроз всех химических предприятий).

Управление рисками становится особенно актуально в период экономического и финансового кризиса. С одной стороны, наблюдается значительный спад деловой активности, с другой – возникают трудности, связанные с финансированием слабой экономической среды. Глобализация экономических процессов является не только дополнительным источником рисков, но и предоставляет дополнительные возможности участникам мирового экономического сообщества. Профессиональный комплексный риск-менеджмент, безусловно, не решит всех проблем и не сведет вероятность возникновения рисков событий к нулю, однако именно такой подход способствует достижению целей деловой организации, повышает эффективность бизнес-решений, позволяет выявить дополнительные возможности в условиях неопределенной внешней среды, обеспечить надежность и устойчивость компании в целом. Зарубежный опыт показывает, что комплексное профессиональное управление рисками, основанное на учете отраслевой специфики, является необходимым условием успешного функционирования крупного наукоемкого производства. Актуальность проблемы комплексного управления рисками в России на крупных химических предприятиях обусловлена не только проблемами адаптации зарубежных стандартов и практических навыков в области управления рисками. Основной проблемой как в отечественной, так и в зарубежной практике риск-менеджмента являются трудности в осмыслении и формулировании целей и задач риск-менеджмента высшим руководством деловой организации, восприятию его как части корпоративной культуры.

В силу особенностей исторического процесса первый опыт в теоретическом осмыслении и практическом применении инструментов управления рисками на предприятиях принадлежит развитым западным странам. Предпосылкой создания первого стандарта по управлению рисками является экономический кризис, начавшийся в конце 80-х годов в США. Созданная комиссия (The Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission - COSO), состоящая из бухгалтеров, финансистов и внутренних аудиторов, в срочном порядке разработала руководство по внутреннему контролю для инвестиционных организаций. Модели риска и контроля, рекомендованные комиссией, послужили основой для ряда других стандартов в будущем. В настоящее время наиболее распространенными в практическом применении являются следующие стандарты в области управления рисками на предприятиях: международный стандарт управления рисками, положения и рекомендации по корпоративному управлению рисками (ERM – Enterprise Risk Management, RMS – Risk Management Standards), разработанные COSO (утвержден в 2001 г.) и международный стандарт управления рисками, разработанный федерацией европейских ассоциаций риск - менеджеров (FERMA), а именно Институтом риск - менеджмента в Великобритании (IRM), ассоциацией риск - менеджмента и страхования (AIRMIC) и национальным форумом риск - менеджмента в общественном секторе (утвержден в 2002 г.). Основной идеей международных стандартов является системный подход в управлении рисками, согласно которому риск-менеджмент должен быть не только включен во все стратегические инициативы, но и быть органичной частью всех бизнес-процессов организации [1, 4]. Несмотря на проработанность теоретических вопросов управления рисками и на то, что риск-менеджеры крупных западных предприятий не сомневаются в необходимости внедрения комплексных систем управления рисками (ERM - Enterprise Risk Management) следует привести данные исследования, проведенного британским журналом «Strategic risk». В исследовании приняли участие около 100 крупных британских компаний, результаты показали, что не для всех компаний очевидна эффективность внедрения такой системы [5]:

- только около 60% респондентов стремятся улучшить корпоративное управление и процесс принятия решений, при этом более половины компаний внедряют ERM под давлением закона или подчиняясь требованиям регуляторов;
- лишь 40% респондентов рассматривают собственный совет директоров как движущую силу при внедрении ERM, топ-менеджмент только половины опрошенных фирм берет на себя полную ответственность за продвижение ERM, а линейные руководители осуществляют оценку рисков по вверенным им направлениям деятельности;
- только 11% опрошенных бизнесменов считают, что политика, процесс и стандарты ERM в их компаниях полностью определены и внедрены;
- настораживает тот факт, что только 22% респондентов сообщили, что проводят с сотрудниками тренинги по управлению рисками;
- ключевым стал вопрос о том, насколько эффективна применяемая в компаниях система RM: 25% компаний оценили формат ERM как «неэффективный», а некоторые сообщили, что просто не знали, какого эффекта они должны были достичь, и только 6% опрошенных считают, что система управления рисками в их компании абсолютно эффективна и соответствует стратегии.

Отечественные стандарты и рекомендации по построению системы управления рисками в деловой организации отсутствуют, крупные компании используют зарубежный опыт риск-менеджмента. Комплексный подход к управлению рисками в России встречается чаще всего в банковском секторе (основными причинами создания и внедрения системы являются привлечение иностранных инвестиций и требования регулятора), крупные же промышленные предприятия находятся на первоначальной стадии внедрения систем управления рисками, чаще всего привлекаются иностранные консультанты для внедрения элементов риск-менеджмента (например, для мониторинга производственных рисков).

Холдинг «СИБУР» - не только основа отечественной нефтехимии, но и передовое предприятие в области модернизаций и инноваций всего экономического сектора страны. В настоящее время заявлен проект производства поливинилхлорида в Нижнем Новгороде, в том числе, совместно с гигантом мировой химической отрасли – немецким концерном BASF. Следует отметить, что процесс управления рисками группы «BASF» осуществляется на основе международного стандарта COSO ERM. Совместные проектные работы с мировым лидером химической индустрии свидетельствует о конкурентоспособности «СИБУР» не только благодаря своему уникальному для отрасли сырьевому и инфраструктурному потенциалу, но и грамотной стратегии развития, включающей в себя внедрение элементов комплексного управления рисками. Так, совсем недавно «СИБУР» стал победителем V международного конкурса «Лучший риск-менеджмент – 2010» в номинации «Построение комплексных систем риск-менеджмента (промышленные предприятия)», проводимого некоммерческим партнерством «Русское общество по управлению рисками» («РусРиск»), которое является членом FERMA (Европейская ассоциация риск-менеджмента). Ввиду того, что в России отсутствуют отечественные стандарты в области построения системы риск-менеджмента положительная оценка «СИБУР» со стороны профессионального сообщества международного уровня свидетельствует о достаточно высоком уровне организуемой корпоративной системы управления рисками. На примере сравнительной характеристики подходов к управлению рисками на крупнейших химических предприятиях Германии и России - «BASF» и «СИБУР», рассмотрим основные особенности зарубежного и отечественного риск-менеджмента в химической отрасли, выделим тенденции развития практики риск-менеджмента и перспективы использования зарубежного передового опыта в данной области корпоративного управления на российских предприятиях в соответствии с отраслевой спецификой.

Целью управления рисками «СИБУР» является повышение устойчивости развития компании, снижение вероятности потери части или всей стоимости компании, тогда как цель управления «BASF» – не только скорейшее выявление и оценка масштабов угроз и потерь для организации, но и определение возможностей, выгода от использования которых находится за пределами поставленных целей и задач.

Процесс управления рисками «BASF» является непрерывным и включает в себя следующие этапы:

1. *Выявление возможностей и рисков* осуществляется локально в бизнес-подразделениях с использованием различных инструментов (например, экспертные интервью), также осуществляется анализ рынка, конкуренции и окружающей среды на основе аналитической и статистической информации. В группе при этом существует контрольный перечень рисков, разработанный при вводе системы риск-менеджмента в эксплуатацию, что оказывает поддержку данного этапа.

2. *Оценка возможностей и рисков* включает в себя количественный анализ суммы доходов/расходов, а также вероятности реализации рискованных событий. Кроме того, проводится исследование количественной зависимости отдельных макроэкономических факторов (например, курсов валют и цен на сырьевые товары).

3. *Агрегирование возможностей и рисков* с учетом макроэкономических факторов осуществляется путем ранжирования по сумме последствий и вероятности возникновения (с помощью метода Монте-Карло). Также учитывается корреляция между отдельными событиями и эффект взаимодействия рискованных факторов.

4. *Осуществление мер контроля и оперативных мероприятий управления рисками* происходит на уровне отделов. Группа по управлению рисками регулярно отчитывается перед корпоративным советом, при критическом уровне какого-либо риска сообщения являются прямыми, а если сумма ущерба может составить более 10 млн eur, то совет информируется немедленно.

5. *Мониторинг и развитие системы риск-менеджмента* на ежегодной основе проводит корпоративный аудит группы. В перечень наиболее эффективных мероприятий по со-

вершенствованию системы риск-менеджмента входят сотрудничество и обмен опытом с передовыми промышленными компаниями и внешними профессионалами в области управления рисками.

Организационная структура риск-менеджмента на немецком химическом концерне BASF выглядит следующим образом (рис. 1) [3]:



Рис. 1. Организационная структура BASF

В свою очередь, в «СИБУР» принята распределенная модель управления рисками (рис. 2) [2]:

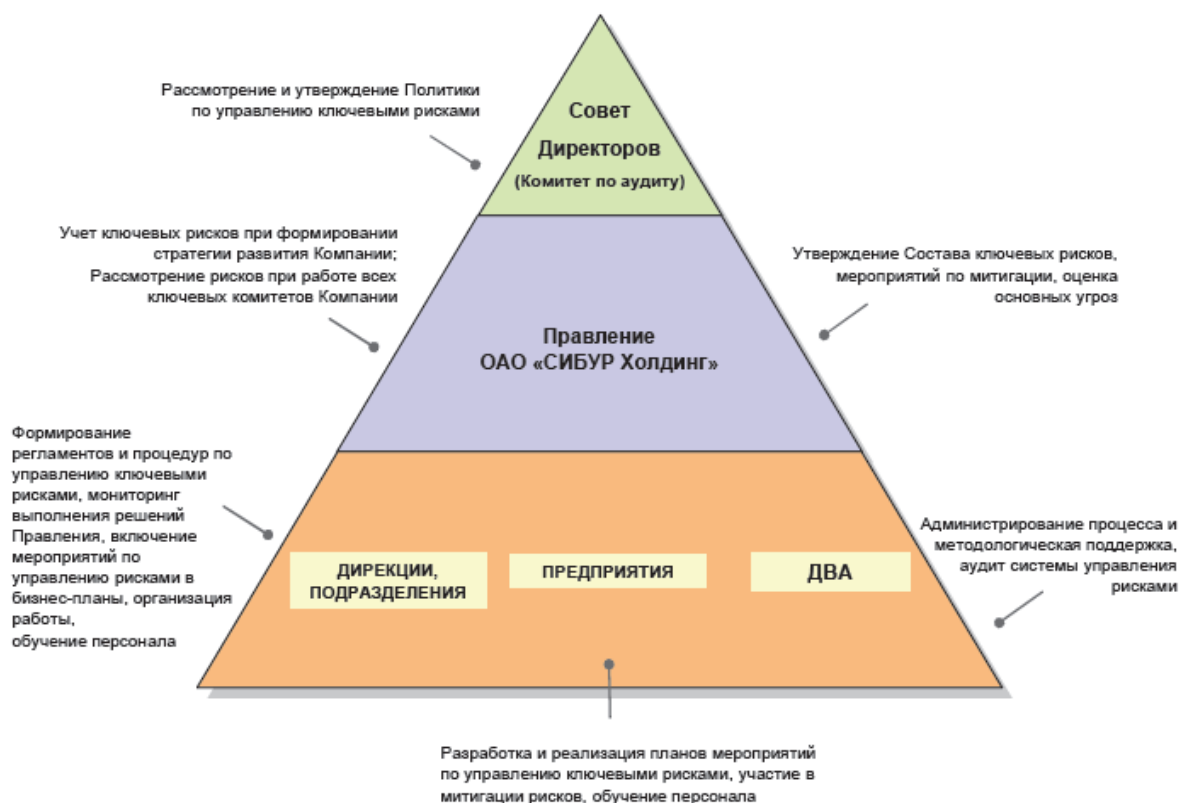


Рис. 2. Организационная модель риск-менеджмента «СИБУР»

Анализ организационно-функциональных структур риск-менеджмента двух химических компаний (немецкой и российской) показал:

1. Компании похожим образом выделяют основные источники рисков; согласно подходам обеих компаний одним из значимых источников является неопределенность внутренних бизнес-процессов и внешней экономической конъюнктуры (изменение потребительского спроса, появление технических и технологических новшеств, многовариантность сфер приложения капиталов, разнообразие критериев предпочтительности инвестирования средств, ограниченность знаний менеджеров и др.).

2. Ответственность за текущее управление рисками возлагается на руководителей структурных подразделений. Таким образом, структура обеих компаний предусматривает возложение ответственности за управление рисками на руководителей структурных подразделений, в чьей зоне ответственности возможна реализация рискового события.

3. На периодичной основе происходит актуализация и пересмотр политики риск-менеджмента.

4. Осуществляется документационное обеспечение и поддержка процесса управления рисками (разработка и утверждение политики управления рисками, регламентов и методических указаний в области управления отдельными видами рисков и др.).

5. Определяются ключевые виды рисков.

6. Достижение поставленной цели и задач риск-менеджмента отражается в ключевых показателях результативности структурных подразделений.

Основные отличительные характеристики риск-менеджмента химических предприятий, которые можно отметить, выглядят следующим образом:

1) немецкой компанией риск рассматривается не только как возможное неблагоприятное событие, но и как возможность получения дополнительных выгод и преимуществ (что отражено в цели управления рисками BASF), тогда как в «СИБУР» понятие риска «носит» явно негативный оттенок (возможность потерь);

2) отсутствие в «СИБУР» специального подразделения, единого центра агрегирования информации по рискам;

3) на BASF осуществляется двойной контроль риск-менеджмента (принцип «четырёх глаз»): корпоративный контроль на ежемесячной основе делает доклад о состоянии управления рисками, корпоративный аудит на периодичной основе пересматривает систему управления рисками в целом;

4) в процессе управления рисками BASF обязательным этапом является агрегация данных по итогам комплексной оценки всех рискообразующих факторов. Агрегация данных по рискам на российском предприятии отсутствует, осуществляется лишь консолидация данных по утвержденному перечню ключевых рисков;

5) оценка некоторых рисков на BASF осуществляется с помощью специальных поставщиков услуг (аутсорсинг одного из этапов процесса риск-менеджмента), тогда как оценка рисков «СИБУР», в рамках процесса риск-менеджмента, осуществляется самостоятельно, на основании действующих методик.

Итак, структурный анализ риск-менеджмента показал, что на немецком концерне BASF управление рисками является грамотно организованной системой, более функциональной, охватывающей все предприятие в целом, тогда как системный подход к управлению рисками в «СИБУР» только начинает применяться. Очевидно, что роль риск-менеджмента в западной компании велика, и функционирование системы управления рисками является неотъемлемой частью всей деятельности предприятия.

Формирование ключевых рисков и разработка методов управления ими в «СИБУР» проводится раз в полгода. «BASF» ранжирует риски и возможности в соответствии (и в тесной взаимосвязи) с утверждаемыми бизнес-планами (оперативными – до года, среднесрочными – от года до трех лет и долгосрочными – от трех лет до десяти лет), мониторинг по которым проводится ежемесячно. Представленные данные свидетельствуют о том, что в российской компании отсутствует комплексное внедрение управления рисками в бизнес-процессы. Действительно, Алексей Ожиганов, начальник отдела управления рисками, депар-

тамент казначейства компании «СИБУР» рассказал, что полномасштабное внедрение системы риск-менеджмента пока не входит в задачу холдинга, поскольку еще не сформирована окончательная структура компании.

«BASF» в 2010 году выделяет для себя следующие существенные риски:

- риск ухудшения экономической ситуации и нестабильность рынков;
- риск наличия сырья и волатильность цен на него;
- риск неиспользования избыточных мощностей;
- риск волатильности валютных курсов;
- прочие финансовые риски;
- нормативные и политические риски;
- возможности и риски в различных областях;
- другие зоны риска (персонал, научные исследования и разработки, информационные технологии, инвестиции и др.).

По мнению риск-менеджмента группы «BASF», в 2010 году химический холдинг, по сравнению с 2009 годом, в целом подвержен меньшим рискам, однако, по-прежнему стоит ожидать влияние экономического спада. На высоком уровне остаются такие угрозы, как нестабильность международных рынков и волатильность цен на сырье. Группа также ожидает спад спроса со стороны клиентов, связанных с отраслями, наиболее пострадавшими от кризиса (автомобильная и строительная). Значимой проблемой деятельности производственного холдинга является риск неиспользования избыточных мощностей.

Согласно решению правления «СИБУР» ключевыми рисками холдинга в 2010 году в порядке значимости являются:

- *техногенный риск* – риск возникновения аварий на ключевых производственных активах холдинга. В связи с тем, что деятельность «СИБУР» связана с эксплуатацией опасных производственных объектов, их деятельность связана с существенными техногенными рисками, таких как риски повреждения имущества или нанесения вреда здоровью и/или имуществу третьих лиц в результате взрывов, аварий, катастроф, злоумышленных действий третьих лиц и т.д.;

- *регулятивный риск* – риск, связанный с деятельностью государственных регулирующих органов. Основными факторами возникновения регулятивных рисков являются изменения законодательства (РФ и зарубежных государств), ухудшающие условия финансово-хозяйственной деятельности (например, изменение налогов, тарифов, таможенных пошлин и акцизов, ужесточение экологических норм, изменения интерпретации трактовки законодательства органами власти – ФНС, ФТС, ФСТ и др.).

- *риск информационных систем* – это риск выход из строя ключевых информационных систем и оборудования, несанкционированный доступ к конфиденциальной информации. Например, факторами возникновения риска являются противоправная деятельность сторонних организаций (всех типов) или отдельных лиц, нарушения сотрудниками установленного порядка работы со средствами ЭВТ и информационными ресурсами и др.;

- *риск нереализации организационных проектов* – это негативные события, влияющие на достижение результатов организационных проектов (качество, сроки, бюджет). Основными факторами возникновения риска являются недостаточный контроль со стороны проектных команд за деятельностью подрядчиков, низкая квалификация подрядчиков, отсутствие/нехватка квалифицированного персонала при реализации проектов и др.;

- *риск недостижения результатов инвестиционных проектов* – это негативные события, влияющие на сроки, качество и стоимость проектов. К факторам возникновения риска можно отнести: срыв сроков реализации проектов, увеличение бюджета проектов в связи с низким качеством планирования/прогнозирования как внутри проектных команд, так и у подрядчиков, низкое качество работ как в связи с низкой квалификацией подрядчиков, так и в связи с недостаточным контролем со стороны проектных команд, отсутствие/нехватка квалифицированного персонала при реализации проектов, несбалансированность с точки зрения

задействованных ресурсов основных проектных дисциплин: проектирования, строительства, материально-технического снабжения и др.;

- *рыночный риск* – это негативные события, снижающие спрос на основную продукцию, финансово-экономические цели инвестпроектов и обеспеченность предприятий холдинга попутным нефтяным газом. Факторы возникновения риска: сужение ценовых коридоров (изменение цен на ресурсы и продукцию), спекулятивное слабопрогнозируемое изменение цен на сырьё и/или готовую продукцию, неверное определение емкости рынка и др.;

- *финансовый риск* – это негативные события, влияющие на платежеспособность и ликвидность холдинга. Факторы возникновения риска: несовершенство системы экономического прогнозирования, включая прогнозирование ликвидности и денежного потока, отсутствие системы эффективного контроля за рабочим капиталом, несовершенство системы налогового планирования, несовершенство системы внутреннего контроля, сбой в функционировании финансовых рынков, ухудшение кредитного положения холдинга и др.

Таким образом, список ключевых факторов риска «BASF» и «СИБУР» значительно отличается. Если на отечественном предприятии наибольшее значение приобретают риски внутреннего характера (техногенный риск, риск информационных систем, риск нереализации организационных и инвестиционных проектов), то на зарубежном предприятии критичными являются внешние риски, связанные с волатильностью на рынках, валютных курсов. Существенные различия обусловлены, прежде всего, политическими, экономическими и социокультурными особенностями развития разных стран. Например, на «BASF» организационные и техногенные риски вполне «управляемы» и не входят в разряд ключевых. Сравнительный анализ ключевых рисков химических предприятий еще раз показывает, что бенчмаркинг на отечественных предприятиях целесообразно использовать только как один из видов управления, так как страновая специфика не позволит эффективно использовать западные технологии.

Итак, сравнение основных аспектов риск-менеджмента предприятий химической отрасли на отечественном и зарубежном предприятии показывает наличие как общих, так и специфических проблем, в большей или меньшей степени влияющих на эффективность применения инструментов управления рисками. Наиболее существенными препятствиями внедрения системы или степени эффективности существующих процедур риск-менеджмента как на зарубежных, так и отечественных предприятиях является отсутствие интеграции риск-менеджмента в корпоративную культуру и отношение топ-менеджмента к внедрению и формализации процессов управления рисками. Следует отметить, что включение успешности мероприятий, проводимых в рамках процедур управления рисками, в список ключевых показателей результативности и эффективности руководителей различного ранга осуществляется как на «BASF», так и на «СИБУР», что является значительным прорывом в осознании значимости процесса управления рисками для отечественных предприятий. В настоящее время, основной причиной наиболее интенсивного развития риск-менеджмента за рубежом становятся не только ужесточение требований регуляторов рынков и законодательств, но и возрастание ответственности топ-менеджмента перед собственниками бизнеса. Во многих зарубежных компаниях риск в сознании топ-менеджмента перестает быть синонимом угрозы, теперь он представляет скорее угрозу и возможность (что наглядно демонстрируют общие тезисы политики риск-менеджмента в химическом концерне «BASF»). В отличие от отечественных предприятий, крупнейшие (например, европейские) компании уже осуществили переход от изолированного управления рисками в отдельных подразделениях к интегральной, комплексной системе управления рисками. При этом необходимо, чтобы за управление рисками отвечали все сотрудники организации, а риск-менеджер выступал лишь как координатор действий. Таким образом, основной тренд европейского бизнеса последнего десятилетия – переход от соблюдения компаниями установленных требований к действиям, выгодным самому менеджменту, основанных на комплексном управлении рисками, только начинает перениматься отечественными компаниями. Сравнивая риск-менеджмент зарубежного и

отечественного химического предприятия в разрезе отраслевой специфики, следует отметить наличие общих угроз: к ключевым факторам риска оба предприятия относят зависимость от поставщиков сырья (наличие, колебания цен и др.), к значимым рискам, находящимся на постоянном контроле, относят экологические и отраслевые риски. Набор инструментов управления тем или иным видом риска также имеет достаточное сходство между собой (страхование, лимитирование и др.). Однако изначально принципиально разная постановка целей риск-менеджмента двух рассмотренных компаний отражает основные отличия существующих подходов в управлении рисками, присущие отечественным компаниям в сравнении с более развитыми зарубежными компаниями в целом: отсутствие комплексного подхода и одностороннее использование двойственной природы риска, а между тем, риск не только угроза, но и возможность.

Библиографический список

1. A Risk Management Standard. AIRMIC, ALARM, IRM: 2002 [Электронный ресурс]. – Эл. Текстовые данные (360 Кб). – FERMA, 2003.
2. Годовой отчет ОАО СИБУР Холдинг: 2009 год [Электронный ресурс]. - Эл. текстовые данные (1,31 Мб). - Режим доступа: <http://www.sibur.ru/pages/rus/7207/7304/7377/index.shtml>. Дата обращения: 07.12.2010.
3. Отчет о рисках BASF. 2002 [Электронный ресурс]. – Эл. текстовые данные (340 Кб). - Режим доступа: <http://www.basf.com/group/corporate/en/investor-relations/corporate-governance/risk-management>. Дата обращения: 07.12.2010.
4. Стандарт COSO ERM. Управление рисками организации. Интегрированная модель. [Электронный ресурс]. – Эл. текстовые данные (334 Кб). – М.: Делойт, 2004.
5. **Шемякина, Т.** ERM: модно или полезно? // Риск-менеджмент. 2007. №9. С. 8.

*Дата поступления
в редакцию 25.04.2011*

A.A. Sharova

FOREIGN INDUSTRIAL ENTERPRISES RISK-MANAGEMENT EXPERIENCE (I.E. CHEMICALS AND UTILITIES SECTOR ENTERPRISE)

An analysis of major approaches and principles of risk-management as applied in Russia and abroad demonstrates not only similar ideas (approaches) but also a number of fundamental differences. The article gives a comparative analysis of risk-management systems in large-scale chemical enterprises of Russia and Germany ("SIBUR" and "BASF", respectively) as well as demonstrates the basic/main peculiarities and perspectives for the development of Russian chemical enterprises risk-management.

Key words: risk-management, enterprise risk-management, chemical enterprises.

УДК 339

Ф.Ф. Юрлов, Л.А. Таскина

**УЧЕТ ИНТЕРЕСОВ РАЗЛИЧНЫХ ЗАИНТЕРЕСОВАННЫХ СТОРОН
ПРИ СТРАТЕГИЧЕСКОМ ПЛАНИРОВАНИИ И УПРАВЛЕНИИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В настоящей работе проблема выбора эффективных решений при СПУ рассматривается применительно к предприятиям, имеющим стратегическое значение. При этом предлагается учёт интересов сторон, заинтересованных в результатах функционирования стратегических предприятий и организаций.

Ключевые слова: эффективность; стратегическое планирование; стратегические предприятия; показатели; стратегические решения; заинтересованные стороны.

Стратегическое планирование и управление СПУ является мощным средством повышения эффективности общественного производства. Составной частью СПУ является выбор эффективных стратегических решений. В настоящее время распространённым способом указанного выбора является портфельный анализ. Теории и практике портфельного анализа посвящено значительное количество научных работ в зарубежной и отечественной литературе. Однако, несмотря на достаточно широкое распространение данного подхода к выбору стратегических решений, он имеет определённые ограничения. В частности, это относится к определению критериев эффективности указанных решений и их количеству. Матричный подход, который используется при портфельном анализе, базируется на применении двух критериев (показателей) эффективности анализируемых объектов. В общем случае требуется использование многокритериального подхода к решению задач стратегического планирования и управления.

В настоящей работе проблема выбора эффективных решений при СПУ рассматривается применительно к предприятиям, имеющим стратегическое значение. При этом предлагается учёт интересов сторон, заинтересованных в результатах функционирования стратегических предприятий и организаций. Характерной особенностью стратегического планирования и управления является необходимость определения свойств внешней среды при разработке стратегий развития хозяйствующих субъектов. При переходе к рыночным способам хозяйствования данная особенность является определяющей при сравнении методов планирования в централизованной и рыночной экономиках. В общем случае внешняя среда может характеризоваться следующими группами факторов: природными, организационными, рыночными, внешнеэкономическими, политическими и др.

В соответствии с терминологией, используемой при стратегическом планировании и управлении, внешняя среда представляется состоящей из двух частей: микросреды и макросреды.

Микросреда обычно включает ближнее окружение хозяйствующего субъекта (предприятия, производственного комплекса, научной организации, территориального образования и т.п.), с которым оно взаимодействует непосредственно. Применительно к промышленному предприятию к характерным представителям ближнего окружения можно отнести: поставщиков, потребителей, конкурентов, инвесторов, кредитно-финансовые учреждения и др.

Макросреда характеризуется следующими составляющими: финансово-кредитная политика правительства, демографическая обстановка в стране и в том или ином регионе, политическая ситуация, международные отношения, законодательство, налоговая политика, инфляционные процессы и т.п.

Таким образом, при анализе внешней среды потребуется выделить две группы факторов: факторы, определяемые на микроуровне и факторы, рассматриваемые на макроуровне.

В данном случае, в качестве указанных факторов могут выступать критерии (показатели), которые используют указанные представители внешней среды для оценки эффективности своих действий (например, эффективность стратегий при стратегическом планировании и управлении).

Каждый из представителей внешней среды будет характеризоваться своим набором критериев (показателей) эффективности принимаемых решений. В общем случае указанные критерии являются противоречивыми, т.е. улучшение какого либо критерия может привести к ухудшению других критериев. Поэтому выбор оптимальных решений по совокупности критериев (показателей) существенно усложняется. Требуется многокритериальный подход к выбору наиболее предпочтительных решений при стратегическом планировании и управлении. Необходимость многокритериального выбора возникает в ситуациях, когда осуществляется оценка эффективности стратегий с позиций единственного участника (заинтересованной стороны). Ситуация значительно усложняется при наличии нескольких участников стратегического планирования и нескольких сторон, заинтересованных в его результатах. В рассматриваемых ситуациях наряду с проблемой многокритериальности возникает проблема учёта интересов различных заинтересованных сторон при выборе наиболее эффективных стратегий развития хозяйствующих субъектов.

В соответствии с подходами, используемыми в экономической литературе при анализе состояния предприятий и организаций, рассматриваются следующие группы, заинтересованные в результатах деятельности хозяйствующих субъектов: владельцы (инвесторы), менеджеры; заимодавцы (кредиторы); персонал; профсоюзы; правительственные учреждения; общество в целом. Располагая указанным набором заинтересованных в деятельности предприятий и организаций сторон, можно произвести примерное ранжирование их важности.

Первое место в данном ранжировании можно дать собственникам предприятий и организаций, т.к. они рискуют собственным капиталом и иными средствами при организации того или иного бизнеса. Владельцы предприятий в наибольшей степени заинтересованы в долгосрочной и краткосрочной прибыльности вкладываемых средств. В качестве важных показателей успешности предприятий они рассматривают показатели роста дивидендов и прибыли, приходящейся на акцию. Улучшение указанных показателей приводит к росту стоимости вложений, осуществляемых владельцами предприятий.

Следующей категорией лиц, заинтересованных в результатах деятельности предприятий, являются менеджеры, которые осуществляют их текущую деятельность. Они отвечают за повышение эффективности производства и обеспечение заданных экономических показателей: выручки, прибыли, рентабельности, оборачиваемости, финансовой устойчивости и др. Заинтересованность менеджеров обусловлена рядом факторов, к которым можно отнести: уровень заработной платы, в зависимости от экономических результатов предприятия, карьерный рост, повышение квалификации и т.п.

Далее следует категория заимодавцев (кредиторов), которые предоставляют предприятиям и организациям капитал на различные сроки. В качестве показателей эффективности вкладываемого ими капитала можно указать следующие показатели: надёжность выплат по процентам, способность должников вернуть сумму задолженности, обеспечение кредита активами должников, минимизация риска финансовых или иных вложений.

Особую группу заинтересованных лиц представляет правительство в лице исполнительных органов власти разных уровней управления. В зависимости от типа предприятий они могут иметь первостепенное значение или иметь не главную роль в деятельности предприятий. В качестве показателей, которые представляют интерес для органов власти, можно указать: уровень налогов, надёжность их уплаты, охрану окружающей среды, занятость населения, уровень безработицы, своевременную выплату подлежащей заработной платы работникам предприятий, демографические факторы и т.п.

Важную роль в решении рассматриваемой проблемы играет общественность, которую могут представлять: профсоюзы, СМИ, различные партии, население и др. Общественную

группу могут интересовать такие показатели как: экология, криминогенная обстановка в данном регионе, условия труда, социальные факторы и т.п.

Таким образом, при стратегическом планировании предприятий необходимо учитывать интересы различных участников и заинтересованных сторон. В общем случае эти интересы не совпадают. Поэтому потребуется поиск тех или иных схем компромисса, которые позволяют принимать компромиссные решения с учётом интересов каждого участника и каждой заинтересованной стороны.

При определении интересов различных сторон, необходимо учитывать тип анализируемых предприятий. Особенно это относится к предприятиям, имеющим стратегическое значение. В соответствии с определением стратегических предприятий, приведённым в Федеральном законе «О несостоятельности (банкротстве)», указанные предприятия являются государственными унитарными. Перечень этих предприятий утверждается Правительством Российской Федерации. Отсюда непосредственно следует, что при определении целей и задач различных сторон, заинтересованных в результатах деятельности стратегических предприятий, приоритет имеют государственные органы власти. При определении целей государственных органов власти следует наряду с экономическими факторами учитывать социальные, экологические и иные последствия принимаемых решений.

Одной из задач СПУ при анализе стратегических предприятий, является оценка их состояния. Методика анализа финансового состояния и платёжеспособности стратегических предприятий и организаций базируется на учёте двух показателей: коэффициента текущей ликвидности и коэффициента платёжеспособности по текущим обязательствам.

В этом случае, наряду с указанными показателями потребуется учитывать набор других показателей, которые имеют не только экономическое содержание. Особенно это относится к предприятиям оборонно-промышленного комплекса, топливно-энергетического комплекса.

При выборе наиболее эффективных стратегических решений возникает необходимость решения различных по содержанию задач. Для успешного их анализа необходимо определенное упорядочение этих задач с целью определения адекватных способов решения. В настоящей статье приводятся классификации указанных задач с учетом интересов различных участников и заинтересованных сторон. В качестве основных типов задач предлагаются классификации их по следующим параметрам:

1. По количеству участников:

- с одним участником;
- с несколькими участниками;
- с несколькими группами участников.

Ситуация с одним участником может иметь место, когда выбор стратегических решений осуществляется единственным хозяйствующим субъектом (например, промышленным предприятием). В данном случае отсутствует противоречие между участниками принятия стратегических решений.

При наличии нескольких участников, в качестве различных участников могут выступать: поставщики, потребители, инвесторы, кредиторы и т.п. Интересы указанных участников в общем случае будут несовпадающими. При этом в общем случае оптимальные решения каждого из участников будут различными. Поэтому потребуется согласование этих интересов и поиск схем принятия согласованных решений.

Ситуация с несколькими группами участников может возникнуть когда несколько участников объединяются в виде коопераций. Указанные кооперации могут создаваться, например, в процессе реструктуризации предприятий. В данном случае возможны следующие типы противоречий: противоречия между членами каждой из групп и противоречия между участниками, принадлежащими к той или иной группе. Возникает проблема согласования интересов указанных коопераций с помощью тех или иных схем компромисса.

2. По количеству заинтересованных сторон:

- с одной заинтересованной стороной;
- с несколькими заинтересованными сторонами;
- с несколькими группами заинтересованных сторон.

Отличие заинтересованных сторон от участников принимаемых решений заключается в том, что они не участвуют непосредственно в разработке тех или иных процессов и не затрачивают при этом каких-либо средств. Однако при этом заинтересованные стороны имеют различные интересы. В качестве заинтересованных сторон могут выступать: органы власти разных уровней управления, общественные организации, конкуренты и т.п. В ряде случаев отдельные заинтересованные стороны могут вступать в коалиции, представляющие те или иные интересы.

В данных ситуациях потребуется определять, какие интересы преследует каждая из заинтересованных сторон, а также интересы отдельных групп. Способы согласования указанных интересов могут отличаться от способов согласования интересов участников, рассмотренных ранее.

3. В зависимости от интересов участников различают задачи:

- принятия решений при наличии совпадающих интересов участников;
- с прямо противоположными (антагонистическими) интересами;
- с несовпадающими , но не антагонистическими интересами.

Первый тип задач является наиболее простым и не требует применения схем компромисса при выборе эффективных решений.

При наличии прямо противоположных интересов для принятия предпочтительных решений могут быть использованы методы теории антагонистических игр. В соответствии с этой теорией могут быть разрешены конфликты, которые могут иметь место при принятии стратегических решений.

В ситуациях, когда интересы участников не совпадают, но не являются антагонистическими, находит применение теория игр с не противоположными интересами. Такие ситуации являются наиболее характерными для анализа социально-экономических процессов. В отличие от ситуаций, когда интересы участников являются антагонистическими, в данном случае они могут образовывать коалиции. При этом может быть достигнут эффект синергии, при котором эффективность принятия решений повышается.

4. В зависимости от интересов заинтересованных сторон.

Данная ситуация аналогична ситуации с определением интересов участников тех или иных проектов. Здесь также необходим поиск тех или иных схем компромиссов, с помощью которых выбираются компромиссные решения. Однако методы разрешения противоречий заинтересованных сторон могут отличаться от методов, используемых участниками.

5. По степени определенности внешней среды.

Принятие стратегических решений невозможно без анализа состояния внешней среды. Применительно к рыночной экономике данное положение является особенно актуальным. В зависимости от степени определенности (предсказуемости) внешней среды возможны следующие типы задач:

- детерминированные;
- вероятностные;
- задачи с полной неопределенностью.

Детерминированные задачи выбора предпочтительных решений имеют широкое распространение в теории и практике оценки эффективности систем различного назначения. При их решении считается, что могут быть получены точные результаты исследований. Детерминированный подход к решению рассматриваемой проблемы во многих случаях неадекватно отображает реальные экономические процессы. Точное определение экономических показателей в условиях рыночной экономики является обычно проблематичным. Поэтому требуется применение иных подходов к выбору стратегических решений.

Распространенным направлением решения данной проблемы является использование

вероятностного подхода. В отличие от детерминированных задач вероятностные задачи описываются вероятностными характеристиками анализируемых процессов. Применение вероятностных моделей во многих случаях позволяет снизить риск принятия стратегических решений. Однако при их использовании возможны трудности, обусловленные недостатком информации о законах и параметрах распределения внешней среды. Поэтому возникает необходимость принятия решений при условии, что вероятностные характеристики анализируемых систем являются неизвестными.

В ситуациях, когда не удастся применить вероятностные модели, возникает необходимость принятия решений в условиях полной неопределенности. Указанная неопределенность характеризуется набором неуправляемых факторов. В качестве неуправляемых факторов могут выступать: действия конкурентов, природные условия, инфляционные процессы и т.п. При этом считается, что набор факторов внешней среды является известным, но неизвестно какой из факторов будет действовать в рассматриваемой ситуации.

6. По уровням анализа стратегических решений различают одноуровневые и многоуровневые задачи.

В качестве уровней анализа могут выступать: федеральный, региональный, областной, уровни предприятия и т.д. На каждом из уровней формулируются свои цели, средства достижения целей, критерии эффективности, методы анализа. В виду их различия возникают противоречия при выборе наиболее предпочтительных решений.

Примером одноуровневого анализа является оценка эффективности принимаемых решений на уровне промышленного предприятия. Анализ деятельности отдельных бизнес-единиц и всего предприятия в целом является двухуровневым.

Многоуровневый подход к решению поставленных задач является частью системного подхода, который находит применение при решении различных проблем: социально-экономическом прогнозировании, стратегическом планировании, оценке эффективности инвестиционных решений и во многих других случаях. Такой подход позволяет комплексно решать поставленные задачи с учетом технических, экономических, социальных и иных факторов.

7. По типу применяемых критериев эффективности принимаемых решений находят применение:

- экономические;
- социальные;
- экологические;
- инновационные и другие критерии.

В общем случае применение каждого из критериев приводит к различным выводам относительно эффективности принимаемых решений. Поэтому возникает необходимость поиска компромиссных решений с учетом различных критериев.

8. По количеству применяемых критериев различают задачи:

- однокритериальные;
- многокритериальные;
- с однородной группой критериев;
- характеризующиеся наличием нескольких групп критериев.

Однокритериальный подход находит ограниченное применение при решении экономических задач, так как в общем случае приходится решать многокритериальные задачи. Однако в ряде случаев он находит применение. Например, в централизованной экономике в качестве основного критерия оценки эффективности систем различного назначения употреблялся критерий минимума общественно-необходимых затрат. Данный критерий использовался при условии, что анализируемые альтернативы удовлетворяли принципу тождества полезного результата. В рыночной экономике, как правило, используется многокритериальный подход к решению рассматриваемой проблемы. Однако при этом находит применение формирование комплексных показателей на базе имеющейся совокупности частных показате-

телей. В данном случае используются интегральные показатели эффективности принимаемых решений.

При применении многокритериального подхода возникают два вида противоречий:

- между показателями, принадлежащими к той или иной группе;
- между показателями, принадлежащими к разным группам.

Наличие указанных противоречий приводит к различным решениям, которые получаются при использовании каждого из критериев. Требуется устранение или снижение уровня указанных противоречий.

9. По количеству объектов анализа различают:

- наличие одного объекта;
- наличие нескольких объектов.

В первом случае определяется собственная эффективность одного объекта. При этом применение нескольких критериев эффективности может привести к одному и тому же результату анализа. Например, применение критериев чистой текущей стоимости, индекса доходности, внутренней нормы доходности и срока окупаемости инвестиций приводит к одному и тому же выводу относительно эффективности проекта.

Во втором случае приходится сравнивать несколько альтернатив и выбирать наиболее предпочтительное решение. В данном случае применение каждого из критериев может привести к различным выводам относительно эффективности проектов. Возникает необходимость принятия согласованных решений на основе многокритериального подхода. С этой целью находит применение различные принципы оптимальности принимаемых решений. К этим принципам относятся: принцип доминирования, принцип Парето, принцип формирования комплексных показателей, принцип выделения главного показателя и перевод остальных в разряд ограничений и другие. В общем случае для повышения объективности анализируемых систем имеется необходимость применения указанных принципов в комплексе.

Библиографический список

1. **Юрлов, Ф.Ф.** Методы и модели в экономике: учебник / Ф.Ф. Юрлов [и др.]; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. - Нижний Новгород, 2010. – 234 с.
2. **Юрлов, Ф.Ф.** Стратегические предприятия: оценка экономического состояния, стратегическое планирование и управление, прогнозирование: монография / Ф.Ф. Юрлов [и др.]; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2008. – 240 с.

*Дата поступления
в редакцию 25.04.2011*

F.F. Urlov, L.A. Taskina

THE ACCOUNT OF INTERESTS OF VARIOUS INTERESTED PARTIES AT STRATEGIC PLANNING AND MANAGEMENT

In the present work the problem of selection of effective solutions at strategic planning and management is considered in the terms of enterprises having strategic value. Thus the account of interests of various parties which are interested in results of functioning of the strategic organisations and enterprises is proposed.

Key word: effectiveness; strategic value; strategic enterprises; characteristic; strategic decisions; interested parties.

УДК 338.45

С.Н. Яшин, О.С. Боронин

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В настоящее время при оценке эффективности инновационных проектов распространен подход, ориентированный на анализ только экономических показателей. В статье представлены основные положения разработанного инструментария для многокритериальной оценки эффективности инновационного проекта. Методика предусматривает определение обобщенного интегрального показателя эффективности для каждого проекта.

Ключевые слова: инноватика, методический подход, комплексный показатель, типы инноваций, инновационный проект, интегральный показатель, математический инструментарий оценки, классификационный критерий.

В настоящее время Правительством РФ и руководителями регионов в рамках формирования национальной инновационной экономики все больше внимания уделяется необходимости инновационного развития предприятий, одним из направлений которого является успешное внедрение научно-технических разработок. Для этого на уровне государства, а также территориальных образований и отдельных хозяйствующих субъектов утвержден ряд нормативных актов и целевых программ, направленных на стимулирование инновационных процессов в стране.

Кроме государственного значения, успешно реализованные инновационные проекты являются важнейшими факторами поддержания конкурентоспособности предприятий и роста их стоимости. В то же время недостаточный уровень финансирования в инновационное развитие предприятий приводит к их техническому и технологическому отставанию от конкурентов, а, следовательно, к снижению финансовых результатов производственной деятельности.

В современных экономических условиях, когда высока неопределенность коммерческого успеха, велики затраты финансовых ресурсов, предприятиям целесообразно ориентироваться на перспективные эффективные инновационные проекты. Это обуславливает необходимость в комплексном анализе эффективности вовлечения новшеств, связанных с реализацией инновационных проектов, в хозяйственный оборот, в определении не только экономической результативности научно-технических разработок, но и социальных, экологических и других показателей эффективности проектов. В этой связи, важной задачей становится формирование инструментария и методов оценки эффективности инновационных проектов, позволяющих учесть заинтересованность разных участников, которыми могут выступать и государственные структуры.

При этом следует отметить, что в настоящее время отсутствует единый утвержденный в нормативных документах инструментарий оценки эффективности инновационных проектов, предусматривающий возможность их ранжирования.

Одним из вариантов решения анализируемой проблемы является формирование подходов к созданию совокупности показателей эффективности инновационных проектов и предложение методов для приведения их в сопоставимый вид для сравнения.

На основании анализа теоретических исследований и нормативных документов в области понятия «*эффективность инновационного проекта*», а также использования системного подхода, выделим основные направления и показатели оценки эффективности инновационных проектов.

Несмотря на некоторую общность методов оценки эффективности инвестиционных и

инновационных проектов, последние обладают рядом специфических особенностей, которые обусловлены следующими факторами: более широкий круг участников, обязательное проведение сравнительного анализа показателей эффективности проекта, многокритериальность оценки, принципиальная новизна объекта реализации инновационного проекта.

Предприятия заинтересованы в том, чтобы обезопасить себя от потери вложенных средств и получить максимальную прибыль. Для этого в настоящее время руководители используют в основном инструментарий и методы, изложенные в нормативном документе «Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов» (далее – Рекомендации). Однако указанные Рекомендации не позволяют в полной мере объективно оценить с точки зрения эффективности реализации новшеств данные специфические особенности инновационных проектов.

На основании анализа научных работ отечественных и зарубежных исследователей, посвященных данной проблеме, и используя системный подход при учете многогранности понятия «*эффективность*», многообразия инноваций в деятельности предприятий и их результатов, а также специфики инновационных проектов, выделены основные направления оценки их эффективности, представленные в табл. 1.

Таблица 1

**Основные направления оценки эффективности
инновационных проектов**

Фактор	Наименование
По составу участников	<i>Коммерческая</i> (финансовая) <i>эффективность</i> (учет финансовых последствий реализации проекта для его непосредственных участников). <i>Бюджетная эффективность</i> (отражающая финансовые последствия осуществления проекта для федерального, регионального или местного бюджетов). <i>Народнохозяйственная экономическая эффективность</i> (учитывает затраты и результаты, связанные с реализацией проекта, выходящие за пределы прямых финансовых интересов участников проекта).
По виду эффекта	<i>Экономический</i> (чистый денежный поток, чистая приведенная стоимость, индекс прибыльности, рентабельность инвестиций, дисконтированный срок окупаемости инвестиций, внутренняя норма рентабельности, средневзвешенная стоимость капитала, коэффициент эффективности инвестиций). Показатели учитывают в стоимостном выражении все виды поступлений и затрат, обусловленные реализацией инновационного проекта. <i>Социальный</i> (показатели учитывают социальные результаты реализации инновационного проекта). <i>Экологический</i> (показатели уровня шума, объема выбросов, вибрации и др.). Показатели учитывают влияние инновационного проекта на окружающую среду. <i>Технический</i> (показатели новизны, надежности, компактности и др.). <i>Комплексный</i> (показатели, характеризующие влияние инновации на экономическую эффективность предприятия в целом: показатели роста выручки, прибыли, производительности труда и др.).
По времени соотнесения	<i>Фактическая</i> <i>Плановая</i>

Выделение разных видов эффектов, необходимость их оценки; разнообразие участников проекта, которые стремятся реализовать свои, иногда противоречащие друг другу целевые установки, позволяет считать задачу количественной оценки эффективности реализации инновационных проектов весьма сложной. На наш взгляд, в основе решения данной задачи лежит следующая последовательность действий (рис. 1).



Рис. 1. Этапы разработки инструментария оценки эффективности инновационных проектов

Принятие решений при проектировании инновационных проектов, основанных на технических исследованиях, а также определение эффективности и целесообразности их реализации связано с необходимостью учета многих факторов. В этих условиях одной из предпосылок получения рациональных решений является использование системного подхода, предусматривающего многокритериальную оценку эффективности проектов.

Для формирования инструментария оценки эффективности инновационных проектов предлагается выделить пять групп интегральных показателей, каждая из которых характеризует свой аспект реализации инновационного проекта (рис. 2). На наш взгляд, предложенная система критериев позволяет проводить полную комплексную экспертизу инновационного проекта, учитывающую все возможные эффекты и последствия, которые могут возникнуть при его реализации.



Рис. 2. Система интегральных показателей оценки эффективности инновационного проекта

Таким образом, комплексная оценка инновационных проектов заключается в определении уровня эффективности проекта по совокупности интегральных показателей, характеризующих экономические, технические, социальные, экологические и другие аспекты вложения инвестиций.

Выделив группы, согласно последовательности, приведенной на рис. 1, целесообразно предложить методы расчета экономических, технико-экономических, социально-экономических, эколого-экономических критериев и показателей влияния на экономику предприятия с учетом интересов разных участников инновационного проекта.

Следующий этап формирования инструментария заключается в разработке метода

формирования совокупности интегральных показателей, позволяющего приводить разноразмерные критерии к сопоставимому виду, общему началу отсчета и единому интервалу измерения. При этом используем следующие допущения и рассуждения.

Информационной базой для расчета интегральных показателей являются различные формы отчетности предприятия и статистические данные.

Значения рассчитанных интегральных показателей эффективности по каждому проекту X_{ijk} (здесь $i = 1 \dots N$ - номер рассматриваемого инновационного проекта, $j = 1 \dots 5$ - номер группы эффективности, $k = 1 \dots M$ - номер показателя в группе эффективности) вписываются в соответствующие колонки табл. 2.

Поскольку рассчитанные критерии эффективности отличаются различной размерностью, предлагается стандартизировать их путем приведения к безразмерному виду с помощью расчета относительных показателей.

Относительная оценка k -го показателя в j -й группе эффективности i -го проекта q_{ijk} определяется двумя способами:

1) в том случае, если между эффективностью i -го проекта и значением k -го показателя в j -й группе эффективности действует прямая зависимость, то есть при росте значения k -го показателя в j -й группе эффективности эффективность i -го проекта увеличивается, то расчет q_{ijk} проводим по формуле:

$$q_{ijk} = \frac{X_{ijk} - X_{jk \min}}{X_{jk \max} - X_{jk \min}}; \quad (1)$$

2) в том случае, если между эффективностью i -го проекта и значением k -го показателя в j -й группе эффективности действует обратная зависимость, то расчет q_{ijk} проводим по формуле:

$$q_{ijk} = \frac{X_{jk \max} - X_{ijk}}{X_{jk \max} - X_{jk \min}}; \quad (2)$$

где X_{ijk} - значение k -го показателя в j -й группе эффективности для i -го проекта; $X_{jk \min}$, $X_{jk \max}$ - соответственно минимальное и максимальное значения k -го показателя в j -й группе эффективности для сравниваемых проектов (базовый показатель).

Для расчета коэффициентов значимости в силу большого разнообразия показателей целесообразно использовать два подхода.

1 подход. В условиях неопределенности, когда показатели эффективности можно ранжировать по их приоритету на *количественном* уровне, для расчета коэффициентов значимости отобранных интегральных показателей используем метод *экспертного ранжирования*.

2 подход. В условиях неопределенности, когда показатели эффективности можно проранжировать по приоритету *лишь на качественном* уровне ("очень важно" - "важно" - "менее важно" и т.п.), коэффициенты значимости этих показателей рассчитаем на основе оценок Фишборна по формуле:

$$C_j = \frac{2 \cdot (y - j + 1)}{y \cdot (y + 1)}, \quad (3)$$

где y - количество рассматриваемых категорий показателей эффективности инновационных проектов; j - номер соответствующей категории.

При этом должно соблюдаться условие, что сумма коэффициентов значимости всех интегральных показателей равна единице:

$$\sum_{j=1}^5 C_{jk} = 1, \quad (4)$$

где $j = 1 \dots 5$ - номер группы эффективности, $k = 1 \dots M$ - номер показателя в j -й группе эффективности.

Коэффициенты значимости C_{jk} , рассчитанные обоими методами, вписываются в соответствующую колонку таблицы показателей эффективности (табл. 2).

Таблица 2

**Матрица многокритериальной оценки
инновационных проектов**

Показатели эффективности ИП	Проект				Базовый показатель	Коэф ф-т значимости
	№1	№2	№3	N		
1. Экономические показатели						
1. Чистый приведенный доход (NPV), тыс. руб.	q_{111}	q_{211}	q_{311}	q_{N11}	$X_{11\max}$	C_{11}
	X_{111}	X_{211}	X_{311}	X_{N11}		
...
2. Техничко-экономические показатели						
1. Интеллектуало- емкость проекта (И)	q_{121}	q_{221}	q_{321}	q_{N21}	$X_{21\max}$	C_{21}
	X_{121}	X_{221}	X_{321}	X_{N21}		
...
3. Показатели влияния реализации ИП на экономику предприятия						
1. Изменение охвата сегмента рынка ($\Delta V_{\text{сег.р.}}$)	q_{131}	q_{231}	q_{331}	q_{N31}	$X_{31\max}$	C_{31}
	X_{121}	X_{231}	X_{331}	X_{N31}		
...
4. Соци ально-экономические показатели						
1. Уменьшение эконом. последствий от дорож. происшествий ($\mathfrak{E}_{\downarrow\text{ДТП}}$), млн. руб.	q_{141}	q_{241}	q_{341}	q_{N41}	$X_{41\max}$	C_{41}
	X_{141}	X_{241}	X_{341}	X_{N41}		
...
5. Эколого-экономические показатели						
1. Уменьшение шума от транспорта ($\Delta Y_{\text{ш}}$)	q_{151}	q_{251}	q_{351}	q_{N51}	$X_{51\max}$	C_{51}
	X_{151}	X_{251}	X_{351}	X_{N51}		
...
Обобщенный показатель проекта (Q_i)	Q_1	Q_2	Q_3	Q_N	-	-

В табл. 2 X_{ijk} - значение k -го показателя в j -й группе эффективности для i -го проекта, q_{ijk} - относительная оценка k -го показателя в j -й группе эффективности i -го проекта, C_{jk} - коэффициент значимости k -го показателя в j -й группе эффективности.

Таким образом, через определение относительных оценок показателей q_{ijk} и расчет коэффициентов их значимости C_{jk} все интегральные разноразмерные критерии приводятся в сопоставимый между собой вид.

Предлагаемый алгоритм оценки эффективности инновационных проектов и их ранжирования представлен на рис. 3.

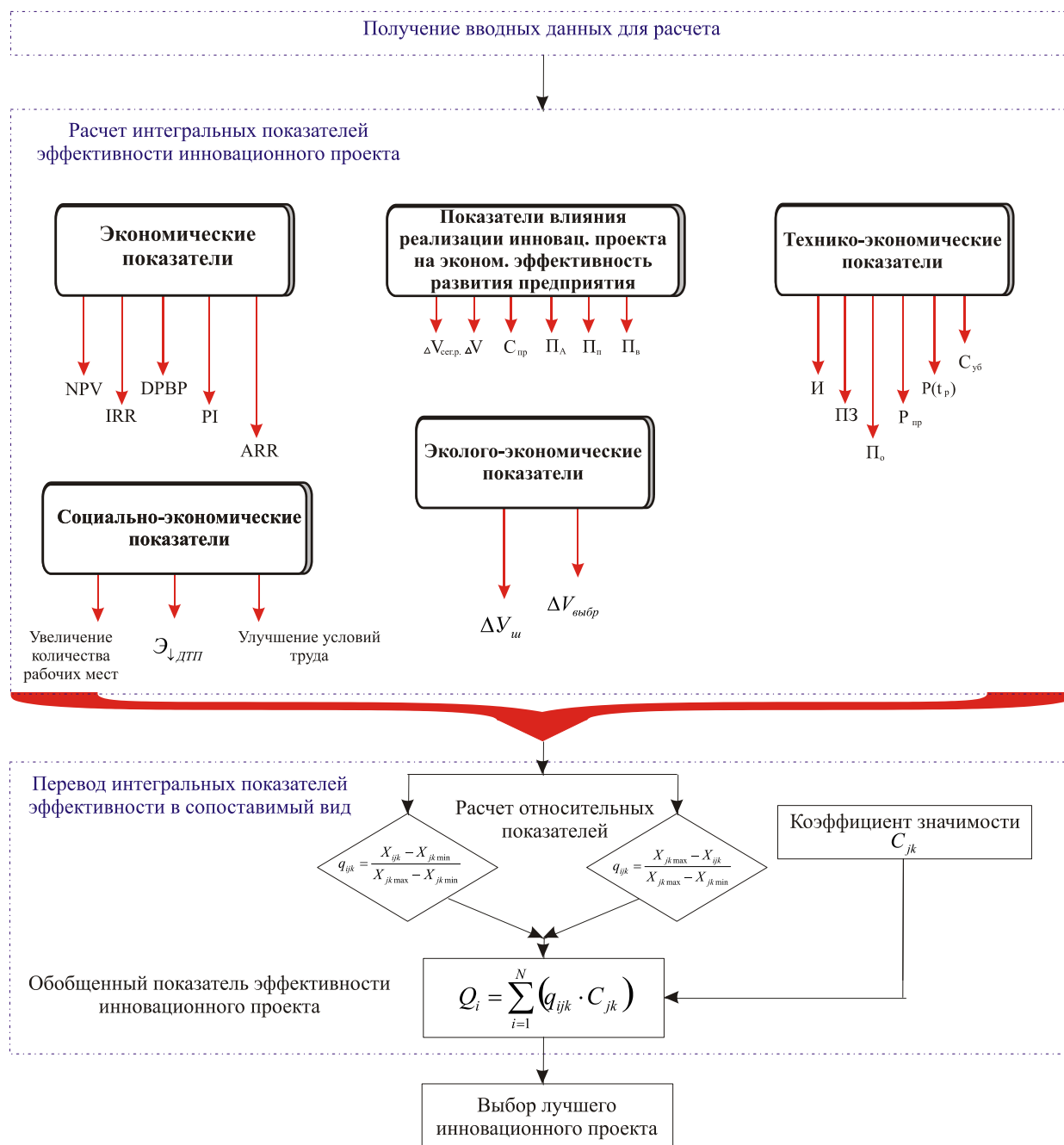


Рис. 3. Алгоритм выбора лучшего инновационного проекта на основе оценки его эффективности

Обобщенный показатель эффективности i -го проекта Q_i определяется как сумма безразмерных относительных оценок всех показателей q_{ijk} , взвешенных с помощью коэффициентов значимости C_{jk} по следующей формуле:

$$Q_i = \sum_{j=1}^N (q_{ijk} \cdot C_{jk}) \quad (5)$$

где q_{ijk} - относительная оценка k -го показателя j -й группы эффективности i -го проекта; $i = 1 \dots N$ - порядковый номер инновационного проекта; N - общее количество сравниваемых инновационных проектов; $j = 1 \dots 5$ - номер группы эффективности; $k = 1 \dots M$ - номер показателя в j -й группе эффективности; C_{jk} - коэффициент значимости k -го показателя в j -й группе эффективности.

После расчета обобщенного показателя для всех проектов по значению Q_i определяется их рейтинг и производится выбор лучшего инновационного проекта.

Преимуществом предложенного метода является то, что он позволяет не ограничивать число анализируемых показателей эффективности инновационных проектов. Число показателей должно быть достаточным для учета интересов различных заинтересованных лиц при выборе наиболее эффективного проекта.

Предложенные авторами инструментарий и методы оценки эффективности инновационных проектов могут быть использованы руководителями хозяйствующих субъектов, органами государственной власти, экономистами и специалистами предприятий при изучении результативности внедрения инноваций в производственный процесс и формирования группы наиболее эффективных инновационных проектов для их реализации.

Библиографический список

1. **Корчагин, П.Ю.** Интегральные критерии оценки качества инновационных проектов: дисс. ... канд. эконом. наук : 08.00.05 / Корчагин Павел Юрьевич. – М., 2008. – 27 с.
2. **Милехин, С.В.** Разработка системы оценки эффективности инновационного проекта в условиях динамично изменяющегося рынка высокотехнологичных товаров и услуг / С.В. Милехин, С.В. Васильев // Инновации. 2009. № 4(126). С. 107–110.

*Дата поступления
в редакцию 25.04.2011*

S.N. Yashin, O.S. Boronin

ASSESSMENT OF EFFICIENCY INNOVATION PROJECTS

Nowadays when evaluating the performance of innovation projects distributed approach is to analyse of only economic indicators. This article presents the main provisions of the toolkit for multicriteria evaluation of efficiency of innovation project. Method provides for the definition of the complex integral indicator efficiency for each project.

Key words: Innovation, the methodical approach, the indicator, the competitive environment, types of innovations, the innovation project, the integral indicator, the mathematical tools of assessing, the classification criteria.

СОЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ, ИННОВАЦИИ В ОБРАЗОВАНИИ, PR-ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621

Е. Комлева

ЯДЕРНОЕ ЧЕЛОВЕЧЕСТВО И Ф.М. ДОСТОЕВСКИЙ

Институт философии и политологии, Факультет гуманитарных наук и теологии,
Технический университет, Дортмунд, Германия

Осмысление социальных аспектов важного в судьбе человечества феномена ядерной энергии и формирование социоядерного будущего предложено дополнить использованием художественного, религиозного и философского наследия Ф.М. Достоевского и опыта исследователей его творчества.

Ключевые слова: ядерный, энергия, социум, Достоевский, культура, философское и религиозное мышление, литература, образ Сампо.

Все рациональные науки имеют свою метафизику.

И. Кант

Исходный тезис и его социокультурные предпосылки

Нельзя сказать, что философия, теология, литература и искусство XX века оставили феномен ядерной энергии, как важную часть бытия, без внимания. Но этого внимания явно мало. И, пожалуй, недостает примеров “высшей пробы” по таланту “исполнителей”. В качестве меры человечности ядерной энергии и адекватности человека “новому состоянию” (по К. Ясперсу [43]) социума предлагают пытаться использовать адаптированную к проблеме позицию, объединяющую взгляды Достоевского, знатоков его наследия и людей, хотя бы изредка обращающихся к писателю-философу. Достоевский – база для понимания ядерной вселенной и ядерного человечества (учитывая как военное, так и мирное предназначение ядерной энергии) через рефлексию светских и религиозных представлений о мироздании, фундаментальных, вне времени и пространства, свойств человека и общества.

Автор статьи не является литературоведом – специалистом по творчеству Достоевского. Однако это обстоятельство не освобождает его от добротной и убедительной для, прежде всего, знатоков Достоевского аргументации выдвинутого предложения. Обилие цитат объясняется тем, что столь деликатную задачу – давать совет профессионалам о корректировке набора исследовательских тем – удобно и надежно решать путем заимствования отдельных “уколов мысли” (термин Ю. Карякина) “на поле” самой науки о Достоевском и смежных дисциплин и систематизации отрывочной информации.

“Сейчас появилась возможность синтеза всех направлений исследования творчества великого русского писателя..., что только и дает ключ к подлинному его пониманию”, – пишет в своей статье К. Степанян [38]. А. Керенский сравнивал аналитику Достоевского с таблицей Д. Менделеева, поскольку предугадывались неизвестные социальные типы [9]. Альтернативы Н. Бердяева: “Распадение космоса” в ядерной войне и сострадание “всему способному страдать”, “внутреннее преодоление хаоса, духовное возрождение, эпоха творчест-

ва”, свобода человека, в том числе с учетом негативных результатов свободы по Достоевскому, как основные составляющие вариантов развития человечества [3]. С. Фудель сопоставил религиозные прозрения Достоевского и действия (Р. Бредбери, “451 градус по Фаренгейту”) как бы последних людей христианской цивилизации, живших в условиях атомного одиночества, идею заучивания наизусть глав Евангелия, чтобы пронести их в темноте, как золотые звенья человечества. По мнению С. Фуделя, это необходимо нам как духовная компенсация грядущей пустоты [42]. Г. Марсель “от Ясперса, Хайдеггера и Достоевского” обсуждал опасность ядерной войны [25].

А. Солженицын сопрягает Достоевского, “забывание Бога” и “край ядерной и неядерной смерти” [37]. В. Розанов, сравнивая мнения Толстого и Достоевского о науке и искусстве, отмечал большую глубину суждений Федора Михайловича по этому вопросу, в частности, что по Достоевскому рациональная наука в целом – благо, но она не является самодостаточной (“не слишком хитра” в противовес толстовскому “слишком хитра”). И. Золотусский, в сопоставлении изучавший творчество Гоголя и Достоевского, не обошел стороной проблему “физиков” и “лириков” – важный атрибут ядерного человечества (книга “Фауст и физики”). Зададимся также вслед за В. Кантором [16] вопросом: “Что может дать Достоевский XXI веку?” К Достоевскому обратился и представитель РФ при НАТО Д. Рогозин [29].

“Мне Достоевский дал больше, чем все физики мира” – по многочисленным свидетельствам говорил А. Эйнштейн. Эсхатология XIX века (Достоевский) и века ядерного, XX (Л. Леонов), анализируется А. Татариновым [39]. “У России всего два принципиальных отличия от Гондураса – ядерные боеголовки и Достоевский. И «Братья Карамазовы» не меньше, чем красная кнопка, мешают Западу перевести нас на положение колонии для трудно-воспитуемых” [26]. Достоевский – потенциал глубинной энергии, “парадоксальности глубинного смысла”. Достоевский, как и рефлексия ядерного феномена, требует полной отдачи ума и души. “Энергия самоутверждения распадающейся души, цепная реакция скандалов, предвестие атомной энергии. На этой энергии и держатся романы Достоевского... Только включившись в роман целиком (условия возникновения цепной реакции), мы проникнемся силой его адской энергии” [14]. Показана применимость одного из принципов микромира (*принцип дополненности*) к литературоведческому анализу творчества Достоевского [1].

Достоевский является наиболее известным за рубежом русским писателем и философом. Епископ Венский и Австрийский Иларион – представитель Русской Православной Церкви при европейских международных организациях [11], В. Гусейнов [8] и М. Мельников [26] вспоминают о неоднократно обозначавшемся публично интересе представителей администрации США к русскому классическому писателю как главному эксперту по современной России. Х. Клинтон, например, усвоила из “Братьев Карамазовых”, “насколько опасно быть уверенным в своей абсолютной правоте, и насколько важно уметь ценить точку зрения других” [26; 31]. “Международное сообщество исследователей Достоевского убеждено, что... писатель давно превратился из объекта... литературоведческого... в повод поговорить о вопросах более глобальных...” [30].

Добавим следующие важные обстоятельства, связующие Достоевского и время после него. А. Салуцкий и Л. Аннинский усомнились в том, была бы неизменной позиция Достоевского в контексте нашей современности. “Как повлияло бы создание *атомной* бомбы на философию *Достоевского*, доживи он до наших дней? Есть вопрос? Есть.” [32]. “Чернобыль – для того, чтобы дать философам”, “только на почве русской культуры и можно будет осмыслить катастрофу... Только она к этому готова”, “Чернобыль – тема Достоевского”. Такие связи в масштабе вечности, сопоставляя социальные процессы, атомную бомбу и Чернобыль, воспроизводит В. Липневич, рецензируя “Чернобыльскую молитву” С. Алексиевич [24]. С другой стороны, по В. Кантору [15], тщательно анализирующему в историческом плане и позицию Достоевского, альтернатива культурной самоизоляции русских как в Европе от России, так и в России от Европы, “единственная альтернатива мировому катаклизму – идеология русского европеизма. Та идеология, что позволяет критически смотреть и на Рос-

сию, и на Запад... Это — внутренняя самокритика европейской культуры, способствующая тому, чтобы во всём европейском мире можно было существовать нормально”. Иначе “одичавшая, раздираемая на части националистическими и региональными амбициями Россия достигнет своих блудных сынов распадом АЭС или ядерным ударом в любой точке земного шара...”.

Лейтмотив анализа творчества М. Булгакова у В. Сахарова – в контексте амбивалентности научного знания сопоставительное обращение во времени от очерка “Киев-город” и повестей “Роковые яйца” и “Собачье сердце” назад (к Достоевскому) и вперед (в том числе - к атомной бомбе, Хиросиме и Чернобылю) [35]. А. Куросава, находившийся под сильным влиянием Достоевского, в своем творчестве не обошел Хиросиму. И в каламбуре В. Пелевина из романа “Generation П” соединены разные, в том числе “от Достоевского”, культурные реминисценции, “связывая, - по А. Генису, - узлом пласты разных реальностей”: “Скоро, скоро со стапелей в городе Мурманске сойдет ракетно-ядерный крейсер «Идиот», заложенный по случаю 150-летия со дня рождения Достоевского... Все громче раздаются голоса, предлагающие заложить другой крейсер такого типа, «Богоносец Потемкин», который так огромен, что моряки называют его плавучей деревней” [7].

Л. Сараскина исследует библейские истоки, рефлексию Достоевским и активизацию в США после сентябрьской 2001 года террористической атаки лозунга “Кто не с нами...”, а также альтернативы ему [33]. А. Глюксман, представляя в Мадриде свою книгу “Достоевский на Манхэттене”, уже в названии которой сопоставлены явления разных веков, говорил о “спасении через литературу” от “стремления к разрушению”, “помешательства насилия”. “Лишь литература может вам помочь проанализировать это стремление и иссушить его истоки” [13]. Достоевский является одним из зачинателей самых начальных отечественных вариантов размышлений о возникающей долговременной угрозе, о разломах в сознании и общественных отношениях. О факторах, приведших в конечном счете накануне XXI века к пороговой ситуации на планете по комплексу глобальных проблем [2]. Особенности войны как явления в истории человечества, современная глобализация в варианте американизации, российское ядерное оружие как последнее средство отстоять национальную идентичность – вот темы Достоевского по В. Сердюченко [36]. Метафизику Достоевского и Сталина, оперируя образами ядерной сферы, рассматривает С. Телегин в контексте диалектики и совмещения социальной организации, социальной справедливости и духовной страсти, иррациональной природы, свободы человека, в поисках примеров “философии становления и изменения” [40].

Идеологи современной meta-прозы считают Достоевского предтечей этого литературного направления. А творчество лидера “метафизического реализма” Ю. Мамлеева в России и за рубежом сопоставляют в параллелях с произведениями классика.

Одной из предпосылок выхода за рамки привычной “колеи” применительно к Достоевскому являются внутренние проблемы современного научного “мира Достоевского”. “Приходится сильно постараться, чтобы отыскать неисследованный участок, сформулировать свежую гипотезу... наука «достоевсковедение» уходит в мелкие темы. ... Впрочем, не ко всем гипотезам Игорь Волгин относится столь сурово. Он с симпатией говорит о физике-ядерщике Владимире Шкунденкове, который пытается находить в поэтике Федора Михайловича связи с... физикой” [28]. Как подчеркивает В. Борисова, “... некая скрепляющая идея ушла... не зря... В. Захаров поднимает проблему кризиса в достоевсковедении” [4].

Кроме того, рецепция Достоевского обществом не сводится лишь к науке и другим традиционным видам деятельности и демонстрации интеллекта элиты. Ныне и в этом ракурсе огромные запасы дополнительной информации содержит Интернет. И сетевой интеллект может быть полезным для “синтеза, - по К. Степаняну [38], - всех направлений исследования творчества великого русского писателя”. Легко ощутить такой потенциал “остального человечества” – общества “достоевсковедов-неформалов”. Достаточно, например, поработать в интернетовских поисковых системах с различными комбинациями на основе признаков “Достоевский” и “ядерная/атомная энергия”. Этот потенциал нужно применять, после его

духовно-гуманитарной трансформации. Не опускаясь по языку и мыслям до уровня некоторых сайтов, но и не пренебрегая присущим сетевой культуре позитивом, не теряя имеющиеся там зерна смысла. Весомое подспорье будет пока гипотетическому антропосоциоядерному сектору достоевсковедения, который мог бы питаться не только от академических печатных, но и от электронных источников знания.

Некоторые обобщения к вопросу о “ядерной миссии” Достоевского

Общественное мнение, долг, разум, который не имеет нравственных критериев в самом себе, приоритет коллективной жизни и морали. Умение осознать, что грешен и неправ, встать на позицию "вне себя" и "не для себя". Духовная эпидемия, которая грозит человечеству самоистреблением. Религиозно-мифологические символы. Размышления о власти и представителях власти. Сомнение в человеке и вера в него. Преображение человека и человечества. Человек, общество и взаимоотношение между ними. Экологические мотивы. Предчувствия и пророчества. Прогресс и издержки цивилизации. Вера и цивилизация, ответственность. Национальные особенности, в том числе и когда "забвение всякой мерки во всем". Скрытая, но часто присутствующая тема Ильи-пророка, связанная с русской традицией, народными верованиями, небесными явлениями, человеческими страстями, символизмом “щита и меча”. Россия, славяне и Запад. Полифонизм и диалог между "сознаниями". Связь всех со всеми. Страстное стремление к истине, критичность в отношении действительности и сиюминутных интересов. Момент принятия решений. Открытость важной для общества информации. Всечеловечность и терпимость. Многонациональное "сожительство". Футурология. Петербург и Семипалатинск. Эти и другие аспекты сопрягают наследие Достоевского и его последователей с философскими гранями ядерного феномена.

Достоевский и сообщество достоевсковедов характеризуются сочетанием естественного, технического, гуманитарного образования и образа мыслей с наблюдательностью и интуицией, совестью и религиозностью. "Было стыдно писать", - говорит один из персонажей Достоевского. Дай Бог, чтобы нам не было стыдно за решения в ядерной сфере. Нравственный императив, о котором стали много говорить в XX веке, волновал и Достоевского. Но во многом сейчас нравственный императив – это лишь декларация. Нынешние его авторы пришли к выводу, что в обозримом будущем он невыполним. Где, как ни у Достоевского искать ответы на вопросы и конкретику по существу? Достоевский корректировал не совсем точное восприятие своей позиции: "... я лишь реалист в высшем смысле, то есть изображаю все глубины души человеческой".

Тема XIV Симпозиума Международного Общества Достоевского (2010 г.): “Достоевский – Философское мышление, взгляд писателя”. С. Алексиевич, для которой Достоевский является ориентиром, изучает глубину человеческой души через призму трагических ситуаций войны и Чернобыля.

Может показаться, что Достоевский и ядерный феномен несовместимы. Но "глубинный реализм" при рассмотрении человека и общества в таком контексте не вреден. И не мы, как уже отмечено ранее, первые. Кроме того, обозначено несколько вариантов сопряжения Достоевского с современностью. Один из них – найти "магистральный сюжет" для разных времен. Если феномен ядерной энергии во вселенском масштабе и не “магистральный сюжет” (не всегда и не все люди понимали его природное значение для биологической жизни на Земле), то социальные ядерные проблемы с некоторых пор совершенно точно – "магистральная общечеловеческая головная боль". В программе Старорусских чтений "Достоевский и современность" (2009) были темы “Достоевский о глобализации” и “Достоевский в блокаде Ленинграда”. Глобализация и Достоевский сопоставлены и А. Юозайтис на конгрессе “Русская словесность в мировом культурном контексте” (2009). Вот названия некоторых крупных публикаций, говорящие о связи Достоевского с современностью и будущим и ко многому обязывающие: “XXI век глазами Достоевского: перспективы человечества” (2000), двухтомник "Достоевский и XX век" (2007), альманах “Достоевский и мировая культура”

издается с 1993 года, ежегодник “Достоевский и современность” (с 1987). Современная рецепция Достоевского в мире является весомым доказательством сопряженности его творчества и мировых проблем. Ф. Каутман, например, критически рассмотрел взгляды Достоевского применительно к интегрированному периоду XIX, XX и XXI веков [21]. Такой подход чётче оттеняет достижения и ошибки Достоевского.

Некоторые профессионалы-ядерщики, как и гуманитарии, чувствуют необходимость формировать по Достоевскому нравственную опору развития отрасли в XXI веке [12]. “Темная энергия” человека, рефлексия которой занимает важное место в творчестве Достоевского, вызывает ассоциации с “темной энергией” (“соседкой” ядерной энергии в физической картине мира) вселенной. Соратник А. Сахарова по теоретической физике Д. Киржниц сравнивает его и с Эйнштейном, и с Достоевским [22].

Наука о Достоевском: на подступах к ядерной реальности

Полезен вопрос: “Сопрягают ли творчество писателя и ядерное бытие профессионалы науки о Достоевском?” Прямой постановки такой задачи достоевковедами мне не известно. Однако некоторые из них отразили социоядерные проблемы в своих публикациях. Кроме того, о соприкосновении достоевсковедов с этой сферой жизни можно узнать из публикаций их друзей и знакомых, а также социоядерных аналитиков.

А. Лосев, философия и проза которого испытали влияние Достоевского, был (как и Н. Бердяев) близок к пониманию соразмерности атомного оружия и возможной гибели цивилизации. Изучавшие Достоевского в пору начальных этапов глобальной гонки ядерных вооружений М. Бахтин, В. Кожин и Ю. Селезнев одновременно анализировали условия и тенденции “первого ядерного века”, гипотетической третьей мировой войны.

Г. Фридлендер: “И сегодня, в эпоху, когда нашей планете грозит опасность ядерной катастрофы, способной разрушить нашу цивилизацию, мысль Достоевского о том, что в истории последнее слово зависит не от внешней необходимости, но от самих людей, - и притом от каждого из них, - от сознательного отношения к силам общественного добра и зла, от нашей способности сделать свободный нравственный выбор между ними, с тем чтобы сохранить себя, свое будущее и будущее своих детей для счастливой и достойной человека жизни на земле, заслуживает, думается, нашего особого внимания. В этой мысли автора Карамазовых содержится предостережение великого романиста, обращенное в его последнем романе-эпопее не только к его современникам, но и к нам, будущим поколениям” [41].

Как отметил Г. Померанц, Достоевский в романе “Преступление и наказание” создал притчу о глубоких негативных следствиях “голого” рационализма. “Дело не в отдельной ложной идее, не в ошибке Раскольникова, а в ограниченности любой идейности. «Еще хорошо, что вы старушонку только убили, - говорил Порфирий Петрович. - А выдумай вы другую теорию, так, пожалуй, еще и в сто миллионов раз безобразнее дело бы сделали». Порфирий Петрович оказался прав. Опыт последних веков показал, как опасно доверять логике, не поверяя ее сердцем и духовным опытом. Ум, ставший практической силой, опасен. Опасен научный ум со своими открытиями и изобретениями. Опасен политический ум со своими реформами. Нужны системы защиты от разрушительных сил ума, как на АЭС - от атомного взрыва” [27].

Ю. Карякин, описывая свой путь к постижению Достоевского, анализирует его тексты. “Есть великие открытия в науке... Но есть и великие открытия абсолютно самоубийственной и (или) самоспасительной... духовно-ядерной энергии человека в искусстве — НЕ-СРАВНЕННО «фундаментальнее» всех... научных открытий. Почему... Эйнштейн, Малер, Бехтерев... почти абсолютно одинаково именно так относились к Достоевскому? Да потому, что в человеке, в душе его сходятся, пересекаются все, абсолютно все линии, волны, влияния всех законов мира... все остальные космические, физические, химические и прочие силы. Миллиарды лет ушли на то, чтобы все эти силы сконцентрировались только в одной этой

точке...” [20]. “Второе прочтение...было ошеломляющим: я сопоставлял его пророчества с реальностью. «Спутник-топор». Помните? Иван Карамазов спрашивает чёрта: а что будет с топором, если его запустить в космос? – Как что? Превратится в спутник и будет висеть над Землей... А рассуждения в «Идиоте» об угрозе «звезды Полюнь»? Кто теперь не знает, что Чернобыль прямо так и переводится: полюнь?” [18].

Он находит современное прочтение мыслей Достоевского: “«Мы на Земле недолго...» Раньше это относилось к каждому человеку, ...теперь – ко всему роду людскому. Раньше счет для человечества шел на неисчислимые века и тысячелетия, теперь – на десятилетия, а может быть, и годы. А если или когда счет пойдет тоже на дни? Никто не может гарантировать, что роковая черта еще не перейдена. Никто...не умеет опровергнуть страшную догадку: а может быть, всемирный «Чернобыль», всечеловеческий «Челленджер» уже запущены, а мы – внутри, летим себе, работаем... А если еще и боимся нажать на ядерную кнопку, то на экологическую жмем все...бездумнее... Произошла встреча...человечества со своей смертью. Произойдет ли...спасительный взрыв его духовных жизненных сил?” [18]. Или “моделирует” хронику ядерной войны: “...люди могут увидеть...на...экране...взрыв ядерный (прямой репортаж) и не догадаются, что это они сами именно и взрываются сию минуту... Да что там "могут" - все время слышат, видят, читают...о конце света, о том, насколько тщательно, деловито, буднично идет подготовка к нему, и нетерпеливо поджидают, что после него будет репортаж со стадиона”. Или поясняет суть стиля: “Нельзя же...«красиво» писать о Хиросиме. Точно так же и для Достоевского нельзя было...«красиво» модулировать голосом, когда кричал он о смертельной опасности человеку и роду человеческому” [19].

Из симбиоза мыслей о Достоевском и современности – осознание Ю. Карякиным смертности человечества и перемена мировоззрения. “XX век превратил «абстрактную» возможность...самоубийства человечества...в предельно реальную...в условиях ядерной и экологической угрозы...и сейчас в полной мере большинство людей еще не осознали грозящую опасность – не только ядерную...” И осознание того, что культура есть единственный способ одоления этой смерти: “Культура утверждает и спасает бытие путем его одухотворения. Благодаря культуре человек не был истреблен животными-соперниками на первой стадии своего существования и благодаря этому же не самоистребился (пока). И весь прогресс человечества — не в цивилизационном смысле конечно,— это непрерывное его самоспасение от нарастающей смертельной угрозы путем самовозвышения, одухотворения” [17].

И. Волгин видит необходимость Достоевского как явления в ментальности ядерного мира и сопоставляет в связи с этим в публицистике социальные процессы. “Конечно,... можно... противостоять мировому злу исключительно с помощью авианосцев, ядерных бомб, танков, спецслужб. Но если мы хотим понять, что с нами происходит, если мы желаем лечить не больного, а болезнь, нам не обойтись без участия тех, кто принял на себя миссию «найти в человеке человека»” [6]. Он в своем творчестве не обошел стороной и ядерные обrazy. Например, так представлен в его интерпретации вечный вопрос в ядерном контексте: “... Твой выход, человек! Бог что-то медлит. Дьявол что-то мямлит. Последний акт. Идет двадцатый век - быть или не быть, решай скорее, Гамлет! Будь мужественным, Гамлет, до конца: ждут матери - в Америке, в России. И ждет ответа, словно тень отца, тень мальчика на камне в Хиросиме”. Или: “Я подражаю взрываю ядерным в неподражаемых мирах” [5].

Л. Сараскина в полемике с современными представителями радикал-либерализма и на базе Достоевского не может обойти феномен Хиросимы, обращаясь и к прошлому, и к гипотетическому будущему [34]. В. Дудкин напрямую связывает глобальные и современные опасности для человека, избавление от них, с антропологией Достоевского, в том числе и в связи с угрозами ядерной сферы [10].

Может быть, академической науке о Достоевском преодолеть экранирующий новые перспективы барьер традиционности, адаптироваться к незнакомой реальности и прикоснуться к конструированию допустимого ядерного социума помогут “неодостоевсковеды от

метафизического реализма”? Вероятно, даже немного провоцируя манерой мышления и письма, “неодостоевсковеды” осваивают новую тематику, сопрягая с ней и классику.

Выводы

Подведем итог обоснованию предложения о сопряжении социоядерной тематики и духовного наследия Достоевского. Есть влияние ядерного феномена на мышление последователей и исследователей Достоевского, литераторов, гуманитариев разного профиля. И это влияние мы видим на приведенных ранее примерах. Хотя, надо признать, это довольно редкие примеры. Еще раз возвращаясь к мысли: уместно и обратное. Можно не соглашаться с Достоевским. Можно его не любить. Однако мы в связи с ядерной энергией обязаны, по мнению многих философов и теологов, пройти через опасные откровения о человеке и обществе, через максимально полное познание их. Значит, игнорировать Достоевского и исследования его творчества нельзя. Это художественно-философское и литературоведческое явление органично и с пользой дополнит другие внешние системы координат для “ядерного человека” и “ядерного человечества”. “Вселенная Достоевского”, как и другие выверенные временем духовно-гуманитарные достижения человечества, может и должна быть сопричастной познанию ядерного феномена, активно формировать общую социоядерную ментальность и принципы безопасного, долговечного и комфортного будущего, а также само это будущее. В том числе, - в рамках гипотезы SAMPO [23].

Сопричастность и формирование желательно видеть международными и реализованными, прежде всего, объединенными силами светских и религиозных интеллектуалов России, Японии, Германии (эти страны имеют самые крупные национальные сообщества достоевсковедов) и Казахстана, учитывая разные и весомые в каждом отдельном случае факторы: результативные традиции этих стран в науке о Достоевском, их исторический путь в XX веке и национальный социоядерный опыт. Возможно, - на интегрированной базе азиатских центров изучения творчества Достоевского и социоядерной тематики (Семипалатинска, Омска, Томска и Барнаула). При этом методологически можно приблизиться к необходимой полноте подхода к проблеме.

При некой шутилой интерпретации, возможно, видимо, как оценку Достоевским ядерного феномена трактовать известные слова Дмитрия Карамазова о том, что он радуется солнцу, когда его видит, и даже тогда, когда его не видит, но знает, что оно есть. И без всяких шуток, ровно по Достоевскому, культурно-исторические мотивы однажды уже защитили один из городов (Киото) от ядерного удара. Спасет “красота” нравственности и нынешний мир.

Благодарю за поддержку исследований профессора Brigitte Falkenburg.

Библиографический список

1. **Абдрашитов, А.В.** “Парадоксальность глубинного смысла” и ее раскрытие в концепции дополнительности (сопоставление описаний в квантовой физике и литературе) / А.В. Абдрашитов, И.В. Левин / Чтения им. В.И. Вернадского, 2002 г. – Интернет-версия.
2. **Апухтина, Н.Г.** Отечественные истоки глобально-экологического мышления: историко-философский анализ: автореф. дисс. ... докт. философс. наук. – Екатеринбург, Уральский гос. университет, 2000. – 29 с.
3. **Бердяев, Н.А.** Из записной тетради. Философ свободного духа (Николай Бердяев: жизнь и творчество) / Н.А. Бердяев. – М.: Высш. шк., 1993. – 271 с.
4. **Борисова, В.В.** Двадцать лет спустя: ретроспективный взгляд на Достоевские чтения в Старой Руссе // Достоевский и современность: материалы XX Международных Старорусских чтений 2005 года. – Великий Новгород, 2006. – С. 44-53.
5. **Волгин, И.Л.** Стихи: Гамлет, Меня пугают подражательством... Официальный сайт Игоря Волгина.
6. **Волгин, И.Л.** Улица Достоевского (“Письма из Переделкина”). Официальный сайт Игоря Волгина.
7. **Генис, А.** Феномен Пелевина. – Сайт творчества Виктора Пелевина.

8. **Гусейнов, В.** Страничка редактора // Вестник аналитики. 2005, №1.
9. **Доброхотов, А.Л.** Избранное / А.Л. Доброхотов. – М.: Территория будущего, 2008. – 472 с.
10. **Дудкин, В.В.** Достоевский - Ницше (Проблема человека) / В.В. Дудкин. – Петрозаводск, 1994. – 153 с.
11. Епископ Венский и Австрийский Иларион: “Достоевский – гигант, равного которому в истории русской литературы не было”. – Официальный сайт Московской Патриархии, 15.11.2006.
12. “Инквизитор твой не верует в Бога, вот и весь его секрет!” Ф. М. Достоевский // Сайт PRoAtom, 14.09.2007.
13. **Глюксман, А.** (“Если бы в ЦРУ читали Достоевского, 11 сентября можно было бы предотвратить” (“АВС”, Испания). – Интернет-версия.
14. **Искандер, Ф.** Эссе и публицистика. – Интернет-версия.
15. **Кантор В.** Русский европеец как задача России // Русская мысль. 1999. № 4279 и 1999, № 4280. – Интернет-версия.
16. **Кантор, В.К.** Что может дать Достоевский XXI веку / Dostojewskij-Tage 2006 in Dresden. Dostojewskij-Denkmal in Dresden durch Herrn Prof. Georg Milbradt, Ministerpräsident des Freistaates Sachsen, anwesend Frau Angela Merkel, Bundeskanzlerin und Herr Vladimir Putin, Präsident der Russischen Föderation. 10.10. – 11.10. 2006. Dresden.
17. **Карякин, Ю.Ф.** Дневник русского читателя // Октябрь, 1997. №11. – Сайт “Журнальный зал”.
18. **Карякин, Ю.Ф.** Достоевский и Апокалипсис. – Сайт “Русского переплета”, 7.8.2001.
19. **Карякин, Ю.Ф.** Зачем хроникер в “Бесах”? – Сайт “Русского переплета”, 2.6.2001.
20. **Карякин, Ю.Ф.** Уколы мысли. // Новая газета. 2009. №90. – Интернет-версия.
21. **Каутман, Ф.** Достоевский в XXI веке // Достоевский и мировая культура. 2000. №15. С. 165–173.
22. **Киржниц, Д.А.** Каким запомнился Сахаров-физик. – Интернет-версия.
23. **Комлева, Е.В.** Социоядерный антропный принцип и геоядерная прагматика // Минеральное сырье Урала. 2008. №5. С. 44–47.
24. **Липневич, В.** Прощание с вечностью (рецензия): Светлана Алексиевич. Чернобыльская молитва // Новый мир. 1997. №6. – Сайт “Журнальный зал”.
25. **Марсель, Г.** Ответственность философа в современном мире // Путь в философию. Антология. М., 2001. С. 254–267. – Интернет-версия.
26. **Мельников, М.** Урок Достоевского от Хиллари Клинтон // Аргументы и Факты, 2009. – Интернет-версия.
27. **Померанц, Г.** Саморегулирующаяся вавилонская башня / Философско-культурологический семинар “РАБОТА ЛЮБВИ” (Цикл встреч 1996-2001 года). – Сайт IGRUNOV.RU.
28. **Раевская, М.** Достоевский и Нечто // Независимая газета, 13.10.2004. – Интернет-версия.
29. **Рогозин, Д.О.** Речь о Достоевском. – Сайт Постоянного представительства России при НАТО, 21.11.2008.
30. **Рощина, Л.** Достоевский в диалоге культур // Голос России, 31.08.2009. – Интернет-версия.
31. Сайт факультета глобальных процессов МГУ, 14.10.2009.
32. **Салуцкий, А.С.** Из России, с любовью: роман о богоизбранности / А.С. Салуцкий, Л.Аннинский. – М., 2006. – 685 с. – Интернет-версия.
33. **Сараскина, Л.И.** “Кто не с нами...”: библейские истоки революционного лозунга / Достоевский и современность. Материалы XX Международных Старорусских чтений 2005 года. – Великий Новгород, 2006. С. 292–315.
34. **Сараскина, Л.И.** Испытание будущим. Ф.М. Достоевский как участник современной культуры. – Сайт Государственного института искусствознания.
35. **Сахаров, В.** Сатира должна идти до конца. – Сайт “Все о Михаиле Афанасьевиче Булгакове”.
36. **Сердюченко В.** Как я перестал бояться и научился любить атомную бомбу. – Интернет-версия.
37. **Солженицын, А.И.** Темплтоновская лекция. – Интернет-версия.
38. **Степанян, К.** Достоевский - это писатель, который имеет “космическую” особенность // “Независимая газета”, сайт “Имя России”, 2009.
39. **Татаринов, А.** Под знаком Апокалипсиса // Литературная Россия, №23, 2007. – Интернет-версия.
40. **Телегин, С.** Метафизика Сталина // Завтра, 9.04.2008. – Интернет-версия.

41. **Фридлендер, Г.М.** От “Подростка” к “Братьям Карамазовым” // Dostoevsky Studies, v.7, 1986. – Сайт The Department of Slavic Languages and Literatures, University of Toronto.
42. **Фудель, С.И.** У стен Церкви // Тихоновский Благовест. 2007. №11. – Интернет-версия.
43. **Jaspers, K.** Die Atombombe und die Zukunft des Menschen: politisches Bewusstsein in unserer Zeit. Munchen, 1958. – 506 s.

*Дата поступления
в редакцию 22.04.2011*

E. Komleva

NUCLEAR HUMANITY AND FM DOSTOYEVSKY

It is proposed to include the research of Dostoevsky's literary, religious and philosophical heritage as a complementary component for the reflection of social aspects of the phenomenon of nuclear energy, being so important for the fate of humankind, as well as for the formation of socio-nuclear future.

Key words: nuclear, energy, socium, Dostoevsky, culture, philosophic and religious thought, literature, image of Sampo.

УДК 316.733

В.П. Козырьков

ЭСТЕТИЗАЦИЯ КАК СПОСОБ СУЩЕСТВОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЩЕСТВА

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Рассматриваются эстетизм как исторически позднее социальное явление, социальная феноменология современного российского эстетизма. Анализируется природа современной социальной реальности и эстетической социологии, эстетизм представлен как способ преодоления социальных антагонизмов.

Ключевые слова: эстетизм, информационное общество, эстетизация.

Еще раз о сути эстетизма. Предшествующие статьи по проблеме эстетизма [1-2] общества и социологии позволяют нам сделать некоторые выводы общего характера.

Важно подчеркнуть, что эстетический фактор давно уже вошел в арсенал естественной науки в качестве критерия определения истинности и завершенности теории в научном исследовании. В частности, определение «красота – критерий истины» стало общим местом. Что касается социальных наук в классический период их развития, то в качестве критерия истины в большей степени подчеркивался, кроме всех прочих, критерий гуманистической направленности открытых социальных истин, чем критерий эстетический.

Сейчас ситуация коренным образом изменилась, и критерий эстетичности формы добываемых социальных знаний завоевывает доминирующий статус. Даже в большей степени, чем в естественных науках, поскольку социальное знание приобрело свою информационную форму, которая становится самооценностью в СМИ и массовых коммуникациях в целом. То есть в такой большой степени, что коммуникативная функция социального знания стала доминировать над функцией целеполагания как основы социальных действий. Точно так же, как в обществе, лидирующую позицию стали занимать коммуникации в противовес деятельности. Грубо говоря, общение вытеснило поступок, презентация – реальную жизнь, а в реальной жизни в качестве привилегированной сферы стала заявлять о себе не сфера труда, а сфера услуг. Не нужно объяснять, чем презентация отличается от реального поступка: в презентации доминирует эстетический фактор, в поступке – мораль. Следовательно, мы еще раз можем отметить, что, эстетизм характеризуется как раз вытеснением моральных норм нормами эстетическими, которые в сфере коммуникаций, услуг и презентаций играют решающую роль.

Попробуем разобраться в причинах такого явления, связывая этот анализ с характером развития социологии.

Существует ли информационное общество? Мы сейчас так часто и много говорим об информационном обществе, что заставили себя поверить в то, что такое общество существует. Нас утешает мысль, что возникает некий совершенно новый тип общества, в котором информация становится решающим фактором во всех социальных процессах. При этом информация оценивается как нечто более высокое по эффективности и значимости, чем все другие действующие факторы: техника, собственность, власть, способности человека, способ организации его деятельности и т.д. Информация видится как феномен, который пронизывает все общество, модифицирует все его другие причины и факторы и становится инструментом решения многих, казалось бы, нерешенных в прошлом проблем.

Хотя, строго говоря, выглядит такая позиция очень странно, поскольку сама по себе информация даже как самостоятельное явление существовать не может, а не то что определять характер и поведение других явлений и процессов. Для обоснования этой позиции при-

водится немало аргументов, начиная от банального утверждения, что «кто владеет информацией, тот владеет миром», заканчивая демонстрацией сверхмощных компьютеров, которые могут моделировать сверхсложные процессы.

Но разве это не так? Разве массовость всех происходящих процессов не является очевидным доказательством того, что они имеют объективный и необходимый характер? И не пытаемся ли мы оспорить очевидные факты, которые сейчас известны уже младенцам? Ведь мы действительно на каждом шагу видим множество компьютеров и массовую рекламу информационных технологий. Ведь если бы не было спроса на все это, то ничего этого не было бы.

Все это так. Но не впадаем ли мы в искушение объяснять общественные явления спросом людей? Иначе говоря, не попадаем ли мы на крючок той теории, которая и призвана пробуждать спрос? Между тем законы развития общественных процессов не тождественны законам спроса. Законы спроса и предложения есть законы рынка, то есть лишь одной из сфер экономики, а не общества в целом. И даже не экономики в целом, которая включает в себя процессы производства и распределения, а не только обмена и потребления. Кроме того, общество в целом как сверхсложная система содержит сферы, которые очень далеки от экономики или имеют иную природу, поэтому разрушаются под воздействием рыночных отношений.

Как показывает социальная практика, разрушаются они и под действием современных информационных технологий, предлагающих суррогаты художественных образов, симулякры религий, вульгаризированные формы общения, очень сомнительные средства развития гражданского общества и образования. Действительно, чем объяснить, что при тенденции к всеобщей «мобилизации» и компьютеризации формы демократического управления обществом все сужаются, а уровень образования населения все снижается? И разве это не существующая власть, больше озабоченная «вертикалью», власти, пропагандирует цифровые технологии связи институтов государства и населения, уходя от реального с ним общения? И разве это не нынешняя власть сокращает школьные программы, отсылая за знаниями в интернет?

Таким образом, общественная роль информации не может быть определена однозначно положительно. При всем многообразии работ по информационному обществу социологической теории информационного общества не существует. Это косвенно говорит о том, что никакого информационного общества, которое бы полностью детерминировалось информацией, нет. Увеличение роли и объема информации в жизни общества является лишь симптомом скрытых, внутренних процессов, которые на поверхности представляются как отношения на основе информации.

Давно известно: суть тех или иных явлений тогда для всех становится очевидной истиной, когда они достигают определенной стадии зрелости. В нашем случае тайна информационного общества стала для всех явью тогда, когда подключение к интернету стало носить массовый характер, а пользование мобильной связью – всеобщий. Теперь просьба «найти в интернете» никого уже не удивит, и мы видим уже не только достоинства общего доступа к глобальной базе информационных данных, но и его недостатки, выражающиеся в определенной утрате способности человека к самостоятельной выработке знаний. И теперь уже не нужно никому объяснять, что изменилось в способе коммуникации, когда каждый человек, от мала до велика, в любой момент может соединиться с кем хочет, испытывая, однако, от этой общей досягаемости для всех, опять-таки, определенный дискомфорт.

Таким образом, всем стало понятно, что каждый стал обладать такими информационными и коммуникационными ресурсами, которые стали для него избыточными. А всеобщая мобилизация перешла в новую стадию, на которой главной ценностью стала не содержание информации, а потребность ее передачи и получения. В этих условиях, когда явление переходит в собственную противоположность, и можно утверждать о зрелом их характере.

Наконец, информационные процессы стали «прихорашиваться». Возможно, что этот момент есть симптом того, что информатизация достигла определенного предела в развитии. На первых стадиях эстетизация имела мало значения.

Эстетизм как исторически позднее социальное явление

Эстетизм – это духовная компенсация нравственно, духовно, культурно несостоявшейся личности. Об эстетизме заговорили и заспорили тогда, когда действительные эстетические формы в жизни людей стали сужаться и снижаться по своему уровню. Ностальгией по ушедшим красочным и ярким временам, кажется, впервые заболели романтики. Хотя миф о «золотом веке» никогда не исчезал из культуры.

И все же «цветущая сложность» (К. Леонтьев), которая якобы господствовала в прошлом, покорила сознание В. Жуковского, Н. Гоголя, А. Герцена, К. Леонтьева, А. Блока, В. Розанова, Н. Бердяева, П. Флоренского и многих других русских писателей и философов XIX–XX веков.

Впрочем, в XX веке «зацвела» не только сложность, но и «простота», выразившись в еще более многообразных формах, чем сложность. Она породила целую культуру – массовую культуру, которая загнала сложность в *эстетическую резервацию* – элитарную культуру. И чем тусклее становилась социальная реальность, тем более активно развивалась идея о необходимости ее целенаправленной эстетизации в самых разных направлениях. Высокого напряжения и острой противоречивости движение к эстетизму возникло на рубеже XIX–XX веков, вызвав эпоху декаданса и, одновременно, возрождение и усиление эстетства милитаристского духа, поэтому, по словам М. Лифшица и Л. Рейнгарда немалому числу представителей эстетства первого типа пришлось стоять «на коленях перед эстетикой агрессивной художественной воли, способной навязать чужому сознанию любую команду» [3, 182]. Перед такой «эстетикой внушения», которая стала господствовать в XX веке, не устоит никакая другая эстетика.

Эстетство как исток эстетизма и форма оправдания

Эстетизм сам по себе, по своим истокам не страшен, – он не обидит и мухи. И все же эстетизм рождается в лоне эстетства, которое само по себе не только безобидно, но даже очень приятно, привлекательно и полезно. Но то же эстетство, в определенных исторических условиях из крошки Цахеса вырастает как на дрожжах и превращается в социального монстра, который все крушит на своем пути, находя своим действиям оправдание тем, что в общественном сознании представляет свои движения изящными или «крутыми». Тогда очень трудно устоять на его пути и сохранить субъектную самостоятельность. И тогда эстетизм уже находит свое постоянное и гарантированное оправдание тем, что в обществе вырабатывается идеология эстетизма. Собственно говоря, социальным монстрам уже не требуется оправдание, поскольку его действия считаются естественными и тем самым обреченно оправданными. Пусть попробует заяц не восхищаться движениями льва, особенно голодного!

Социальная безграничность и формы противостояния процессу тотальной эстетизации

Развитие эстетизации социальных отношений в XX веке показало, что этот процесс не имеет границ. Точно так же, как не может быть ограничений в применении обертки для того или иного товара: красивую, скрывающую содержание и даже соблазняющую упаковку можно найти для любой вещи. К тому же эстетизация так же не пахнет и так же социально универсальна, как и деньги. Поэтому в топку эстетизации бросается все: прошлое и будущее, идеи и вещи, люди и звери. Ее ненасытной пасти не избежали классические мифы, многоликое родное язычество, западная и восточная мистика, всевозможные игры, различный «экстрим» и многие другие элементы культуры, включая философию, науку и религию. Но все это духовное многообразие оставалось бы не горючим материалом, если бы оно щедро не «поливало» различными взрывчатыми веществами и смесями, которые производились революциями и реформами, войнами и конфликтами, эпидемиями и катастрофами, терактами и

репрессиями. И когда возникал завораживающий социальный пожар, то уже было невозможно разобрать, что тут горит, чем это все щедро поливается и кто поджигатель.

Тем более что эта новая историческая ситуация стала теоретически оправдываться и обосновываться различными социальными теориями общего и частного характера: «всеединства» и «софиологии», «постмодернизма» и «общества риска», «социальной мобильности» и «социального конфликта», «всеобщего благоденствия» и «конца истории» и др. Но сейчас уже смело можно рапортовать: общество «упоения в бою и бездны мрачной на краю», общество, которое воспел А. С. Пушкин в его исторической колыбели, в настоящее время полностью сложилось. Окончательно ли? Является ли тенденция к углублению эстетизации общества прогрессом или регрессом?

Западная цивилизация, двигаясь в сторону все большей эстетизации, получила вполне определенный и ясный ответ на этот вопрос: эстетизм, при последовательном и безграничном его развитии, приводит к социальной катастрофе. Разумеется, не сам по себе эстетизм, а то социальное содержание, что скрывается в этой художественной упаковке. Красивый лозунг конца XIX века, – «красота спасет мир», – приписываемый Ф. Достоевскому, но приобретший массовый характер, получил свое зловещее воплощение в идеологии и практике нацизма. Красота не спасла мир, а прикрыла образовавшуюся духовную пустоту. Как справедливо заметил М. М. Бахтин, «эстетизм, покрывающий пустоту, — вторая сторона кризисов» [4, 179]. Следовательно, красота спасла не мир, а тех, кто постоянно развязывает войну.

Эстетические идеи в массовой психологии приобретают более влиятельный характер и вытесняют традиционные моральные ценности. Поэтому «фашизм, – свидетельствовал В. Беньямин, – вполне последовательно приходит к эстетизации политической жизни» [5]. При чем эстетизация политики приводит к своим самым крайним формам, выраженным в массовом насилии. «Все усилия по эстетизации политики, – показывает Беньямин, – достигают высшей степени в одной точке. И этой точкой является война» [5]. Таким образом, эстетическая форма оказалась единственной из возможных духовных форм, которая не оказала «сопротивления» милитаристским тенденциям первой половины XX века. Эстетика войны – вот высшая и объективная форма развития эстетизма в современной культуре. Получение наслаждения от убийства и самоубийства, тотального уничтожения и самоуничтожения – вот мотивация этой эстетики.

Поэтому западной культурой второй половины XX века выработаны различные ограничения и формы противостояния экспансионизму принципа эстетизма. В частности, в борьбе против социализированного эстетизма получили свое развитие принципы гуманизма, были выработаны новые формы морали, получили развитие традиционные и созданы новые формы религиозной духовности.

Похоже, что Россия еще не осознала всей опасности социального эстетизма. И связано это с тем, что ей больше пришлось играть роль страдающей от эстетизма стороны и редко приходилось выступать в роли его субъекта. Теперь такой случай представился. Тем более, что вместо имперского монстра теперь на исторической арене действует более компактное и молодое государство, которое еще не испытало на себе всех своих возможностей и ему хочется поэкспериментировать на исторической арене, показать все свои «прелести». Поэтому 90-е годы в российской истории – это упоение эстетизмом во всех областях жизни: в экономике и политике, в области права и семьи, морали и религии, философии и литературе, музыке, коммуникации и других сферах публичного и частного характера.

Об эстетизме русской культуры

Особое значение идея эстетизма имеет для русского человека. Это хорошо было видно уже в творчестве Н. В. Гоголя, открывшего для общественного сознания феномен пошлости. Успех его произведений был вызван именно данным эпохальным открытием, тяжесть которого стала одной из причин его личной трагедии.

Против эстетизма всю жизнь боролся Л. Н. Толстой, отказываясь от своих художественных произведений и стремясь со всей возможной откровенностью и правдой обнажить

социальные язвы жизни, доходя в этом до кинического самоуничтожения и христианского самораспятия. Однако и великий писатель не устоял против эстетизма жизни. Его последние произведения «Книга для чтения», «Путь жизни», «Закон насилия и закон любви» пронизаны идеей социального эстетизма. «Все бедствия и всего человечества и отдельных людей не бесполезны и ведут человечество, хотя и окольным путем, все к той же одной деятельности, которая предназначена людям: совершенствованию», – писал Толстой в 1908 г. Но категория «совершенствования» есть категория эстетическая.

Эстетизм в понимании природы человека и в оценке мотивов его поведения присущ и мировосприятию А. Чехова, утверждавшему, что «в человеке должно быть все прекрасно». Эстетизм босачества, социального дна и пролетарских низов развивал М. Горький. Религиозный вариант эстетизма, при всем разбросе мировоззренческих позиций, мы находим в творчестве П. Флоренского, С. Франка, Н. Лосского, И. Ильина, Н. Бердяева и других русских мыслителей. Например, произведения Д. Андреева «Роза мира» порождены эстетической идеей о новой форме духовности, в которой были бы органически слиты все формы религии, создавая некую «розу мира». В. В. Розанов эстетизм российской истории объяснял большим влиянием художественной литературы, обвиняя ее в апокалипсическом исходе для русского народа в 1917 г.

Важно еще одно обстоятельство: эстетизм русской культуры обусловлен уродливостью русской повседневной жизни, ее фатальной непредсказуемостью, неразрешимой противоречивостью под воздействием своего революционного (или бюрократически-реформаторского) эстетизма, претендующего на то, чтобы сделать жизнь народа прекрасной «во всех отношениях». В русской культуре эстетизацию получило то в культуре, что эстетизации, казалось бы, не подлежит: война, революция (Ленин, Троцкий, Сталин и др.), святыни (В. Розанов и др.), любовь (В. Соловьев и др.), совесть (Ф. М. Достоевский, Л. Н. Толстой и др.). Русский народ архиэстетичен, ибо морально неразвит и социально дик (А. Пушкин, И. Бунин, М. Горький и др.)

Сама русская жизнь постоянно «пишет» романы, в которых художественными героями выступают живые лица, а не вымышленные персонажи. Многие русские романы более реалистичны, чем сама жизнь, тяготеющая больше или к фантазмагориям, или к безбрежному эпизму.

Социальная феноменология современного российского эстетизма

Современный российский эстетизм приобрел столь многообразные социальные формы, что можно говорить о рождении новой культуры. Так, политический эстетизм присущ тоталитарной идеологии, в том числе идеологии большевизма. Коммунистический идеал гипнотизирует людскую массу тем, что художественно привлекателен и прекрасен. Он прекрасен тем, что идеально преодолевает уродливые и низменные формы жизни в существующей социальной реальности.

Идеи ускоренной перестройки СССР за считанные годы, безусловно, эстетические, так как произвели впечатление на людей своей социальной экспрессией, вызвали восхищение простотой формы, но, как и любые эстетические утопии, привели общество к трагическому исходу: к войнам, к обвальному спаду производства, к разрушению многообразных социальных связей. Вот здесь-то мы и видим всю деструктивность эстетизма, приведшего жизнь к такой «цветущей сложности», о которой не мечтал и К. Леонтьев, ставший одним из первых теоретиков эстетизма русской жизни.

Политические выборы в современной, постсоветской России проводятся на основе эстетических критериев: нравится – не нравится, симпатичный – не симпатичный, красивый – уродливый и т. д. Эстетизм мышления в политической жизни стал чем-то привычным и бесспорным, вытеснив трезвый реализм и практический расчет. Эстетизм мышления узаконился и в социальной науке, свив себе гнездо в виде полипарадигмальности познания, эклектизма и нарративизма. Многообразие всегда красиво. Точно так же, как павлиний хвост живописнее хвоста сороки.

Эстетизация мысли и преодоление эстетизации

Не эстетизированная мысль питается состраданием к людям, сопереживанием боли других людей и соучастием в их заботах. Поэтому для преодоления эстетизированности философии нужно чаще обращаться к социологии. Философия как «мышление вслух» есть ее эстетизация. Философия с вопросом «заботаешься ли ты о себе?», с которым бродил по улицам Сократ, есть живая философия, лишенная эстетизма. Но этот источник философской мысли требует от человека ежедневного и предельно внимательного наблюдения за тем, что происходит в жизни и как люди ведут себя: как они одеваются; как выражают свои чувства; какие слова подбирают в разговоре друг с другом; что они едят и как это делают; что выражают их глаза и каков цвет лица; как они ходят, сидят, бегают, передвигаются на транспорте и двигаются другими способами; как они учатся, работают, отдыхают и занимаются другими видами жизнедеятельности и т. д. Только погрузившись в эту глубину и прозу повседневной жизни, можно найти тот смысл, который существует реально, а не создается идеологами в виде очередного «нового мифа» или новой и красивой социальной утопии.

Этот смысл можно уловить в глазах случайного попутчика в автобусе или даже в повадках уличной собаки. В том числе и тот смысл, который порождается культурой эстетизма. Покажем это на трех примерах.

Первый пример. Небольшая собачонка деловито бежала к мусорному баку, но остановилась метров за 5, несколько раз понюхала воздух, ничего интересного не нашла и побежала дальше. С такой же деловитостью к этому баку подходит бомж, но не нюхает воздух за 5 метров, а сразу опрокидывает голову в мусорную кучу, роется в ней палочкой, находит то, что ищет и также деловито уходит. Собака выглядит чище (не роется во всех мусорных баках, а вначале их обнюхивает издали) и благороднее (уступила место человеку). Человек выглядит грязнее, и ведет себя низко, не подпуская к мусору собаку, когда роется сам.

Второй пример. Всю жизнь слышу лозунг: «Красота спасет мир!» Может быть. Привожу пример: на углу улицы стоит нищенка. Мимо проходят толпы людей. Останавливаются и подаются только незаметные, прямо скажем, – не красивые люди. Красивые в ее сторону не смотрят, так как даже воображаемое присутствие себя рядом с нищенкой вызывает у них отвращение. Даже Н. В. Гоголь как-то в одном из своих писем признавался, что он, конечно, христианин и гуманист, но ему никак не удается подать руку нищему и грязному человеку. Следовательно, нищего спасает не красота, а доброта. Красота не спасает, а завораживает мир, делая его бесчувственным к страданиям и боли. Может быть, красота и спасет мир, но в нем не останется людей.

Третий пример. Если оценить современное общественное бытие эстетически, то представляется отвратительная по своему виду картина: молодящаяся и разбитная старушка, имея большой капитал, завлекла молодого, но слабовольного и запутавшегося в жизни молодого человека в свои любовные сети. Она ничего ему дать не в состоянии, кроме откровенных улыбок, нескромных обещаний и прочих уловок опытной кокетки. Поэтому сцена обольщения не может продолжаться долго. Она будет длиться ровно столько, сколько понадобится молодому человеку для того, что понять, с кем он имеет дело и что его впереди ничего не ждет, кроме унижения. Поэтому я не удивлюсь, что эта ловкая политическая старушка бросит неопытного молодого человека раньше, чем он проснется от исторического сна. Мое сравнение столь же грубо, сколь вульгарна описываемая современная социальная ситуация: завлекла – и бросила. Благо на Западе есть крупные «стабилизационные фонды». Был он недавно и у нас, но созданный за счет обнищания народа.

Эстетизация истории

В последнее время все чаще заходит разговор о варваризации или одичании истории.

Если историю довести до «конца», если лишить ее смысла, направленности, заданной прошлым, то, конечно, происходит ее эстетизация.

Эстетизация истории является одним из фундаментальных истоков профанации общественной жизни. При этом сам процесс эстетизации осуществляется в двух направлениях.

Во-первых, в любой текст вводится историческая тема, которая, по замыслу авторов, должна придать достоверность и глубину эстетическому содержанию. Казалось бы, обращение к истории действительно углубляет содержание произведения, но только в том случае, когда история берется в ее реальном виде, *реконструкцией* которой занимается историческая наука. Между тем в современной литературе и в различных других дискурсах история *конструируется* автором, который стремится не к адекватному познанию истории, а историческому подобию в отдельных фрагментах, предоставляя весь остальной текст воле воображения. Такой фрагментарный, постмодернистский историзм сейчас используется не только в бульварной литературе, в телесериалах, в голливудских исторических фильмах, но также в рекламе, доводящей процесс эстетизации истории до своего наиболее крайнего, вульгарного вида.

Во-вторых, исторический материал модернизируется и эстетизируется в историко-идеологических текстах. Эстетическая форма в этом случае придает видимость глубины там и тому, где ее нет. Но при ближайшем рассмотрении, как только спадает эстетическая пелена с социального бытия, научная картина мира вытесняется мистическими построениями, а воинствующий сциентизм сливается с новыми формами прагматической рациональности, в которых логические законы нисколько не мешают существованию иррациональных элементов сознания, так как они попадают под защиту эстетической формы и мистических настроений. Так, эстетизация дополняется и сопровождается вульгаризацией в создании, оценке и понимании общественных явлений и процессов.

Таким образом, эстетизация истории, осуществляясь с двух сторон и постоянно переключаясь, дискредитирует как историческую науку, так и социологию. А вместе с социальной наукой снижаются и дискредитируются в обществе художественные формы познания мира. Внешне такая эстетизированная и, одновременно, историзированная форма духовности выглядит неким «крутым» коктейлем, употребление которого требует крепкого физического и психического здоровья. Но, тем не менее, данный «напиток», как некогда древняя синкретичная духовность, каким-то образом воспроизводит духовную целостность человека, хотя часто только в ее элементарных формах, постоянно возвращая человека в его автохтонное социокультурное состояние, что и выступает питательной почвой пошлости. Поэтому и появляется «современная мифология», возникает тяга к различным «альтернативным», ненаучным формам познания, интерес к своей генеалогической крови, цвет которой, якобы, может избавить от пошлости. Наступает период архаизации культуры, которая, в свою очередь, вызывает эстетизм.

Прошлое всегда более эстетично, чем настоящее, поскольку человек находит в прошлом часто только то, что привлекательно для него, отбрасывая горькие истины и уродливые картины.

Природа современной социальной реальности и эстетической социологии. Еще раз отметим, что сейчас складывается новый тип общественных отношений, в понимании природы которого оказываются якобы посрамленными как идеалисты, так и материалисты, поскольку социальная реальность, а вместе с ней реальность эстетическая приобрели объектно-субъектную природу. Но в такой оценке новой реальности скрыто внутреннее противоречие. На самом деле ни субъект, ни объект не имеют действительного характера: они оказываются сконструированными с использованием воображения. Конструируются различные формы отношений: этнические, политические, гендерные и др. [6-8].

На первое место выходит информация, характер которой часто имеет мало отношения к рационализированным формам и методам познания. Поэтому было бы крайне ошибочным отождествление понятий «информационное общество» и «общество знания». Информация может иметь значение и циркулировать в системе коммуникаций, не обладая истинным характером. Между тем как знание ориентировано на истину, на достоверность, на объективность. Для информации достаточно лишь *правдивости* и способности приводить к определенному социальному *эффекту*. Важно выяснить не что такое истина и в чем она состоит, а

что *считается* истиной и какую он имеет *ценность*. По сути дела мы сейчас наблюдаем, как информатизация общества по своей сути становится содержанием процесса эстетизации, его внешней социальной оболочкой, которая претендует на бесспорную содержательность лишь потому, что это информация, а не что-либо иное.

Но все это приводит нас к выводу, что складывается новый социологос, в котором решающей причиной событий и явлений становится эстетический фактор в его различных модификациях: исторических и актуальных, элитарных и массовых, профессиональных и любительских, классических и прикладных и т. д. Эстетизация настолько влиятельна, что даже время воспринимается в эстетических формах: повседневная игра с возрастом, операции омоложения, совмещение исторических эпох и др. [9].

Еще раз подчеркнем, чтобы избежать недоразумения, эстетические отношения не имеют субстанциональности. В эстетизированных отношениях они приобретают субстанциональность, но сконструированную, которую Б. Андерсон называет воображаемой, а Ж. Бодрийяр – симулякром. И как только это происходит, так воображаемая реальность начинает существовать как очень активный фактор в социальных отношениях, поскольку для подтверждения своего существования эстетизированному обществу постоянно приходится проявлять активность в эстетическом направлении на порядок выше, чем обычной, естественно сформировавшейся социальной реальности.

Но если это так, если социальная реальность радикально изменяет свой характер, то социология тоже изменяет свою природу, поскольку она не только исследует новую социальную реальность, но и сама является частью ее.

Во-первых, она становится наукой об эстетизированных общественных явлениях и отношениях, поэтому ее можно было бы назвать «эстетической социологией» [10, 279]. Имеется в виду не социология искусства, как это можно подумать, а социология в ее целом и общем виде. Точно так же, как существует экономическая социология, под которой надо иметь в виду не социологию экономики, в которой экономика рассматривается как объект, а социология видится как субъект, который бросает свое благосклонное внимание с объекта на объект в зависимости от собственного желания. Думается, что экономическая социология есть та форма социологии, которую она приобретает в настоящее время, если игнорируются все социокультурные факторы и отношения. То есть на заре новорусского капитализма. Исторически мы сейчас возвращаемся к временам А. Смита и Д. Рикардо.

Во-вторых, социология эстетизируется, подчиняясь не только внешне, но и внутренне логике эстетического сознания. Социология настолько эстетизируется, что утрачивает свою способность быть формой рационального познания мира и превращается в такой дискурс, который только условно можно назвать социологией.

В-третьих, в конечном счете, делается вывод, что никакая социология в современном обществе уже невозможна. Если даже она и существует, то лишь по социальной инерции, а в действительности такая форма сознания становится лишь одним из элементов структуры эстетического сознания и эстетизированных общественных отношений. В массовом сознании этот вывод подкрепляется тем, что создан шаржированный образ социолога, а политические структуры используют социологическое знание лишь для улучшения своего имиджа и повышения своего рейтинга.

Социология, как одна из высших форм рациональности, превращается в продукт иррационального творчества, в котором больше ценятся «плотные нарративы», «интерпретации», «воображение» и другие формы эстетического отношения к действительности.

Эстетическое как современная форма социальности. Таким образом, новое требование современной культуры в первую очередь предъявлено личности, которая должна полностью раскрыться, самореализоваться и воплотиться в мире, несмотря ни на какие существующие преграды. Эстетически прославиться стало не только легче, а просто *необходимо* для того, чтобы жизнь состоялась и считалась успешной. Следовательно, *эстетика стала формой этики*. И пророчески правым оказался М. М. Бахтин, считая, что «проблема души

методологически есть проблема эстетики». Поэтому в основе своей современный процесс эстетизации есть процесс реализации стремящейся к свободе индивидуальности. Такой процесс, который начинает протекать не по социальным законам, а по «законам красоты», по законам художественного развития. Говоря словами Гегеля, возникает эпоха «приятного стиля», «стремления к эффекту» [11, 12]. В этой гегелевской формулировке мы без труда узнаем те социальные процессы, которые протекают на наших глазах, когда явление «призывает к себе публику и пытается установить с ней связь лишь способом изображения» [11, 12]. Следовательно, уже Гегелем была выражена ситуация, в которой эстетические категории начинают играть роль социальной взаимосвязи. То, что во времена Гете и Гегеля существовало лишь как историческая предпосылка, в настоящее время является одним из универсальных оснований новой культуры.

Антагонизмы современного эстетизма и новые истоки эстетизация социологии.

Вернемся снова к проблеме эстетизма. На данном этапе анализа нам важно подчеркнуть, что современный эстетизм имеет более сложную природу, и сейчас можно только удивляться социальной невинности эстетизма времен Шиллера и Гете, Канта и Гегеля, Гоголя и Белинского, Леонтьева и Ницше.

Казалось бы, тотальная эстетизация общества, которую мы сейчас наблюдаем, есть явление настолько новое и неожиданное, что никаких исторических корней у него быть не может. Как мы уже отмечали, О. Конт даже во времена расцвета романтизма не считал необходимым рассматривать эстетизированные социальные явления. Но этот пробел в социологии Конта был компенсирован одним из представителей романтизма, Ж. де Сталь, создавшей задолго до Конта трактат по социологии искусства. Ей было написано большое сочинение, в котором рассматривается, «какое влияние оказывает религия, нравы и законы на литературу, а литература — на религию, нравы и законы» [12, 66]. Эта большая работа важна не только для изучения истории литературы, но для понимания истоков социологии, которые кроются не только в осмыслении экономических и социальных проблем того времени, но и духовных, эстетических в том числе. Следует согласиться с мнением автора вступительной статьи к цитированному трактату, А.А. Аникста, что Ж. де Сталь «можно назвать основоположником социологии литературы».

Эстетизм в современном обществе настолько многообразен и противоречив, а его социальное значение настолько весомо, что не обращать на него внимания со стороны социальной науки уже невозможно. Поэтому философия и социология искусства из академических и сугубо профессиональных дисциплин перешли в разряд публицистики, а исследования эстетически выраженных форм социальной жизни, к которым относится и телевидение с интернетом, имеют не столько художественное значение, сколько политическое и коммерческое. В частности, эстетизм оказался «замешанным» в страшных социальных катастрофах XX века, включая нацистскую чуму и сталинские концлагеря, и стал весьма прибыльным занятием в области рекламы, дизайна, PR, маркетинга и других современных социальных технологий «соблазна» [13]. Возникновение телевидения, а затем и интернета только усилило значение эстетического фактора, поставив его в центр коммуникационных технологий, освобождающихся от этических параметров. Социальные взаимосвязи, не получив своих адекватных моральных средств развития, начинают развиваться в иной форме.

Наиболее активной из этих форм становится эстетическая форма, вытесняя религиозную и правовую. Религиозная форма социальной взаимосвязи не сдается, но при этом приобретает эстетизированную форму. И право остается, но тоже эстетизируется. Для права стало важнее произвести *эффект*, чем выразить идею *справедливости*. Работа суда присяжных, демонстрация заседаний судов на ТВ, дискуссия обвинителя и адвоката на суде — все это формы эстетизации права. Виртуальное пространство, о котором сейчас так много разговоров, по сути дела есть ценностное пространство эстетического характера [14-16]. Наконец, культура постмодернизма, развитие которой сейчас происходит на наших глазах, есть вершина развития эстетизма и его доминирования в общественных процессах.

И все же, несмотря на глубокое различие форм эстетизма двух эпох, приведенные оценки Гете и Гегеля справедливы не только для эпохи расцвета культуры романтизма, в которой стали доминировать игра и утонченный вкус. Объясняется это тем, что лишь какое-то время в XIX и XX веках прославиться в науке стало легче, чем в эстетике. Век господства науки как культурной ценности продолжался недолго. Правда, этого времени хватило на то, чтобы создать новые исторические предпосылки для нового этапа в развитии эстетических потенций культуры. Следовательно, наука тоже попала под очарование эстетизма, который использовал против своего конкурента в борьбе за умы и души людей испытанный прием: наука была обвинена в антигуманизме. Это привело к тому, что наука была вынуждена создавать свою этику, подчиняясь процессу профессионализации морали. Но как только мораль приобретает относительную форму, так появляются новые истоки и возможности эстетизма.

Несмотря на временное отступление победного шествия разума, идеи научного и технического прогресса все же не были совсем оттеснены в сторону. Однако современные молодые люди могут даже не поверить, что совсем недавно общество верило во всемогущество науки. Затем его стали пугать «сциентизмом» и скорым наступлением эпохи экспертократии и технократизма. Возник активный диалог о «двух культурах» (Ч. Сноу), который постепенно сошел на распространение устрашающих идей глобальных катастроф и «конца истории» (Ф. Фукуяма). Однако в последние два десятилетия, когда наука «согласилась» перейти в свою неклассическую стадию, а искусство – в стадию постмодернизма, ситуация радикально изменилась и снова все вернулось в исходную позицию, о которой нам двести лет назад поведали Шиллер и Гете, Кант и Гегель.

Итак, славное время для ученых было скоротечным. Сейчас в эстетике снова стало легче прославиться, чем в науке и морали. Правда, больше в практической эстетике, чем в ее теоретическом выражении. Да и на практике уровень эстетизации всех отношений человека очень и очень далек от того уровня, который был достигнут благодаря воздействию идей и образов «Фауста», музыки Бетховена и сказок Гофмана. Практическая эстетика приобрела технологический характер, но в качестве духовного основания этих технологий часто выступают иррациональные формы, а не диалектически утонченные конструкции Гегеля. Вся культура оказалась покрытой серым маревом масс-продукции, в нагромождении которой, создаваемом мощнейшими СМИ, трудно отыскать светлое и гуманистическое содержание искусства, а красоте потребовалось оправдание [17]. Идея единства морали и эстетики, подчиненного принципу «эстетической совести», которую развивал Виндельбанд, не нашла поддержки [18, 232].

Этика в этой ситуации оказалась в еще более «неудобном» положении, чем двести лет назад. Во-первых, в обществе функционирует множество исторически выработанных моральных систем, конкурирующих между собой, что, казалось бы, позволяет говорить о развитии морального сознания, но в действительности многообразие моральных кодексов ведет к эстетизации морали, начиная от гедонизма, эвдемонизма, утилитаризма, этики ненасилия и заканчивая этикой «благоговения перед жизнью». Доминирующими категориями морали становятся не добро и ответственность, а выбор и удовольствие. Даже удовольствие от выбора определенных моральных кодексов. Как итог развития этой тенденции – сложилась культура, которую П. Сорокин обозначил сенситивной.

Во-вторых, исчезновение доминирования моральных ценностей общего характера привело к возникновению отраслевых и даже индивидуальных моральных заповедей, что заставляет делать вывод об отмирании морали вообще как особого социального института. Действительно, любой неблагоприятный поступок всегда можно оправдать нормами профессионального кодекса, в который предусмотрительно вписываются все возможные моральные нарушения, но лишь только для того, чтобы уметь обойти их.

В-третьих, если моральные ценности и не отмирают вообще, то приобретают относительный, «текущий» характер, трансформируясь под напором все более жестких и активных

исторических факторов. «В чести» сейчас оказались не физики и не лирики, не истина и не красота, не доброта и не справедливость. Наступила эпоха, когда «короткое время нравится все», и больше всего нравятся «короткие деньги». Поэтому начинается не господство эстетики в ее классической форме, а господство *тотальной эстетизации*. Такого процесса, в котором каждое из явлений наделяется равным со всеми правом быть в полной мере *выраженным в мире*, независимо от общих моральных ограничений, если даже они существуют. И высшим уравниателем в утверждении этого права стали деньги.

В-четвертых, в моральном сознании началось доминирование идеи «морального выбора», которая только по видимости апеллирует к разуму человека, а на самом деле подчеркивает ситуацию случайности.

Эстетизм как способ преодоления социальных антагонизмов. Таким образом, для человека, переболевшего XX веком, достаточно очевидно, что эстетизм становится доминирующей идеологией тогда, когда в обществе существует гигантский социальный разрыв между бедностью и богатством, между имущими и неимущими классами, властью и народом. Так было всегда, в том числе и в нацистской Германии и в сталинском СССР. Поэтому вполне естественно поднимать проблему эстетизма в современной России, в которой, по последним статистическим и социологическим данным, богатые богаче бедных в 17 и более раз (в Москве аж в 50 раз!). Фантастически несправедливое распределение собственности удивило даже западных наблюдателей, показывающих нам, как Москва стала самой густонаселенной столицей долларовых миллиардеров, и как российские концерны с помощью государства задушили весь российский малый бизнес. Такое ощущение, что возвращаются советские времена, когда народу не разрешалось ни производить, ни торговать. Но тогда это делалось государством, а сейчас – монополиями, но результат один и тот же. О росте авторитаризма в России и сокращении демократических свобод сейчас не говорит только тот, кому нет никакого дела до политики.

Причем социальный разрыв с каждым годом увеличивается, заставляя общество изобретать все новые средства и механизмы эстетизации в двух направлениях.

Во-первых, заставляя социальную элиту искать новые средства развлечения, получения острых ощущений и завораживающих ландшафтов. Искать технологии легитимации и возвеличения собственных успехов, позволяющих выступать в качестве элиты. Искать социальные технологии, которые могли бы создать красивые имиджи, прикрывающие растущее социальное безобразие.

Во-вторых, вынуждает социальные низы искать средства духовного примирения со своим положением, средства, которые позволяли бы сохранить собственное достоинство и как-то скрасили положение «униженных и оскорбленных». Невольно возрождаются не только персонажи и образы художественных миров Ф. Достоевского, но и рекомендации А. Шопенгауэра об утешении шедеврами искусства и созерцанием страданий других. При всеобщей социальной маргинализации сознание человека не может всю эту «цветущую сложность» объяснить рационально и осваивает только религиозно или эстетически. СМИ взахлеб поглощают и лихорадочно тиражируют многообразную продукцию этого маргинализованного общества.

Букет эстетизма получается удивительно благоуханный. История ничего подобного давно уже не порождала и ее обоняние отвыкло от таких щедрых подарочных жестов, который сделала Россия на рубеже тысячелетий. Человечество до сих пор находится в состоянии шока от распада СССР и его многолетних последствий, которые шлейфом окутали всю планету и не видно еще конца этого распада. Этот шок привел к тому, что мысль заметалась в поисках приличного объяснения происходящего, но, ничего не найдя, успокоилось на спасительном эстетизме. Как утверждал еще Т. Адорно, «ложное общественное сознание в рамках программного эстетизма выражается в пронзительности тона, который наказывает эстетизм ложью» [19, 358]. Причем, наказывает ложью как эстетизм первого, элитного типа, так и эстетизм социального

дна. Пронзительность тона посещает не только публичные сферы жизни, но и приватные, выражаясь то в новой военной истерии, то в очередной сексуальной революции.

Таким образом, проблема не в том, что происходит идеологическая эстетизация социальной реальности, а в том, что процесс эстетизации приобрел антагонистическую направленность и сугубо мрачный по прогнозируемым результатам характер. И можно только удивляться цинизму социальной элиты, которая своим поведением непрерывно демонстрирует, как прекрасно быть богатым и здоровым, призывая к этому униженную часть населения. Создавая для этого кредитные банки, игровые автоматы, финансовые «пирамиды», запрещая пить и курить и призывая заниматься физкультурой. Но забывая при этом, что обращение с такими призывами к маргинализированному обществу, количественные параметры которого мы уже привели, можно назвать только социальным лицемерием. Но это и глубочайший эстетизм, поскольку нужно иметь извращенно-развитое и художественно-утонченное воображение, чтобы представить себе, что вся многомиллионная российская армия сырых и убогих тут же откликнется на эти призывы и стройными рядами выйдет на улицу заниматься оздоровительной гимнастикой, бросив наркотики, пить, курить, заниматься проституцией и совершать преступления.

Библиографический список

1. **Козырьков, В.П.** Генезис эстетизации общества и социологии / В.П. Козырьков // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Серия "Управление в социальных системах. Коммуникативные технологии". 2010. №1. С. 6-15.
2. **Козырьков, В.П.** Социокультурная трансформация эстетизма в становлении информационного общества / В.П. Козырьков // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Серия «Управление в социальных системах. Коммуникативные технологии». 2010. №2 (82). Н. Новгород: Изд-во НГПУ, 2010. С. 6–16.
3. **Лифшиц, М.** Кризис безобразия. От кубизма к поп-арт / М. Лифшиц, Л. Рейнгард. - М.: Искусство, 1968. – 230 с.
4. **Бахтин, М. М.** Эстетика словесного творчества / М. М. Бахтин. - М.: Искусство, 1986. – 445 с.
5. **Беньямин, В.** Произведение искусства в эпоху его технической воспроизводимости / В. Беньямин // <http://www.out-line.ru/ben.html>
6. **Андерсон, Б.** Воображаемые сообщества. Размышления об истоках и распространении национализма / Б. Андерсон. – М.: «КАНОН-пресс-Ц», «Кучково поле», 2001. – 288 с.
7. **Здравомыслова, Е.А.** Социальное конструирование гендера / Е.А. Здравомыслова, А.А. Темкина // <http://www.nir.ru/sj/sj/34-zdrav.htm>
8. **Ясавеев, И.Г.** Конструирование социальных проблем средствами массовой коммуникации / И.Г. Ясавеев. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2004. – 200 с.
9. **Хапаева, Д.** Готическое общество: морфология кошмара / Д. Хапаева. – М.: НЛЮ, 2008. – 151 с.
10. **Дюркгейм, Э.** Социология. Ее предмет, метод, предназначение / Э. Дюркгейм. – М.: Канон, 1995. – 352 с.
11. **Гегель, Г.В.Ф.** Лекции по эстетике. Т. 2. / Г.В.Ф. Гегель. – М.: СПб.: Наука, 2007. – 604 с.
12. **Сталь, Ж. де.** О литературе, рассмотренной в связи с общественными установлениями / Ж. де Сталь. - М.: Искусство, 1989. – 476 с.
13. **Бодрийяр, Ж.** Соблазн / Ж. Бодрийяр. – М.: Ad Marginem, 2000. – 318 с.
14. **Козырьков, В.П.** Антропология в системе интернеткоммуникации / В.П. Козырьков // Вестн ННГУ. Сер. "Социальные науки". Вып. 1 (4). Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2005. – С. 269-278;
15. **Козырьков, В.П.** Новые социально-онтологические аспекты коммуникации в развитии образовательной субкультуры / В.П. Козырьков // Вестн. ННГУ «Инновации в образовании». Вып. 1 (6). Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2005. С. 232–244;
16. **Козырьков, В.** «Тройное дно» интернетзнания / В.П. Козырьков // <http://club.fom.ru/entry.html?entry=1883>.

17. **Шатунова, Т.М.** Социальный смысл онтологии эстетического (опыт оправдания красотой) / Т.М. Шатунова. Казань: Изд-во КГУ, 2008.
18. **Виндельбанд, В.** Философия культуры. Избранное / В. Виндельбанд. – М.: ИНИОН, 1994. – 350 с.
19. **Адорно, Т.** Эстетическая теория / Т. Адорно. – М.: Республика, 2001. – 527 с.

*Дата поступления
в редакцию 22.04.2011*

V.P. Kozirkov

AESTHETICIZATION AS A WAY OF EXISTENCE OF THE INFORMATION SOCIETY

The aestheticism as historically later social phenomenon, social phenomenology of the modern Russian aestheticism. The nature of contemporary social reality and aesthetic sociology, aestheticism is presented as a way of overcoming the social antagonisms.

Key words: aestheticism, information society.

УДК 719

В.В. Кулачков

**МАССОВОЕ СОЗНАНИЕ КРЕСТЬЯНСТВА ЗАПАДНОГО РЕГИОНА РОССИИ
В ГОДЫ ПЕРВОЙ МИРОВОЙ ВОЙНЫ, РЕВОЛЮЦИИ И ГРАЖДАНСКОЙ ВОЙНЫ**

Брянская государственная инженерно-технологическая академия

Первая мировая война и последующие революционные события - период чрезвычайно насыщенный драматическими событиями и фундаментальными общественными сдвигами. Массовое сознание в этот период представляло гораздо более подвижным явлением, накапливающим новые черты и признаки и представляло собой сознание крестьянства как социальной общности. Период революции и гражданской войны способствовал радикализации массового сознания крестьянства, однако основной задачей крестьян было стремление защитить себя, свои семьи и имущество от государственного произвола. Становление новой экономической политики способствовало возникновению определенного компромисса во взаимоотношениях власти и общества.

Ключевые слова: первая мировая война, революция, массовое сознание, крестьянство, радикализация, консерватизм

Россия вступила в революцию с широко ощущавшимся недовольством существовавшим положением вещей и с пониманием истощенности ресурсов старого строя, отсутствием у него перспектив развития. Первое послереволюционное десятилетие – период чрезвычайно насыщенный драматическими событиями и фундаментальными общественными сдвигами. Массовое сознание в этот период представляло гораздо более подвижным явлением, накапливающим новые черты и признаки и представляло собой сознание крестьянства как социальной общности. Первая мировая война, которая предшествовала революционным событиям, также способствовала изменению повседневности крестьянства. В обстановке первой мировой войны усложнились отношения личности, общества и государства. Военная атмосфера, новые черты повседневной жизни, изменение условий существования, социального окружения вызывало у провинциальных жителей переосмысление ценностей и норм, восприятия себя как личности, равно как и своего отношения к ближайшей и высшей власти. Отправляясь служить царю и Отечеству, крестьянин переходил из одного социального и экзистенциального состояния в другое [1]. Отныне не он сам распоряжался своими поступками и даже своей жизнью, а государство целиком и полностью располагало им. Через это крестьянин чувствовал себя более тесно причастным государственному началу, становился частью государственного механизма. Эта теоретическая посылка подтверждается словами самих мобилизованных, чьим лозунгом у дверей винных лавок было: «Водка государева, и мы государевы, а кто не даёт её нам, тот изменник» [2]; садясь на ремонтных лошадей, запасные заявляли офицеру, что лошади теперь принадлежат им [2]. Подобные рассуждения объясняют настойчивость и решительность мобилизованных: даже самые резкие и очевидно противозаконные действия они считали для себя правомерными. Вместе с тем ещё требует уточнения вопрос о том, что же так жёстко определяло цель их действий. С моей точки зрения, спиртное выступает здесь как необходимый атрибут ритуального закрепления перехода в новое состояние. В большинстве культурных традиций тот или иной опьяняющий напиток используется как средство достижения особого сакрально отмечаемого состояния, служащего своеобразным медиатором между разными этапами жизни, которые воспринимаются традиционным сознанием как качественно разные формы человеческого существования. Эту функцию опьяняющий напиток повсеместно выполняет в свадебных ритуалах, при крещении (наречении имени), на поминальной трапезе [3].

Период мировой войны, революции и гражданской войны способствовал радикализации массового сознания крестьянства, однако нельзя категорически утверждать, что на-

строению большинства людей в деревне были присущи желание немедленно все разрушить и начать создавать новое общество. Понятно, что подобные настроения революционного утопического романтизма были весьма распространены. Крестьянскую нетерпимость к волостным старшинам и писарям как представителям старого мира, образно выразил в 1917 году крестьянин Потапов из Калужской губернии в письме Московскому совету рабочих депутатов: «Пока этот весь гной не выпустили, дело будет тормозиться. Надо очистить почву от этих злых плевел» [4]. В плане практического воплощения этих слов крестьяне стремились к обновлению состава волостных судов. Когда на заседании Орловского уездного исполкома 29 мая 1917 г. представитель одной из волостей спросил, как быть с прежним составом суда, которому народ не доверяет, ему ответил делегат Чудновской волости: «у нас избран новый состав суда по одному судье от каждого общества, и народ ему верит» [5]. Крестьяне с. Морозово Щучинской волости Поречского уезда Смоленской губернии 27 сентября 1917 г. явились к мировому судье и потребовали удалиться, заявив, что: «никаких судов, кроме комитета, им не нужно» [6].

Все эти события происходили при Временном правительстве, которое слабо контролировало ситуацию в стране. Его комиссары на местах, в частности в Смоленской губернии, докладывали в 1917 г.: «Самовольная рубка частновладельческих и казенных лесов расширяется, принимая размеры поголовного истребления лесов... Милиция плохо поставлена, бессильна бороться и то, что она предпринимает, парализуется бездеятельностью судов... Комиссары одни бессильны, когда все организации сочувствуют поступкам населения. Революционная власть должна воздействовать на непокорных революции жестоким путем, истребление лесов можно прекратить только силой» [7]. Телеграмма от 24 апреля 1917 г. из Орловской губернии в адрес Временного правительства сообщала: «В Болховском уезде крестьяне самовольно устанавливают арендную плату, запрещают наниматься на полевые работы. В казенных лесничествах крестьяне удаляют лесную стражу» [8]. В Калужской губернии: «В Козельском и Калужском уездах крестьяне отказываются обрабатывать землю, требуют сдачи в аренду земли и лугов, не допускают рубки леса» [9]. Как это обычно бывает в смутное и беспокойное время, обострился и продовольственный вопрос: «Следует указать на вывоз хлеба из Орловской губернии крестьянами Калужской губернии. Крестьяне гужом и по железной дороге отправлялись за хлебом и ежедневно вывозили 8-9 тыс. пудов по страшно высоким ценам и без всякого учета» [10].

Для контроля ситуации в стране были необходимы грамотные кадры, но в годы гражданской войны катастрофически не хватало квалифицированных людей, умеющих работать с крестьянским населением. Так, в 1919 г. в отчете народному комиссару государственного контроля из Ливенского уезда Орловской губернии сообщалось: «Нужда в работниках в учреждениях страшная – совершенно отсутствуют мало-мальски опытные счетоводы... Между тем, после августовского крестьянского восстания, когда почти все представители власти и партии были перебиты – ни губерния, ни Центр, не прислали должного числа хороших работников и агитаторов, дабы правильно осветить задачи Советской власти и поднять в сознании крестьянства внутренний авторитет таковой» [11]. В отчете по Смоленской губернии отмечалось: «В распоряжении Губпродкома до сих пор нет точных статистических данных для учета населения, наличия хлебных запасов и будущего урожая; товарообмен, как средство получения от крестьян хлеба, совершенно прекратился в губернии» [12]. Деревенские коммунисты должны были стать основой партии, но селяне не имели особых оснований хорошо относиться к членам деревенских комячеек. Как правило, сельские коммунисты по своему уровню стояли ниже «среднего» хозяина; никакой партийной дисциплине они не подчинялись, да и контроль за их действиями вряд ли был возможен, «ячейка» представляла в глазах общины поощряемым начальством сообществом местных хулиганов, если не хуже того [13]. Инструктор НКВД в 1918 г. писал из Орловской губернии: «Деревенские ячейки требуют тщательной чистки, что может обеспечить спокойствие деревни» [14]. На Орловской губернской конференции коммунистов, проходящей 9 июня 1918 г., руководитель парт-

организации Э.О. Ваксин, характеризуя текущий момент и поведение крестьянства, заявлял: «Несознательные массы в настоящее время отклонились от нас...» [15]. На этой же конференции представитель крупнейшего в Орловской губернии Елецкого уезда Еркин говорил: «С крестьянами нам очень трудно сладить...» [15]. По некоторым свидетельствам (даже самих коммунистов), община укрепляла свои позиции, несмотря ни на что. Сельсоветы оставались фикцией, вывеской, прикрывающей ее всевластие [16].

Представляется, что по отношению к периоду революции и гражданской войны можно говорить лишь о «чрезвычайщине», хотя к концу стали появляться элементы «нормальности». Подтверждением этого может служить выдержка из доклада по Смоленской губернии Ф.М. Федорова, работающего в апреле 1920 г. при агитационном поезде: «В деревне промслов никаких, кустарных начинаний нет... До сего времени подталкивали боевые лозунги и мы побеждали, за победой население ждало улучшения, а земного рая не видно и до сих пор» [17]. Выходец из крестьян, курсант курсов «Вымпел» Ф.М. Бобриков после возвращения из отпуска так описывал обстановку дома (Орловская губерния, Малоархангельский уезд, Губкинская волость, село Орляки, январь 1921 года): «Крестьяне только запуганы всевозможными агентами и отрядами, которые воспитывают дулом и плеткой, совершенно не нужны в деревне с таким примером» [18]. Курсант курсов «Выстрел» И.К. Петров в 1921 году после поездки домой (Смоленская губерния, Юхновский уезд, Ильи-Жаденская волость) сообщал в заявлении в партком: «сильно распространены незаконные обыски и реквизиции продуктов у крестьян, даже выполнивших разверстку... При обысках практикуется запугивание крестьян, оружием и арестом. В общем, ведут себя, как бандиты, и этим наводят страх на местное население» [18]. Действительно, в первые годы существования Советской власти таких случаев было огромное количество. Орловский губкомпартии докладывал в ЦК РКП (б): «Конец марта и первая половина апреля прошли под полосой кулацких восстаний, охвативших в той или иной степени все почти уезды (за исключением Карачевского и Мценского)» [19]. Секретарь Елецкого укома РКП (б) К. Гроднер настаивал на применении репрессий при сборе чрезвычайного налога [20]. Крестьяне-уполномоченные Е.Т. Бондарев и П.Г. Сиволобчиков от хутора Сокольники Ленинской волости, Боровского уезда, Калужской губернии в письме председателю ВЦИК Калинину от 9 мая 1920 года писали: «Выполнение этих нарядов (*продразверстка*) производилось вооруженным продотрядом, и скот у некоторых брался влиянием силы оружия. Подобные распоряжения Боровского Райпродкома окончательно подрывают доверие власти, и в ней многие теперь видят безнаказанные, чуть ли не диктаторские, неправильные в то же время распоряжения» [20].

Понятно, что большинство крестьян стремилось жить спокойно, без применения насилия. Для многих жителей деревни первые месяцы существования нового режима принесли потери, которые невозможно было компенсировать. Менталитет революционного радикализма масс формировался не только стремлением к социальному реваншу, но и целым комплексом иных причин: низкой образованностью и неразвитостью интеллекта, специфической культурой российской деревни, самым стремительным водоворотом революционных событий, лишавших людей времени и способности трезво анализировать свои действия. Немалую роль в разжигании социальных инстинктов играли слухи и в целом революционная мифология, чрезвычайно искажавшая массовое сознание. Нарушения прав человека в годы Гражданской войны носили системный характер, поскольку, как справедливо отмечает В.П.Булдаков, «террор был для большевиков сначала средством разжигания так называемой классовой борьбы, а затем превратился в форму утверждения особого рода государственности» [21]. С этой мыслью согласен и С.А.Павлюченков, полагающий, что террор «одновременно служил и орудием борьбы, и инструментом социального преобразования общества. Террор врос корнями в большевистскую идеологию классовой борьбы и строительства бесклассового общества, питался ее соками, получая от нее энергию и нравственное оправдание» [21]. Эти мнения можно подтвердить отношением крестьян к натуралогу: «Граждане деревни Жилина в декабре 1921 г. Теплухин Григорий, Дмитриков Егор и Пашкин Анд-

рей дали обязательство..., что выполнят в двухнедельный срок... налог по сену и маслу» [22]. 8 сентября 1921 г. на заседании коллегии Брянского губернского продовольственно-го комитета прозвучали такие заявления крестьян: «Скажите, сколько с меня причитается, и я уплачу сдачу, чтобы развязать себе руки» [23]. В докладе члена Песоченской организации РКП(б) И.П. Ахrameева после объезда Лосинской волости Бежицкого уезда сообщалось: «От уплаты продналога никто из граждан не отказывался, но есть беднейшее население, которое не может уплатить... Я говорил им, что будет создана специальная комиссия, которая решит судьбу взыскания с них налога...» [24]. К неплательщикам применялись административные и судебные меры воздействия. В 1921/22 г. из 176 тыс. крестьянских хозяйств на 0,2% было наложено пени, 0,75% предано суду и 1% арестовано [25].

Выступления против власти и борьба с ней различными средствами и способами, в том числе и с оружием в руках, активизировали деятельность революционных трибуналов. Так, приговор Смоленского губревтрибунала от 3 июля 1920 г. гласил: «Новодова и Ребинкова... как злостных преступников и изменников делу Рабочих и Крестьян в момент наступления польской и баронской белогвардейщины объявить вне закона и расстрелять в 24 часа» [26]. В 1921 году в адрес ВЦИКа была направлена телеграмма с просьбой о помиловании от имени Я.И. Лагуткина (Орловская губерния, Дмитровский уезд, Гладинская волость, село Столбово). Он писал, что является пролетарием и за сочувствие вооруженному восстанию в Дмитровском уезде приговорен к высшей мере наказания. Указывал причины для смягчения приговора: семья из 5 человек, отец 65 лет, брат в Красной армии, 3 детей и жена. Однако Орловский революционный трибунал сообщал, что Я.М. Лагуткин не достоин помилования, т.к. был активным участником Дмитровского вооруженного восстания в Орловской губернии в феврале-марте 1921 г. и отдавал распоряжения о расстреле коммунистов. Конечно, телеграмма не имела последствий [27].

Письма, жалобы, заявления с мест свидетельствовали, что усвоение «революционного правосознания», основанного на тотальном отрицании прав личности, давалось с трудом. Противоправные, с точки зрения нормального массового сознания, конфискационные действия властей вызвали поток писем во власть. Характерно, что люди не посылали на головы властей проклятья и не угрожали взяться за оружие. Наоборот, граждане пытались использовать малейшие юридические зацепки, какие только можно было выискать в зыбком правовом пространстве коммунистического режима. Это иллюстрирует прошение крестьянина С.А. Сироткина, датированное 1920 г. (Смоленская губерния, Гжатский уезд, Трубинская волость, дер. Лескино-Столбово) на имя председателя ВЦИК М.И.Калинина: «Я и мои дети никогда нигде торговлей не занимались, наемным трудом не пользовались, людей не эксплуатировали, а также спекуляцией не занимались, а жили и кормились своим честным трудом, что подтверждаю сельским приговором. Вследствие вышеизложенного, покорнейше прошу ВЦИК успокоить мою старость: освободить моего сына И.С. Сироткина из Смоленской тюрьмы; возратить моим дочерям их приданое. При сем прилагаю приговор о раздельном состоянии моих детей и приговор о моей честной трудовой жизни» [27]. В данном случае характерна попытка построить аргументацию на формальных основаниях – ссылка на сельские приговоры. Это не единичные примеры ссылки на инструкции, постановления и декреты, что все чаще использовалось в качестве стратегии апеллирования к власти.

Основной задачей крестьян было стремление защитить себя, свои семьи и имущество от государственного произвола. Поэтому правовая и правозащитная тематика, равно как и собственно понятие закона, настойчиво входят в различные формы апелляции к власти в качестве способа нормализации отношений с государством, придания им более спокойного и прагматичного характера. Различные беззакония власти рождали потребность воззвать к рационализации взаимоотношений общества и государства, показать «вождям» практическую пагубность и невыгодность произвола по отношению к крестьянству. Это неминуемо выводило корреспондентов на упоминание о законе и необходимости его неукоснительного со-

блюдения. При этом многие крестьяне пытаются доказать, что они честно и граждански ответственно готовы пройти и реально проходят свою часть пути в направлении установления с государством социально доверительных и, главное, правооснованных отношений. Массовое нарушение большевиками прав собственности, всякого рода конфискации и реквизиции, коснувшись в той или иной степени большинства крестьянства, также вели к масштабной рационализации сознания. Именно борьба за собственность миллионов и миллионов людей в наибольшей степени характеризует уход от революционных мифов. Через противодействие всепоглощающему конфискационно-репрессивному маховику происходила активизация правосознания и гражданской психологии. Само большевистское начальство, как отмечает, в частности, А.Черных, все более и более ощущало, что для решения конструктивных задач (в том числе организации экономики, снабжения армии и в целом выживания коммунистического государства) негативная разрушительная энергия масс оказалась малопригодна или по крайней мере недостаточна [28]. Таким образом, реальная ситуация стимулировала ростки права в массовом сознании крестьянства и в целом большинство сельских жителей в ту эпоху отличало рациональное и прагматическое мировосприятие. Стремление спокойно и уверенно вести хозяйство, знать, каких действий следует ожидать от власти и как выстроить в связи с этим возможную стратегию поведения, – все это говорило о продолжении процесса рационализации массового сознания.

Библиографический список

1. **Булдаков, В.П.** Красная смута: природа и последствия революционного насилия / В.П. Булдаков. М., 1997. – 193 с.
2. ГАОО. Ф.580. Ст.1.Д.5962. Л.47.
3. **Топоров, В.Н.** Опьяняющий напиток // Мифы народов мира. Энциклопедия. Т. 2. – М., БСЭ.2000. С. 256-258.
4. Госархив Московской области. Ф.683. Оп.11.Д.31.Л116.
5. ГАРФ. Ф.6978. Оп.1.Д.416.Л.6.
6. РГИА. Ф.2049. Оп.1.Д.379.Л.105.
7. ГАРФ.Ф.1778. Оп.1. Д.56. Л.1-1об.
8. ГАРФ.Ф.1778. Оп.1. Д.302. Л.27-27об.
9. ГАРФ.Ф.1778.Оп.1.Д.302. Л.35об.
10. ГАРФ.Ф.1778. Оп.1. Д.302. Л.196.
11. ГАРФ.Ф.4390.Оп.1.Д.123.Л.72.
12. ГАРФ. Ф.4390. Оп.1.Д.275. Л.22.
13. **Павлов, Б.В.** Коммунистическая партия и советская политическая система в 1918–1920 гг. // Общественная мысль, политические движения и партии в России в XIX–X вв. – Брянск, 1996. С. 92–93.
14. ГАРФ. Ф.393. Оп.13. Д.270. Л.304об.
15. ГАОО. ФП. 1.Оп.1.Д.16.Л.11,17.
16. **Яковлев, Я.** Наша деревня. Новое в старом и старое в новом / Я. Яковлев. –М., 1924. С.141–142.
17. ГАРФ.Ф.130.Оп.4.Д.346.Л.1.
18. Письма во власть. 1917–1927. Заявления, жалобы, доносы, письма в государственные структуры и большевистским вождям. – М., 1998.
19. См.: Переписка секретариата ЦК РКП(б) с местными партийными организациями (апрель-май 1919г.). Сб. док-ов. Т. VII. М., 1972. С. 415.
20. **Осипова, Т.В.** Крестьянский фронт в гражданской войне // Судьбы российского крестьянства. – М., 1996. С. 106.
21. **Павлюченков, С.А.** Военный коммунизм в России: власть и массы / С.А. Павлюченков. – М., 1997. – 258 с.
22. ГАБО. Ф.Р-11.Оп.1.Д.533.Л.5.
23. ЦНИБО.Ф.29.Оп.1.Д.417.Л.21.
24. ГАБО.Ф.Р-11.Оп.1.Д.533.Л.15.
25. ГАБО.Ф.Р-11.Оп.1.Д.533.Л.44.

26. ГАРФ. Ф.Р-1005.Оп.67.Д.28.Л.137.

27. ГАРФ.Ф.1005.Оп.3.Д.35.Л.9.

28. **Черных, А.** Становление России советской: 20-е годы в зеркале социологии / А. Черных. – М., 1998. С. 22.

*Дата поступления
в редакцию 22.04.2011*

V.V. Kulashcov

**THE CONSCIOUSNESS OF THE MASSES OF THE PEASANTRY
WEST REGION OF RUSSIA IN THE YEARS OF THE FIRST WORLD WAR,
THE REVOLUTION AND THE CIVIL WAR**

The First World War and the subsequent revolutionary events - the period of extremely intense dramatic and fundamental social changes. Mass consciousness in this period appeared as a much more fluid phenomenon, accumulating new traits and characteristics and represents the consciousness of the peasantry as a social community. Period of revolution and civil war contributed to the radicalization of the mass consciousness of the peasantry, but the main objective of the peasants was to protect themselves, their families and property from state tyranny. Formation of a new economic policy has contributed to some compromise in the relationship of government and society.

Key words: The First World War, revolution, mass consciousness, the peasantry, the radicalization, conservatism.

УДК 378.1: 159.9

Е.Е. Щербакова, А.В. Корнишин

**РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ
ПО ФОРМИРОВАНИЮ КРЕАТИВНОСТИ У СТУДЕНТОВ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Нижегородский архитектурно-строительный университет

Представлены основные базовые слагаемые педагогической деятельности. Разработанная концептуальная модель развития креативности построена в контексте креативно-педагогической методологии и учитывает взаимосвязь ее компонентов. Рассмотрены условия, необходимые для развития креативности.

Ключевые слова: педагогика творчества, психология творчества, креативность, педагогическая деятельность, субъект педагогической деятельности.

Проанализировав особенности студенческого возраста, П. Ростопшин (2001) выделяет следующие аспекты [1, с. 83]:

1. Выявление закономерностей психологической теории обучения в высшей школе теснейшим образом связано с рассмотрением особенностей психологии студенческого возраста (в среднем 17–22 года). Это возраст расцвета физического и умственного развития человека. Но расцвет – еще не зрелость.

2. С приближением зрелости происходит непрерывное нарастание работоспособности, динамики активной деятельности, продуктивности. В то же время моменты повышения динамики одной функции сменяются моментами понижения других функций.

3. В этом возрасте наблюдаются развитие вербального интеллекта, динамичность возбуждения, повышаются уровень наблюдательности и общая культура наблюдения. Совершение действий, поступков преобладает над их обоснованием. В этом возрасте характерны проявление максимализма, стремление к скорейшему проявлению себя в сложных жизненных ситуациях без достаточно глубокой оценки вероятных последствий совершенных поступков, эгоцентризм.

4. Наблюдается безразличное отношение к опыту других людей; советы, замечания старших воспринимаются как необоснованное вторжение в личную жизнь. Характерно стремление к независимости, самостоятельности, увлечение новым (не всегда прогрессивным).

5. Наряду с самоуверенностью возникает неуверенность в своих возможностях, что часто проявляется в развязности, небрежности, негативизме и даже в агрессивности. В этом возрасте весьма заметны мотивы товарищества и дружеской солидарности.

6. Наряду с любознательностью, стремлением к новому, проявлением интереса к определенной деятельности и области знаний имеют место отрицание и скептицизм как следствие поверхностных взглядов. Категоричность мнений в этом возрасте легко может измениться, особенно под влиянием референтной группы.

7. Возраст 17–23 года – наиболее плодотворный для формирования знаний, научного и профессионального развития, совершенствования всесторонней мыслительной культуры.

В отношениях к учебной и научной работе П. Ростопшин (2001) выявляет специфические студенческие типы: эмпирики, аналитики, рационализаторы, логики, исполнители, организаторы, систематики, эрудиты, генераторы идей, романтики, подражатели и даже перехватчики мыслей [1, с. 84]. На наш взгляд, для формирования плодотворных ценностных ориентации у всех перечисленных студенческих типов необходимо развивать качества креативности.

А.В. Хуторской (2000) выделяет такие креативные качества личности, как фантазия, воображение, самобытность, чувство новизны, интуиция, вдохновенность, инициативность, педагогическое творчество [2, с. 315].

Н. Роджерс (1990) пишет: «Под педагогическим творчеством учителя нужно прежде всего понимать целенаправленную созидательную деятельность, предполагающую систематическое совершенствование, с одной стороны, осуществляемой им учебно-воспитательной и общественно-педагогической работы, а с другой - профессионального мастерства посредством овладения новейшими достижениями науки, передового опыта и активизации собственных научно-методических поисков» [3, с. 164-168].

Важнейшим фактором развития творческих способностей в период обучения в вузе является состояние творческого самочувствия. Для развития творческого самочувствия необходимо создавать благоприятные условия, также важной частью процесса является работа человека над самим собой.

Под психологической устойчивостью в педагогической деятельности следует понимать синтез свойств и качеств, позволяющих уверенно, самостоятельно, без излишнего напряжения осуществлять свою профессиональную деятельность в различных, часто непредвиденных условиях (Р.И. Хмелюк, 1986).

Показателями психологической устойчивости в педагогической деятельности являются следующие:

- 1) уверенность в себе как в учителе;
- 2) отсутствие страха перед детьми;
- 3) умение владеть собой (саморегуляция, самоконтроль);
- 4) эмоциональная устойчивость, характеризующаяся отсутствием раздражительности, неуравновешенности;
- 5) наличие волевых качеств (целеустремленности, организованности, выдержанности, решительности, самообладания, терпимости);
- 6) удовлетворенность деятельностью.

Страх, эмоциональное напряжение молодого учителя вызывает нестандартная ситуация на уроке, вопросы учащихся, принятие самостоятельного решения и т.д. Еще в период обучения студентов в вузе можно подготовить будущего учителя к преодолению отрицательных эмоций, сформировать психологическую устойчивость.

В период обучения в вузе психологическая устойчивость обеспечивается формированием:

- 1) устойчивости интереса и потребности в педагогической деятельности;
- 2) профессионально значимых мотивов;
- 3) волевых качеств личности;
- 4) педагогической техники;
- 5) способности психической саморегуляции.

Из сказанного можно сделать вывод, что психологическая устойчивость является неотъемлемым условием творческого самочувствия.

Рассматривая психологическую сущность творческого самочувствия, выделим ее составляющие:

- психологическая саморегуляция;
- психологическая устойчивость;
- оптимальное психо-эмоциональное состояние студента.

Творческое самочувствие определяется оптимальным психоэмоциональным состоянием соответствующей деятельности, которая может быть сформирована посредством:

- развития навыков релаксации;
- развития навыков набора энергии.

Систематизируя положительное влияние творческого самочувствия на студента, можно выделить основные аспекты:

- повышение интеллектуальных и социальных, в том числе и педагогических способностей, глубины восприятия действительности и отдельных явлений;
- развитие аналитических возможностей;

- выработка чувства глубинного спокойствия, приобретение
- способностей к управленческой деятельности;
- улучшение памяти;
- повышение эстетических вкусов, развитие чувства гармонии, красоты;
- улучшение психо-эмоционального состояния;
- чувство радости;
- душевное спокойствие.

Н.В. Самоукина (2002) обращает внимание на то, что практическая психологическая подготовка школьного учителя до сих пор остается нерешенной проблемой. В педагогических университетах и колледжах кроме получения знаний по содержанию и методике обучения детей, студенты дополняют и конкретизируют педагогические знания в ходе педагогической практики в школе, являющейся обязательной для всех слушателей педагогического профиля с целью формирования у них практических навыков овладения методикой преподавания. Но при этом специальной психологической практики для студентов не существует.

Последствия такого положения дел: преобладание формального стиля общения учителя и недостаток личностного общения с учениками, неумение понять индивидуальность учащегося, отсутствие навыков развивающего воздействия, невладение учителями внутренними средствами профессиональной психотехники и саморегуляции. Только немногие учителя, приходя в школу, успешно нарабатывают психологический опыт самостоятельно, большинство же сталкивается с проблемами в общении со школьниками, конфликтует с ними и их родителями, применяют преимущественно директивные средства воздействия, находятся в состоянии хронической усталости.

В работе преподавателей при изучении студентов должен учитываться фактор интеллектуальной креативности и социальной креативности как проявление одной из ведущих потребностей, реализующейся в их поисково-преобразовательной деятельности.

Формировать креативность студентов следует в условиях индивидуального подхода с учетом их мотивационной направленности. Формирующий эксперимент включает в себя в рамках учебных дисциплин «Введение в специальность», «Общая психология», «Возрастная психология» проведение лекций и семинаров, развивающих креативность и тем самым формирование соответствующих ценностных ориентации, а также тренинговые занятия по авторской методике «Активизация творческого потенциала будущего психолога-педагога».

Креативный эффект лекций достигается благодаря сформулированным на них заданиям и проблемам. Приведем возможные виды заданий студентам на лекции:

1. Ответить на 2-3 заранее записанных на доске вопроса. План лекции также может быть записан в виде вопросов. В конце занятия студенты зачитывают свои ответы, сравнивая их.

2. Выявить черты сходства и отличия между рассматриваемыми на лекции явлениями, понятиями.

3. Самостоятельно составить план лекции (простой или сложный). В конце занятия студенческие планы зачитываются, сравниваются.

4. Воспроизвести в тетрадях основное содержание лекции (конспективно или схематично, в виде таблицы или символического рисунка).

5. Придумать и задать свои вопросы по содержанию лекции.

6. Сделать собственные выводы из лекции, отразить личный взгляд на проблему в виде последующего мини-сочинения.

7. Сформулировать проблему на завтра - прием, когда поставленная преподавателем или возникшая у студентов проблема не рассматривается на текущей лекции, а переносится на следующее занятие. Студенты имеют время для ее осмысления [300, с. 194-196].

По доминирующим формам коммуникации студентов креативные лекции и семинары строятся на перечисленных далее видах работы:

Индивидуальное самообучение — студенты выполняют ту или иную самостоятельную работу (с изучаемыми объектами, учебниками, решением психолого-педагогических задач, исследовательская работа) и составляют письменные сообщения по ее результатам.

Парное взаимообучение - студенты в стабильных парах либо в парах сменного состава (студенты в течение семинара меняются местами по типу конвейера) объясняют друг другу какой-либо вопрос, защищают свою тему, оценивают результаты друг друга.

Групповая работа по общей теме. Обучение внутри группы. Студенты, объединенные в группы, взаимодействуют внутри них: объясняют новый материал, обсуждают его, оценивают свою деятельность, готовят выступление, проводят фрагмент занятий.

Взаимообучение групп. Группы, занимающиеся разными проблемами или видами деятельности, например, теоретики и экспериментаторы, временно объединяются, чтобы поделиться опытом, информацией, проблемами.

Студент вместо преподавателя. Один или двое учеников обучают всю группу, проводя лекцию или семинарское занятие.

Подготовка студентами выступлений. Отрабатываются такие виды деятельности, как техника выступления, методика ведения дискуссии, формулировка вопросов и ответов к ним, аргументация суждений, рецензирование, оценивание, анализ.

Самоорганизующий коллектив. По мере того, как студенты овладевают определенными видами деятельности, им представляются все большие возможности в самоорганизации обучения. Например, спонтанное либо специально организованное (методом «круглого стола» или «мозговой атаки») рождение замысла семинара (или их серии) ведет к образованию координационной группы учащихся, уточнению тематики и технологии занятия, коллективной подготовке и проведению занятия.

Для развития оргдеятельностных качеств студентов на семинарах, развивающих креативность, применяются различные способы образования подгрупп:

1. Подгруппы создаются на основе уже существующего размещения студентов в аудитории. Например, подгруппу образуют четыре студента, сидящие за двумя соседними столами, либо студенты целого ряда. Данный способ имеет формальную основу, но требует меньше всего времени для осуществления.

2. Преподаватель в соответствии со своими критериями определяет состав студенческой подгруппы. Способ эффективен для решения внешних задач преподавателя при условии авторитета и доверия к нему студентов.

3. Студенты самостоятельно разбиваются на подгруппы по 4-6 человек еще до семинара или в самом его начале. Наиболее естественный самоорганизующий способ, но требующий увеличенных затрат времени.

4. Студенческая группа или преподаватель по определенным критериям выбирает лидеров будущих групп, которые набирают себе в группы остальных студентов. Подгруппы заполняются постепенно и равномерно на основе взаимного самоопределения учеников.

5. Преподаватель определяет студентов, которые осуществляют набор остальных членов подгруппы, затем в подгруппах выбираются групповоды. Данный способ помогает развитию коммуникативных навыков студентов, дает им шанс активного взаимодействия.

6. Преподаватель или студенты определяют и записывают на доске перечень главных вопросов по изучаемой теме. Каждый студент выбирает для себя проблему и входит в соответствующую подгруппу. Если подгруппы оказываются слишком большими, они разбиваются еще на несколько подгрупп. В созданных подгруппах выбираются лидеры.

7. Сначала выбираются лидеры подгрупп, которые определяют проблему для занятия в подгруппе, затем остальные студенты расходятся к лидерам по известным темам. Способ эффективен при наличии студентов - специалистов по данному направлению.

8. По одной и той же теме (например, тема «Дошкольный возраст» в рамках дисциплины «Возрастная психология») задается несколько аспектов ее изучения с разными видами деятельности (например, «игра», «рисование», «лепка», «аппликация», «конструирование», «восприятие сказки», «трудовая деятельность», «учебная деятельность»). Студентам психолого-педагогических специальностей предлагается выбрать подгруппу с приоритетными для них видами деятельности, при этом происходит выбор ими индивидуальной траектории изучения темы.

9. Самоорганизация групповой работы. Студентам предлагается самим определить проблемы для групповых занятий и виды деятельности своих подгрупп. Преподавателем задаются временные рамки деятельности подгрупп и формы предоставления образовательного продукта. Группы запрашивают необходимые методики для проведения эксперимента, идут в библиотеку, на экскурсию (например, в детский сад) и т.д.

10. Поэтапное образование групп. Первоначально 3-5 студента, достигшие определенных успехов в изучении темы или проблемы, объединяются к подгруппу и самостоятельно работают в ней. С остальными студентами преподаватель занимается по своему плану. Подгруппа студентов по ходу обучения расширяется, разбивается, в свою очередь, на подгруппы по определенным критериям. Так происходит до тех пор, пока большинство студентов не войдут в подгруппы. Данная форма стимулирует переход студентов к групповой работе, однако требует от преподавателя владения ситуативными методами организации обучения.

Особого внимания для проведения семинаров, развивающих креативность студентов, заслуживает технология организации работы в группах. Так как группы занимаются на семинаре в основном самостоятельно, студентов необходимо к этому подготовить. Проводится общий инструктаж, раздаются специальные памятки, заранее готовятся задания, преподаватель принимает участие в работе отдельных групп.

Библиографический список

1. **Рогов, Е.И.** Учитель как объект психологического исследования: пособие для школьных психологов по работе с учителем и педагогическим коллективом / Е.И. Рогов. – М.: Гуманит. Изд. Центр ВЛАДОС, 1998. С. 258–294.
2. **Чернова, Э.Г.** Ценностные ориентации современной учащейся молодёжи малых городов центрально-европейского региона России: автореф. дисс. ... канд. психол. наук. – М., 2003. – 16 с.
3. **Сартаков, И.В.** Инициатива в творческой деятельности // Активность личности: сб. научных трудов. – Новосибирск. 2000. Ч. II. С. 133–141.

*Дата поступления
в редакцию 22.04.2011*

E.E. Sherbakova, A.V. Kornishin

There are basic categories of pedagogical activity. The developed conceptual model of creativity is constructed in a context of creative-pedagogical methodology. It takes into account some correlation of its components. The conditions that necessary for development of creativity are considered also.

Key words: pedagogics of creativity, psychology of creativity, creativity, pedagogical activity, the subject of pedagogical activity.

МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 629.7.05/06: 531.781.2 (075.8)

В.Л. Волков

ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ПАРАМЕТРАМ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

Арзамасский политехнический институт (филиал) НГТУ им. Р.Е. Алексеева

Сформулированы требования к электромеханическим параметрам МЭМС акселерометра по критерию статической точности. Выявлены параметры, наиболее сильно влияющие на основной показатель качества акселерометра – крутизну статической характеристики. Разработана методика расчета статических характеристик акселерометра для заданного диапазона измерений.

Ключевые слова: МЭМС, акселерометр, статическая характеристика, чувствительность, корректирующее устройство, средний квадрат ошибки, допуск параметра, точность, моделирование.

Постановка задачи

Результаты научно-исследовательской работы, представленные в [1] показали возможность создания микромеханического компенсационного акселерометра в условиях отсутствия измерительных шумов с оптимальными параметрами, обеспечивающими минимальные значения динамических ошибок. Была дана оценка влияния параметров корректирующего устройства (КУ) датчика на средний квадрат ошибки (СКО) и сформулированы требования к допустимым отклонениям параметров КУ относительно расчетных.

Однако, задача обоснования требований к параметрам акселерометра значительно сложнее и предполагает формулирование требований, прежде всего, на основе обеспечения статической точности. Такая задача может быть решена только при выявлении параметров, наиболее сильно влияющих на основной показатель качества – крутизну статической характеристики. Необходимо оценить допуски на электромеханические параметры датчика и КУ при заданном допуске на крутизну статической характеристики.

При оценке коэффициентов влияния параметров акселерометра на статическую ошибку может быть применена методика, основанная на статистических испытаниях Монте-Карло (применялась в работе [1] при оценке коэффициентов влияния параметров КУ на СКО динамической ошибки).

Задача определения коэффициентов чувствительности dJ/df_i показателя качества K – крутизны статической характеристики к параметрам ДПИ решается следующим образом. Производится моделирование работы ДПИ при номинальных значениях параметров (расчетных параметрах ДПИ для заданного диапазона измерения, оптимальных параметрах КУ). При этом исследуемому параметру f_i задаются случайные вариации с равновероятным распределением. Проводятся многократные статистические испытания, в которых регистрируется выходная характеристика K и на основе множества результатов определяется среднее значение характеристики K и ее среднеквадратическое отклонение σ_K . Коэффициент чувствительности i -го параметра по результатам испытаний при этом определяется как [2]

$$\frac{dK}{df_i} = \frac{\sigma_K/K}{\sigma_{fi}/f_i}, \quad (1)$$

где σ_{fi} – среднеквадратическое отклонение i -го параметра от номинального значения.

На стадии проектирования ДПИ для показателя качества K устанавливают его номинальное значение $K_{\text{ном}}$ и предельную допустимую погрешность. Необходимо, чтобы K попадал в поле допуска, тогда ДПИ по данному свойству считается работоспособным.

Чтобы обеспечить допустимую точность акселерометра на статическом режиме (относительная погрешность на границах диапазона должна составлять не более 0,1%), необходимо предъявить требования к предельным отклонениям параметров с учетом их коэффициентов влияния на статическую характеристику.

Предельная абсолютная погрешность выходного сигнала датчика на границе диапазона определяется по приближенному соотношению ошибки, взятому из метрологии

$$\Delta U = \sum_{j=1}^n \frac{dK}{df_j} \delta(f_j) = \sum_{j=1}^n k_j \delta(f_j), \quad (2)$$

где $\delta(f_j)$ – предельно возможное отклонение j -го параметра от номинального значения, k_j – коэффициент чувствительности j -го параметра.

В предельном случае, когда ошибка возникает только из-за j -го параметра, а ошибки других параметров нулевые, из (2) для j -го параметра получим:

$$\Delta U_{\text{max}} = k_j \delta(f_j). \quad (3)$$

На основании 0,1% предельной ошибки, т.е. при $\Delta U_m / U_{\text{max}} = 0,001$, где U_{max} – максимальное значение выходного сигнала в вольтах, определим предельно допустимые отклонения параметров от номинальных значений. Из (3) получим

$$\delta(f_j) = 0,001 U_{\text{max}} / k_j. \quad (4)$$

При расчете акселерометра на разные диапазоны измерения необходимо выбрать ключевой параметр, наиболее сильно влияющий на крутизну статической характеристики акселерометра. В методике расчета акселерометра для заданного диапазона измерения сначала определяется номинальная крутизна статической характеристики K из условия, определяющего коэффициент передачи датчика для заданного диапазона

$$U_{\text{max}} / f_{\text{max}} = K, \quad (5)$$

где f_{max} – верхнее предельное значение входного ускорения на данном диапазоне измерения.

Затем решается задача расчета параметров акселерометра дающих крутизну K и с учетом коэффициентов влияния параметров определяются допустимые отклонения параметров от расчетных.

Математическая модель акселерометра

Микромеханический акселерометр представляет собой маятниковую кремниевую конструкцию (рис. 1) с осью вращения, проходящей через упругие подвесы.

Центр масс на рисунке смещен вправо за счет $am1 > am2$. Упругие подвесы имеют крестообразную форму и работают на кручение. Основными конструктивными параметрами маятниковой конструкции являются:

$am1, am2$ – длина правой и левой части рамки маятника;

bm – ширина рамки маятника;

$am3, bm3$ – длина и ширина ограничителя маятника;

ct – толщина рамки маятника;

ap – длина упругого подвеса;

cp – максимальная и минимальная толщина упругого подвеса;

h – зазор маятника с крышкой.

В рассматриваемой конструкции микромеханического акселерометра используется емкостной преобразователь перемещений и электростатическая силовая обратная связь, реализованные с помощью токопроводящих элементов подвижной части и неподвижных обкладок акселерометра [3, 4].

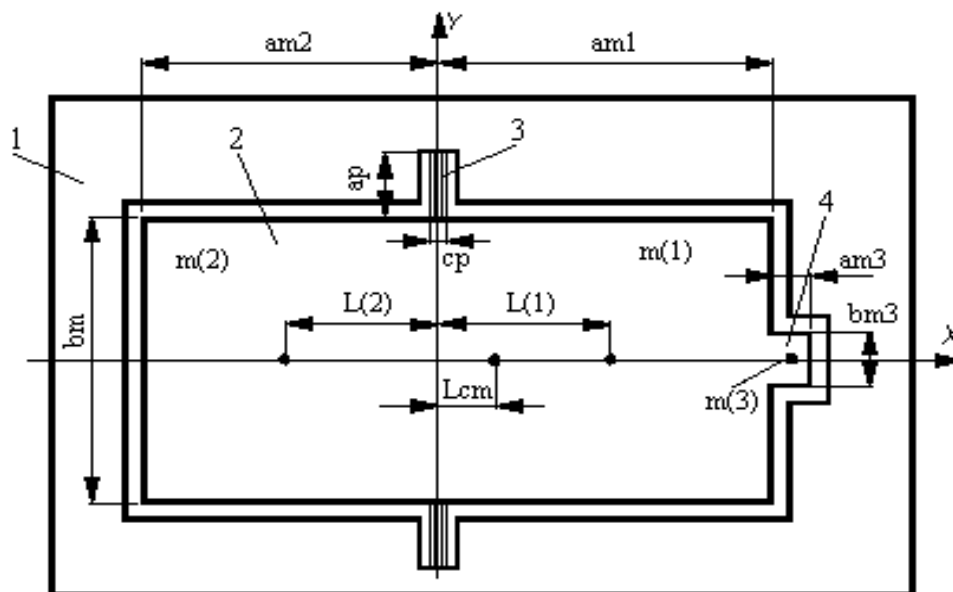


Рис. 1. Маятниковая конструкция акселерометра:

1 – неподвижная обкладка акселерометра; 2 – маятник;
3 – упругий подвес; 4 – ограничитель

Структурная схема измерительного устройства на базе рассматриваемой маятниковой конструкции представлена на рис. 2.

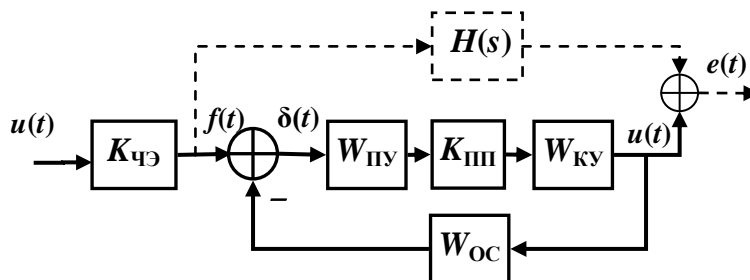


Рис. 2. Структурная схема датчика:

$K_{чэ}$ – коэффициент передачи чувствительного элемента;
 $W_{пу}$ – передаточная функция подвижного узла (маятника);
 $K_{пп}$ – коэффициент передачи преобразователя перемещения;
 $W_{ку}$ – передаточная функция усилителя с корректирующим устройством;
 $K_{ос}$ – коэффициент передачи силового элемента обратной связи;
 $H(s)$ – идеальный оператор передачи измеряемого сигнала
 $e(t)$ – ошибка датчика

Общая передаточная функция согласно структурной схеме вычисляется в виде

$$W(s) = K_{чэ} \frac{W_{пу} K_{пп} W_{ку}}{1 + W_{пу} K_{пп} W_{ку} K_{ос}}. \quad (6)$$

Основные передаточные функции структурной схемы рис. 2 вычисляются в соответствии с формулами:

$$W_{пу} = 1/(Js^2 + K_{dy}s + G_y), \quad (7)$$

$$W_{ку} = T(1)s + T(2) + T(3)/s, \quad (8)$$

где J – момент инерции относительно оси вращения, K_{dy} – коэффициент демпфирования от-

носительно оси Y , G_y – жесткость упругих подвесов относительно оси кручения Y , $T(1)$, $T(2)$, $T(3)$ – постоянные времени корректирующего устройства.

Основные математические модели интегрального маятника, преобразователя перемещения, силового элемента обратной связи используются в соответствии с теоретическими положениями работ [3, 4].

Здесь отметим только формулы для вычисления определяющих параметров маятника. Формула момента инерции маятника выведена в соответствии геометрией, приведенной на рис. 1.

$$J = (m_1/3 + m_3) a_{m1}^2 + m_2 a_{m2}^2/3 + m_3 a_{m3}^2/3. \quad (9)$$

Расстояние до центра масс маятника определяется в соответствии с законами теоретической механики по формуле

$$L_{cm} = \sum (L_i \cdot m_i) / M, \quad (10)$$

где $M = \sum m_i$ – полная масса маятника.

Методика расчета основных характеристик акселерометра

В структурной схеме датчика (см. рис. 2) для улучшения динамических свойств предусмотрено корректирующее устройство с передаточной функцией $W_{ку}$, соответствующей ПИД-регулятору (см. формулу (8)). Параметры КУ при этом рассчитываются в соответствии с критерием минимума СКО динамической ошибки на основе методики работы [1].

С целью расчета конструктивных параметров акселерометра и передаточных функций в программной среде *Matlab* разработана программа-функция $[Z, W_{пу}, W_{ку}, W] = dlu(P)$, входными данными которой является вектор параметров P (маятника, КУ, конструкции):

$$P = [am(1), am(2), bm, am(3), bm(3), ct, ap, cp, h, K_{ус}, T(1), T(2), T(3), U_{оп}],$$

где, дополнительно к параметрам конструкции рис. 1, обозначено: $K_{ус}$ – коэффициент усилителя мощности, $U_{оп}$ – опорное напряжение.

Выходными параметрами программы-функции являются передаточные функции: $W_{пу}$ – подвижного узла; $W_{ку}$ – корректирующего устройства; W – акселерометра и вектор расчетных параметров акселерометра

$$Z = [M, L_{цм}, J, G_y, K_{до}, K_{чэ}, K_{ос}, K_{пп}, K, T],$$

где M – масса маятника; $L_{цм}$ – расстояние до центра масс маятника; J – момент инерции относительно оси вращения; $K_{до}$ – коэффициент демпфирования относительно оси Y ; G_y – жесткость упругих подвесов относительно оси кручения; $K_{чэ}$ – коэффициент передачи чувствительного элемента; $K_{ос}$ – коэффициент обратной связи; $K_{пп}$ – коэффициент первичного преобразователя; $T = [T(1), T(2), T(3)]$ – вектор постоянных времени КУ.

Текст программы-функции $dlu(P)$ на языке *Matlab* составлен в соответствии с теоретическими формулами механики (в частности формулы (9), (10)), формулами для расчета коэффициента чувствительного элемента, первичного преобразователя, датчика обратной связи [3, 4], формулами для вычисления передаточных функций (7), (8).

Использование программы-функции $dlu(P)$ осуществляется путем предварительного задания входных данных – вектора параметров P с последующим ее вызовом из управляющей программы *control_dlu*:

```
am(1)=3.7e-3; am(2)=3.3e-3; am(3)=1e-5; % длина частей маятника
bm=3.5e-3; bm(3)=1e-5; % ширина частей маятника
ct=1e-4; % толщина маятника
ap=2e-4; % длина упругого подвеса
cp=1e-5; % max и min толщина упругого подвеса
h=1.0277e-5; % зазор между маятником и неподвижной обкладкой
Kус=2; % коэффициент усилителя мощности
Uоп=5; % опорное напряжение
```

$P=[am(1),am(2),bm, am(3),bm(3),cm,ap,cp,h,Kyc,T(1),T(2),T(3),Uop]$; % вектор параметров
 $[Z,W_{пу},W_{ку},W]=dlu(P)$; % вызов программы-функции.

Для расчета параметра $am1$, определяющего диапазон измерения датчика, сначала определяется коэффициент передачи датчика K (5), соответствующий диапазону измерения и, учитывая коэффициент влияния $am1$ на K , определяется численное значение $am1$ (параметр $am2$ связан с $am1$ соотношением: $am2=7e-3 - am1$).

Пример. Для исходных данных датчика при диапазоне измерения $\pm 1g$ определены параметры КУ по методике работы [1]: коэффициент передачи КУ: $K_{ку} = 1 \cdot 10^7$; постоянные времени: $T_1 = 0,0024$; $T_2=155$; $T_3= 27,596$. При использовании программы-функции dlu рассчитаны все параметры акселерометра (основные параметры приведены в табл. 1).

Таблица 1

Основные параметры акселерометра для диапазона $\pm 1g$

Параметр	$m(1),$ $m(2),$ $m(3), \text{ Кг}$	$L(1),$ $L(2),$ $L(3), \text{ М}$	$M, \text{ Кг}$	$L_{цм}, \text{ М}$	$K_{ду}$	J	G_y	T_1, T_2, T_3
Значение	$3.0247 \cdot 10^{-5}$ $2.6789 \cdot 10^{-5}$ $2.328 \cdot 10^{-10}$	0.0019 -0.0016 0.0037	$5.70 \cdot 10^{-5}$	$2.272 \cdot 10^{-4}$	$2.038 \cdot 10^{-9}$	$2.41 \cdot 10^{-10}$	$2.76 \cdot 10^{-6}$	$0,0024$ $0,0204$ $27,6$
Параметр	$K_{ку}$	$h, \text{ М}$	$K_{пп}$	$\omega_0, \text{ рад/с}$	$K_{чэ}$	$K_{ос}$	$t_{пп}, \text{ с}$	
Значение	$1.0 \cdot 10^{+7}$	$1.0 \cdot 10^{-5}$	$5.0 \cdot 10^{+5}$	$1,27 \cdot 10^5$	$1.296 \cdot 10^{-8}$	$2.541 \cdot 10^{-8}$	$2,36 \cdot 10^{-5}$	

Соответствующие полученным параметрам передаточные функции имеют следующий вид:

– передаточная функция подвижного узла:

$$1$$

$$W_{пу} = \frac{1}{2.358e-10 s^2 + 1.687e-5 s + 2.76e-6};$$

– передаточная функция корректирующего устройства:

$$0.0024 s^2 + 168.7 s + 27.6$$

$$W_{ку} = \frac{0.0024 s^2 + 168.7 s + 27.6}{s};$$

– полная передаточная функция датчика:

$$3.11e-5 s^2 + 2.186 s + 0.3576$$

$$W = \frac{3.11e-5 s^2 + 2.186 s + 0.3576}{2.358e-10 s^3 + 7.786e-5 s^2 + 4.287 s + 0.7013}.$$

Далее, решая задачу обоснования требований к параметрам акселерометра, необходимо определить коэффициенты чувствительности параметров (вектора параметров P), на основной показатель качества – крутизну статической характеристики K .

Для этого на основе метода статистического моделирования составлена управляющая программа $dlu_kj.m$, текст которой представлен далее:

% Блок исходных данных

$Ao=7e-3$; $g=9.80665$; $am(1)=3.727174e-3$; $am(2)=Ao-am(1)$; $am(3)=1e-5$;
 $bm=3.5e-3$; $bm(3)=1e-5$; $cm=1e-3$; $ap=2e-4$; $cp=1e-5$; $mu=17.9e-6$; $h=1e-5$; $Kyc=2e0$;
 $Kyc=2$; $Uop=5$; $K0=5.0985811e-1$; $T(1)=0.0024$; $T(2)=168.6865$; $T(3)=27.596$;

% Вычисление $Ko(k)$ – крутизны при вариации $s(k)$ j -го параметра
 $j=1$;

while $j < 15$

$P=[am(1),am(2),bm,am(3),bm(3),cm,ap,cp,h,Kyc,T(1),T(2),T(3),Uop]$; % обновление вектора параметров
 $an(j)=P(j)$; $k=1$;


```

while k<50
P(j)=0.5*an(j)+an(j)*rand(1,1); % вариация j-го параметра
[Z,Wпу,Wкy,W,K]=dlu_kj_fcn(P); % вычисление параметров акселерометра
Ko(k)=K; s(k)=P(j); % запоминание K и j-го параметра в массив
k=k+1;
end

% Расчет коэффициентов влияния и допусков параметров
K=sum(Ko)/length(Ko); % среднее значение крутизны
b(j)=sum(s)/length(Ko); % среднее значение j-го параметра
e=Ko-K; e1=s-b(j);
CKO(j)=sum(e.*e)/length(e); % среднееквадратическое значение крутизны
CKOj(j)=sum(e1.*e1)/length(e1); % среднееквадратическое значение j-го параметра
kj(j)=abs((CKO(j)/K)/(CKOj(j)/b(j))); % коэффициент влияния j-го параметра
delt(j)=0.001*Uоп/kj(j); % допустимое отклонение j-го параметра
j=j+1
end

```

Эта программа вызывает подпрограмму-функцию $dlu_kj_fcn(P)$, предназначенную для расчета параметров акселерометра и построенную аналогично $dlu(P)$.

При использовании $dlu_kj.m$ по формуле (1) найдены коэффициенты чувствительности (коэффициенты влияния) параметров f_i ДПИ на выходную характеристику K . Результаты - коэффициенты влияния k_j и допуски δ_j параметров сведены в табл. 2, также в табл. 2 представлены исходные данные по номинальным значениям параметров f_i и их среднееквадратическим отклонениям σ_{fi} .

Таблица 2

Коэффициенты чувствительности k_i и допуски δ_i параметров

Параметр f_i	Статистический номинал f_i	σ_{fi}	σ_K	$k_i=dK/df_i$	δ_i
$P(1)=am(1)$	3.67e-3	1.14e-6	1.33e+0	1.66e+4	3.011e-7
$P(2)=am(2)$	3.28e-3	8.47e-7	1.00e+0	2.59e+3	1.93e-6
$P(3)=bm$	3.57e-3	1.015e-6	1.31e-10	2.92e-7	1.7e+4
$P(4)=am(3)$	1.0e-5	8.34e-12	5.24e-11	3.98e-5	1.3e+2
$P(5)=bm3$	1.0e-5	8.53e-12	4.39e-11	3.29e-5	1.5e+2
$P(6)=cm$	1.02e-3	7.83e-8	1.95e-1	1.58e+3	3.17e-5
$P(7)=ap$	2.02e-4	3.41e-9	1.77e-28	8.21e-24	6.1e+20
$P(8)=cp$	9.96e-6	8.63e-12	1.77e-28	1.59e-22	3.1e+19
$P(9)=h$	1.005e-5	8.3e-12	5.55e-1	4.78e+5	1.05e-8
$P(10)=Kyc$	1.96e+0	3.18e-1	3.59e-29	3.23e-28	1.5e+25
$P(11)=T(1)$	2.36e-3	4.65e-7	3.59e-29	2.67e-25	1.9e+22
$P(12)=T(2)$	1.7e+2	2.39e+3	3.59e-29	3.74e-30	1.3e+27
$P(13)=T(3)$	2.76e+1	4.44e+1	3.59e-29	2.25e-29	2.2e+26
$P(14)=Uop$	4.98e+0	2.08e+0	3.46e-29	1.22e-28	4.1e+25

Параметры с наибольшими коэффициентами влияния: $am(1)$, $am(2)$ - длина правой и левой части маятника; cm - толщина маятника; h - зазор между маятником и неподвижными обкладками акселерометра в таблице выделены жирным цветом. К отмеченным параметрам предъявляются достаточно серьезные требования: указанные линейные размеры $am(1)$, $am(2)$, cm должны выдерживаться практически с микронной точностью, а зазор h с точностью до сотых долей микрона. Изготовление элементов конструкции акселерометра с такими допусками вряд ли возможно, поэтому реальное значение крутизны статической характеристики при изготовлении будет отличаться от расчетного на величину больше чем 0,1 %.

Тем не менее, уровень 0,1 процентной ошибки крутизны K достигается калибровкой

акселерометра, например, за счет регулировки зазора. В этом случае сохранение 0,1 % ошибки показателя K практически сводится к стабильности параметров $am(1)$, $am(2)$, cm , h в процессе эксплуатации с указанными в табл. 2 допусками. Учитывая высокостабильные свойства конструкционного материала кремния, из которого изготавливается акселерометр, достижение ошибки статической характеристики на уровне 0,1 % и даже лучше вполне возможно.

Моделирование акселерометра в *Matlab Simulink*

С целью реального исследования работоспособности акселерометра и его параметров создана его модель в визуальной среде *Matlab Simulink* [5] при задании рассчитанных параметров.

Схема моделирования акселерометра в *Matlab Simulink* представлена на рис. 3. Схема предусматривает вычисление ошибки отработки входного скачкообразного сигнала структурой акселерометра. Причем при дальнейшей обработке массива ошибок, полученных в блоке e , рассчитывается экспериментальное значение среднего квадрата ошибки.

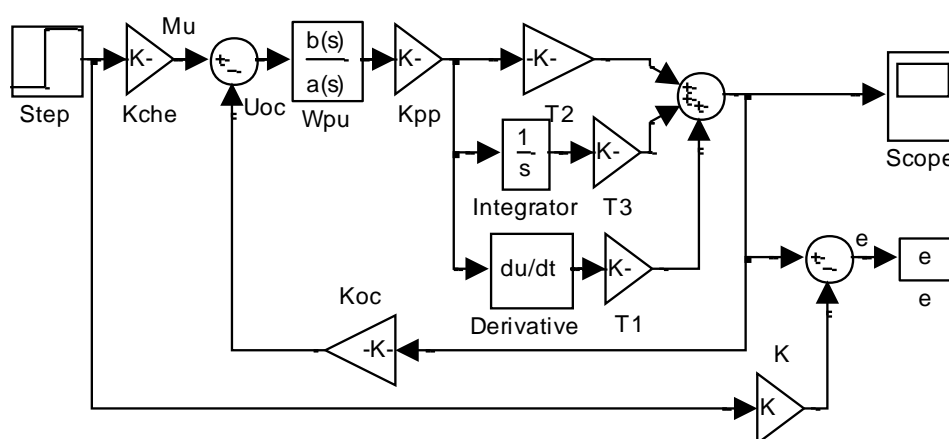


Рис. 3. Схема моделирования акселерометра в *Matlab Simulink*

Математическая модель МЭМС акселерометра успешно проверена при моделировании в *Matlab Simulink* для диапазона $\pm 1g$, что дает основание сделать заключение о реальной возможности создания датчика также на другие диапазоны измерения с минимальными статическими и динамическими ошибками.

Результаты моделирования по схеме 3 представлены в виде переходного процесса (см. график на рис. 4) при действии входного ускорения $1g$. Время переходного процесса получено на уровне 0,000004 с, что соответствует теоретической модели и что также подтверждает качественную работоспособность датчика.

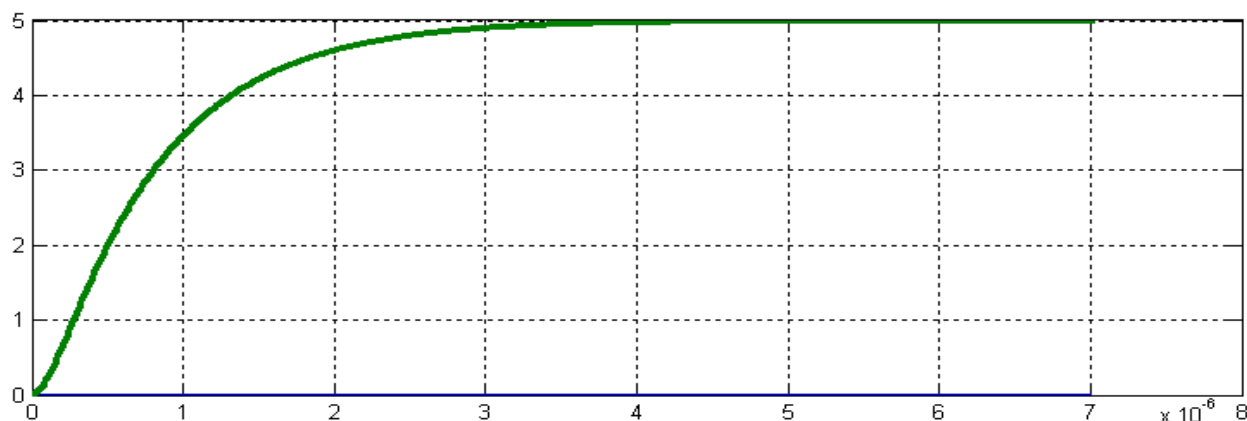


Рис. 4. Переходный процесс датчика

На основе моделирования по схеме 3 произведена оценка СКО, результаты которой для данного примера соответствуют минимальным значениям, отмеченным в [1]: $СКО=0,000021$.

Выводы

В качестве заключения по проведенным исследованиям можно отметить следующее:

- существует возможность уменьшения статических и динамических ошибок рассматриваемого акселерометра на основе заданных исходных данных, особенностей конструкции, с учетом практических возможностей и ограничений;
- необходимо отметить особенность создания МЭМС акселерометра для различных диапазонов измерения за счет использования изменения наиболее чувствительных параметров конструкции маятника (например, зазора между подвижной и неподвижной частью маятника и корпуса, смещения оси крепления упругих подвесов).

В данной работе выявлены параметры МЭМС маятникового компенсационного акселерометра, наиболее сильно влияющие на основной показатель качества акселерометра – крутизну статической характеристики, сформулированы требования к электромеханическим параметрам акселерометра по критерию статической точности, разработана методика расчета статических характеристик акселерометра для заданного диапазона измерений.

Библиографический список

1. **Вавилов, В.Д.** Оптимизация параметров микромеханического акселерометра / В.Д. Вавилов, В.Л. Волков, А.В. Улюшкин // Труды НГТУ им Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород. 2010. № 3. С. 308 – 314.
2. **Волкова, Н.В.** Исследование датчиков первичной информации методом статистических испытаний Монте-Карло // Приборостроение в аэрокосмической технике: материалы Всероссийской научно-технической конференции. – Арзамас, 1999. С. 24-28.
3. **Распопов, В.Я.** Микромеханические приборы: учеб. пособие / В.Я. Распопов. – М.: Машиностроение, 2007. – 400 с.
4. **Вавилов, В.Д.** Интегральные датчики: учебник / В.Д. Вавилов; НГТУ. – Н. Новгород, 2003. – 503 с.
5. **Дьяконов, В.П.** *Simulink 5/6/7: Самоучитель* / В.П. Дьяконов. – М.: ДМК Пресс. 2008. – 784 с.

*Дата поступления
в редакцию 22.04.2011*

V.L. Volkov

MOTIVATION OF THE REQUIREMENTS TO PARAMETERS FOR ACCELEROMETER A MICROMECHANICAL

The Worded requirements to electromechanic parameter MEMS accelerometer on criterion of steady-state accuracy. The Revealed parameters, most powerfully influencing upon the leading index quality accelerometer - a steepness of the steady-state feature. The Designed methods of the calculation steady-state and dynamic features accelerometer for given a range of the measurements.

Key words: MEMS, accelerometer, steady-state feature, sensitivity, correcting device, average square of the mistake, tolerance of the parameter, accuracy, modeling.

УДК 629.7.05/06: 531.781.2 (075.8)

В.Д. Вавилов

РАЗДЕЛЕНИЕ СИГНАЛОВ НЕСКОЛЬКИХ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН, ДЕЙСТВУЮЩИХ ПО ОДНОМУ КАНАЛУ

Арзамасский политехнический институт (филиал) НГТУ им. Р.Е. Алексеева

Приводятся материалы разработки микросистемного ДУС, в качестве чувствительного элемента в котором используется вибрирующая пластина из кристаллического кремния, подвешенная на двустороннем подвесе. Особенностью разработки является то, что с помощью двух одинаковых синхронных детекторов и дифференциального фильтра нижних частот осуществляется разделение сигналов двух физических величин, действующих по одному каналу.

Ключевые слова: вибрирующая пластина, микросистемный ДУС, кристаллический кремний, фильтр нижних частот, упругий элемент, синхронный детектор.

В микросистемной технике часто возникает необходимость измерений нескольких физических величин, действующих по одному каналу. Например, в датчике угловых скоростей с двусторонними подвесами (рис. 1) по оси z действует линейное ускорение и одновременно при колебании сосредоточенной массы 7 вдоль оси x и действии угловой скорости Ω относительно оси y , возникает кориолисово ускорение.

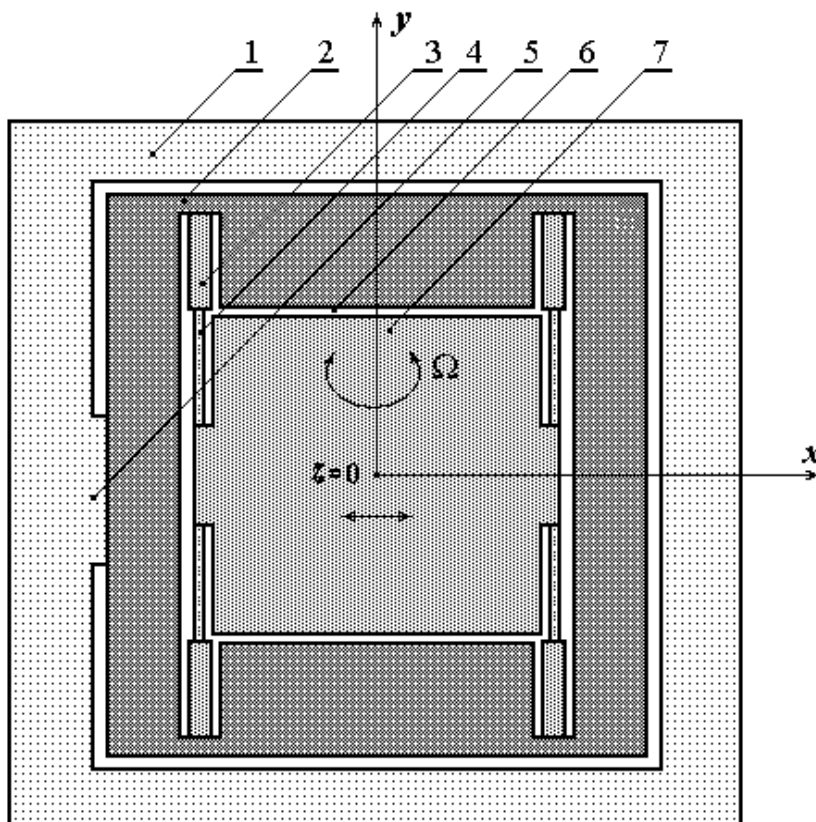


Рис. 1. Вид в плане ЧЭ:

- 1 - корпусная пластина; 2 - монтажная пластина; 3 - упругий подвес по оси z ;
 4 - упругий подвес по оси x ; 5 - консольная балка;
 6 - сквозное травление; 7 - сосредоточенная масса

Величины этих сил соизмеримы. При этом работает упругий подвес 3, а упругий подвес 4 создает силу сопротивления по оси x . Сосредоточенная масса является чувствительной к обоим ускорениям и одновременно является подвижным электродом емкостной измерительной схемы. Для осуществления принудительных колебаний сосредоточенной массы по оси x и для измерения перемещений по оси z с обеих сторон кремниевого чувствительного элемента приварены молекулярной сваркой диэлектрические обкладки, на которых нанесены проводящие электроды (рис. 2).

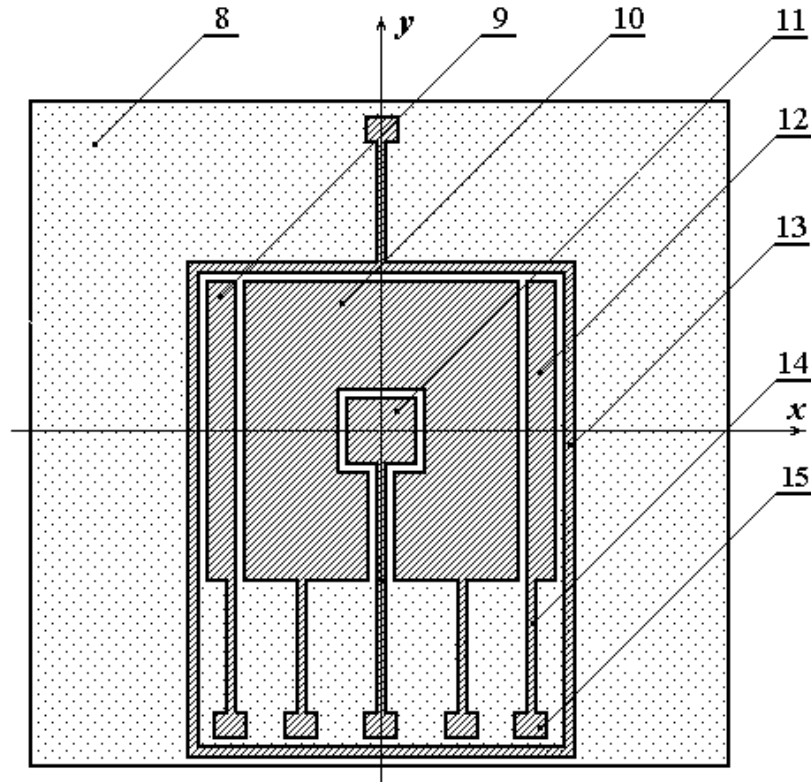


Рис. 2. Топология неподвижных электродов:

8 - неподвижная обкладка; 9 и 12 - проводящие электроды возбуждения колебаний; 10 - обкладка силового преобразователя 11 - обкладка емкостного преобразователя перемещений; 12 - электроды возбуждения колебаний; 13 - охранный контур заземления; 14 - проводящие дорожки соединения электродов с контактными площадками; 15 - контактные площадки

Принцип работы конструктивной схемы микросистемного ДУС с двусторонними подвесами аналогичен принципу работы конструктивной схемы с линейными подвесами. Совершенно очевидно, что и математические модели обеих этих схем, записанные в общем виде, являются идентичными.

При действии поворотной угловой скорости относительно оси y , параллельно к плоскости подвижного узла, возникает кориолисова сила, действующая по оси z :

$$F_k = 2m\Omega\dot{x}, \quad (1)$$

где m - масса подвижного узла; Ω - угловая скорость относительно оси y (внешнее воздействие); \dot{x} - скорость колебательного процесса сосредоточенной массы вдоль оси x . Колебания эти являются принудительными на собственной частоте упругой системы.

Осредненное значение линейной скорости можно оценить через угловую скорость возбуждения колебаний и амплитуду перемещения:

$$\dot{x} = \omega_\delta \delta, \quad (2)$$

где ω_g - угловая скорость колебательного движения подвижного узла, возбуждаемая автогенератором; δ - амплитуда колебаний.

Работа устройства осуществляется следующим образом. Полный цикл работы устройства осуществляется за один период синхронизирующих импульсов. Импульсная последовательность на выходе генератора 15 синхронизирующих импульсов подает сигналы на устройство 3 переключения полярности опорных напряжений 1 и 2. Переменное напряжение с амплитудой, равной величине опорных напряжений, подводится к первому и второму входам сумматора обратной связи 4.

К третьему входу сумматора обратной связи подводится напряжение U_1 с выхода первого операционного усилителя 9. Это напряжение алгебраически складывается с первым положительным опорным напряжением $(+U_{оп} \pm U_1)$ и со вторым отрицательным опорным напряжением $(-U_{оп} \pm U_1)$. С выходов сумматора обратной связи 4 алгебраические суммы напряжений подводятся к последовательной цепи из измерительных емкостей 5 и 6.

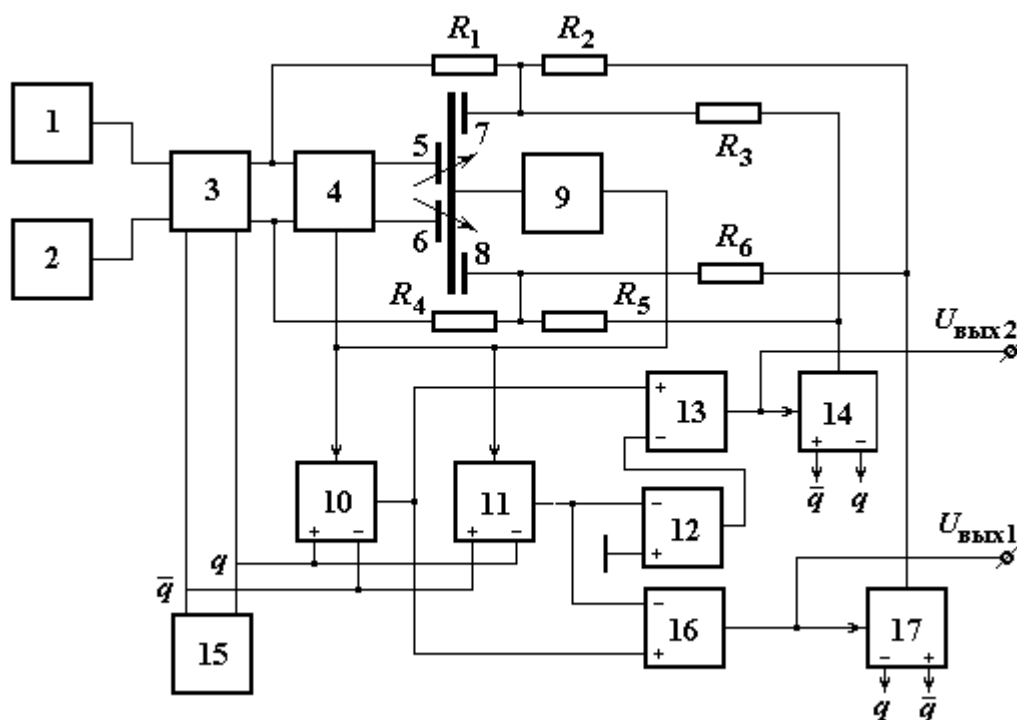


Рис. 3. Электрическая схема микросистемного ДУС:

- 1 и 2 - положительный и отрицательный источники опорных напряжений;
 3 - схема переключения полярностей источников опорных напряжений; 4 - сумматор напряжений;
 5, 6 - дифференциальные измерительные емкости; 7, 8 - силовые электроды; 9 - первый операционный усилитель; 10 - первый синхронный детектор; 11 - второй синхронный детектор; 12 - второй операционный усилитель; 13 - второй фильтр нижних частот; 14 - третий синхронный детектор;
 15 - генератор синхронизирующих импульсов; 16 - первый фильтр нижних частот;
 17 - четвертый синхронный детектор

Преобразование амплитудно-модулированного сигнала после первого операционного усилителя 9 осуществляется с помощью логотметрической схемы, состоящей из первого 10 и второго 11 синхронных детекторов и первого фильтра нижних частот 14, где амплитудно-модулированное напряжение преобразуется в изменение постоянного напряжения. Демодуляция и фильтрация от несущей частоты в устройстве является двухполупериодной, что способствует сглаживанию.

Рассмотрим работу электрической схемы по диаграммам, приведенным на рис. 4. Пусть в течении цикла кориолисова сила изменяется по знакопеременной кривой, например, синусоиде. Учитывая, что синхронные детекторы входных сигналов не инвертируют, а только запоминают выбранные значения до конца цикла. Соответственно для кориолисовой силы на выходах первого и второго детекторов имеют место равные по абсолютной величине сигналы, но с противоположными знаками. Поступив на входы дифференциального фильтра нижних частот *16* эти сигналы складываются.

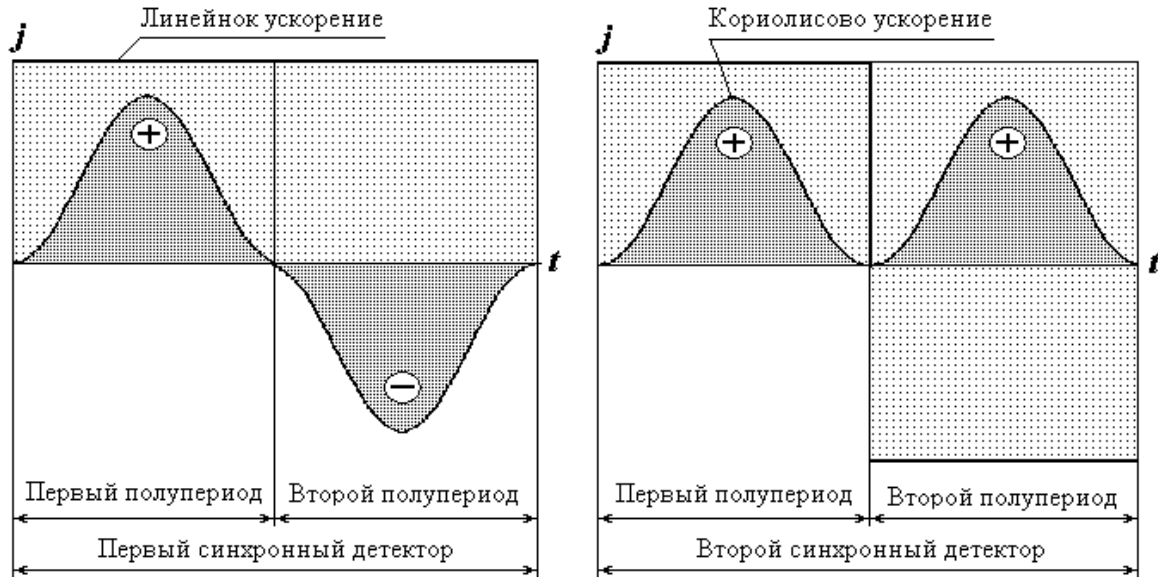


Рис. 4. Диаграмма сигналов на выходах синхронных детекторов

Таким образом, первый фильтр нижних частот *16* выдает на выходе сигнал, пропорциональный величине перемещения подвижного электрода измерительных емкостей под действием кориолисовых сил:

$$U_{\text{вых1}} = U_{\text{оп}} K \frac{y}{h}, \quad (3)$$

где K - коэффициент передачи первого фильтра нижних частот; y - измеряемое перемещение; h - начальный зазор между подвижным и неподвижными электродами измерительных емкостей.

Особый случай – сигнал от линейного ускорения, действующего по той же оси. Для линейного ускорения на выходах первого и второго детекторов имеют место одинаковые сигналы по величине и знаку. Соответственно эти сигналы дифференциальным фильтром нижних частот *16* вычитаются.

С целью получения электрического сигнала, пропорционального линейному ускорению, выходной сигнал после второго синхронного детектора *11* инвертируется вторым операционным усилителем *12*. Соответственно на входах второго фильтра нижних частот *13* присутствуют сигналы по линейному ускорению, равные по величине и противоположные по знаку, а сигналы по кориолисовому ускорению – с одинаковыми знаками. При этом первые складываются, а вторые вычитаются. Таким образом, на выходе второго фильтра нижних частот *13* осуществляется измерение сигнала по линейному ускорению.

Далее сигнал с выхода фильтра нижних частот *13* поступает через третий синхронный детектор *14* на резистивные линеаризирующие сумматоры $R_1 - R_2 - R_3$ и $R_4 - R_5 - R_6$ и далее на силовые электроды *7* и *8* на обработку действующего линейного ускорения. После силовой обработки доля перемещения, внесенная инерционной силой от линейного ускорения сводится к нулю, т.е. этот канал работает как обычный компенсационный акселерометр, а под-

вижный узел остается только под действием кориолисовой силы. Отсортированный сигнал, которой имеет место на выходе фильтра нижних частот 16, это есть сигнал об измеряемой угловой скорости Ω по оси y . Канал измерения угловой скорости Ω так же, как и канал по линейному ускорению, выполнен с силовой компенсацией. Для этой цели сигнал с выхода фильтра нижних частот 16 через четвертый фильтр нижних частот заведен в обратную связь на суммирующие линеаризаторы. Третий 14 и четвертый 17 синхронные детекторы предназначены для преобразования постоянных напряжений с выходов первого и второго фильтров нижних частот в переменные, что связано с исключением массопереноса между подвижным и неподвижными электродами.

Рассмотрим далее динамический процесс при измерении угловой скорости. Пусть по оси x подвижный узел приведен в принудительные колебания с помощью электростатического автогенератора, а по оси z действует две силы: кориолисова и ньютонова. Параллельно действию сил от кориолисова и линейного ускорений возможно действие шумовой помехи, приводящей к уходам нулевого уровня. Если принять, что в течении одного периода измерений шумовая помеха является постоянной, то по каналу измерения кориолисова ускорения она так же, как и сигнал от линейного ускорения, будет вычитаться. При измерении же линейного ускорения вычитание шумовой помехи не имеет места. Поэтому рассмотренное устройство желательно применять только для измерения угловых скоростей, а канал по линейному ускорению использовать только как корректирующий.

С целью определения математической модели ЧЭ микросистемного ДУС с допущением одной степени свободы подвижного узла, запишем уравнения Лагранжа для оси z в следующем виде:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{z}} - \frac{\partial T}{\partial z} = Q_z, \quad (4)$$

где T - кинетическая энергия рассматриваемой системы; Q_z - проекции обобщенных сил по соответствующим направлениям.

Величину кинетической энергии для данной динамической системы можно записать в следующем виде:

$$T = \frac{m\dot{z}^2}{2}. \quad (5)$$

В развернутом виде обобщенные силы запишутся:

$$Q_z = (F_k + mj + mj_{ш}) - k_z z - k_{dz} \dot{z}, \quad (6)$$

где $j_{ш}$ - шумовая составляющая ускорения; k_z - жесткость упругого подвеса по оси чувствительности; k_{dz} - абсолютный коэффициент демпфирования.

Подставляя (3) и (4) в уравнений (2), получим:

$$m\ddot{z} + k_{dz}\dot{z} + k_z z = 2m\omega_\delta \Omega + mj + mj_{ш}. \quad (7)$$

Учитывая предыдущие соотношения, а также независимость декартовых координат, принятых в уравнениях Лагранжа (2) за обобщенные, система уравнений (6) к операторной форме запишется:

$$(ms^2 + k_{dz}s + k_z)z = 2m\Omega\omega_\delta + mj + mj_{ш} / \quad (8)$$

В соответствии с уравнением (7) можно записать передаточные функции подвижного узла по угловой скорости в виде:

$$W_{кор}(s) = \frac{K_{кор}}{ms^2 + k_{dz}s + k_z}, \quad (9)$$

где $K_{кор} = 2m\delta\omega_\delta$ - коэффициент передачи чувствительного элемента по каналу угловой скорости; $\omega_\delta = \sqrt{k_x/m}$ - переносная частота колебаний, задаваемая приводом.

С целью повышения точности измерений в замкнутом контуре регулирования по каналу угловой скорости возможно применение типовых корректирующих устройств, например, ПИД-регуляторов.

Выводы

1. Разработана методика разделения двух информационных сигналов для физических величин, действующих по одной оси. При этом для одной из этих величин сигнал должен быть знакопеременным, а для второй постоянным.

2. Разработана методика корректирования погрешностей от влияния линейного и шумового ускорений при измерении угловой скорости с помощью микросистемного ДУС.

Библиографический список

1. Северов, Л.А. «Микромеханические гироскопы: конструкции, характеристики, технологии, пути развития.» / Л.А. Северов [и др.] // Изв. вузов. Приборостроение. 1998. Т. 41. №1 2. С. 57–73.
2. Былинкин С.Ф., Вавилов В.Д., Миронов С.Г. Микромеханический гироскоп, Патент РФ №2209394, 7G01C 19/56, Бюл. №21, 27.07.2003.

*Дата поступления
в редакцию 22.04.2011*

V.D. Vavilov

DIVISION SIGNAL SEVERAL PHYSICAL VALUES, ACTING ON ONE CHANNEL

The material of the development microsystems DUS happen to In article as detector element in which is used vibrating plate from crystalline flint under-hung on double-sided spring up. Particularity of the development is that by means of two alike synchronous detectors and differential filter of the lower frequencies osuschestvlyaetsya. division signal two physical values, acting on one channel

Key words: vibrating plate, microsystems DUS, crystalline silicon, filter of the lower frequencies, springy element, synchronous detector.

УДК 629.7.05/06: 531.781.2 (075.8)

А.Н. Шипунов, А.А. Гаврилов, Е.Н. Гаврилова

БАЛАНСИРОВКА ИНТЕГРАЛЬНОГО ДАТЧИКА УГЛОВЫХ УСКОРЕНИЙ

ОАО АНПП «ТЕМП-АВИА», Арзамас

Предложенная конструкция чувствительного элемента датчика угловых ускорений обладает высокой чувствительностью к полезному сигналу, но также чувствительна к линейному ускорению и угловой скорости. В статье теоретически обоснованы и экспериментально апробированы методики отстройки чувствительного элемента от линейного ускорения и угловой скорости.

Ключевые слова: чувствительный элемент, угловое ускорение, статическая балансировка, динамическая балансировка.

Проблема измерения угловых ускорений вращающихся элементов машин и механизмов является одной из наиболее важных в контрольно-измерительной технике. Машиностроение и ракетостроение, судостроение и энергетика – далеко не полный перечень отраслей народного хозяйства, дальнейшее развитие которых зависит от решения этой проблемы. Знание углового ускорения имеет значение и для решения задач навигации и управления, а также для технической диагностики и определения механических характеристик машин и механизмов в динамических режимах. Однако механика измерения угловых ускорений пока еще находится в стадии становления и для ее развития требуется анализ и обобщение многолетнего опыта работы в этой области измерительной техники.

Разрабатываемый датчик предназначен для измерения угловых ускорений и представляет собой датчик компенсационного типа, состоящий из чувствительного элемента и сервисной электроники, располагающихся в герметичном корпусе с выводными контактами.

Чувствительный элемент представляет собой инерционную массу, содержащую подвижную обкладку из кремния 1 с закрепленным на ней кольцом из титана 2 (рис. 1). Подвижная обкладка закреплена на двух упругих подвесах 3 и содержит две катушки обратной связи 4 датчика момента (ДМ). Рамка подвижной обкладки соединена электростатической диффузионной сваркой со стеклянной неподвижной обкладкой 5 датчика угла с нанесенными на нее металлизированными полигонами. Подвижная и неподвижная обкладки образуют емкостной датчик угла.

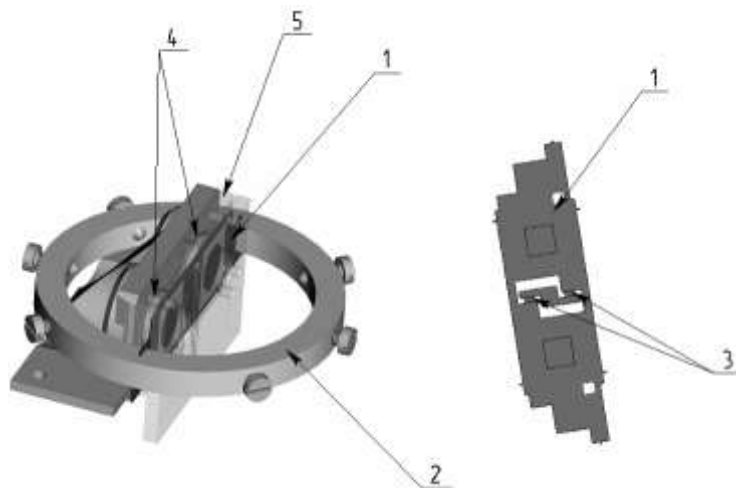


Рис. 1. Конструкция чувствительного элемента

Чувствительный элемент наряду с угловым ускорением воспринимает линейное ускорение и угловую скорость, причем величина полезного сигнала мала. Для решения этой проблемы в первоначальную конструкцию (без кольца) было введено титановое кольцо с регулировочными винтами. Оно позволило увеличить инертную массу и как следствие чувствительность к угловому ускорению. Максимальное угловое ускорение, на которое рассчитан датчик, составляет $2400 \text{ }^\circ/\text{с}^2$; при этом создается ток в катушках датчика момента обратной связи, эквивалентный току в этих катушках на линейном акселерометре АТ1104 при воздействии ускорения в 7g.

При действии углового ускорения $\ddot{\psi}$ подвижная обкладка чувствительного элемента отклоняется на определенный угол α , изменяя при этом дифференциальную емкость датчика угла (рис. 2). Разбаланс емкостей преобразуется сервисной электроникой датчика в напряжение, которое подается на катушки ДМ и нагрузочное сопротивление R_n .

Для получения требуемых точностных характеристик в динамическом режиме датчик построен по схеме с обратной связью. Датчик момента компенсирует внешнее воздействие измеряемой величины, а требующийся для этого ток прямо пропорционален внешнему воздействию и является выходным параметром датчика.

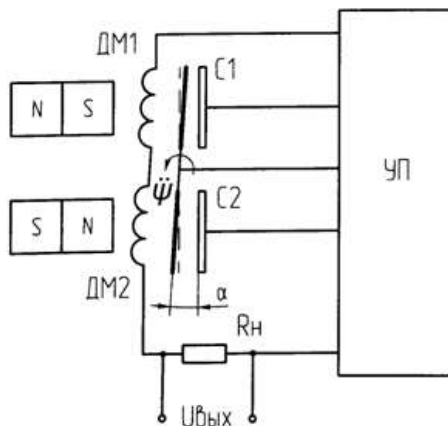


Рис. 2. Принципиальная схема датчика углового ускорения

Таким образом, устройство является маятниковым компенсационным датчиком с электропружиной и емкостным преобразователем угла.

Функциональная схема датчика изображена на рис. 3.

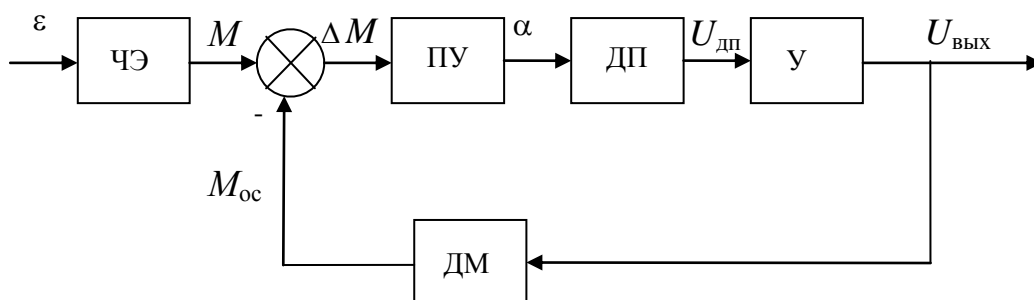


Рис. 3. Функциональная схема датчика угловых ускорений

На функциональной схеме обозначено: ЧЭ – чувствительный элемент, ПУ – подвижный узел, ДП – датчик перемещений (датчик угла), У – усилитель, ДМ – датчик момента,

ε – измеряемое угловое ускорение, M – инерционный момент, M_{oc} – момент обратной связи, α – угол отклонения маятника от нейтрали, $U_{дп}$ – выходное напряжение датчика угла, $U_{вых}$ – выходное электрическое напряжение.

При действии измеряемого углового ускорения на чувствительный элемент возникает инерционный момент M , пропорциональный ускорению. Разность ΔM инерционного момента M и момента обратной связи M_{oc} вызывает перемещение подвижного узла ПУ на угол α . В результате изменяются величины зазора между обкладками измерительных емкостей ДП, что приводит к дисбалансу емкостной мостовой схемы. Напряжение $U_{дп}$ разбаланса усиливается усилителем U , преобразуется в выходное напряжение датчика $U_{вых}$, сигнал которого используется для обратной связи.

Физический принцип измерения, заложенный в датчик углового ускорения, предполагает чувствительность датчика к линейному ускорению и угловой скорости. Эти воздействия являются помехами по отношению к полезному сигналу – угловому ускорению, что требует компенсации (отстройки). Конструкция чувствительного элемента содержит шесть винтов (рис. 1) для балансировки: статической для отстройки от линейных ускорений, динамической – для отстройки от угловой скорости.

Основной задачей является разработка методики статической и динамической балансировки.

Статическая балансировка датчика может быть осуществлена с помощью 4-х регулировочных винтов, расположенных в инерционной массе (титановом кольце, вклеенном в кристаллический элемент) так, чтобы каждая пара винтов лежала на одной оси, а их оси пересекались. На рис. 4 показано положение регулировочных винтов массой m до регулировки, пунктиром показано первоначальное положение центра тяжести инерционной массы.

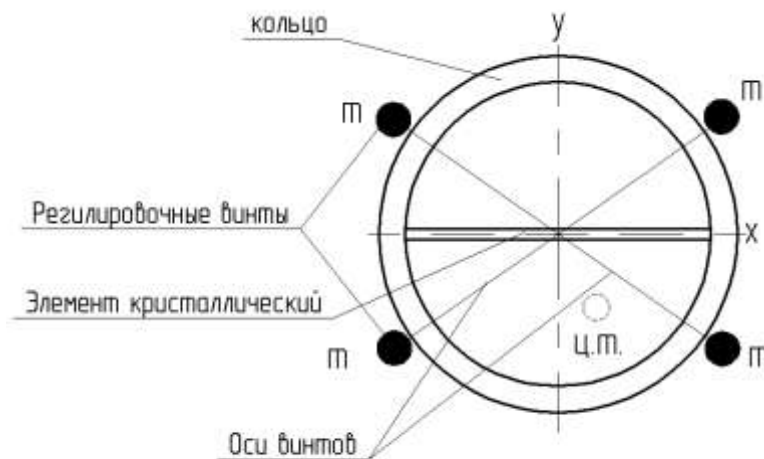


Рис. 4. Схема для статической балансировки

Принцип статической балансировки заключается в том, чтобы перемещением регулировочных винтов добиться совпадения центра тяжести инерционной массы с осью чувствительности датчика. Изначальное несовпадение центра тяжести с осью чувствительности обусловливается рядом причин: неточность установки титанового кольца, несимметричность конструкции чувствительного элемента, неидеальность изготовления деталей ЧЭ.

Так как балансировка датчика осуществляется с помощью регулировочных винтов, то кольцо и элемент кристаллический можно исключить из расчета.

Проанализируем поведение статически отбалансированной инерционной массы, состоящей из 4-х винтов (рис. 5) при действии на нее угловой скорости.

Рассмотрим общий случай, когда оси винтов пересекаются друг с другом под углом β , а вектор угловой скорости перпендикулярен оси чувствительности и повернут на произволь-

ный угол α относительно оси x , являющейся биссектрисой угла β . Пара винтов АВ и пара винтов CD под действием центробежных сил стремятся развернуться вокруг оси чувствительности так, чтобы составить перпендикуляр с вектором угловой скорости. Создаваемые при этом центробежные моменты будут направлены в разные стороны.

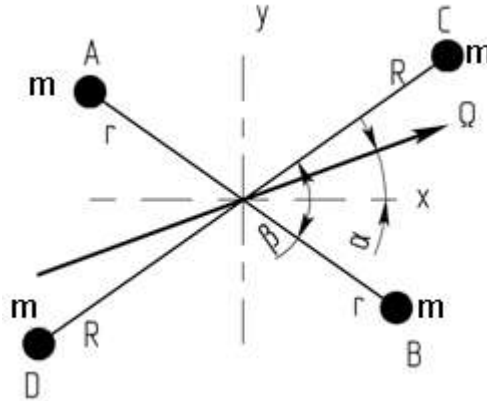


Рис. 5. Статически отбалансированная система из четырех винтов

Рассмотрим действие угловой скорости на каждую пару винтов АВ и CD (рис. 6).

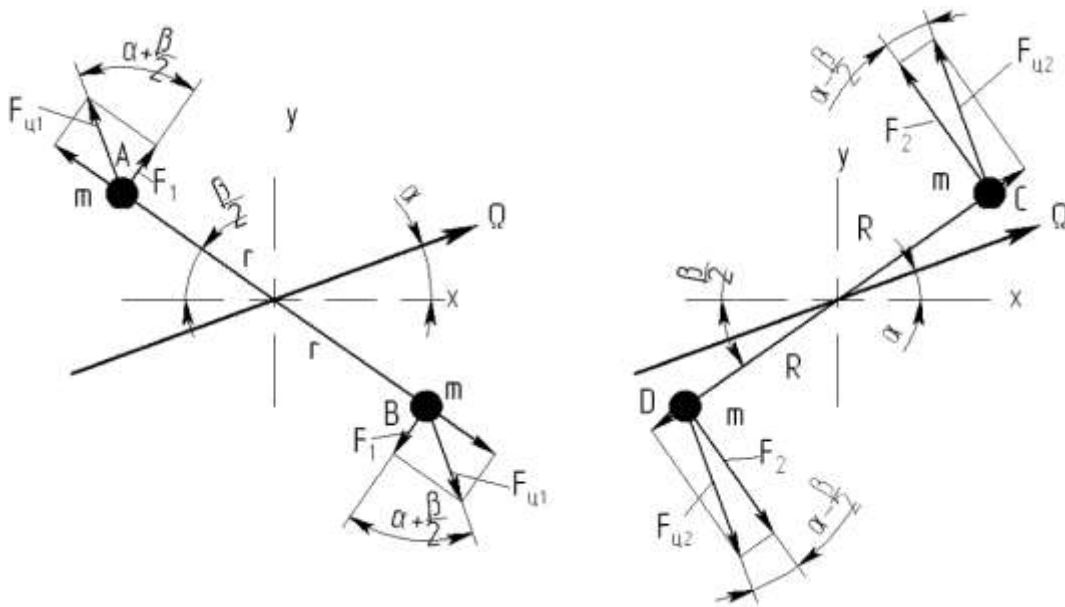


Рис. 6. Действие угловой скорости на пары винтов

Возникающие центробежные силы $F_{ц1}$ и $F_{ц2}$ будут определяться выражениями:

$$F_{ц1} = m \cdot \Omega \cdot r \cdot \sin\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right),$$

$$F_{ц2} = m \cdot \Omega \cdot R \cdot \sin\left(\alpha - \frac{\beta}{2}\right),$$

где $F_{ц1}$, $F_{ц2}$ - центробежные силы, Н; m - масса ЧЭ, кг; Ω - угловая скорость, $^\circ/\text{с}^2$; R , r - плечи приложения центробежных сил, м.

В результате центробежные моменты определяются как произведение силы, стремящейся развернуть винты на расстояние, где эта сила возникает:

$$M_1 = F_1 \cdot r = F_{u1} \cdot \cos\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right) \cdot r = m \cdot \Omega^2 \cdot r^2 \cdot \sin\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right) \cdot \cos\left(\alpha + \frac{\beta}{2}\right) = \frac{m \cdot \Omega^2 \cdot r^2}{2} \sin(2\alpha + \beta),$$

$$M_2 = -F_1 \cdot R = F_{u2} \cdot \cos\left(\alpha - \frac{\beta}{2}\right) \cdot R = m \cdot \Omega^2 \cdot R^2 \cdot \sin\left(\alpha - \frac{\beta}{2}\right) \cdot \cos\left(\alpha - \frac{\beta}{2}\right) = \frac{m \cdot \Omega^2 \cdot R^2}{2} \sin(2\alpha - \beta).$$

Произведение $m \cdot r^2$ или $m \cdot R^2$ - момент инерции материальной точки J_x в данном случае винтов.

Для того чтобы датчик не чувствовал действие угловой скорости, необходимо, чтобы сумма возникающих моментов была равна 0 независимо от угла приложения вектора угловой скорости α :

$$\sum M_i = 0 \quad \text{или} \quad M_1 = -M_2. \quad (1)$$

Условие выполняется в случае, когда:

- угол $\beta=90^\circ$, т.е. когда оси винтов расположены по отношению друг к другу под прямым углом;
- моменты инерции пар винтов J_x равны между собой (при одинаковой массе винтов $R = r$).

Ввиду неидеальности изготовления и установки инерционного кольца угол $\beta \neq 90^\circ$, поэтому с помощью 4-х регулировочных винтов отстройку от действия угловой скорости осуществить невозможно.

Рассмотрим систему, состоящую из шести регулировочных винтов, где добавляется еще одна пара винтов, ось которых ортогональна оси x (рис. 7).

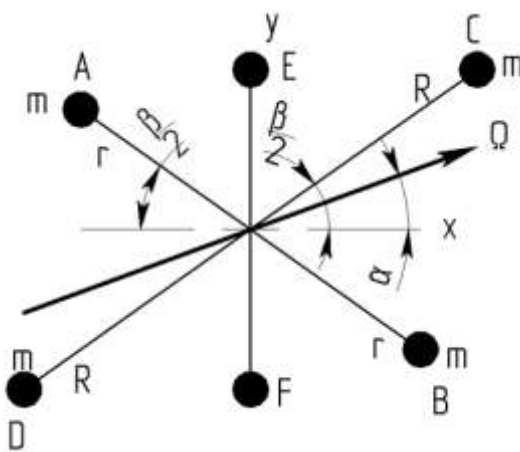


Рис. 7. Система из 6 балансирующих винтов

В связи с доработкой появляется еще один центробежный момент от пары винтов EF:

$$M_3 = J_{EF} \cdot \Omega^2 \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha) = \frac{J_{EF} \cdot \Omega^2}{2} \cdot \sin(2\alpha).$$

Сохраняя условие (1):

$$M_1 + M_2 + M_3 = 0,$$

получим:

$$\frac{J_{AB} \cdot \Omega^2}{2} \cdot \sin(2\alpha + \beta) - \frac{J_{CD} \cdot \Omega^2}{2} \cdot \sin(2\alpha + \beta) + \frac{J_{EF} \cdot \Omega^2}{2} \cdot \sin(2\alpha + \beta) = 0,$$

$$J_{EF} = -2\cos(2\beta).$$

При условии $J_{AB} = J_{CD} = J$:

$$J \cdot (\sin(2\alpha) \cdot \cos\beta - \cos(2\alpha) \cdot \sin\beta + \sin(2\alpha) \cdot \cos\beta + \cos(2\alpha) \cdot \sin\beta) + J_{EF} \sin(2\alpha) = 0,$$

$$J_{EF} = -2\cos(2\beta).$$

Отсюда следует, что в системе, состоящей из 3-х пар регулировочных винтов, оси которых неперпендикулярны, можно выполнить балансировку.

Статическую балансировку проводят в поле постоянного линейного ускорения. В качестве постоянного ускорения выбрано ускорение свободного падения.

Датчик закрепляется на делительной головке по направлению действия ускорения свободного падения и соединяется с источником питания и вольтметром. В начальном положении записывается нулевой сигнал. Затем производится поворот на 90° и снова записывают значение нулевого сигнала. Таким же образом выполняются еще два измерения. Балансировка осуществляется перемещением регулировочных винтов отверткой без дополнительных приспособлений, при этом разрушение механических подвесов элемента кристаллического не происходит. Регулировкой необходимо добиться того, чтобы значения нулевого сигнала были равны. После статической балансировки по 4 точкам датчик отбалансирован по всем другим направлениям.

Диаграмма несбалансированного датчика представлена на рис. 8, а. Значения, расположенные на диаграммах по окружности от 0 до 350 , соответствуют углу наклона датчика относительно \vec{g} , значения выходного сигнала датчика расположены радиально.

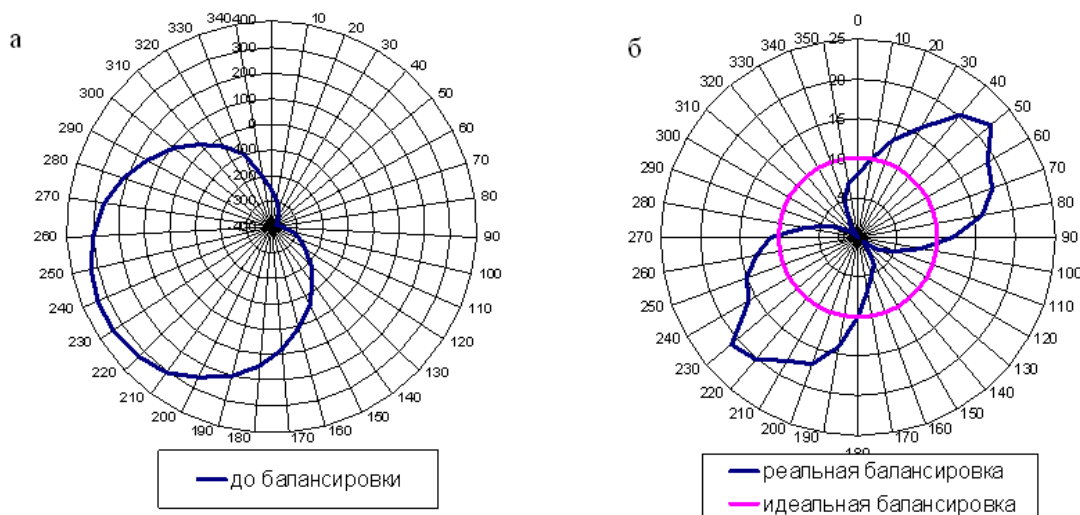


Рис. 8. Несбалансированный датчик:
а – до балансировки; б – после балансировки

В идеальном случае балансировки выходной сигнал датчика в любом положении должен быть равен нулевому сигналу и кривая диаграммы должна выглядеть как окружность с радиусом, равным нулевому сигналу датчика, и располагаться в центре диаграммы.

Диаграммы отстройки от действия линейного ускорения показаны на рис. 8, б.

Кривая диаграммы отбалансированной системы имеет вид петли, что обуславливается прогибом маятника. Так как емкостные полигоны неподвижной обкладки располагаются на одной стороне, то в определенном положении датчика прогиб маятника создает минимальные рабочие зазоры в ёмкостях и малейший дисбаланс центра масс вызывает значительное изменение выходного сигнала датчика. Напротив, в противоположном положении датчика дисбаланс центра масс не чувствуется. В результате диаграмма имеет области выступов и впадин относительно нулевого сигнала. Погрешность от действия линейного ускорения составляет 0,8%.

Еще одной составляющей суммарной погрешности датчика является погрешность от действия угловой скорости. Поскольку угловое ускорение объекта варьируется от $200^\circ/\text{с}^2$ до $600^\circ/\text{с}^2$ на частотах от 1 Гц до 10 Гц, то максимальная угловая скорость объекта определится:

$$\Omega = \frac{\ddot{\psi}}{2\pi f} = \frac{600}{2 \cdot 3,14 \cdot 1} = 95^\circ/\text{с}.$$

В результате работ по отстройке от действия угловой скорости выявлено, что отстройку осуществлять не требуется, поскольку при действии угловой скорости на датчик, равной $\Omega = 120^\circ/\text{с}$, погрешность составляет 0,6%. Тем не менее, возможность балансировки в конструкции предусмотрена наличием дополнительных регулировочных винтов.

Библиографический список

1. **Вавилов, В.Д.** Интегральные датчики / В.Д. Вавилов; НГТУ. – Н.Новгород, 2003. – 503 с.
2. **Вавилов, В.Д.** Конструирование интегральных датчиков / В.Д. Вавилов, В.И. Поздьяев. – М.: Изд-во МАИ, 1993. – 68 с.

*Дата поступления
в редакцию 06.05.2011*

A.N. Shipunov, A.A. Gavrilov, E.N. Gavrilova

BALANCING THE INTEGRAL SENSOR OF THE ANGULAR SPEEDUPS

The Offered design of the detector element of the sensor of the angular speedups possesses high sensitivity to useful signal, but also sensitive to linear speedup and angular velocity. In article are theoretically motivated and experimental is proved methodses adjustment detector element from linear speedup and angular velocity.

Key words: sensor, acceleration, static balancing, dynamic balancing.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ НАУКАХ

УДК 517.956.4:517.983.54

Ф.А. Кутерин, М.И. Сумин

О РЕГУЛЯРИЗОВАННОМ АЛГОРИТМЕ УДЗАВЫ В ОБРАТНОЙ ЗАДАЧЕ ФИНАЛЬНОГО НАБЛЮДЕНИЯ ДЛЯ ПАРАБОЛИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ

Нижегородский государственный университет им Н.И. Лобачевского

Рассматривается обратная задача нахождения начального условия и распределенной правой части операторного параболического уравнения по приближенно известному в финальный момент времени его решению. На примере этой задачи обсуждается процедура регуляризации классического двойственного алгоритма Удзавы. В качестве регуляризованного алгоритма Удзавы выступает алгоритм итеративной двойственной регуляризации. Приводятся результаты численных расчетов, демонстрирующих работу регуляризованного двойственного алгоритма при решении обратной задачи финального наблюдения для уравнения теплопроводности.

Ключевые слова: классический двойственный алгоритм Удзавы, итеративная двойственная регуляризация, обратная задача финального наблюдения, параболическое уравнение, уравнение теплопроводности, численный эксперимент.

Для решения разнообразных оптимизационных задач на условный экстремум широко применяются двойственные (т.е. основанные на теории двойственности) численные алгоритмы [1, 2]. Типичным их представителем является предложенный в 1958 г. так называемый алгоритм Удзавы [3] (его описание см., например, в [1]), представляющий собой процедуру непосредственного решения на основе градиентного метода задачи, двойственной к исходной оптимизационной задаче. Этот классический алгоритм стал одним из самых популярных двойственных алгоритмов решения задач оптимизации с ограничениями и нашел многочисленные применения в различных важных исследованиях как теоретического, так и прикладного характера [4, 5, 6]. Однако сходимость алгоритма Удзавы изучалась лишь при двух весьма важных обстоятельствах, одно из которых заключалось в предположении точного задания исходных данных оптимизационной задачи, а другое предполагало существование седловой точки соответствующего функционала Лагранжа [4, 5, 6]. Вместе с тем, оба эти предположения являются весьма ограничительными, так как, во-первых, в реальных практических задачах, как правило, невозможно заранее установить факт наличия указанной седловой точки и, во-вторых, для таких задач характерным является наличие ошибки в задании их исходных данных. Формальное же применение алгоритма в общей ситуации может привести и приводит к стандартным эффектам неустойчивости приближенного решения. Рассмотрим в этой связи два конкретных иллюстративных примера. Первый из них демонстрирует принципиальную неустойчивость двойственной схемы, проявляющуюся при решении уже самых простых конечномерных оптимизационных задач [7].

Пример 1. Пусть имеется задача минимизации сильно выпуклой квадратичной функции двух переменных на множестве, задаваемом аффинным ограничением типа равенства, эквивалентная задаче поиска нормального решения линейной алгебраической

системы двух уравнений с двумя неизвестными

$$|x|^2 \rightarrow \min, Ax = y, x \in R^2, A \equiv \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, y \equiv \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, x^* = (0.5; 0.5).$$

Двойственная задача имеет вид

$$V(\lambda) \equiv L(x(\lambda), \lambda) = -\frac{1}{4} \langle AA^* \lambda, \lambda \rangle - \langle y, \lambda \rangle \rightarrow \max, \lambda \in R^2,$$

где $L(x, \lambda) \equiv |x|^2 + \langle \lambda, Ax - y \rangle$, $x(\lambda) \equiv \operatorname{argmin} \{L(x, \lambda), x \in R^2\} = -\frac{1}{2} A^* \lambda$. Ее решением является вектор $(-1, \alpha) \forall \alpha \in R^1$.

Рассмотрим возмущенную задачу при $\delta > 0$

$$|x|^2 \rightarrow \min, A^\delta x = y^\delta, x \in R^2, A^\delta \equiv \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & \delta^2 \end{pmatrix}, y^\delta \equiv \begin{pmatrix} 1 \\ \delta \end{pmatrix}.$$

Соответствующая двойственная задача

$$V^\delta(\lambda) \equiv L^\delta(x^\delta(\lambda), \lambda) \rightarrow \max, \lambda \in R^2$$

имеет решение $\lambda^\delta = \left(\frac{2-2\delta}{\delta}, \frac{2\delta-4}{\delta^3} \right)$ и при этом вектор

$x^\delta(\lambda^\delta) \equiv \operatorname{argmin} \{L^\delta(x, \lambda^\delta), x \in R^2\} = \left(1 - \frac{1}{\delta}, \frac{1}{\delta} \right)$ есть, в соответствии с классическим

двойственным подходом, «приближенное» решение исходной задачи, которое при $\delta \rightarrow 0$ не сходится к ее единственному точному решению $x^* = (0.5; 0.5)$.

В этом примере хорошо видно, как ошибка в задании исходных данных оптимизационной задачи влияет на процесс сходимости классической двойственной схемы.

Второй конкретный пример призван продемонстрировать практическую неустойчивость классического алгоритма Удзавы.

Пример 2. Рассмотрим обратную задачу нахождения начального условия $v(x)$ в третьей краевой задаче для уравнения теплопроводности

$$\begin{aligned} y_t - y_{xx} &= 0, \quad y(x, 0) = v(x), \\ y_x(0, t) &= y(0, t), \quad y_x(L, t) = -y(L, t), \quad 0 \leq t \leq T, \\ L &= 1, \quad T = 0.001, \end{aligned}$$

из множества допустимых воздействий $D = \{v(\cdot) \in L_2(0, L) : v(x) \in [-2, 2] \text{ при } x \in [0, L]\}$ по приближенно известному в финальный момент времени решению $q(x) = y(\cdot, T)$. Для численного решения данной задачи был формально применен классический алгоритм Удзавы. При этом обратная задача записывалась в форме эквивалентной задачи минимизации

$$\|v\|_{L^2} \rightarrow \min, \quad y[v](\cdot, T) = q, \quad v \in D, \quad q \in L_2(0, L).$$

Неустойчивость классического двойственного алгоритма иллюстрирует рис. 1.

Более подробно данный пример будет рассмотрен в заключительной части работы.

В работах [8-12] был предложен и развит метод (алгоритм) двойственной регуляризации для исследования и решения задач математического программирования [10], оптимального управления [8, 11, 12], а также обратных задач [9]. Этот метод свободен от указанных ранее принципиальных недостатков классического двойственного алгоритма и заключается в непосредственном решении на основе метода регуляризации задачи Тихонова, являющейся двойственной к исходной оптимизационной задаче и, как следствие, одновременном параллельном решении исходной (прямой) задачи. Кроме того, в работах [9, 10] (см. также [7]) был предложен и метод (алгоритм) так называемой итеративной

двойственной регуляризации, представляющий собой, по сути дела, процедуру регуляризованного градиентного подъема при максимизации целевой функции двойственной задачи с параллельным решением прямой задачи. Именно эту процедуру регуляризованного градиентного подъема при решении двойственной задачи и следует рассматривать как регуляризованный аналог классического алгоритма Удзавы.

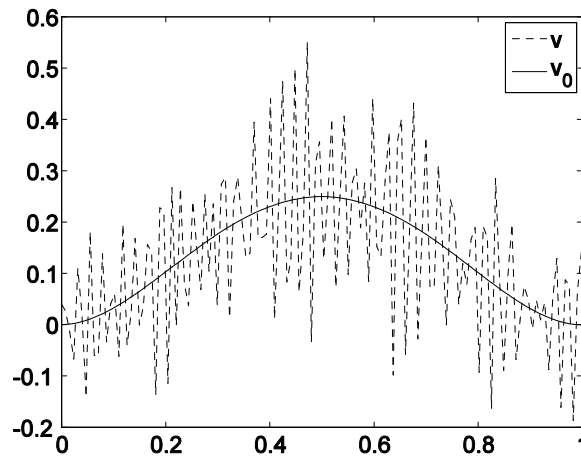


Рис. 1. Исходная начальная функция – v_0 , результат формального применения двойственного алгоритма – v

В настоящей работе эффективность алгоритма итеративной двойственной регуляризации для решения некорректных задач иллюстрируется на примере решения обратной задачи для операторного дифференциального уравнения, в качестве конкретного представителя которой выступает обратная задача финального наблюдения для уравнения теплопроводности, обсуждается численная реализация регуляризованного алгоритма Удзавы для этой конкретной обратной задачи. При этом естественно обратная задача записывается прежде всего в форме эквивалентной задачи минимизации с ограничением типа равенства.

Постановка задачи

Пусть H – гильбертово пространство, $U_1, U_2 \subset H$ – выпуклые замкнутые множества, $D_1 \equiv \{u \in L_2(0, T; H) : u(t) \in U_1 \text{ при п.в. } t \in [0, T]\}$, $D_2 \equiv U_2 \subset H$. Множество $D = D_1 \times D_2$ назовем множеством допустимых управлений.

Рассмотрим задачу Коши для операторного параболического уравнения [13]

$$y'(t) + Ay(t) = u(t), \quad 0 \leq t \leq T, \quad y(0) = v, \quad (1)$$

где оператор A является энергетическим расширением линейного неограниченного симметричного положительно определенного оператора с областью определения, плотной в вещественном сепарабельном гильбертовом пространстве H . Это значит, что $A \in L(V \rightarrow V^*)$, где V – энергетическое гильбертово пространство, V^* – пространство, сопряженное к V , $D(A) = V$ – область определения, и $R(A) = V^*$ – область значений оператора A . Будем предполагать также, что имеют место вложения $V \subset H$; $H^* \subset V^*$, причем эти вложения плотные и непрерывные. Решением задачи Коши (1), соответствующим паре $\pi = (u, v) \in D$, называется регулярная обобщенная функция $y(\cdot) \equiv y[\pi](\cdot) \in L^2(0, T; V)$, имеющая регулярную производную $y'(t) \in L^2(0, T; V^*)$, удовлетворяющая уравнению (1) при п.в. $t \in (0, T)$ и начальному условию $y(0) = v_0$. Понятие обобщенного решения задачи (1) и определения пространств $L^2(0, T; V)$ и $L^2(0, T; V^*)$ подробно обсуждаются в [13].

Обратная задача финального наблюдения заключается в нахождении пары $\pi = (u, v) \in D$ с минимальной нормой $\|u\|_{L^2(0,T;H)}^2 + \|v\|_H^2$ по известному в момент времени T наблюдению $q \in H$. Предполагается, что решение обратной задачи существует. Будем обозначать его π^0 . Таким образом, мы имеем равенство $y[\pi^0] = q$.

Поставленная обратная задача эквивалентна задаче оптимального управления с ограничением типа равенства

$$I_0(\pi) \rightarrow \inf, \quad I_1(\pi) = q, \quad \pi \in D, \quad q \in H \quad (2)$$

$$I_0(\pi) \equiv \|u\|_{L^2(0,T;H)}^2 + \|v\|_H^2, \quad I_1(\pi) \equiv y[\pi](T). \quad (3)$$

Будем считать, что оператор A исходной задачи (1) задан точно, а финальное наблюдение с ошибкой h^δ такой, что $\|h^\delta\|_H \leq \delta$, $\delta > 0$.

С учетом погрешности финального наблюдения имеем возмущенную задачу оптимального управления.

$$I_0(\pi) \rightarrow \inf, \quad I_1(\pi) = q^\delta \equiv q + h^\delta, \quad \pi \in D, \quad q^\delta \in H. \quad (4)$$

Необходимые теоретические сведения

Для задачи (1) при сделанных ранее предположениях для оператора A справедлива теорема существования и единственности решения [13].

Теорема 1. Пусть $A \in L(V \rightarrow V^*)$ – энергетическое расширение линейного неограниченного симметричного положительно определенного оператора с областью определения, плотной в гильбертовом пространстве H , и вложение пространств $V \subset H$ компактно. Тогда для любых $u \in L^2(0,T;V^*)$ и $v \in H$ существует единственное решение задачи (1).

Определим функционал Лагранжа задачи (4)

$$L_q^\delta(\pi, \lambda) \equiv I_0(\pi) + \langle \lambda, I_1(\pi) - q^\delta \rangle, \quad \pi \in D, \lambda \in H \quad (5)$$

и двойственную задачу

$$V_q^\delta(\lambda) \equiv \min_{\pi \in D} L_q^\delta(\pi, \lambda) \rightarrow \sup, \quad \lambda \in H. \quad (6)$$

Заметим, что операция \min в определении целевой функции двойственной задачи законна, так как функционал L_q^δ является сильно выпуклым на выпуклом замкнутом множестве $D \subset L^2(0,T;H) \times H$. При этом минимум достигается для любого q в единственной точке

$$\pi^\delta[\lambda] \equiv \operatorname{argmin}_{\pi \in D} L_q^\delta(\pi, \lambda), \quad \lambda \in H.$$

Лемма 1. Производная Фреше функционала V_q^δ в точке $\lambda \in H$ равна

$$\partial V_q^\delta(\lambda) = y[\pi^\delta[\lambda]](T) - q^\delta.$$

Эта производная удовлетворяет условию Липшица.

Доказательство этой леммы полностью аналогично доказательству леммы 2.6 в [9].

Метод двойственной регуляризации

Метод двойственной регуляризации [8-12] применительно к решению задачи (2) заключается в применении метода регуляризации Тихонова к двойственной задаче (6):

$$R^{\delta,\alpha}(\lambda) \equiv V_q^\delta(\lambda) - \alpha \|\lambda\|_H^2 \rightarrow \max. \quad (7)$$

Функционал $R^{\delta,\alpha}$ является сильно вогнутым и, согласно лемме 1, его градиент равномерно

непрерывен (липшицев). Это обстоятельство позволяет применить для максимизации функционала (7) какой-либо градиентный метод, например, хорошо известный метод наискорейшего подъема.

Обозначим через $\lambda^{\delta,\alpha}$ единственную в H точку, дающую безусловный максимум функционалу $R^{\delta,\alpha}$.

Теорема 2. При условии согласования ошибки задания исходных данных δ с параметром регуляризации α

$$\delta/\alpha(\delta) \rightarrow 0, \quad \delta \rightarrow 0$$

регуляризованные элементы $\pi^\delta[\lambda^{\delta,\alpha(\delta)}]$ для любого q сильно сходятся при $\delta \rightarrow 0$ к решению невозмущенной задачи π^0 .

Доказательство проводится аналогично доказательству в [9].

Следует отметить, что как и в [9], утверждение теоремы справедливо как в случае, когда функционал V^0 достигает максимума на H , так и в случае, когда этого нет.

Итеративная двойственная регуляризация

Будем применять для решения двойственной задачи (6) процедуру итеративной регуляризации градиентного метода [2]. Поясним кратко смысл этой процедуры.

Для каждого фиксированного α может быть найдено решение $\lambda^{\delta,\alpha}$ задачи

$$R^{\delta,\alpha}(\lambda) \rightarrow \max, \quad \lambda \in H. \quad (8)$$

Предположим, мы задали последовательность параметров α_k , согласованных с последовательностью ошибок наблюдения δ_k . В этом случае с возрастанием номера k задачу (8) при α_k придется решать со все более высокой точностью, поэтому число итераций n_k метода градиентного подъема может оказаться весьма большим при больших k . Это обстоятельство может создать трудности при практической реализации метода двойственной регуляризации. Поэтому для практического решения обратной задачи (2) предлагается использовать процедуру итеративной двойственной регуляризации [9, 10].

Принцип итеративной регуляризации градиентного двойственного метода решения задачи (7) заключается в том, что при каждом фиксированном k делается один шаг метода градиентного подъема с шаговым множителем $\beta = \beta_k$ в задаче (7) при $\alpha = \alpha_k$ и затем делается переход к задаче (7) с $\alpha = \alpha_{k+1}$. Начальную точку $H = L^2(0, L)$ можно выбрать произвольным образом из гильбертова пространства H . Чтобы полученная таким образом процедура была устойчива по отношению к ошибкам исходных данных необходимо, чтобы последовательность параметров регуляризации α_k и последовательность шаговых множителей β_k были определенным образом согласованы с последовательностью ошибок в исходных данных $\langle Af, f \rangle_H^{1/2}$.

Пусть последовательность $\bar{\lambda}^k$, $k=1,2,\dots$, в соответствии с методом итеративной двойственной регуляризации конструируется по правилу

$$\bar{\lambda}^{k+1} = \bar{\lambda}^k + \beta_k \left(\partial V_q^{\delta_k}(\bar{\lambda}^k) - 2\alpha_k \bar{\lambda}^k \right), \quad k=0,1,\dots; \bar{\lambda}^0 \in H, \quad (9)$$

где числовые последовательности $\delta_k, \alpha_k, \beta_k$, $k=0,1,\dots$, удовлетворяют условиям

$$\delta_k \geq 0, \alpha_k > 0, \beta_k > 0, \lim_{k \rightarrow \infty} (\delta_k + \alpha_k + \beta_k) = 0,$$

$$\frac{\alpha_k}{\alpha_{k+1}} \leq C_0, \quad \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{|\alpha_{k+1} - \alpha_k|}{(\alpha_k)^3 \beta_k} = 0, \quad \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{\beta_k}{(\alpha_k)^3} = 0, \quad \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{\delta_k}{(\alpha_k)^3} = 0, \quad \sum_{k=1}^{\infty} \alpha_k \beta_k = +\infty. \quad (10)$$

Теорема 3. При условии, что элементы $\bar{\lambda}^k$, при λ , находятся из рекуррентной

формулы (9) и выполняются условия согласования (10), имеет место предельное соотношение

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \left\| \pi^{\delta_k} [\bar{\lambda}^k] - \pi^0 \right\| = 0,$$

где π^0 – решение исходной обратной задачи (2).

Замечание. В качестве одного из возможных примеров указанных выше числовых последовательностей можно взять, в частности $\alpha_k = k^{-1/6}$, $\beta_k = k^{-3/5}$.

При практической реализации схемы двойственной регуляризации, в случае, когда исходные данные задаются с определенной фиксированной погрешностью $\delta > 0$, может быть использовано следующее условие останова итеративного процесса (9) (см., например, [10]). При фиксированном уровне погрешности v_0 итерации продолжаются до такого наибольшего номера $k = k(\delta)$, при котором выполняются неравенства

$$\delta_k \geq \delta, \quad k = 1, 2, \dots, k(\delta). \quad (11)$$

Теорема 4. Пусть $\bar{\lambda}^0 \in H$, а элементы $\bar{\lambda}^k$, при β_0 , находятся из рекуррентной формулы (9) и выполняются условия согласования (10). Тогда верно предельное соотношение

$$\lim_{\delta \rightarrow \infty} \left\| \pi^{\delta_k} [\bar{\lambda}^{k(\delta)}] - \pi^0 \right\| = 0,$$

где $\pi^{\delta_k} [\bar{\lambda}^{k(\delta)}]$ – результат $k(\delta)$ итераций процесса (9) при $\partial V_q^{\delta_k}(\lambda) = \partial V_q^{\delta}(\lambda)$.

Численный эксперимент

Проиллюстрируем работу и особенности метода итеративной двойственной регуляризации [9, 10] на примере обратной задачи нахождения начального условия $v(x)$ в третьей краевой задаче для уравнения теплопроводности

$$\begin{aligned} y_t - y_{xx} &= 0, \quad y(x, 0) = v(x), \\ y_x(0, t) &= y(0, t), \quad y_x(L, t) = -y(L, t), \quad 0 \leq t \leq T, \\ L &= 1, \quad T = 0.001, \end{aligned} \quad (12)$$

из множества допустимых управлений $D = D_2 \equiv \{v(x) \in L_2(0, L) : v(x) \in [-2, 2] \text{ при } x \in [0, L]\}$.

Чтобы воспользоваться описанной процедурой, поясним, как задача (12) записывается в виде абстрактной задачи Коши (1). Следуя схеме, приведенной в [13, гл. 2, §2, с. 66], введем оператор

$$Af = -f''(x), \quad 0 < x < L,$$

с областью определения

$$D(A) = \{f = f(x) \in C^2[0, L] : -f'(0) + f(0) = 0, f'(L) + f(L) = 0\},$$

плотной в $H = L^2(0, L)$.

Легко убедиться, что оператор A является линейным, симметричным, неограниченным и положительно определенным. Энергетическое пространство V , получаемое пополнением $D(A)$ в метрике $\langle Af, f \rangle_H^{1/2}$, здесь совпадает с пространством $H^1(0, L)$. Энергетическое расширение

$$A : V \rightarrow V^* = (H^1(0, L))^*$$

исходного оператора A определяется равенством

$$\langle Af, g \rangle = f(0)g(0) + f(L)g(L) + \int_0^L f'(x)g'(x)dx, \quad \forall f, g \in H^1(0, L).$$

Это позволяет рассматривать задачу (12) как частный случай задачи (1) и применять

для решения обратной задачи финального наблюдения уже описанные метод двойственной регуляризации и итеративный двойственный метод.

Численные эксперименты проводились по замкнутой схеме. Это означает, что для некоторой функции v_0 «точного решения» обратной задачи решалась задача (12) при $v \equiv v_0$ и функция $y_T \equiv y[v_0](\cdot, T)$ рассматривалась как финальное наблюдение. Далее функция y_T возмущалась с целью моделирования «погрешности измерения». «Приближенно известное» финальное наблюдение q^δ вычислялось по формуле $q^\delta = y_T + h^\delta$, и далее решалась обратная задача нахождения v при финальном наблюдении $q = q^\delta$. При этом использовался метод итеративной двойственной регуляризации (9) с описанным ранее правилом останова (11). В качестве последовательностей, удовлетворяющих условиям согласования (10), использовались последовательности $\alpha_k = \alpha_0 k^{-1/6}$, $\beta_k = \beta_0 k^{-3/5}$. Значения констант α_0 и β_0 были подобраны опытным путем таким образом, чтобы метод сходил «достаточно быстро» и равнялись $\alpha_0 = 0.0000001$, $\beta_0 = 2000$. Полученное решение обратной задачи v сравнивалось с v_0 (вычислялась норма разности в пространстве L^2), кроме того, оценивалось значение нормы соответствующей двойственной переменной λ также в L^2 .

Задача (12) и сопряженная задача решались с помощью разностной схемы Кранка-Николсона, которая, устойчива при любых шагах по времени и имеет второй порядок точности по пространственной переменной. Соответственно, вместо функций из гильбертовых пространств рассматривались сеточные представления этих функций. Для обеспечения достаточной точности решения использовалось равномерное разбиение по x с помощью 256 точек.

Ошибка \mathcal{K}^δ в пространстве сеточных приближений задавалась следующим образом. Бралась сеточная функция \hat{h}^1 со случайными значениями, распределенными равномерно на отрезке $[-1, 1]$, вычислялась ее норма $\|\hat{h}^1\|$, а также «собственно погрешность» по формуле $\mathcal{K}^\delta = \delta(\hat{h}^1 / \|\hat{h}^1\|)$.

В качестве нормы в пространстве сеточных приближений рассматривался сеточный аналог нормы в L_2

$$\|\hat{u}\| = \sqrt{\sum_{i=1}^{n_x} (u^i)^2 \xi}, \quad \xi = L/(n_x - 1),$$

где n_x – число точек разбиения, а u^i – значения функции \hat{u} в соответствующих точках.

При проведении численных экспериментов ставились три цели:

1. Продемонстрировать сходимость алгоритма итеративной двойственной регуляризации в случае, когда у функции Лагранжа (5) задачи (2)-(3) есть седловая точка.
2. Показать поведение алгоритма в ситуации, когда нет седловой точки у функции Лагранжа (5).
3. Продемонстрировать неустойчивость алгоритма (9)-(10) в отсутствие регуляризирующего слагаемого при наличии ошибки в исходных данных.

Для достижения перечисленных целей проводились три серии численных экспериментов. Ниже при описании результатов численных экспериментов в каждом из трех случаев приводятся графики начальной функции v_0 , результата восстановления методом итеративной двойственной регуляризации $v[\lambda_N]$ и график функции λ_N (двойственной переменной) на последнем N -м шаге итеративного процесса. Кроме того подсчитывается норма двойственной переменной λ_N и невязка $\|v_0 - v[\lambda_N]\|$.

В первой серии экспериментов в качестве начальной функции взята гладкая функция v_0^1

$$v_0^1 \equiv \frac{x^2(x-L)^2}{22^4 L^4}.$$

«Погрешность наблюдения» равнялась 1%, то есть $\delta = 0.01 \|\phi^0\|$. Использовалось условие останова (11).

Таблица 1
Уменьшение невязки с возрастанием точности
решения задачи

Число итераций, N	$\ \lambda_N\ $	$\ v_0 - v[\lambda_N]\ $
10	0.555782	0.00554065
100	1.00724	0.000299552
1000	1.79222	0.000202258
10000	3.18836	0.000137671
100000	5.67136	9.37373e-05

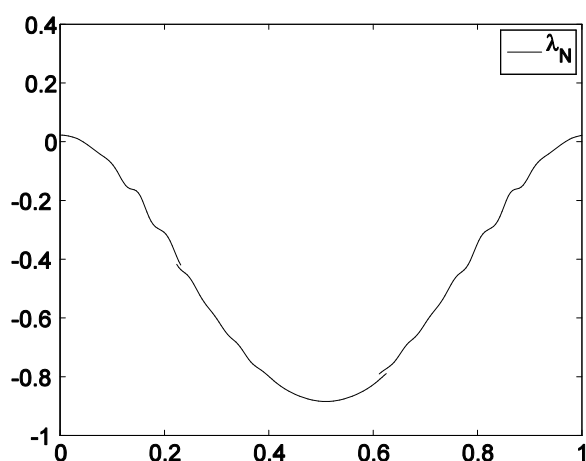


Рис. 2. Двойственная переменная на 10-м шаге

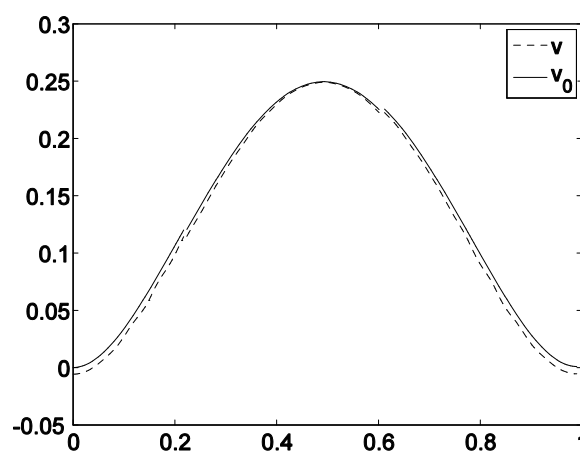


Рис. 3. Начальная функция и восстановленная начальная функция, 10 итераций

Уменьшение нормы разности $\|v_0^1 - v[\lambda_N]\|$ говорит о сходимости метода итеративной двойственной регуляризации. Следует отметить низкую скорость сходимости итерационного двойственного метода, обусловленную априорным выбором последовательностей шаговых и регуляризующих множителей α_k и β_k .

Во второй серии экспериментов использовалась разрывная начальная функция

$$v_0^2 \equiv \begin{cases} -1, & x < a, x > b, \\ 1, & a \leq x \leq b, \end{cases}$$

принимая значения внутри допустимого множества $[-2, 2]$. В этой ситуации, как показано в [9], функционал Лагранжа (5) задачи (2)-(3) не имеет седловой точки. Это значит, что норма двойственной переменной λ по мере работы алгоритма должна неограниченно увеличиваться. Чтобы наблюдать этот эффект «в чистом виде» (независимо от вклада погрешности наблюдения) «погрешность наблюдения» δ была положена равной нулю.

Анализируя приведенные далее результаты, можно наблюдать, что с ростом числа итераций происходит приближение решения к начальной функции и одновременное увеличение нормы λ_k .

Таблица 2
Рост нормы двойственной переменной

Число итераций, N	$\ \lambda_N\ $	$\ y_0 - v[\lambda_N]\ $
100000	647.621	0.0299701
1000000	1764.2	0.00961037
10000000	3601.9	0.00121545

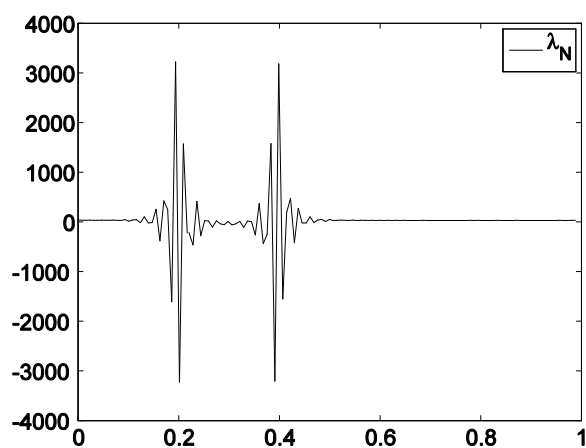


Рис. 4. Двойственная переменная на 10000-м шаге

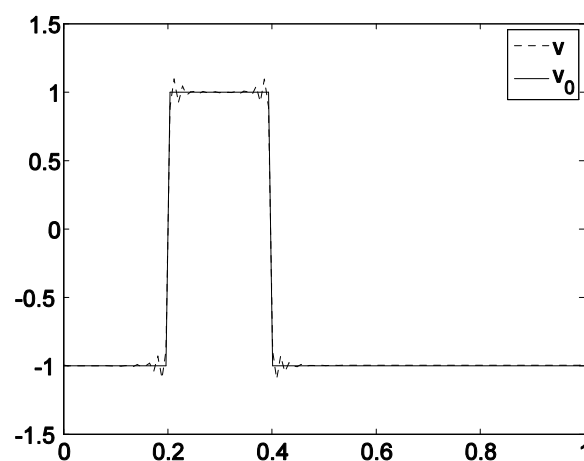


Рис. 5. Начальная и восстановленная функции на 10000-м шаге

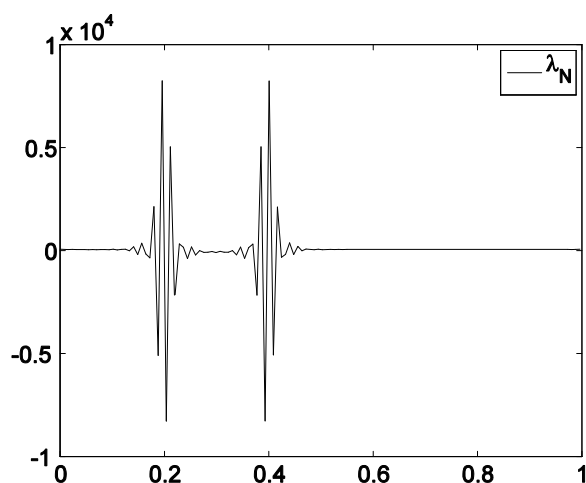


Рис. 6. Двойственная переменная на 100000-м шаге

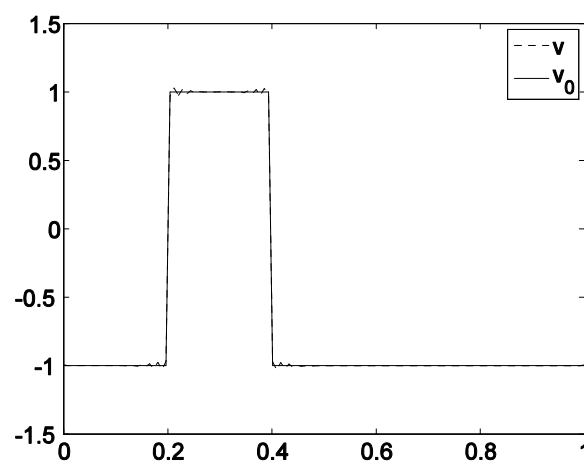


Рис. 7. Начальная и восстановленная функции на 100000-м шаге

В третьей серии экспериментов, как и в первой, в качестве начальной функции была взята гладкая функция v_0^1 , но все элементы α_k , отвечающие за регуляризацию в формуле (9), были положены равными нулю, то есть, по сути применялся классический алгоритм Удзавы. В то же время «финальное наблюдение» возмущалось равномерно распределенной случайной ошибкой h^δ , как было описано выше. Уровень ошибки был равен 3% ($\delta = 0.03\|\xi^0\|$). Результаты численного эксперимента представлены на следующих двух графиках и в таблице.

Таблица 3
Неустойчивость итерационного двойственного метода
без регуляризации

Число итераций, N	$\ \lambda_N\ $	$\ y_0 - v[\lambda_N]\ $
10000	299.144	0.0923157
100000	1054.59	0.127038
1000000	4742.26	0.222071

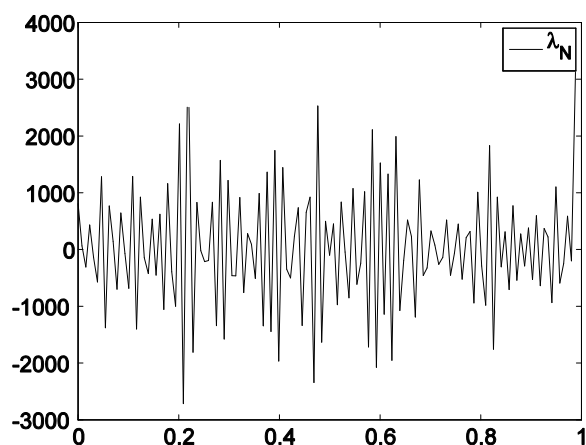


Рис. 8. Двойственная переменная на 100000-м шаге

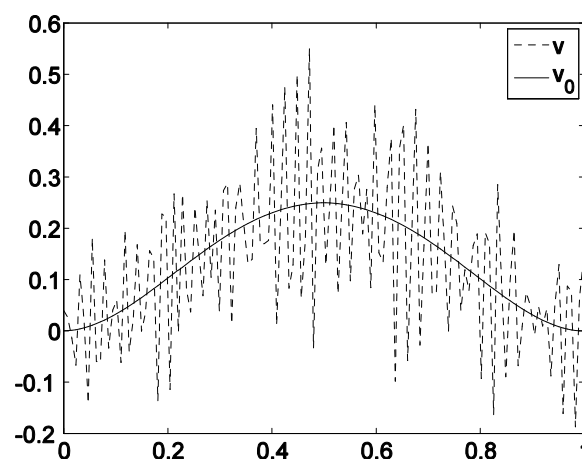


Рис. 9. Начальная и восстановленная функции на 100000-м шаге

По мере работы алгоритма как норма двойственной переменной, так и невязка увеличивались. И, как можно заметить из графиков начальной и восстановленной функций, приближенное решение обратной задачи «не тяготеет» к ее точному решению, что говорит о неустойчивой работе итерационного двойственного метода без регуляризации и о ее существенности в задаче с неточно известными начальными данными.

Результаты проведенных экспериментов показали эффективность метода итерационной двойственной регуляризации [8-12] в задаче финального наблюдения для одномерного уравнения теплопроводности и необходимость регуляризации при решении подобного рода задач.

Работа подготовлена при финансовой поддержке аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2011 годы)» Минобрнауки РФ (проекты 2.1.1/3927, 2.1.1/13303) и Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (проект НК-13П-13).

Библиографический список

1. **Мину, М.** Математическое программирование. Теория и алгоритмы / М. Мину. – М.: Наука, 1990. – 488 с.
2. **Васильев, Ф.П.** Методы оптимизации / Ф.П. Васильев. – М.: Факториал Пресс, 2002. – 824 с.
3. **Uzawa, H.** Iterative Methods for Concave Programming. In: Studies in linear and nonlinear programming, Chap. 10 (Arrow, Hurwicz, Uzawa eds.), Stanford University Press, 1958. [русский перевод в кн.: Эрроу К.Дж., Гурвиц Л., Удзава Х. Исследования по линейному и нелинейному программированию. М.: ИЛ, 1962. – 336 с.]
4. **Гловински, Р.** Численное исследование вариационных неравенств / Р. Гловински, Ж.-Л. Лионс, Р. Тремольер. – М.: Мир, 1979. – 576 с.

5. **Экланд, И.** Темам Р. Выпуклый анализ и вариационные проблемы / И. Экланд. – М.: Мир, 1979. – 400 с.
6. **Темам, Р.** Уравнения Навье-Стокса. Теория и численный анализ / Р. Темам. – М.: Мир, 1981. – 408 с.
7. **Сумин, М.И.** Некорректные задачи и методы их решения. Материалы к лекциям для студентов старших курсов: учеб. пособие / М.И. Сумин. – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2009. – 289 с.
8. **Сумин, М.И.** Оптимальное управление параболическими уравнениями: двойственные численные методы, регуляризация // Распределенные системы: оптимизация и приложения в экономике и науках об окружающей среде: сб. докладов Международной конференции (Екатеринбург, 30 мая – 2 июня 2000 г.). Екатеринбург: Изд-во Ин-та математики и механики УрО РАН, 2000. С. 66–69.
9. **Сумин, М.И.** Регуляризованный градиентный двойственный метод решения обратной задачи финального наблюдения для параболического уравнения // Вычислительная математика и математическая физика. 2004. Т. 44. 11. С. 2001–2019.
10. **Сумин, М.И.** Регуляризация в линейно-выпуклой задаче математического программирования на основе теории двойственности // Вычислительная математика и математическая физика. 2007. Т. 47. 4. С. 602–625.
11. **Сумин, М.И.** Параметрическая двойственная регуляризация для задачи оптимального управления с поточечными фазовыми ограничениями // Вычислительная математика и математическая физика. 2009. Т. 49. 12. С. 2083–2102.
12. **Сумин, М.И.** Двойственная регуляризация и принцип максимума Понтрягина в задаче оптимального граничного управления для параболического уравнения с недифференцируемыми функционалами // Труды института математики и механики УрО РАН. 2011. Т. 17. 1. С. 229–244.
13. **Осипов, Ю.С.** Основы метода динамической регуляризации / Ю.С. Осипов, Ф.П. Васильев, М.М. Потапов. – М.: Изд-во Московского университета, 1990. – 238 с.

*Дата поступления
в редакцию 05.05.2011*

F.A. Kuterin, M.I. Sumin

ON REGULARIZED ALGORITHM OF UZAWA IN INVERSE PROBLEM OF FINAL OBSERVATION FOR PARABOLIC EQUATION

The paper deals with the inverse problem of determination of initial condition and distributed right-hand side for operator parabolic equation whose solution is known approximately at final time. On an example of this problem we discuss the regularization of the classical dual algorithm of Uzawa. As regularized algorithm of Uzawa we consider the algorithm of iterative dual regularization. The results of numerical experiments showing work of the regularized dual algorithm for solving inverse problem of final observation for heat conduction equation are given.

Key words: Classical dual algorithm of Uzawa, iterative dual regularization, inverse problem of final observation, parabolic equation, heat conduction equation, numerical experiment.

УДК 517.9

С.Н. Алексеенко, Е.А. Елькина

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО АРГУМЕНТА
К ИССЛЕДОВАНИЮ НЕЛОКАЛЬНОЙ РАЗРЕШИМОСТИ ЗАДАЧИ КОШИ
ДЛЯ УРАВНЕНИЙ ПЕРВОГО ПОРЯДКА С ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ
ОПЕРАТОРОМ ТИПА ПОЛНОЙ ПРОИЗВОДНОЙ ПО ВРЕМЕНИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Получены условия разрешимости задачи Коши для уравнения с дифференциальным оператором типа полной производной по времени на заданном конечном интервале $[0, T]$ изменения аргумента t , который в физических задачах обычно выражает время. Доказательство нелокальной разрешимости опирается на глобальные оценки, полученные с использованием мажорантных уравнений.

Ключевые слова: метод дополнительного аргумента, задача Коши, глобальные оценки.

Для описания разнообразных физических процессов в механике сплошной среды широко используются уравнения с дифференциальным оператором типа полной производной по времени [1, 2, 3]:

$$\partial_t v + v \partial_x v = f(t, x, v). \quad (1)$$

Изучению условий разрешимости уравнений вида (1) и поиску для них оптимальных способов построения численных решений посвящено большое количество работ. С последними достижениями по исследованию разрешимости задачи Коши для систем уравнений вида (1) можно познакомиться в обзорной статье [1]. А классические результаты по выводу, использованию и решению уравнений вида (1) содержатся в [4] и многих известных учебниках по дифференциальным уравнениям математической физики. Как можно видеть на примере приведенных литературных источников, для исследования уравнений вида (1) разработано много разных методов. Все они имеют свои достоинства и недостатки и каждый из известных методов применим к своему классу задач.

Так, в частности, метод характеристик в принципе позволяет доказать локальную разрешимость задачи Коши для уравнения (1). Однако, определение границ интервала разрешимости и нахождение выражения для v в исходных координатах (t, x) является в методе характеристик трудноразрешимой задачей. При этом, как правило, используется теорема об обратной функции, которая в большинстве случаев не дает возможности «конструктивно» определить интервал разрешимости.

Кроме того, если функция $f(t, x, v)$ имеет сложный вид, или вместо одного уравнения имеется система уравнений, то в рамках классического метода характеристик уравнения «на характеристиках» приобретают неудобный для исследования вид.

Задача определения условий разрешимости уравнения (1) без привлечения теоремы об обратной функции, как и задача построения численного решения в исходных координатах эффективно решаются в рамках метода дополнительного аргумента [5, 6, 7, 8, 9].

Однако до сих пор с помощью метода дополнительного аргумента в основном исследовались вопросы локального существования решения уравнений первого порядка с дифференциальным оператором типа полной производной по времени. Хотя, некоторые задачи о нелокальной разрешимости уже рассматривались [2, 10].

Данная работа посвящена выяснению условий разрешимости задачи Коши для уравнения вида (1) на заданном конечном интервале $[0, T]$ изменения аргумента t , который в физических задачах обычно выражает время.

Естественно, нелокальная разрешимость возможно лишь при определенных ограни-

чениях на функцию $f(t, x, v)$. Чтобы сделать последующие выкладки менее громоздкими, рассмотрим уравнение вида

$$\partial_t u + u \partial_x u = -U(t, x, u)u \quad (2)$$

с начальным условием

$$u(0, x) = \varphi(x). \quad (3)$$

Исходные условия на функции $U(t, x, u)$ и $\varphi(x)$ сформулируем далее. Продифференцируем (2) по x :

$$\partial_{xt}^2 u + (\partial_x u)^2 + u \partial_{xx}^2 u = -U(t, x, u) \partial_x u - \partial_x U(t, x, u) u - \partial_u U(t, x, u) \partial_x u \cdot u.$$

Введем обозначения:

$$q := \partial_x u, U_1 := \partial_x U, U_2 := \partial_u U, A := U + U_2 u.$$

С ними последнее уравнение перепишется в виде

$$\partial_t q + u \partial_x q = -q^2 - U(t, x, u)q - U_1(t, x, u)u - U_2(t, x, u)uq. \quad (4)$$

С учетом (3) зададим начальное условие для функции

$$q(0, x) = \varphi'(x). \quad (5)$$

В соответствии с методом дополнительного аргумента, запишем для задачи (2) – (5) расширенную характеристическую систему:

$$\frac{d\eta(s, t, x)}{ds} = v(s, t, x), \quad (6)$$

$$\frac{dv(s, t, x)}{ds} = -U(s, \eta, v)v, \quad (7)$$

$$\frac{dw(s, t, x)}{ds} = -w^2 - A(s, \eta, v)w - U_1(s, \eta, v)v, \quad (8)$$

$$\eta(t, t, x) = x, \quad (9)$$

$$v(0, t, x) = \varphi(\eta(0, t, x)), \quad (10)$$

$$w(0, t, x) = \varphi'(\eta(0, t, x)). \quad (11)$$

Введем необходимые обозначения и сформулируем условия на функции $U(t, x, u)$ и $\varphi(x)$.

Будем обозначать, как обычно, $C(\Omega_*)$ и $C^{\alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_n}(\Omega_*)$ - пространства функций, определенных и непрерывных (соответственно вместе со своими производными до порядка α_i по i -му аргументу, $i=1, 2, \dots, n$) на некотором подмножестве Ω_* евклидова пространства \mathbb{R}^n , $n=1, 2, \dots$. Если это важно, то будем обозначать $C^{\alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_n; \alpha_{n+1}}(\Omega_*)$ пространство функций, у которых порядок смешанных производных не выше чем α_{n+1} . Пространства функций, ограниченных на неограниченном множестве, будем обозначать таким же символом с чертой наверху. Для вектор-функций сохраним эти же обозначения. Далее,

$$Q_T = \{(s, t, x): 0 \leq s \leq t \leq T, -\infty < x < \infty\},$$

$$R(TK) = [0, T] \times (-\infty, \infty) \times [-K, K],$$

где K – произвольно зафиксированное положительное число.

Примем, что $\varphi \in \bar{C}^2(R^1)$, $U \in \bar{C}^{1,2,2}(R(TK))$.

Обозначим

$$N_\varphi := \max \left\{ \sup_{x \in (-\infty, \infty)} |\varphi(x)|, \sup_{x \in (-\infty, \infty)} |\varphi'(x)|, \sup_{x \in (-\infty, \infty)} |\varphi''(x)| \right\},$$

$$M(K) := \max \left\{ \sup_{(\xi_1, \xi_2, \xi_3) \in R(TK)} |U(\xi_1, \xi_2, \xi_3)\xi_3|, \sup_{(\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4) \in R(TK) \times [-K, K]} |\xi_4^2 + A(\xi_1, \xi_2, \xi_3)\xi_4 + U_1(\xi_1, \xi_2, \xi_3)\xi_3| \right\},$$

$$M_j(K) := \max \left\{ \sup_{(\xi_1, \xi_2, \xi_3) \in R(TK)} |\partial_{\xi_j} [U(\xi_1, \xi_2, \xi_3)\xi_3]|, \sup_{(\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4) \in R(TK) \times [-K, K]} |\partial_{\xi_j} [\xi_4^2 + A(\xi_1, \xi_2, \xi_3)\xi_4 + U_1(\xi_1, \xi_2, \xi_3)\xi_3]| \right\}, j = 1, 2, 3, 4.$$

Сформулируем в виде лемм те утверждения о взаимосвязи между решениями задач (2)-(3) и (6)-(11), а также о разрешимости задачи (6)-(11), которые составляют основу метода дополнительного аргумента и доказаны или непосредственно вытекают из цитированных выше работ.

Лемма 1. Пусть $\varphi \in \bar{C}^2(R^1), U \in \bar{C}^{0,2,2}(R(TK))$, причем T и K подобраны таким образом, что выполняется неравенство $N_\varphi + TM(K) \leq K$. Пусть, далее T_1 - положительный корень уравнения

$$(N_\varphi + M_3(K))t + \frac{1}{2}M_2(K)t^2 = 1,$$

$$T_2 := [M_4(K)]^{-1}, \quad T_0 := \min(T_1, T_2), \quad T_3 = \begin{cases} T_0 - \varepsilon, & \text{если } T_0 \leq T \\ T, & \text{если } T_0 > T, \end{cases}$$

где ε - любое число из интервала $(0, T_0)$.

Тогда при $0 < t \leq T_3$ система уравнений (6)-(8) с дополнительными условиями (9) – (11) имеет единственное решение $\eta(s, t, x) \in \bar{C}^{1,1,1}(Q_{T_3})$, $v \in \bar{C}^{1,1,1}(Q_{T_3})$, $w \in \bar{C}^{1,1,1}(Q_{T_3})$.

Лемма 2. Функция $u(t, x) = v(t, t, x)$, где $v \in \bar{C}^{1,1,1}(Q_{T_3})$, определяется из решения задачи (6) – (11), будет являться решением исходной задачи Коши (1) – (2).

Лемма 3. При выполнении условий леммы 1 и $U \in \bar{C}^{1,2,2}(R(TK))$ справедливо $v \in \bar{C}^{1,1,2}(Q_3)$.

Из этих трех лемм следует теорема о локальной разрешимости исходной задачи Коши (2)-(3).

ТЕОРЕМА 1

Пусть $\varphi \in \bar{C}^2(R^1), U \in \bar{C}^{1,2,2}(R(TK))$, причем T и K подобраны таким образом, что выполняется неравенство $N_\varphi + TM(K) \leq K$. Пусть, далее, T_1 - положительный корень уравнения

$$(N_\varphi + M_3(K))t + \frac{1}{2}M_2(K)t^2 = 1,$$

$$T_2 := [M_4(K)]^{-1}, \quad T_0 := \min(T_1, T_2), \quad T_3 = \begin{cases} T_0 - \varepsilon, & \text{если } T_0 \leq T \\ T, & \text{если } T_0 > T, \end{cases}$$

где ε - любое число из интервала $(0, T_0)$.

Тогда при $0 < t \leq T_3$ задача Коши (2) - (3) имеет решение $u(t, x) \in \bar{C}^{1,2}(Q_{T_3})$.

Теперь займемся определением условий, при выполнении которых задача (6)-(11), а,

следовательно, и задача (2)-(3), будут иметь решение на всем заданном в начале промежутке $[0, T]$.

Первый и самый важный этап этой работы состоит в выводе глобальных оценок для v и w .

Запишем для задачи (6), (7), (9), (10) соответствующую систему интегральных уравнений.

$$\eta(s, t, x) = x - \int_s^t V(\tau, t, x) d\tau, \quad (12)$$

$$v(s, t, x) = \varphi(\eta(0, t, x)) e^{-\int_0^s U(\tau, \eta, v) d\tau}. \quad (13)$$

$$\text{Констатируем первое условие: } U(t, x, y) \geq 0 \quad (14)$$

для $(t, x, y) \in R(TK)$.

Из (13) следует первая глобальная оценка

$$|v| \leq N_\varphi. \quad (15)$$

Переходим к выводу глобальной оценки и определению условий ее осуществления для w . Правая часть в (8) представляет собой квадратный трехчлен относительно w . Найдем его корни:

$$w^2 + Aw + U_1 v = 0, \quad w_{1,2} = \frac{1}{2} \left[-A \pm \sqrt{A^2 - 4U_1 v} \right].$$

В качестве следующего условия глобальной разрешимости примем, что

$$A^2 - 4U_1 v > 0 \quad (16)$$

при всех $0 \leq s \leq t \leq T, -\infty < \eta < \infty, |v| \leq N_\varphi$.

Обозначим $W_1 := \frac{1}{2} \left[-A + \sqrt{A^2 - 4U_1 v} \right], W_2 := \frac{1}{2} \left[-A - \sqrt{A^2 - 4U_1 v} \right]$.

Перепишем уравнение (8) в виде:

$$\frac{dw}{ds} = -(w - W_1)(w - W_2) \quad (17)$$

Построим для (17) мажорантные и минорантные уравнения, решения которых и обеспечат искомую глобальную оценку.

Определим $\tilde{W}_1 := \min_{s \in [0, t]} W_1, \bar{W}_1 := \max_{s \in [0, t]} W_1, \bar{W}_2 := \min_{s \in [0, t]} W_2, \tilde{W}_2 := \max_{s \in [0, t]} W_2$ (рис. 1).



Рис. 1. Взаимное расположение введенных обозначений

В качестве следующего условия глобальной разрешимости примем, что при всех допустимых t, x :

$$\tilde{W}_2 < \tilde{W}_1. \quad (18)$$

Для сокращения последующих записей обозначим $x_0 := \eta(0, t, x)$.

Мажорантные и минорантные уравнения будем строить по-разному в зависимости от взаимного расположения $\varphi'(x_0)$ и $\bar{W}_2, \tilde{W}_2, \tilde{W}_1, \bar{W}_1$. Пусть вначале $\tilde{W}_2 < \varphi'(x_0) < \tilde{W}_1$.

В качестве минорантного уравнения возьмем

$$\frac{d\tilde{W}}{ds} = -(\tilde{W} - \tilde{W}_1)(\tilde{W} - \tilde{W}_2). \quad (19)$$

Для \tilde{W} зададим то же самое начальное условие, что и для w :

$$\tilde{W}|_{s=0} = w|_{s=0} = \varphi'(x_0). \quad (20)$$

Лемма «Min1». Если $\tilde{W}_2 < \varphi'(x_0) < \tilde{W}_1$, (21)

то на всем интервале существования решения задачи (6)-(11) справедлива оценка

$$\tilde{W}_2 \leq \tilde{W} \leq w. \quad (22)$$

Доказательство.

В силу (21) для s , близких к 0, $\tilde{W}_2 \leq \tilde{W} < w < \tilde{W}_1 \leq W_1$.

Убедимся, что (19) будет минорантным уравнением для (17). Справедливы неравенства

$$|w - \tilde{W}_1| \leq |w - W_1| \Rightarrow -(w - \tilde{W}_1) \leq -(w - W_1), \quad w - \tilde{W}_2 \leq w - W_2.$$

Следовательно, $-(w - \tilde{W}_1)(w - \tilde{W}_2) \leq -(w - W_1)(w - W_2)$, то есть,

$$-(w - \tilde{W}_1)(w - \tilde{W}_2) + (w - W_1)(w - W_2) \leq 0. \quad (23)$$

Вычтем из уравнения (19) уравнение (17):

$$\frac{d\tilde{W}}{ds} - \frac{dw}{ds} = -(\tilde{W} - \tilde{W}_1)(\tilde{W} - \tilde{W}_2) + (w - W_1)(w - W_2).$$

Прибавим и вычтем $(w - \tilde{W}_1)(w - \tilde{W}_2)$:

$$\frac{d(\tilde{W} - w)}{ds} = -(\tilde{W} - \tilde{W}_1)(\tilde{W} - \tilde{W}_2) + (w - \tilde{W}_1)(w - \tilde{W}_2) - (w - \tilde{W}_1)(w - \tilde{W}_2) + (w - W_1)(w - W_2).$$

С учётом (23)

$$\frac{d(\tilde{W} - w)}{ds} \leq -(\tilde{W} - \tilde{W}_1)(\tilde{W} - \tilde{W}_2) + (\tilde{W} - \tilde{W}_1)(w - \tilde{W}_2) - (\tilde{W} - \tilde{W}_1)(w - \tilde{W}_2) + (w - \tilde{W}_1)(w - \tilde{W}_2),$$

откуда вытекает, что

$$\frac{d(\tilde{W} - w)}{ds} \leq -(\tilde{W} - \tilde{W}_1)(\tilde{W} - w) - (w - \tilde{W}_2)(\tilde{W} - w).$$

Таким образом, приходим к неравенству

$$\frac{d(\tilde{W} - w)}{ds} \leq (\tilde{W}_1 + \tilde{W}_2 - \tilde{W} - w)(\tilde{W} - w). \quad (24)$$

Докажем, что $\tilde{W} \leq w$. В точке $s=0$ имеем $\tilde{W} = w$. Пусть начиная с некоторой точки s_0 (в частности, $s_0 = 0$) будет $\tilde{W} > w$. Тогда $\tilde{W} - w > 0$ в некоторой окрестности справа от точки s_0 , а в точке s_0 $\tilde{W} - w = 0$. Тогда из (24) следует, что в этой окрестности

$$\frac{d(\tilde{W} - w)}{ds} \leq |\tilde{W}_1 + \tilde{W}_2 - \tilde{W} - w|(\tilde{W} - w).$$

Отсюда в силу леммы Гронуолла $\tilde{W} = w$. Полученное противоречие доказывает, что $\tilde{W} \leq w$.

Решая уравнение (19) с условиями (20), (21), будем иметь

$$\tilde{W} = \frac{\tilde{W}_1 - \tilde{W}_2 K}{1 - K}, \quad \text{где } K := \frac{\varphi'(x_0) - \tilde{W}_1}{\varphi'(x_0) - \tilde{W}_2} e^{-(\tilde{W}_1 - \tilde{W}_2)s}. \quad (25)$$

Так как в силу (21) $K < 0$, то из (25) следует, что $\tilde{W}_2 \leq \tilde{W}$. А так как ранее доказано, что $\tilde{W} \leq w$, то получаем утверждение леммы: $\tilde{W}_2 \leq \tilde{W} \leq w$.

Допустим теперь, что $\tilde{W}_2 < \varphi'(x_0) \leq \tilde{W}_1$, и построим при этом условии для (17) мажор-

рантное уравнение. Чтобы включить в рассмотрение случай $\varphi'(x_0) = \bar{W}_1$, определим величину (функцию от x и t) $\bar{W}_{1,\varepsilon} = \bar{W}_1 + \varepsilon, \varepsilon > 0$.

В качестве мажорантного уравнения возьмем:

$$\frac{d\bar{W}}{ds} = -(\bar{W} - \bar{W}_{1,\varepsilon})(\bar{W} - \bar{W}_2)$$

с тем же самым начальным условием, что и для W :

$$\bar{W}|_{s=0} = w|_{s=0} = \varphi'(x_0).$$

Лемма «Max1». При $\tilde{W}_2 < \varphi'(x_0) \leq \bar{W}_1$ (26)

на всем интервале существования решения задачи (6)-(11) справедлива оценка

$$w \leq \bar{W} \leq \bar{W}_1. \quad (27)$$

Доказательство этой леммы производится по той же схеме, что и доказательство леммы «Min1».

Рассмотрим ситуацию, когда $\varphi'(x_0) \geq \tilde{W}_1$. Чтобы включить в рассмотрение случай, когда $\varphi'(x_0) = \tilde{W}_1$, определим $\tilde{W}_{1,\varepsilon} = \tilde{W}_1 - \varepsilon$ и в качестве минорантного уравнения возьмем

$$\frac{d\tilde{W}}{ds} = -(\tilde{W} - \tilde{W}_{1,\varepsilon})(\tilde{W} - \bar{W}_2) \text{ с тем же самым начальным условием } \tilde{W}|_{s=0} = w|_{s=0} = \varphi'(x_0).$$

Лемма «Min2». Если $\tilde{W}_1 \leq \varphi'(x_0)$, (28)

то на всем интервале существования решения задачи (6)-(11) справедлива оценка

$$\tilde{W}_1 \leq \tilde{W} \leq w. \quad (29)$$

Доказательство этой леммы производится по той же схеме, что и доказательство леммы «Min1».

Для вывода оценки сверху при $\varphi'(x_0) > \bar{W}_1$ рассмотрим мажорантное уравнение

$$\frac{d\hat{W}}{ds} = -(\hat{W} - \bar{W}_1)(\hat{W} - \tilde{W}_2) \text{ с тем же самым начальным условием } \hat{W}|_{s=0} = w|_{s=0} = \varphi'(x_0).$$

Лемма «Max2». Если $\bar{W}_1 < \varphi'(x_0)$, (30)

то на всем интервале существования решения задачи (6)-(11) справедлива оценка

$$w \leq \hat{W} \leq \varphi'(x_0). \quad (31)$$

Доказательство этой леммы, как и следующих двух лемм, производится по той же схеме, что и доказательство леммы «Min1».

Лемма «Max3». Если $\varphi'(x_0) = \tilde{W}_2$, (32)

то на всем интервале существования решения задачи (6)-(11) справедлива оценка

$$w \leq \ddot{W} \leq \bar{W}_1, \quad (33)$$

где \ddot{W} является решением следующего мажорантного уравнения

$$\frac{d\ddot{W}}{ds} = -(\ddot{W} - \bar{W}_1)(\ddot{W} - W_\gamma),$$

в котором W_γ выбирается меньше, чем \bar{W}_2 .

Лемма «Min3». Если $\varphi'(x_0) = \tilde{W}_2$, (32)

то на всем интервале существования решения задачи (6)-(11) справедлива оценка

$$\varphi'(x_0) \leq \ddot{W} \leq w, \quad (34)$$

где \ddot{W} является решением следующего минорантного уравнения

$$\frac{d\ddot{W}}{ds} = -(\ddot{W} - \tilde{W}_1)(\ddot{W} - \tilde{W}_2)$$

с начальным условием

$$\ddot{W}|_{s=0} = \varphi'(x_0) - \varepsilon.$$

На основе оценок, установленных в леммах, запишем искомую глобальную оценку для $w(s, t, x)$. Обозначим $W_1^0 = \sup_{R(TK)} |\bar{W}_1|$, $W_2^0 = \sup_{R(TK)} |\tilde{W}_2|$, $N_w := \max \{W_1^0, W_2^0, N_\varphi\}$. Суммируя условия (21), (26), (28), (30), (32) и оценки (22), (27), (29), (31), (33), (34), приходим к выводу, что при выполнении неравенства

$$\tilde{W}_2 \leq \varphi'(\eta(0, t, x)) \quad (35)$$

будет иметь место глобальная оценка

$$|W| \leq N_w. \quad (36)$$

Оценки (15) и (36) справедливы при всех $0 \leq s \leq t$, в том числе и при $s = t$, то есть, они сохраняются для $u(t, x) = V(t, t, x)$, $q(t, x) = W(t, t, x)$:

$$|u(t, x)| \leq N_\varphi, \quad (37)$$

$$|q(t, x)| \leq N_w. \quad (38)$$

Перед тем, как перейти к выводу заключительной глобальной оценки для $\partial_x W$, докажем здесь важное для всей теории тождество:

$$v(s, t, x) = v(s, s, \eta(s, t, x)) = u(s, \eta(s, t, x)). \quad (39)$$

Дифференцируя $u(s, \eta(s, t, x))$ по s , получим

$$\begin{aligned} \frac{du(s, \eta)}{ds} &= \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{d\eta}{ds} = \frac{\partial u}{\partial t} + v(s, t, x) \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u(s, \eta)}{\partial t} + u(s, \eta) \frac{\partial u(s, \eta)}{\partial x} - (u - V)q(s, \eta) = \\ &= -U(s, \eta, u(s, \eta))u(s, \eta) - (u - v)q(s, \eta). \end{aligned}$$

Вычитая (7) из последнего равенства, будем иметь

$$\frac{d(u - v)}{ds} = -U(s, \eta, u)u + U(s, \eta, v)v - (u - v)q(s, \eta).$$

Перепишав последнее уравнение в виде

$$\frac{d(u - v)}{ds} = -U(s, \eta, u)(u - v) + [U(s, \eta, v) - U(s, \eta, u)]v - (u - v)q(s, \eta),$$

интегрируя его от 0 до s и учитывая, что $u(0, \eta(0, t, x)) = \varphi(\eta(0, t, x)) = v(0, t, x)$, придем к интегральному уравнению относительно $u(s, \eta(s, t, x)) - v(s, t, x)$:

$$u - v = \int_0^s [-U(\tau, \eta, u)(u - v) + (U(\tau, \eta, v) - U(\tau, \eta, u))v - (u - v)q(\tau, \eta)] d\tau.$$

Оценивая правую часть, получим

$$|u - v| = N_1 \int_0^s |u - v| d\tau, \text{ где } N_1 = \text{const.}$$

В силу леммы Гронуолла $u(s, \eta) = v(s, t, x)$.

С учетом (39) уравнение (6) можно записать в виде

$$\frac{d\eta(s, t, x)}{ds} = u(s, \eta(s, t, x)).$$

Дифференцируя его по x , получим

$$\frac{d\partial_x \eta(s, t, x)}{ds} = \frac{\partial u}{\partial x} \partial_x \eta(s, t, x), \text{ следовательно, } \frac{d\partial_x \eta}{ds} = q(s, \eta) \partial_x \eta.$$

Интегрируя последнее уравнение от s до t , с учетом того, что $\partial_x \eta(t, t, x) = 1$, получим

$$\partial_x \eta(s, t, x) = e^{\int_s^t q(\tau, \eta) d\tau}.$$

$$\text{Откуда } |\partial_x \eta(s, t, x)| \leq N_\eta, \quad \text{где } N_\eta := e^{N_w T}. \quad (40)$$

Теперь мы можем оценить

$$\partial_x v(s, t, x) = \partial_x [u(s, \eta(s, t, x))] = \partial_x u(s, \eta) \partial_x \eta = q(s, \eta) \partial_x \eta, \text{ следовательно,} \\ |\partial_x v(s, t, x)| \leq N_w N_\eta. \quad (41)$$

Перейдем к выводу глобальной оценки для $\partial_x w(s, t, x)$. Продифференцируем уравнение (8) и начальное условие (11) по x . В пределах этого вывода для сокращения записей будем обозначать производную по x от функций v, η, w нижним индексом. Также через $A_1(s, x, y)$ обозначим производную функции $A(s, x, y)$ по x , а через $A_2(s, x, y)$ - производную функции $A(s, x, y)$ по y . Для вторых производных от функции $U(s, x, y)$ введем соответствующие обозначения:

$$U_{12}(s, x, y) := \partial_x \partial_y U(s, x, y), U_{11}(s, x, y) := \partial_x^2 U(s, x, y), U_{22}(s, x, y) := \partial_y^2 U(s, x, y).$$

Таким образом, $A_1(s, x, y) = U_1(s, x, y) + U_{12}(s, x, y)y$,

$$A_2(s, x, y) = U_2(s, x, y) + U_{22}(s, x, y)y.$$

Также обозначим

$$C_U := \sup_{R(TK)} |U(t, x, y)|, C_U^{(i)} := \sup_{R(TK)} |U_i(t, x, y)|, C_U^{(ij)} := \sup_{R(TK)} |U_{ij}(t, x, y)|, i = 1, 2, j = 1, 2$$

С этими обозначениями

$$|A_1(s, \eta, v)| \leq |U_1| + |U_{12}| \cdot |v| \leq C_U^{(1)} + C_U^{(12)} N_\phi,$$

$$|A_2(s, \eta, v)| \leq 2|U_2| + |U_{22}| \cdot |v| \leq 2C_U^{(2)} + C_U^{(22)} N_\phi.$$

В результате дифференцирования задачи (8), (11) получим дифференциальное уравнение

$$\frac{dw_x}{ds} = -2ww_x - A(s, \eta, v)w_x - A_1(s, \eta, v)w\eta_x - A_2(s, \eta, v)v_x w - \\ - U_{11}(s, \eta, v)v\eta_x - U_{12}(s, \eta, v)vv_x - U_1(s, \eta, v)v_x \quad (42)$$

с начальным условием

$$w_x(0, t, x) = \phi''(\eta(0, t, x))\eta_x(0, t, x). \quad (43)$$

Обозначим

$$F := A_1(s, \eta, v)w\eta_x + A_2(s, \eta, v)v_x w + U_{11}(s, \eta, v)v\eta_x + U_{12}(s, \eta, v)vv_x - U_1(s, \eta, v)v_x,$$

$$P := 2w + A(s, \eta, v).$$

Для всех входящих в F и P функций уже получены глобальные оценки. Так что

$$|F| \leq N_F, |P| \leq N_P, \text{ где}$$

$$N_F := (C_U^{(1)} + C_U^{(12)} N_\phi) N_w N_\eta + (2C_U^{(2)} + C_U^{(22)} N_\phi) (N_w)^2 N_\eta + C_U^{(11)} N_\phi N_\eta + \\ + C_U^{(12)} N_\phi N_w N_\eta + C_U^{(1)} N_w N_\eta, N_P := 2N_w + C_U + C_U^{(2)} N_\phi.$$

Из задачи Коши (42), (43) для w_x следует явное выражение

$$w_x(s, t, x) = \varphi''(\eta(0, t, x)) \eta_x(0, t, x) e^{-\int_0^s P d\tau} - \int_0^s e^{-\int_0^\sigma P d\tau} F d\sigma,$$

которое дает возможность записать глобальную оценку для $w_x(s, t, x) = \partial_x w(s, t, x)$:

$$|\partial_x w(s, t, x)| \leq N_w^{(1)}, \quad (44)$$

где $N_w^{(1)} = N_\varphi N_\eta e^{N_P T} + T N_F e^{N_P T}$.

Оценка (44) справедлива при всех $s \in [0, t]$, поэтому она остается справедливой и для

$$\partial_x q(t, x) = \partial_x w(t, t, x) : |\partial_x q(t, x)| \leq N_w^{(1)}.$$

А так как $q(t, x) = \partial_x u(t, x)$, то тем самым получена оценка для $\partial_x^2 u(t, x)$:

$$|\partial_x^2 u(t, x)| \leq N_w^{(1)}.$$

Полученные глобальные оценки для $u, \partial_x u = q, \partial_{xx} u = \partial_x q$ дают возможность продолжить решение на весь заданный интервал $[0, T]$.

Беря в качестве начального значения $u(T_0, x)$, продлим решение на некоторый интервал $[T_0, T_1]$, а затем беря в качестве начального значения $u(T_1, x)$, продлим решение на промежуток $[T_1, T_2]$. Длина промежутка разрешимости не будет уменьшаться, так как она определяется глобальными оценками, справедливыми на любом промежутке разрешимости.

В частности, начальные значения

$$u(T_k, x) \in \bar{C}^2(R^1), |u(T_k, x)| \leq N_\varphi, |\partial_x u(T_k, x)| \leq N_w, |\partial_x^2 u(T_k, x)| \leq N_w^{(1)}$$

для всех $k = 0, 1, \dots, n, x \in R^1$.

В результате решение за конечное число шагов может быть продлено на весь заданный промежуток $[0, T]$.

Общий итог исследования представим в виде следующей теоремы.

ТЕОРЕМА 2

Пусть $\varphi \in \bar{C}^2(R^1), U \in \bar{C}^{1,2,2}(R(TN_\varphi))$ и выполнены условия (14), (16), (18), (35), тогда задача

Коши (2)-(3) имеет единственное решение $u \in \bar{C}^{1,2}([0, T] \times R^1)$.

Библиографический список

1. **Chen, G.-Q.** The Cauchy problem for the Euler equations for compressible fluids / G.-Q. Chen, D. Wang // Handbook of mathematical fluid dynamics. – North-Holland, Amsterdam, I (2002). – P. 421-543.
2. **Седов, Л. И.** Механика сплошной среды / Л. И. Седов. – М.: Наука, 1973. Т. 2. – 584 с.
3. **Лойцянский, Л. Г.** Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1987. – 840 с.
4. **Рождественский, Б.Л.** Системы квазилинейных уравнений и их приложения к газовой динамике / Б.Л. Рождественский, Н.Н. Яненко. – М.: Наука, 1968. – 592 с.
5. **Иманалиев, М.И.** К теории нелинейных интегро-дифференциальных уравнений в частных производных типа Уизема / М.И. Иманалиев, С.Н. Алексеенко // Докл. АН. 1992. Т.323. №3. С. 410-414.
6. **Иманалиев, М.И.** К теории систем нелинейных интегро-дифференциальных уравнений в частных производных типа Уизема / М.И. Иманалиев, С.Н. Алексеенко // Докл. АН. 1992. Т.325. №6. С. 1111-1115.
7. **Иманалиев, М.И.** К теории нелинейных уравнений с дифференциальным оператором типа полной производной по времени / М.И. Иманалиев, С.Н. Алексеенко // Докл. АН. 1993. Т.329. №5. С. 543-546.

8. **Иманалиев, М.И.** К вопросу существования гладкого ограниченного решения для системы двух нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка / М.И. Иманалиев, С.Н. Алексеенко // Докл. РАН. 2001. Т.379. №1. С. 16-21.
9. **Иманалиев, М.И.** Метод дополнительного аргумента / М.И. Иманалиев, П.С. Панков, –С.Н. Алексеенко // Вестник Казахского Нац. Университета. Серия матем., механика, информ. Специальный выпуск. 2006. № 1. Алматы. С. 60-64.
10. **Алексеенко, С.Н.** Применение метода дополнительного аргумента к исследованию глобальной разрешимости и выявлению иных свойств решений квазилинейных дифференциальных уравнений первого порядка // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. 2005. Т. 5. № 7. С. 5–11.

*Дата поступления
в редакцию 04/04/2011*

S.N. Alekseenko, E.A. Elkina

**APPLYING THE METHOD OF AN ADDITIONAL ARGUMENT TO AN
INVESTIGATION OF A NONLOCAL SOLVABILITY OF THE CAUCHY PROBLEM
FOR FIRST ORDER EQUATIONS WITH DIFFERENTIAL OPERATOR OF TOTAL
DERIVATIVE WITH RESPECT TO TIME TYPE**

Conditions of a solvability of a Cauchy problem on the given finite interval $[0, T]$ of a variation of the argument t which in physical problems usually denotes time is obtained for an equation with differential operator of the total derivative with respect to time type. The proof of the nonlocal solvability relies on global estimates obtained with usage of the majorizing equations.

Key words: method of an additional argument, Cauchy problem, global estimates.

УДК 621

Г.В. Кондратьев

КОНКРЕТНАЯ ДВОЙСТВЕННОСТЬ ВЫСШЕГО ПОРЯДКА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Все известные конкретные двойственности (Понтрягина, Стоуна, Гельфанда-Наймарка и другие) являются, так называемыми, естественными двойственностями первого порядка. В статье изучается структура конкретной двойственности, дается критерий ее существования для строгих бесконечномерных категорий, приводятся новые примеры.

Ключевые слова: конкретная двойственность, бесконечномерные категории.

Введение

В настоящее время усилия многих математиков направлены на создание теории *слабых* категорий высшего порядка [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]. Под слабыми понимаются категории со слабой ассоциативностью, которую очень нелегко выразить. Математики верят, что такая теория позволит объяснить многие эффекты от топологии до квантовой физики, вычислить гомотопические группы сфер, доказать некоторые гипотезы (например, гипотезу Гротендика, что категория топологических пространств, рассматриваемая со всеми гомотопиями, эквивалентна категории бесконечномерных группоидов). В отличие от *слабых строгих* категории просты с принципиальной точки зрения и уже давно заслуживают быть рабочим аппаратом в разных разделах математики. Например, **2-CAT**, **2-Top**, **2-Group**, **2-LieGroup** являются строгими **2**-категориями.

Не имея возможности изложить в статье основные факты теории (строгих) бесконечномерных категорий (представимость, лемма Йонеды, пределы-копределы, сопряженность), автор рекомендует для чтения [9, 10] или просто принять на веру, что бесконечномерные категории такие же по существу, как одномерные, с небольшими уточнениями.

Двойственность часто связывает противоположные разделы математики, такие как алгебра и геометрия. Будучи эквивалентностью первого порядка, она позволяет переносить внутренние понятия и инварианты из одной категории в другую. Будучи эквивалентностью высшего порядка, она также позволяет переносить внутренне сформулированные инварианты высшего порядка (такие как теории гомотопий, не зависящие от выбора специфических объектов, как сфера или симплекс, **K**-теория и другие) из одной категории в другую.

Категорный анализ конкретной двойственности первого порядка был дан Порстом и Толеном в [11]. Реальным примером конкретной двойственности высшего порядка, который приводится в статье, является **2**-двойственность Гельфанда-Наймарка, справедливость которой была установлена автором в [9, 10].

$\{0, 1, 2, \dots\}$ -клетки обозначаются в тексте латинскими буквами с соответствующими верхними индексами. Через ∞ - **CAT**, **L**, **L'**, **B** обозначаются соответственно *строгая* бесконечномерная категория всех малых *строгих* бесконечномерных категорий, две произвольные бесконечномерные категории и фиксированная базовая категория. $f^m \circ_n g^m$ обозначает композицию **m**-клеток, $m \geq n$, таких что $d^n f^m = c^n g^m$, где d^n и c^n операции взятия начала и конца клетки, повторенные **n** раз. μ обозначает горизонтальную композицию (которая может соответствовать разным \circ_n в зависимости от размерности клеток), e операцию взятия единичной клетки.

Конкретная двойственность

Двойственность – это просто эквивалентность категорий $L^{\text{op}} \sim L'$.

Определение 1. *Конкретной двойственностью над категорией $\mathbb{T} \hookrightarrow \infty$*

$$L^{op} \begin{matrix} \xrightarrow{G} \\ \sim \\ \xleftarrow{F} \end{matrix} L'$$

CAT называется двойственностью, такая, что существуют (инъективные) забывающие функторы $U : L \rightarrow \mathbb{B}$, $V : L' \rightarrow \mathbb{B}$ и объекты $\tilde{A} \in L^0$, $\tilde{B} \in L'^0$, для которых

$$U(\tilde{A}) \sim V(\tilde{B}),$$

$$\begin{array}{ccc} L^{op} & \xrightarrow{G} & L' \\ & \searrow L(-, \tilde{A}) & \downarrow V \\ & & \mathbb{B} \end{array} \quad \begin{array}{ccc} L'^{op} & \xrightarrow{F^{op}} & L \\ & \searrow L'(-, \tilde{B}) & \downarrow U \\ & & \mathbb{B} \end{array}$$

$$V \circ_1 G \sim L(-, \tilde{A}), U \circ_1 F^{op} \sim L'(-, \tilde{B})$$

Представляющие объекты $\tilde{A} \in L^0$, $\tilde{B} \in L'^0$ называются **дуализирующими** объектами для данной конкретной двойственности [11]. Конкретная двойственная сопряженность определяется аналогично с той разницей, что функторы F и G необязательно эквивалентны.

Замечание. В определении 1 введен *слабый* вариант двойственности, где $X \sim Y$ означает, что существуют клетки $f : X \rightarrow Y$ и $g : Y \rightarrow X$, такие что $eX \sim g \circ_1 f$, $eY \sim f \circ_1 g$ (то есть существуют f , g и две подходящие бесконечные последовательности клеток, принадлежащих $Hom(X, X)$ и $Hom(Y, Y)$).

Так же как в одномерном случае, двойственность получается из двойственной сопряженности ограничением на подкатегории, для объектов которых единица и коединица эквивалентны.

Утверждение 1 (представимые забывающие функторы \Rightarrow конкретную двойственную сопряженность) Пусть (L, U) , (L', V) слабо двойственно сопряженные ∞ -

категории $L^{op} \begin{matrix} \xrightarrow{G} \\ \top \\ \xleftarrow{F} \end{matrix} L'$ с представимыми забывающими функторами $U \sim L(A_0, -) : L \rightarrow \mathbb{B}$, $V \sim L'(B_0, -) : L' \rightarrow \mathbb{B}$ (где $\mathbb{B} \hookrightarrow \infty$ -CAT -- некоторая подкатегория). Тогда эта двойственность конкретна над \mathbb{B} с дуализирующим объектом (\tilde{A}, \tilde{B}) , где $\tilde{A} := F(B_0)$, $\tilde{B} := G(A_0)$, то есть

$$U(\tilde{A}) \sim V(\tilde{B})$$

$$\begin{array}{ccc} L^{op} & \xrightarrow{G} & L' \\ & \searrow L(-, \tilde{A}) & \downarrow V \\ & & \mathbb{B} \end{array} \quad \begin{array}{ccc} L'^{op} & \xrightarrow{F^{op}} & L \\ & \searrow L'(-, \tilde{B}) & \downarrow U \\ & & \mathbb{B} \end{array}$$

$$V \circ_1 G \sim L(-, \tilde{A}), U \circ_1 F^{op} \sim L'(-, \tilde{B})$$

Доказательство:

$$U(\tilde{A}) = UF(B_0) \sim L(A_0, FB_0) \sim L'(B_0, GA_0) \sim VGA_0 = V\tilde{B}$$

$$VG(-) \sim L'(B_0, G(-)) \sim L(-, FB_0) = L(-, \tilde{A})$$

(аналогично $UF(-) \sim L'(-, \tilde{B})$) \square

Замечания

- Конкретная двойственная сопряженность задается двумя Hom -функторами, которые допускают подъем вдоль забывающих функторов (чтобы принять значения в нужной категории). Представляющие объекты этих функторов имеют эквивалентные (или изоморфные) несущие объекты в базовой категории \mathbb{B} .

- Для обычных одномерных категорий $\mathbb{B} = \mathbf{Set} \hookrightarrow \infty\text{-}\mathbf{CAT}$ (∞ -1-подкатегория). Для размерности n , как правило, $\mathbb{B} = n\text{-}\mathbf{Cat} \hookrightarrow \infty\text{-}\mathbf{CAT}$ (∞ - n -подкатегория малых $(n-1)$ -категорий).

Определение 2. Для \mathbf{Hom} -множества $L(A, \tilde{A})$ и элемента $(x : A_0 \rightarrow A) \in L^0(A_0, A)$ функтор взятия значения в точке x есть $ev_{A,x} := L(x, \tilde{A}) : L(A, \tilde{A}) \rightarrow L(A_0, \tilde{A})$ ($ev_{A,x} \in \mathbb{B}^1 \hookrightarrow \infty\text{-}\mathbf{CAT}^1$).

Аналогично, $(n-1)$ -модификация взятия значения ev_{A,x^n} , $n = 1, 2, \dots$, для $x^n \in L^n(A_0, A)$ есть $L(x^n, \tilde{A}) \in \mathbb{B}^n(L(A, \tilde{A}), L(A_0, \tilde{A}))$.

Определение 3.

- Для забывающего функтора $V : L' \rightarrow \mathbb{B}$ клетка $f^n : V(Y) \rightarrow V(Y') \in \mathbb{B}^n(V(Y), V(Y'))$ называется L' -клеткой, если $\exists \Phi^n : Y \rightarrow Y' \in L'^n(Y, Y')$, такая что $V(\Phi^n) = f^n$.
- Поднятие \mathbf{Hom} -функтора $V \circ G \sim L(-, \tilde{A})$ называется начальным [12], если $\forall A \in L^0 \forall Y \in L'^0 \forall f^n : V(Y) \rightarrow L(A, \tilde{A}) \in \mathbb{B}^n(V(Y), L(A, \tilde{A}))$ f^n является L' -клеткой если и только если $\forall (x^n : A_0 \rightarrow A) \in L^n(A_0, A)$ $ev_{A,x^n} \circ_{n+1} f^n : V(Y) \rightarrow L(A_0, \tilde{A}) \in \mathbb{B}^n(V(Y), L(A_0, \tilde{A}))$ является L' -клеткой.
- Если поднятия обоих \mathbf{Hom} -функторов $V \circ G \sim L(-, \tilde{A})$, $U \circ F \sim L'(-, \tilde{B})$ -- начальные, тогда конкретная двой-

$$L^{op} \begin{array}{c} \xrightarrow{G} \\ \top \\ \xleftarrow{F} \end{array} L'$$

венная сопряженность, если она существует, называется естественной [11].

Даже если $U\tilde{A} \sim V\tilde{B}$ и $\forall A \in L^0, B \in L'^0$ \mathbb{B} -объекты $L(A, \tilde{A}), L'(B, \tilde{B})$ поднимаются в L', L , \mathbf{Hom} -функторы $L(-, \tilde{A}), L'(-, \tilde{B})$ необязательно имеют поднятие (для этого поднятия функций $A \mapsto L(A, \tilde{A}), B \mapsto L'(B, \tilde{B})$ должны быть продолжаемы функториально над всеми клетками). Мы вводим следующую концепцию.

Определение 4. Условие начального поднятия для конусов взятия значений

$$\{ev_{A,x^n} \in \mathbb{B}^n(L(A, \tilde{A}), L(A_0, \tilde{A}))\}_{x^n \in L^n(A_0, A)}^{n \in \mathbb{N}},$$

$$\{ev_{B,y^n} \in \mathbb{B}^n(L'(B, \tilde{B}), L'(B_0, \tilde{B}))\}_{y^n \in L'^n(B_0, B)}^{n \in \mathbb{N}}$$

состоит из следующих требований

- \mathbf{Hom} -категории вида $L(A, \tilde{A}), L'(B, \tilde{B}) \in \mathbf{Ob}(\mathbb{B})$ поднимаются соответственно в L', L ,
- Конусы взятия значений $\{ev_{A,x^n} \in \mathbb{B}^n(L(A, \tilde{A}), L(A_0, \tilde{A}))\}_{x^n \in L^n(A_0, A)}^{n \in \mathbb{N}},$
 $\{ev_{B,y^n} \in \mathbb{B}^n(L'(B, \tilde{B}), L'(B_0, \tilde{B}))\}_{y^n \in L'^n(B_0, B)}^{n \in \mathbb{N}}$
 поднимаются соответственно в $\{ev_{A,x^n} \in L'^n(G(A), \tilde{B})\}_{x^n \in L^n(A_0, A)}^{n \in \mathbb{N}},$
 $\{ev_{B,y^n} \in L^n(F(B), \tilde{A})\}_{y^n \in L'^n(B_0, B)}^{n \in \mathbb{N}}$ в L', L ,

- $\forall f^n \in \mathbb{B}^n(VX, L(A, \tilde{A}))$ f^n есть L' -клетка если только
 $\forall x^n \in L^n(A_0, A)$ $\mu(ev_{A, x^n}, f^n) \in \mathbb{B}^n(VX, L(A_0, \tilde{A}))$ есть L' -клетка (симметрично
 $\forall g^n \in \mathbb{B}^n(UY, L'(B, \tilde{B}))$ g^n есть L -клетка если только
 $\forall y^n \in L'^n(B_0, B)$ $\mu(ev_{B, y^n}, g^n) \in \mathbb{B}^n(UY, L'(B_0, \tilde{B}))$ есть L -клетка).

Следующая теорема показывает, что при выполнении условия начального поднятия для конусов взятия значений существует начальное поднятие *Hom*-функторов. Эта теорема, сформулированная для категорий первого порядка Порстом и Толеном [11], является критерием существования строгой конкретной естественно й двойственной сопряженности. В доказательстве поднятые отображения взятия значений обозначаются $ev_{A, x}$ (или как-нибудь похоже), а базовые отображения в \mathbb{B} с 'модулем' $|ev_{A, x}|$.

Утверждение 2. Если две строгие ∞ -категории L, L' конкретные над $\mathbb{B} \hookrightarrow \infty$ - **САТ** с представимыми (строго инъективными) забывающими функторами $U = L(A_0, -)$, $V = L'(B_0, -)$ имеют объекты $\tilde{A} \in L^0$, $\tilde{B} \in L'^0$, такие что

- $U\tilde{A} \sim V\tilde{B}$,
- *Hom*-функторы $L(-, \tilde{A}) : L^{op} \rightarrow \mathbb{B}$, $L'(-, \tilde{B}) : L'^{op} \rightarrow \mathbb{B}$ удовлетворяют условию начального поднятия для конусов взятия значений

тогда существует естественная **строгая** конкретная двойственная сопряженность

$$\begin{array}{ccc}
 L^{op} & \xrightleftharpoons[F]{G} & L' \\
 L(A, FB) & \xrightarrow[\text{nat. iso}]{\simeq} & L'(B, GA)
 \end{array}$$

$$\begin{array}{ccc}
 L^{op} & \xrightarrow{G} & L' \\
 \searrow L(-, \tilde{A}) & & \downarrow V \\
 & & \mathbb{B}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{ccc}
 L'^{op} & \xrightarrow{F^{op}} & L \\
 \searrow L'(-, \tilde{B}) & & \downarrow U \\
 & & \mathbb{B}
 \end{array}$$

с дуализирующим объектом (\tilde{A}, \tilde{B}) .

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО

- $L(A, \tilde{A})$, $L'(B, \tilde{B})$ поднимаются в L', L по условию.
- Пусть $f^n \in L^n(A, A')$, тогда $L(f^n, \tilde{A}) : L(A', \tilde{A}) \rightarrow L(A, \tilde{A})$ есть L' -клетка так как
 $ev_{A, a^n} \circ_{n+1} L(f^n, \tilde{A}) := L(a^n, \tilde{A}) \circ_{n+1} L(f^n, \tilde{A}) = L(f^n \circ_{n+1} a^n, \tilde{A}) =: ev_{A', f^n \circ_{n+1} a^n}$,
 которая поднимается $\forall a^n \in L^n(A_0, \tilde{A})$. Следовательно, $L(f^n, \tilde{A})$ есть L' -клетка, и аналогично, $L'(g^n, \tilde{B})$ есть L -клетка, то есть существуют отображе-

$$L^{op} \xrightleftharpoons[F]{G} L'$$

ния, которые очевидно функториальны.

Почему они задают сопряженность?

- (единица и коединица) 1-стрелка (единица) $\eta_B : B \rightarrow GFB$ задается как $|\eta_B| := V\eta_B : |B| \rightarrow |GFB| : b \mapsto [ev_{B, b} : FB \rightarrow \tilde{A}]$, $b \in |B| = L'(B_0, B)$, $|GFB| = L(FB, \tilde{A})$, $|ev_{B, b}| : |FB| \rightarrow |\tilde{A}|$, $|FB| = L'(B, \tilde{B})$, $|\tilde{A}| = L(A_0, \tilde{A}) \sim L'(B_0, \tilde{B})$. Почему $|\eta_B|$ могут быть подняты в L' ? Возьмем композицию с отображениями взятия значе-

ний $|ev_{FB,c}| \circ_1 |\eta_B|(b) = |ev_{FB,c}|(ev_{B,b}) = |ev_{B,b}|(c) = |c|(b)$,

где $c \in |FB|^0 = L'^0(B, \tilde{B}) = L^0(A_0, FB)$, $b \in |B|^n$.

Поэто-

му, $|ev_{FB,c}| \circ_1 |\eta_B| = |c|$ есть L' -клетка. Следовательно, $|\eta_B|$ есть L' -клетка. Коединица дана симметрично

$\varepsilon_A \rightarrow FGA$, $|\varepsilon_A| : |A| \rightarrow |FGA| : a \mapsto [ev_{A,a} : GA \rightarrow \tilde{B}]$,
 $|A| = L(A_0, A)$, $|FGA| = L'(GA, \tilde{B})$, $|ev_{A,a}| : |GA| \rightarrow |\tilde{B}|$, $|GA| = L(A, \tilde{A})$,
 $|\tilde{B}| = L'(B_0, \tilde{B}) \sim L(A_0, \tilde{A})$. По той же причине $|\varepsilon_A|$ есть L -клетка.

- (треугольные тождества) $G\varepsilon_A \circ_1 \eta_{GA} = 1_{GA}$, $F\eta_B \circ_1 \varepsilon_{FB} = 1_{FB}$. Достаточно доказать их для базовых несущих отображений. Поскольку забывающие функторы инъективны, они будут следовать

$$|G\varepsilon_A| \circ_1 |\eta_{GA}| \stackrel{?}{=} |1_{GA}|,$$

где $|\eta_{GA}| : |GA| \rightarrow |GFGA|$, $|GA| = L(A, \tilde{A})$, $|GFGA| = L(FGA, \tilde{A})$,

$\varepsilon_A : A \rightarrow FGA$, $|G\varepsilon_A| : |GFGA| \rightarrow |GA|$.

Возьмем $(f^n : A \rightarrow \tilde{A}) \in |GA| = L^n(A, \tilde{A})$, $a^m \in |A| = L^m(A_0, A)$. Два случая возможны:

$$\begin{cases} (a) (f^n, n > 0) \ \& \ (a^0) : |G\varepsilon_A| \circ_1 |\eta_{GA}|(f^n)(a^0) = |L(\varepsilon_A, \tilde{A})|(ev_{GA,f^n})(a^0) \\ (b) (f^0) \ \& \ (a^n, n \geq 0) : |G\varepsilon_A| \circ_1 |\eta_{GA}|(f^0)(a^n) = |L(\varepsilon_A, \tilde{A})|(ev_{GA,f^0})(a^n) \\ (a) = |ev_{GA,f^n} \circ_{n+1} e^n \varepsilon_A|(a^0) = |ev_{GA,f^n}| \circ_{n+1} e^n |\varepsilon_A|(a^0) = |ev_{GA,f^n}|(ev_{A,e^n a^0}) \\ (b) = |ev_{GA,f^0} \circ_1 \varepsilon_A|(a^n) = |ev_{GA,f^0}| \circ_1 |\varepsilon_A|(a^n) = |ev_{GA,f^0}|(ev_{A,a^n}) \\ (a) = |ev_{A,e^n a^0}|(f^n) = |f^n|(a^0) =: \mu_{A_0,A,\tilde{A}}^L(f^n, e^n a^0) = |1_{GA}|(f^n)(a^0) \\ (b) = |ev_{A,a^n}|(f^0) = |f^0|(a^n) =: \mu_{A_0,A,\tilde{A}}^L(e^n f^0, a^n) = |1_{GA}|(f^0)(a^n) \end{cases}$$

Второе треугольное тождество выполняется аналогично.

- (естественность η_B, ε_A) Опять достаточно доказать естественность для проекций

$$\begin{array}{ccc} |B| & \xrightarrow{|\eta_B|} & |GFB| \\ |f| \downarrow & & \downarrow |GFf| = L(Ff, \tilde{A}) \\ |B'| & \xrightarrow{|\eta_{B'}|} & |GFB'| \end{array}$$

отображений в \mathbb{B}

$$\begin{cases} (a) (b^n \in |B|^n, n \geq 0) \ \& \ (f^0 \in L'^0(B, B')) \\ (b) (b^0 \in |B|^0) \ \& \ (f^n \in L'^n(B, B')) \end{cases}$$

Возможные случаи:

$$\begin{array}{ccc} & b^n & \xrightarrow{\quad} ev_{B,b^n} \\ & \downarrow & \downarrow \\ & & ev_{B,b^n} \circ_{n+1} e^n (Ff^0) \\ & & \parallel = \\ & & \downarrow \\ (a) \quad & |B| \xrightarrow{|\eta_B|} |GFB| & \downarrow |GFf^0| = L(Ff^0, \tilde{A}) \\ & |f^0| \downarrow & \\ & |B'| \xrightarrow{|\eta_{B'}|} |GFB'| & \downarrow |f^0| \downarrow \\ & & |f^0|(b^n) \xrightarrow{\quad} ev_{B',|f^0|(b^n)} \end{array}$$

$$\begin{array}{ccc}
 & b^0 & \xrightarrow{\quad} ev_{B, e^n b^0} \\
 & \downarrow & \downarrow \\
 |B| & \xrightarrow{e^n |\eta_B|} |GFB| & \\
 \downarrow |f^n| & \downarrow |GFf^n| = L(Ff^n, \tilde{A}) & \\
 (b) \quad |B'| & \xrightarrow{e^n |\eta_{B'}|} |GFB'| & \\
 & \downarrow |f^n|(b^0) & \downarrow \\
 & & ev_{B', |f^n|(b^0)}
 \end{array}$$

$ev_{B, e^n b^0} \circ_{n+1} (Ff^n) \parallel = ev_{B', |f^n|(b^0)}$

(напомним, $|f^n|(b^0) \equiv \mu(f^n, e^n b^0)$, $|f^0|(b^n) \equiv \mu(e^n f^0, b^n)$)

Почему $\begin{cases} (a) \quad ev_{B, b^n} \circ_{n+1} e^n(Ff^0) = ev_{B', |f^0|(b^n)} \\ (b) \quad ev_{B, e^n b^0} \circ_{n+1} (Ff^n) = ev_{B', |f^n|(b^0)}? \end{cases}$

Берем проекции отображений:

$$\begin{cases} (a) \quad |ev_{B, b^n}| \circ_{n+1} e^n |Ff^0|(h^n) = |ev_{B, b^n}|(h^n \circ_{n+1} e^n f^0) = \\ (b) \quad |ev_{B, e^n b^0}| \circ_{n+1} |Ff^n|(h^0) = |ev_{B, e^n b^0}|(e^n h^0 \circ_{n+1} f^n) = \end{cases}$$

$$\begin{cases} (a) = |h^n \circ_{n+1} e^n f^0|(b^n) = |h^n| \circ_{n+1} |e^n f^0|(b^n) = |ev_{B', |f^0|(b^n)}|(h^n) \\ (b) = |e^n h^0 \circ_{n+1} f^n|(e^n b^0) = e^n |h^0| \circ_{n+1} |f^n|(e^n b^0) = |ev_{B', |f^n|(b^0)}|(h^0), \end{cases}$$

где $h^n \in L^n(B', \tilde{B})$, $h^0 \in L^0(B', \tilde{B})$

(типы клеток следующие: $Ff : FB' \rightarrow FB$,
 $ev_{B, b} : FB \rightarrow A$ (L -клет-ка), $ev_{B', |f|(b)} : FB' \rightarrow A$ (L -клетка),

$|ev_{B, b}| : L'(B, \tilde{B}) \rightarrow |\tilde{B}| = L'(B_0, \tilde{B})$,

$|ev_{B', |f|(b)}| : L'(B', \tilde{B}) \rightarrow |\tilde{B}| = L'(B_0, \tilde{B})$,

$|Ff| : L'(B', \tilde{B}) \rightarrow L'(B, \tilde{B})$, $|Ff| = L'(f, \tilde{B})$). Следовательно,

η_B - естественна. Аналогично, ε_A - естественна.

- (функторные изоморфизмы
$$\begin{array}{ccc}
 L(A, FB) & \xrightarrow{\theta_{A, B}} & L'(B, GA) \\
 & \xleftarrow{\theta_{A, B}^*} &
 \end{array}$$
)
- Определим $\begin{cases} \theta_{A, B}(f^n) := G(f^n) \circ_{n+1} e^n(\eta_B), \quad f^n \in L^n(A, FB) \\ \theta_{A, B}^*(g^n) := F(g^n) \circ_{n+1} e^n(\varepsilon_A), \quad g^n \in L'^n(B, GA) \end{cases}$

Пусть $g^n \in L'^n(B, GA)$,

$$\begin{aligned}
 \text{тогда} \quad \theta_{A, B}(\theta_{A, B}^*(g^n)) &:= G(Fg^n \circ_{n+1} e^n(\varepsilon_A)) \circ_{n+1} e^n(\eta_B) = \\
 &= e^n(G\varepsilon_A) \circ_{n+1} GFg^n \circ_{n+1} e^n(\eta_B) = e^n(G\varepsilon_A) \circ_{n+1} e^n(\eta_{GA}) \circ_{n+1} g^n = \\
 &= e^n(1_{GA}) \circ_{n+1} g^n = e^{n+1}(GA) \circ_{n+1} g^n = g^n.
 \end{aligned}$$

Аналогично,

$\theta_{A, B}^*(\theta_{A, B}(f^n)) = f^n$, $f^n \in L^n(A, FB)$. $\theta_{A, B}$, $\theta_{A, B}^*$ очевидно функторы и, следовательно, функторные изоморфизмы.

- (естественность $\theta_{A, B}$, $\theta_{A, B}^*$) Докажем, что диаграмма

$$\begin{array}{ccccc}
 A & B & L(A, FB) & \xrightarrow{e^n \theta_{A, B}} & L'(B, GA) \\
 \uparrow x^n & \uparrow y^n & \downarrow L(x^n, Fy^n) & & \downarrow L'(y^n, Gx^n) \\
 A' & B' & L(A', FB') & \xrightarrow{e^n \theta_{A', B'}} & L'(B', GA') \\
 & & & & \downarrow \\
 & & & & L'(y^n, Gx^n) \circ_{n+1} e^n \theta_{A, B} \stackrel{?}{=} e^n \theta_{A', B'} \circ_{n+1} L(x^n, Fy^n)
 \end{array}$$

коммутативна.

Два случая:

$$\begin{cases} (a) \quad (f^0 \in L(A, FB)) \ \& \ (x^n, y^n, n > 0) \\ (b) \quad (f^n \in L(A, FB), n \geq 0) \ \& \ (x^0, y^0) \end{cases}$$
$$\begin{array}{ccc} f^0 & \xrightarrow{\hspace{8cm}} & e^n G(f^0) \circ_{n+1} e^n(\eta_B) \\ \downarrow & & \downarrow \\ & & Gx^n \circ_{n+1} (e^n G(f^0) \circ_{n+1} e^n(\eta_B)) \circ_{n+1} y^n \\ & & = || ? \\ Fy^n \circ_{n+1} e^n f^0 \circ_{n+1} x^n & \longrightarrow & G(Fy^n \circ_{n+1} e^n f^0 \circ_{n+1} x^n) \circ_{n+1} e^n(\eta_{B'}) \\ & & = || \\ & & Gx^n \circ_{n+1} e^n Gf^0 \circ_{n+1} GFy^n \circ_{n+1} e^n(\eta_{B'}) \end{array} \quad \begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \text{=} (\eta_B \text{ н.т.}) \end{array}$$

(a)

$$(a)$$

$$\begin{array}{ccc}
 f^n & \xrightarrow{\quad} & G(f^n) \circ_{n+1} e^n(\eta_B) \\
 \downarrow & & \downarrow \\
 & & e^n Gx^0 \circ_{n+1} (G(f^n) \circ_{n+1} e^n(\eta_B)) \circ_{n+1} e^n y^0 \\
 & & \quad \quad \quad \downarrow \quad \quad \quad \downarrow \\
 & & \quad \quad \quad = \parallel \quad ? \\
 e^n Fy^0 \circ_{n+1} f^n \circ_{n+1} e^n x^0 & \xrightarrow{\quad} & G(e^n Fy^0 \circ_{n+1} f^n \circ_{n+1} e^n x^0) \circ_{n+1} e^n(\eta_{B'}) \\
 & & \quad \quad \quad \downarrow \quad \quad \quad \downarrow \\
 & & \quad \quad \quad = \parallel \quad \quad \quad \downarrow \\
 & & e^n Gx^0 \circ_{n+1} Gf^n \circ_{n+1} e^n GFy^0 \circ_{n+1} e^n(\eta_{B'})
 \end{array}
 \quad \begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array}
 \begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \\ \text{(\eta_B \texttt{nat.})} \\ \\ \\ \end{array}$$

(b)

Следовательно, \mathcal{L} и \mathcal{L}' -конкретно двойственно сопряженные категории. Это соответствие естественное (по построению) и строгое ($\theta_{A,B}$ и $\theta_{A,B}^*$ -изоморфизмы). \square

Следствие. Конкретная естественная двойственность есть **строгая** сопряженность. \square

Примеры конкретной двойственности

Двойственность обычно определяет рабочее пространство для разных алгебро-геометрических теорий. Существует много разных двойственностей, которые зачастую не выделяются явно. Классические двойственности обсуждаются, например, в работах [11, 12, 13, 14].

Хорошо известные двойственности

Все двойственности, приведенные далее, первого порядка, естественные [11] и получены путем ограничения подходящих двойственных сопряженностей.

$$\text{Vec}_k^{op} \begin{array}{c} \xrightarrow{\text{Vec}_k(-,k)} \\ \perp \\ \xleftarrow{\text{Vec}_k(-,k)} \end{array} \text{Vec}_k$$

- \mathbf{Vec}_k двойственно сопряжена самой себе $\mathbf{Vec}_k(-, k)$, где \mathbf{Vec}_k категория векторных пространств над полем k . Двойственность получается ограничением на конечномерные пространства.
- $\mathbf{Set}^{op} \sim \mathbf{Complete Atomic Boolean Algebras}$ (категория множеств двойственно эквивалентна категории полных атомарных булевых алгебр).
- $\mathbf{Bool}^{op} \sim \mathbf{Boolean Spaces}$ (двойственность Стоуна), где \mathbf{Bool} категория булевых колец (каждый элемент -- идемпотент). Она получается из двойственной сопряженно-

$$\begin{array}{ccc} & \text{CRing}(-, 2) & \\ & \xrightarrow{\quad} & \\ \text{CRing} & \xleftrightarrow[\text{Top}(-, 2)]{\perp} & \text{Top} \end{array}$$

сти, где 2 -двухэлементное кольцо и дискретное топологическое пространство. $\text{CRing}(A, 2) \hookrightarrow 2^A$ (подпространство в топологии Тихонова).

- $\text{Hom}(-, \mathbb{R}/\mathbb{Z}) : \text{CompAb}^{\text{op}} \sim \text{Ab}$ (двойственность Понтрягина), где CompAb , Ab -- категории компактных абелевых групп и абелевых групп соответственно.
- $\text{Hom}(-, \mathbb{C}) : \text{C*Alg}^{\text{op}} \sim \text{CHTop}$ (двойственность Гельфанда-Наймарка), где C*Alg , CHTop категории коммутативных \mathbb{C}^* -алгебр и компактных хаусдорфовых пространств. $\text{C*Alg}(A, \mathbb{C}) \hookrightarrow \mathbb{C}^A$ (подпространство в топологии Тихонова).

Новые примеры

Как только механизм получения новых двойственностей известен, можно пытаться получить новые примеры. Однако, если часто двойственную сопряженность получить легко, то ассоциированная двойственность может оказаться пустой. В следующих примерах двойственность получена в результате разных процессов. Для двойственности Гельфанда-Наймарка это расширение на новое гомотопическое измерение, для двойственности Виноградова ограничение на подходящие подкатегории, для двойственности Понтрягина-Лукаша, наоборот, расширение на большие одномерные категории, для дифференциальных уравнений это только двойственная сопряженность, требующая дополнительного исследования.

- (2-двойственность Гельфанда-Наймарка)

Утверждение 3. Существует 2-расширение двойственности Гельфанда-Наймарка с 2-клетками, гомотопическими классами гомотопий.

- Эта двойственность конкретна с дуализирующим объектом \mathbb{C} над 2-Cat (2-категорией малых категорий, функторов и натуральных трансформаций), то есть существуют инъективные забывающие функторы

$U : \text{C*Alg} \rightarrow 2\text{-Cat}$ и $V : \text{CHTop} \rightarrow 2\text{-Cat}$ такие

$$\begin{array}{ccc} \text{C*Alg}^{\text{op}} & \xrightarrow{F} & \text{CHTop} \\ & \searrow & \downarrow V \\ \text{C*Alg}(-, \mathbb{C}) & & 2\text{-Cat} \end{array} \quad \begin{array}{ccc} \text{CHTop}^{\text{op}} & \xrightarrow{G^{\text{op}}} & \text{C*Alg} \\ & \searrow & \downarrow U \\ \text{CHTop}(-, \mathbb{C}) & & 2\text{-Cat} \end{array}$$

что 2-Cat и 2-Cat где U и V -- композиции функторов включения и взятия фундаментального группоида ($U : \text{C*Alg} \hookrightarrow 2\text{-Top} \xrightarrow{2\text{-Top}(1, -)} 2\text{-Cat}$ и $V : \text{CHTop} \hookrightarrow 2\text{-Top} \xrightarrow{2\text{-Top}(1, -)} 2\text{-Cat}$).

- Эта двойственность естественна, то есть поднятия Hom -функторов

$\text{C*Alg}(-, \mathbb{C})$, $\text{CHTop}(-, \mathbb{C})$ вдоль V и U являются начальными. \square

Доказательство может быть найдено в [9, 10].

- (двойственность Виноградова)

Пусть K , A , $A\text{-Mod} \hookrightarrow A\text{-Diff} \hookrightarrow K\text{-Mod}$ обозначают соответственно коммутативное кольцо, K -алгебру, и вложение категории A -модулей в категорию дифференциальных операторов и затем в категорию K -модулей (все вложения тождественны на объектах).

$A\text{-Diff}$ обогащается в тензорной категории $(K\text{-Mod}, \otimes_K)$, а также обогащается двумя различными способами в $(A\text{-Mod}, \otimes_K)$, за исключением того что композиция не является A -линейной. Модульное умножение для первого обогащения $A\text{-Diff}$ в $(A\text{-Mod}, \otimes_K)$ задается $A \times A\text{-Diff}(P, Q) \rightarrow A$.

$\text{Diff}(P, Q) : (a, \Delta) \mapsto l_a \circ \Delta$, для второго $A \times A\text{-Diff}(P, Q) \rightarrow A\text{-Diff}(P, Q) : (a, \Delta) \mapsto \Delta \circ l_a$. Обозначим $A\text{-Diff}$ с левым модульным умножением $l_a \circ -$ в Hom -множествах тем же именем $A\text{-Diff}$, а с правым умножением $- \circ l_a$ 'с плюсом' $A\text{-Diff}^+$.

Следующее предложение суммирует основные факты формальной теории линейных дифференциальных операторов А.М. Виноградова [15].

Утверждение 4

- Для всех $P, Q \in \text{Ob}(A\text{-Mod})$ $A\text{-Diff}(P, Q) = \bigcup_{s=0}^{\infty} \text{Diff}_s(P, Q)$, $A\text{-Diff}^+(P, Q) = \bigcup_{s=0}^{\infty} \text{Diff}_s^+(P, Q)$ являются A -модулями, фильтрован-ными подмодулями дифференциальных операторов порядка $\leq s$, $s = 0, 1, \dots$.
- Для любого $P \in \text{Ob}(A\text{-Mod})$ $A\text{-Diff}(P, P)$ является ассоциатив-ной K -алгеброй.
- $\text{Diff}_s(P, -), \text{Diff}_s^+(-, P) : A\text{-Mod} \rightarrow A\text{-Mod}$ являются A -линейными функторами.
- Для каждого $P \in \text{Ob}(A\text{-Mod})$ функтор $\text{Diff}_s^+(-, P)$ представим объек-том $\text{Diff}_s^+(P) := \text{Diff}_s^+(A, P)$, т.е. $\forall Q \in \text{Ob}(A\text{-Mod})$ $A\text{-Mod}(Q, \text{Diff}_s^+(P)) \xrightarrow{\sim} \text{Diff}_s^+(Q, P)$.
- Для каждого $P \in \text{Ob}(A\text{-Mod})$ функтор $\text{Diff}_s(P, -)$ представим объек-том $\text{Jet}^s(P) := A \otimes_K P \text{ mod } \mu^{s+1}$, где μ^{s+1} есть подмодуль $A \otimes_K P$, поро-жденный элементами $\delta^{a_0} \circ \dots \circ \delta^{a_{s+1}}(a \otimes p)$ [$\delta^b(a \otimes p) := ab \otimes p - a \otimes bp$], т.е. $A\text{-Mod}(\text{Jet}^s(P), Q) \xrightarrow{\sim} \text{Diff}_s(P, Q)$ для $Q \in \text{Ob}(A\text{-Mod})$.
- Включение $A\text{-Mod} \hookrightarrow A\text{-Diff}^+$ есть (обогащенный) левый сопряженный с кое-диницей $ev : \text{Diff}^+(P) \rightarrow P : \Delta \mapsto \Delta(1)$, т.е. $\forall \Delta \in \text{Diff}^+(Q, P) \exists ! f_{\Delta} \in A\text{-Mod}(Q, \text{Diff}^+(P))$ такой что

$$\begin{array}{ccc} \text{Diff}^+(P) & \xrightarrow{ev} & P \\ f_{\Delta} \uparrow & \nearrow \Delta & \\ Q & & \end{array}$$

и это соответствие A -линейно, $f_{\Delta} : q \mapsto (a \mapsto \Delta(aq))$.

- Включение $A\text{-Mod} \hookrightarrow A\text{-Diff}$ есть (обогащенный) правый сопряженный с еди-ницей $j^{\infty} : P \rightarrow \text{Jet}^{\infty}(P) : p \mapsto 1 \otimes p \text{ mod } \mu^{\infty}$ [$\mu^{\infty} := \bigcap_{s=0}^{\infty} \mu^s$], т.е. $\forall \Delta \in \text{Diff}(P, Q) \exists ! f^{\Delta} \in A\text{-Mod}(\text{Jet}^{\infty}(P), Q)$ такой что

$$\begin{array}{ccc} P & \xrightarrow{j^{\infty}} & \text{Jet}^{\infty}(P) \\ & \searrow \Delta & \downarrow f^{\Delta} \\ & & Q \end{array}$$

и это соответствие A -линейно, $f^\Delta : (a \otimes p) \bmod \mu^\infty \mapsto a\Delta(p)$.

- Подкатегория $A\text{-Mod}$ рефлексивна и корефлексивна в $A\text{-Diff}$ (обогащенной в $K\text{-Mod}$). \square

Для $s \in \mathbb{N}$ введем две полные подкатегории категории $A\text{-Mod}$: $A\text{-Mod-Diff}_s$, состоящую из всех A -модулей вида $\text{Diff}_s(P, A)$, $P \in \text{Ob}(A\text{-Mod})$, и $A\text{-Mod-Jet}^s$, состоящую из всех A -модулей вида $\text{Jet}^s(P)$, $P \in \text{Ob}(A\text{-Mod})$.

Утверждение 5 (двойственность Виноградова) Для коммутативной алгебры A существует конкретная естественная двойственная сопряженность

$$A\text{-Mod-Diff}_s^{op} \xrightleftharpoons[\perp]{A\text{-Mod}(-, A)} A\text{-Mod-Jet}^s, \text{ полученная путем ограничения из}$$

$$A\text{-Mod}^{op} \xrightleftharpoons[\perp]{A\text{-Mod}(-, A)} A\text{-Mod}.$$

A является ее дуализирующим объектом. \square

Замечания

- Утверждение 5 устанавливает формальный аналог известной двойственности между дифференциальными операторами и струями на некотором фиксированном многообразии X . Геометрические модули сечений векторных расслоений над X соответствуют модулям P над $C^\infty(X)$ со свойством $\bigcap_{x \in X} \mu_x P = 0$, где μ_x -- максимальный идеал в точке $x \in X$. Функторы $\text{Jet}^s(-)$ и $\text{Diff}_s(-, A)$ сохраняют свойство модуля быть геометрическим [15].

- Эта двойственность является альтернативным алгебраическим способом введения расслоения струй в геометрии (вместо классического способа Гротендика и Эресмана как классов эквивалентности отображений, касающихся порядка s в точке). Когда $A = C^\infty(X)$ и P геометрический модуль, реализуемый как векторное расслоение $V(P)$ над X , тогда $\text{Jet}^s(P)$ реализуется как $\text{Jet}^s(V(P))$ над X в классическом смысле [15].

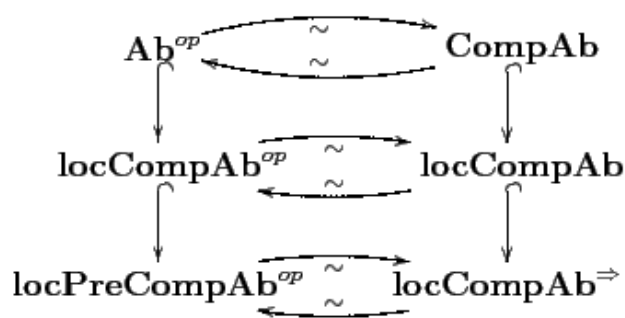
- (двойственность Понтрягина-Лукаша)

Следующая теорема устанавливает расширение двойственности Понтрягина на абелевы локально компактные группы, что было доказано Г. Лукашем [16]. Расширение

$$\begin{array}{c} \mathbb{R}/\mathbb{Z} \\ \downarrow \text{id} \end{array}$$

естественное с тем же самым дуализирующим объектом \mathbb{R}/\mathbb{Z} , точнее, с \mathbb{R}/\mathbb{Z} . Напомним, что топологическая группа *прекомпактна*, если для всякой окрестности единицы существует *конечное* множество элементов, такое что вся группа содержится в произведении этих множеств. И группа *локально прекомпактна*, если указанное свойство выполняется только в некоторой окрестности единицы.

Утверждение 6 (Понтрягин-Лукаш). Имеются следующие естественные двойственности



где $\text{locCompAb}^{\Rightarrow}$ есть категория плотных вложений локально компактных абелевых групп в компактные абелевы группы (с коммутативными квадратами в locCompAb как стрелками). \square

Замечание. Главная идея этого расширения в том, что каждая локально прекомпактная группа G может быть представлена как плотный инъективный locCompAb -морфизм $G_d \rightarrow \text{compl}(G)$, где G_d есть та же самая группа с дискретной топологией, а $\text{compl}(G)$ -- ее пополнение по отношению к двусторонней равномерной структуре на G . После этого обычная двойственность Понтрягина используется [16].

- (двойственность для дифференциальных уравнений)

Утверждение 7. Пусть \mathbf{UAlg} обозначает категорию универсальных алгебр с представимым забывающим функтором. Тогда каждая топологическая алгебра A является дуализирующим объектом и определяет некоторую естественную двойственную сопряженность между \mathbf{UAlg} и \mathbf{Top} . \square

Доказательство см. в [9, 10].

Следствие. Возьмем $\mathbf{UAlg} = k\text{-}\Lambda\text{-Alg}$, категорию внешних дифференциальных алгебр над полем k (\mathbb{R} или \mathbb{C}), объекты которой, подразумевается, представляют обобщенные дифференциальные уравнения. Возьмем

$\mathcal{A} = \Lambda(C^\infty(\mathbb{R}^n))$ или $\Lambda(C^\omega(\mathbb{C}^n))$ (которые играют роль пространства параметров) с jet^∞ -топологией (или более сильной, согласованной с операциями). Тогда

существует естественная двойственная сопряженность $k\text{-}\Lambda\text{-Alg}^{op} \xrightleftharpoons{\perp} \mathbf{Top}$ (между дифференциальными уравнениями и их пространствами решений). \square

Замечания

- В качестве категории, представляющей гладкие дифференциальные уравнения, можно брать сразу полную рефлексивную подкатегорию гладко-полных внешних дифференциальных алгебр (у которых коэффициенты замкнуты относительно гладких операций).
- Если рассматривать категорию $k\text{-}\Lambda\text{-Alg}$, у которой забывающий функтор представим, то будем иметь много лишних точек, не имеющих геометрического смысла (только однородные градуированные отображения степени 0 в \mathcal{A} имеют смысл, представляя интегральные многообразия размерности не больше n). В этом случае представление внешней дифференциальной алгебры будет через пространство большее, чем пространство решений. Если оставить в $k\text{-}\Lambda\text{-Alg}$ только градуированные морфизмы степени 0, тогда забывающий функтор не представим, но дуализирующий объект \mathcal{A} и сопряженность, определенная им, все еще имеют смысл.

Обозначим конкретные подкатегории \mathbf{Top} , двойственные категориям $k\text{-Alg}$ (коммутативные алгебры над k) и $k\text{-}\Lambda\text{-Alg}$ (внешние дифференциальные алгебры над k с градуированными степени 0 морфизмами), через $\mathbf{alg-Sol}$ и $\mathbf{diff-Sol}$ соот-

ветственно, т.е. $k\text{-Alg}^{op} \sim \text{alg-Sol}$,

$k\text{-}\Lambda\text{-Alg}^{op} \sim \text{diff-Sol}$. В частности, alg-Sol содержит все алгебраические и гладкие k -многообразия ($k = \mathbb{R}$ или \mathbb{C}), diff-Sol содержит все пространства вида $\text{alg-Sol}(k^n, X)$ (с представляющим объектом $A = \Lambda(C^\infty(k^n))$).

Приблизительная структура diff-Sol :

- $Ob(\text{diff-Sol})$ это пары $(X, \coprod_{i=1}^n \mathcal{F}_i)$, где $X := k\text{-}\Lambda\text{-Alg}(D, k) = k\text{-Alg}(D, k) \in Ob(\text{alg-Sol})$, $\mathcal{F}_i \subset \text{alg-Sol}(k^i, X)$, $1 < i < n$ [\mathcal{F}_i не являются произвольными подпространствами $\text{alg-Sol}(k^i, X)$].
- $Ar(\text{diff-Sol})$ это пары $(f, \coprod_{i=1}^n \text{Sol}(k^i, f)) : (X, \coprod_{i=1}^n \mathcal{F}_i) \rightarrow (X', \coprod_{i=1}^n \mathcal{F}'_i)$, где $f : X \rightarrow X' \in Ar(\text{alg-Sol})$, $\text{alg-Sol}(k^i, f) : \mathcal{F}_i \rightarrow \mathcal{F}'_i$, $1 \leq i \leq n$.

Утверждение 8. Имеются следующие сопряженности

- $k\text{-Alg} \begin{array}{c} \xrightarrow{\Lambda_k} \\ \perp \\ \xleftarrow{p_0} \end{array} k\text{-}\Lambda\text{-Alg}$, где Λ_k есть функтор взятия свободной внешней дифференциальной алгебры, p_0 проекция на подалгебру элементов степени 0,
- $\text{alg-Sol} \begin{array}{c} \xrightarrow{\text{hom}(k^n, -)} \\ \top \\ \xleftarrow{h} \end{array} \text{diff-Sol}$, где h есть функтор взятия базового пространства, такие что

$$\begin{array}{ccc}
 k\text{-}\Lambda\text{-Alg}^{op} & \begin{array}{c} \xrightarrow{F} \\ \sim \\ \xleftarrow{F'} \end{array} & \text{diff-Sol} \\
 \Lambda_k^{op} \uparrow \vdash p_0^{op} & \text{hom}(k^n, -) \uparrow \vdash b & \\
 k\text{-Alg}^{op} & \begin{array}{c} \xrightarrow{G} \\ \sim \\ \xleftarrow{G'} \end{array} & \text{alg-Sol}
 \end{array}$$

Доказательство и дополнительные детали содержатся в [9, 10].

Существует больше заслуживающих внимания двойственностей, например, между группами преобразований и коммутативными алгебрами, или группами Ли-преобразований и дифференциально-алгебраическими тройками в духе А.М. Васильева [17]. Эти примеры могут быть найдены в [9, 10].

Библиографический список

1. **Leinster, T.** Higher operads, higher categories, Cambridge University Press, 2003.
2. **Baez and J. Dolan, J.** Higher-dimensional algebra and topological quantum field theory, Jour. Math. Phys. 36, 6073-6105, 1995.
3. **Baez, J.** An introduction to n-categories, 7th Conference on Category Theory and Computer Science, eds. E. Moggi and G. Rosolini, Springer Lecture Notes in Computer Science vol. 1290, Springer, Berlin, 1997.
4. **Lurie, J.** Higher topos theory, arXiv:math.CT/0608040, 2006.

5. **Makkai, M.** The multitopic ω -category of all multitopic ω -categories, McGill U, 1999.
6. **Joyal, A.** The theory of quasi-categories, I, II, UQAM, 2007.
7. **Cheng, E., Lauda, A.** Higher-dimensional categories: an illustrated guide book, U of Cambridge, 2004.
8. **Simpson, C.T.** Homotopy Theory of Higher Categories, Cambridge University Press, 2010.
9. **Kondratiev, G.V.** Strict infinity categories. Concrete duality, arXiv:math.CT/0608436, 2006.
10. **Kondratiev, G.V.** Concrete duality for strict infinity categories, arXiv:0807.4256v1 [math.CT], 2008 (a revised paper).
11. **Porst, H.-E., Tholen, W.** Concrete dualities, в книге Category Theory at Work (eds. H. Herrlich. H.-E. Porst), Heldermann Verlag, Berlin, 1991, pp. 111-136.
12. **Adamek, J., Herrlich, H.G., Strecker, E.** Abstract and concrete categories. The joy of cats, John Wiley, 1990.
13. **Bell, J.L.** Toposes and Local Set Theories: An Introduction, Clarendon Press, Oxford, 1988.
14. **Johnstone, P.T.** Stone spaces, Cambridge University Press, 1982.
15. **Виноградов, А.М.** Введение в геометрию нелинейных дифференциальных уравнений / А.М. Виноградов, И.С. Красильщик, В.В. Лычагин. – М., 1986.
16. **Lukacs, G.** Duality theory of locally precompact groups, Category Theory Octoberfest, Ottawa University, 2006.
17. **Васильев, А.М.** Теория дифференциально-геометрических структур / А.М. Васильев. – М.: МГУ, 1987.

*Дата поступления
в редакцию 03.05.2011*

G.V. Kondratiev

CONCRETE DUALITY OF HIGHER ORDER

All the known specific duality (Pontryagin, Stone, Gelfand-Naimark and others) are called natural duality-mi first order. In this article we study the structure of a specific duality, give a criterion of its existence for strict dimensional categories and new examples.

Key words: specific duality, infinite-dimensional category.

ТРУДЫ
НИЖЕГОРОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА

№ 2 (87)

Редакторы: Н.Н. Максимова, О.В. Пугина

Редакция:

603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.
тел.: 8-312-436-73-72, rio@nntu.nnov.ru

Подписано в печать 09.06.2011. Формат 60x84 ¹/₈. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 43. Уч.-изд. л. 40. Тираж 300 экз. Заказ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева.

Типография НГТУ.

Адрес университета и полиграфического предприятия:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

Индекс 10312
Объединенный каталог «Пресса России»