

Труды

ISSN 1816-210X

Нижний Новгород (2010)

№ 1 (80)

Нижегородского
государственного
технического
университета
им. Р.Е. Алексеева

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

№ 1 (80)

Нижний Новгород 2010

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, 2010. № 1 (80). – 312 с.

Выходит 4 раза в год

Главный редактор В.П. Кириенко

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, С.М. Дмитриев, 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, 2010

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE RUSSIAN FEDERATION

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

**TRANSACTIONS
of NIZHNY NOVGOROD STATE TECHNICAL
UNIVERSITY
n.a. R.Y. ALEKSEEV**

№1 (80)

Nizhny Novgorod 2010

Transactions of NIZHNY NOVGOROD STATE TECHNICAL UNIVERSITY n. a. R.Y. Alekseev /
NSTU n.a. R.Y. Alekseev. - Nizhni Novgorod, 2010. № 1 (80). – 312 p.

The journal is issued 4 times a year

Editor-in-Chief V.P. Kiriyenko

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, S.M. Dmitriev, V.K. Maystrenko,
A.M. Groshev, S.N. Khrunkov, S.V. Khvatov, I.O. Leushin, M.G. Mikhailenko,
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>

ПРЕДИСЛОВИЕ

Сборник Трудов НГТУ издается с 1935 года. Его название за период существования претерпело ряд трансформаций, связанных с переименованием вуза и изменением его статуса: Труды Горьковского индустриального института им. А. А. Жданова (1935–1950 гг.); Труды Горьковского политехнического института им. А. А. Жданова (1950–1986 гг.); Труды Горьковского политехнического института (1986–1990 гг.); Труды Нижегородского политехнического института (1990–1992 гг.); Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева (1992 г. – по настоящее время). С момента становления Сборника выпущено 79 томов, некоторые тома содержали от одного до семнадцати самостоятельных тематических выпусков. С 2002 года для Сборника указывается только номер тома. Все издания Сборника подлежат обязательной рассылке в соответствии с реестром Российской книжной палаты, которая в свою очередь обеспечивает рассылку по ведущим библиотекам и информационным центрам.

С 1990 года каждому тому Сборника присваивался международный стандартный книжный номер ISBN, а в 2005 году он был зарегистрирован в Международном центре ISSN. Тираж издания каждого тома (выпуска) Сборника колеблется от 300 до 500 экземпляров.

Тома Сборника формируются по научным направлениям и носят тематический характер, охватывающий все важнейшие и приоритетные направления фундаментального и прикладного научного знания, соответствующего классификации специальностей ВАК РФ. Каждая статья и весь Сборник в целом проходят рецензирование у ведущих специалистов в соответствующих научно-исследовательских организациях и промышленных предприятиях Нижегородского региона.

С 2010 года Сборник Трудов был преобразован в рецензируемый научно-технический журнал, выходящий четыре раза в год и содержащий 13 тематических рубрик.

Основной целью рецензируемого научно-технического журнала «Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева» является содействие повышению качества подготовки специалистов в соответствии со стратегическими направлениями по обеспечению единой государственной политики в области государственной аттестации научных и научно-педагогических кадров. В журнале отражаются результаты фундаментальных научных исследований, прикладных научных исследований, экспериментальных разработок аспирантов, докторантов и соискателей ученой степени кандидата и доктора наук.

СОДЕРЖАНИЕ

РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ.....	13
Анисимов С.А., Зыбин В.А., Крылов В.В. Протокол поиска ресурсов в децентрализованных гридах, обладающих свойствами тесного мира.....	13
Маврычев Е.А. Пространственное сглаживание для оценивания параметров коррелированных сигналов в антенных подрешетках с частичной калибровкой.....	20
Иванов С.В., Назаров А.В., Попов Е.А. Краевая задача для круглого открытого ферритового волновода со спирально проводящей поверхностью.....	28
МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ.....	36
Абрашкин А.А., Громов Е.М., Тютин В.В. Короткие векторные солитоны огибающей в неоднородных средах.....	36
Бодунова Ю.П., Коноплев С.А., Лисин В.Б. Взаимодействие нелинейных локализованных волн в пузырьковой суспензии.....	43
Шевченко Г.В., Чернов А.Г., Ковалев П.Д., Горин И.И. Резонансные колебания в заливах и бухтах: натурные эксперименты и численное моделирование.....	52
ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ.....	63
Власов В.С. Задачи упорядочения и распределения ресурсов при изготовлении изделий микронного производства.....	63
Прилуцкий М.Х., Куликов М.С. Об одной специальной задаче квадратичного программирования.....	70
Пиманкин Д.А., Кисельман Б.А. Оценка движения частотными методами в системах компьютерного зрения.....	75
МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ.....	83
Фролова И.Н., Лаптев А.И. Способ автоматизации выбора средств технологического оснащения.....	83
Фролова И.Н., Кутилова О.И. Анализ современных систем автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП).....	91
Галкин В.В. Оценка деформированного состояния в заготовке прямоугольного сечения, раскатываемой валком на клин по плите.....	95
ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА.....	101
Бородин С.С., Дмитриев С.М., Легчанов М.А., Солнцев Д.Н., Хробостов А.Е. Исследование эффективности перемешивающих решеток в обоснование выбора оптимальной конструкции ТВСА-АЛЬФА реактора типа ВВЭР.....	101
Антоненков М.А., Боков П.А., Кузнецов Д.В., Безносков А.В., Бокова Т.А. Исследование особенностей трения и изнашивания контактных поверхностей в высокотемпературных свинцовом и свинец-висмутовом теплоносителях реакторных контуров.....	109
Данилов И.Н., Майстренко В.К., Пилипосян С.Е. Расчет стыков двух круглых волноводов различного сечения методом леммы Лоренца.....	120

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ.....	131
Кравец В.Н., Мусарский Р.А. Математическая модель сочленённого автотранспортного средства.....	131
Слюсарев А.С., Яблоков А.С. Требования к характеристикам и конструкции гидротрансформаторов в приводах механизмов подъемов плавучих кранов, работающих под водой.....	139
Куляшов А.П., Онкин О.И., Самарин В.П. Аналитическая оценка статистических параметров уплотненной снежной полосы движения.....	144
ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ.....	149
Апполонов Е.М., Сазонов К.Е., Тимофеев О.Я. Безопасность эксплуатации крупнотоннажных судов в арктической транспортной системе.....	149
Русецкая Г.В., Смирнов Л.В. Динамика гидромеханических процессов в центробежных насосах.....	154
Волков В.М., Жуков А.Е. Исследование поведения судовых пластин с центральными сквозными трещинами.....	164
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА.....	169
Лоскутов А.Б., Вагин Е.Б., Солнцев Г.Я., Воеводин А.Г., Соснина Е.Н., Мамонов А.М., Петров А.А. Концепция применения и основные технологические решения создания мини-ТЭЦ на базе газопоршневых двигателей.....	169
Папков Б.В., Шарыгин М.В., Крайнов С.П. Аспекты обеспечения надежности электроснабжения в условиях рынка.....	176
Смирнов А.Ю. Применение сеточных моделей для расчёта электромагнитного момента асинхронных двигателей.....	185
МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ.....	192
Мальцев И.М., Скуднов В.А. Электрофизические процессы металлургии обработки током высокой плотности металлических материалов.....	192
Хлыбов А.А., Скуднов В.А. Оценка структурных изменений в конструкционных металлических материалах акустическими методами для обеспечения безопасной эксплуатации технических объектов.....	200
Братухин В.А., Васильев В.А. Разработка и производство прогрессивных крепежных изделий для авиационной техники.....	210
Кутяйкин В.Г. Металловедческие аспекты формирования очага деформации при термопластической обработке сталей и метрологического обеспечения прикладных исследований.....	216
ХИМИЯ, ХИМИЧЕСКИЕ И БИОТЕХНОЛОГИИ.....	223
Москвичев А.Н., Москвичев А.А. Метод импедансных измерений для исследования свойств и кинетики полимеризации олигомерных композиций.....	223
Москвичев А.А., Гунько Ю.Л., Михаленко М.Г., Москвичев А.Н. Исследование кинетических закономерностей и параметров окисления кадмия в ограниченном объеме щелочного электролита.....	230
Перетрутов А.А., Ксандров Н.В., Чубенко М.Н., Ким П.П. Физико-химические и механические свойства пиритного огарка как сырья для производства красного железно-окисного пигмента и отмывка его от соединений цинка и меди.....	236

ЭКОНОМИКА, ИННОВАЦИИ И МЕНЕДЖМЕНТ.....	243
Юрлов Ф.Ф., Болоничева Т.В., Разина А.В. Методика определения эффективности инновационной деятельности экономических систем путем формирования групповых предпочтений.....	243
Яшин С.Н., Крюкова Т.М. Методика комплексной оценки эффективности инновационной деятельности промышленных предприятий на основе формирования системы экономических показателей	251
Морозова Г.А. Развитие промышленности в регионе.....	259
СОЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ, ИННОВАЦИИ В ОБРАЗОВАНИИ, PR-ТЕХНОЛОГИИ.....	266
Зайцева Е.А., Савченко И.А. Организаторские способности PR-специалиста: структурные и гендерные аспекты.....	266
Агеева Н.А., Антипина О.В. Социальные аспекты инновационного развития муниципальных образований.....	276
Ахматгатин А.А. Теоретические аспекты профессионально-прикладной физической культуры курсанта образовательного учреждения МВД России.....	282
МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ.....	291
Вавилов В.Д., Вавилов И.В., Поздяев В.И. Повышение точности кремниевых датчиков за счет двойного синхронного детектирования.....	291
Обухов В.И., Денисов Р.А. Инженерные методы расчет температурных погрешностей интегральных датчиков.....	300
Яковлев А.А., Улюшкин А.В. Математическая модель интегрального подвижного узла типа «коромысло».....	306

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE RUSSIAN FEDERATION

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

**TRANSACTIONS
of NIZHNY NOVGOROD STATE TECHNICAL
UNIVERSITY
n.a. R.Y. ALEKSEEV**

№1 (80)

Nizhny Novgorod 2010

Transactions of NIZHNY NOVGOROD STATE TECHNICAL UNIVERSITY n. a. R.Y. Alekseev /
NSTU n.a. R.Y. Alekseev. - Nizhni Novgorod, 2010. № 1 (80). – 312 p.

The journal is issued 4 times a year

Editor-in-Chief V.P. Kiriyenko

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, S.M. Dmitriev, V.K. Maystrenko,
A.M. Groshev, S.N. Khrunkov, S.V. Khvatov, I.O. Leushin, M.G. Mikhailenko,
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>

РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ

УДК 004.722.25

С.А Анисимов¹, В.А. Зыбин², В.В. Крылов³

ПРОТОКОЛ ПОИСКА РЕСУРСОВ В ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ ГРИДАХ, ОБЛАДАЮЩИХ СВОЙСТВАМИ ТЕСНОГО МИРА

ООО «Теком»¹, Intel², «Мера Лабс»³

Рассмотрен способ построения децентрализованных гридов с помощью фракталов с ограниченной степенью вершин. Показано, что данная топология проявляет свойства тесного мира. Предложен протокол поиска ресурсов в децентрализованном гриде.

Ключевые слова: протокол, сеть тесного мира, децентрализованный грид, поиск, ресурсы.

Введение

В настоящее время перед учеными возникают сложные задачи, для решения которых недостаточно одного компьютера, кластера или даже специализированного суперкомпьютера. Таким образом, достижение определенных научных целей с помощью современных компьютерных технологий становится чрезвычайно сложной, очень дорогой, а иногда совершенно невыполнимой задачей. Примеры наиболее типичных задач:

- необходим анализ огромного массива данных, части которого находятся в разных точках земного шара;
- требуется выполнить огромное количество вычислений.

Для решения данных задач в настоящий момент используется технология грид – аппаратно-программная инфраструктура, обеспечивающая надежный, устойчивый, повсеместный и недорогой доступ к высокопроизводительным компьютерным ресурсам, их скоординированное разделение и решение задач в динамически меняющихся виртуальных организациях со многими участниками [5-7]. Данное определение подразумевает, что грид – есть средство для совместного использования вычислительных мощностей и хранилищ данных. Изначально гриды предназначались для решения сложных научных, производственных и инженерных задач, которые невозможно решить в разумные сроки на отдельных вычислительных установках. Однако в настоящее время область применения технологий грид не ограничивается только научно-инженерными задачами. Область применения гридов [5, 6, 11]:

- *распределенные вычисления* – происходит объединение компьютерных ресурсов отдельных производств, компаний или научных организаций. Полученная в результате сеть компьютеров используется как единый ресурс;
- *метакомпьютинг* – особый тип распределенных вычислений, подразумевающих соединение суперкомпьютерных центров высокоскоростными сетями;
- *кластерные вычисления* – объединение нескольких персональных компьютеров в единый кластер;

- *технология Peer to Peer* – объединение распределенных персональных компьютеров в единую сеть, которая с помощью специального программного обеспечения позволяет обмениваться данными, в том числе и без участия центрального сервера;
- *распределенные вычисления с помощью сети Интернет* – создание виртуального суперкомпьютера, который состоит из десятков тысяч персональных компьютеров. Персональные компьютеры (узлы грида) работают одновременно над разными частями задачи, получая данные от центрального компьютера через Интернет. Далее результаты пересылаются центральной системе для заключительной обработки.

В область интересов авторов входят только промышленные гриды, которые предъявляют высокие требования к надежности каналов связи между узлами сети, скорости обмена информацией, к мощности и количеству узлов грида. Классическим примером промышленного грида является *Grid2003* – крупнейший в мире, объединяющий ряд мощных вычислительных центров и функционирующий в непрерывном режиме.

Гриды несколько упрощенно можно представить следующим образом: существует множество узлов сети, каждый из которых характеризуется количеством и типом процессоров, объемом оперативной и физической памяти, состоянием и рядом других параметров. Кроме этого, существует корневой сервер, в котором содержится список узлов сети и их состояние. Соответственно при постановке в очередь задачи и запросе необходимого количества процессоров, оперативной памяти одним из узлов грида происходит обращение к корневому серверу и поиск по каталогу ресурсов, удовлетворяющих запросу. В настоящее время во всех гридах существует централизованный каталог ресурсов. Недостатки построения грида:

- в случае выхода из строя корневого сервера весь грид оказывается неработоспособным;
- наличие устаревшей информации о состоянии узлов либо парализация корневого сервера грида частыми запросами.

Нетрудно заметить, что данный грид имеет топологию “звезда”, представленную на рис. 1. Возможно построение грида без централизованного каталога ресурсов (рис. 2).

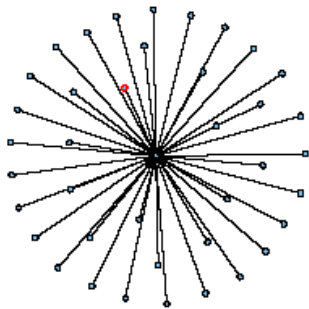


Рис. 1. Топология грида с централизованным каталогом ресурсов

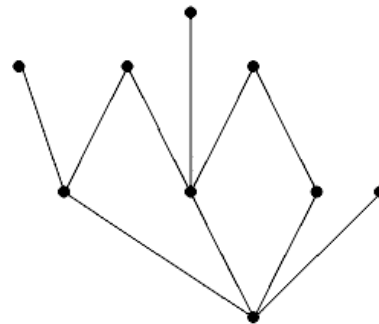


Рис. 2. Пример децентрализованного грида

Для построения грида без использования корневого сервера необходимо, чтобы выполнялись следующие условия:

- количество соединительных линий узла не превышает максимального значения;
- усредненная длина пути между узлами грида минимальна;
- количество соединительных линий грида минимально.

Первое требование введено для исключения парализации одного из узлов грида частыми запросами, а остальные присутствуют для того, чтобы реализовать эффективный алгоритм поиска. Цель данной работы – разработать протокол поиска ресурсов в децентрализованном гриде с оптимальной топологией, которая удовлетворяет показанным выше условиям.

Оптимальная топология и эффективный алгоритм поиска ресурсов

Модели сложных сетей принято представлять в виде связных графов $A = \{ V, T \}$, где V – набор узлов сети; T – набор соединительных линий, представляющий $[2 \times V]$ матрицу переходов. Средняя длина пути между всевозможными парами вершин графа напрямую зависит от выбранной топологии – отображения набора связей на множество узлов. Эффективность алгоритма поиска ресурсов зависит от выбранной топологии. В нашей задаче мы можем пренебречь временем, которое затрачено на транспортировку запросов по соединительным линиям из-за требований, предъявляемых к скорости передачи информации в промышленных гридах. Следовательно, время поиска ресурсов будет зависеть от времени обработки запроса узлом сети, от радиуса грида и от количества соединительных линий каждого узла. В некоторых случаях, при правильно выбранной топологии, в сетях проявляется эффект тесного мира [9, 10], означающий небольшое значение средней длины пути, несмотря на значительные размеры числа узлов в сети. Данный эффект обуславливается логарифмической зависимостью средней дистанции относительно общего числа элементов $l \sim \ln(N)$, где N – число узлов в сети. Таким образом, в оптимальной топологии грида возможно реализовать эффективные алгоритмы поиска, которые позволяют набрать ресурсы за l_{\max} шагов, где l_{\max} – есть диаметр грида. В работах [1–4, 8, 10] показано, что оптимальной топологией графа, которая удовлетворяет следующим условиям:

- кратчайшая средняя длина минимальна;
- число связей минимально;
- степень вершины графа не превышает максимальное значение.

является фрактал с ограниченной степенью вершин Limited Degree Fractal (LDF), топология которого представлена ниже [2, 10]:

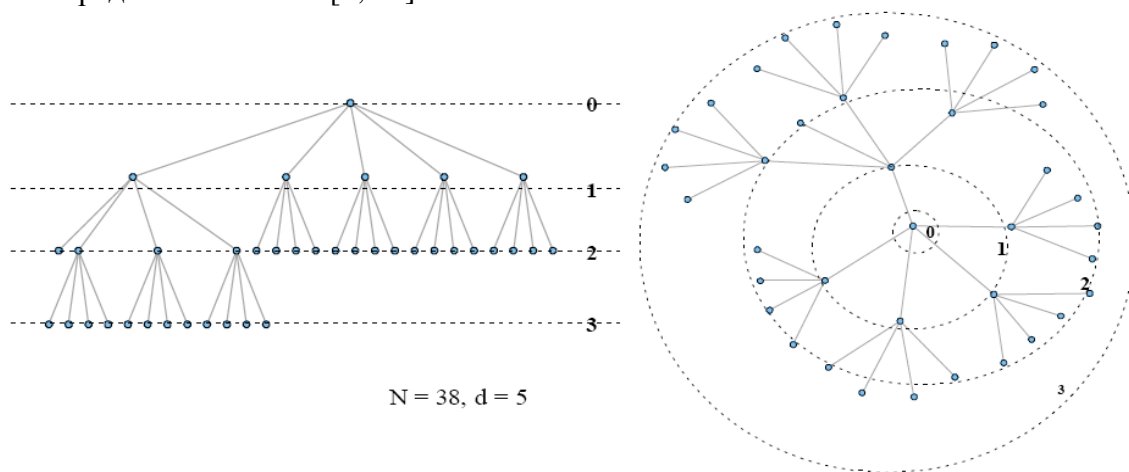


Рис. 3 Уровни LDF сети. Ступенчатое (слева) и круговое (справа) представление

Основные соотношения для LDF сети приведены ниже:

- число связей $N - 1$;
- средняя длина пути $l \cong 2 \frac{\ln(N)}{\ln d}$;
- распределение степеней вершин $\begin{cases} \sim \frac{1}{d} \text{ вершин имеют степень } d \\ \sim 1 - \frac{1}{d} \text{ вершин имеют степень } 1 \end{cases}$;
- коэффициент кластеризации $C = \frac{2}{d(d-1)}$.

Необходимо заметить, что в LDF сети наблюдается эффект тесного мира [9, 10].

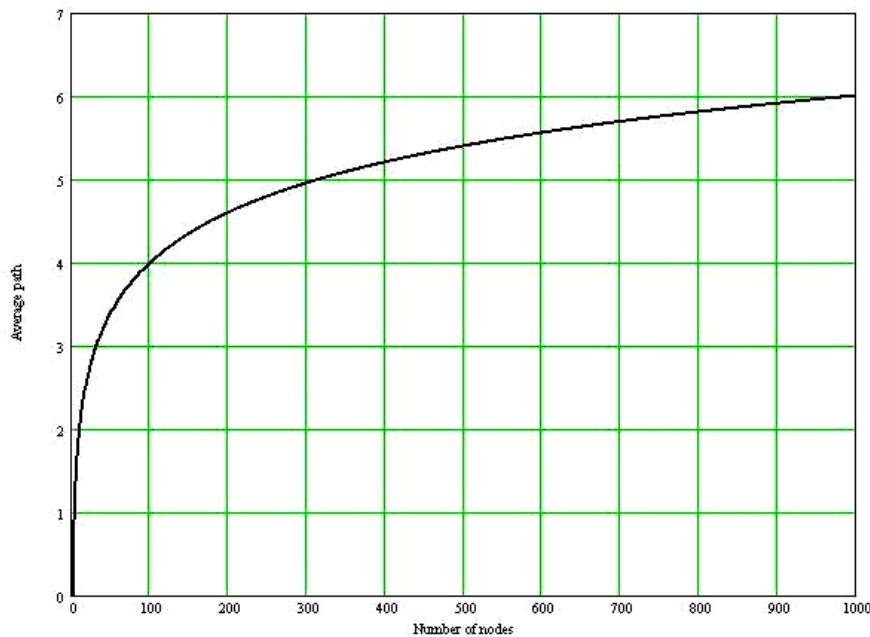


Рис. 4. Зависимость средней длины пути от числа узлов грида при $d = 10$

Далее будет рассмотрена методика роста LDF сети и предложен протокол поиска ресурсов с подавлением “шторма” в сети.

Протокол поиска ресурсов

Алгоритм роста LDF сети имеет следующий вид:

- сеть в начальный момент времени состоит из одного центрального узла;
- в каждый момент времени t в существующую сеть добавляется новый элемент и связывается с одним уже существующим элементом сети, причем выбор узла, с которым новый элемент будет соединен, зависит от заполнения уровня;
- к каждому узлу может присоединиться не более d элементов.

Далее показано, что LDF сеть с максимальной степенью вершины, равной пяти в начальный момент времени, состоит из узла 1. В следующий момент происходит добавление узла 2 и присоединение его к 1. При добавлении происходит заполнение таблиц как присоединяемого, так и исходного узлов LDF сети, в которых содержится список соседних узлов грида и количество их ресурсов. Аналогичным образом происходит добавление в следующие моменты времени узлов 3, 4, 5:

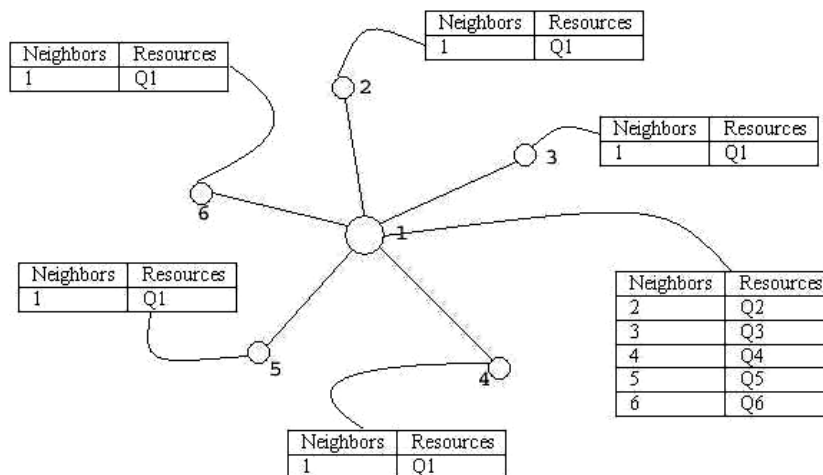


Рис. 5. Алгоритм заполнения первого уровня LDF сети

При запросе ресурсов любой узел передает три поля:

- идентификатор узла, который захватывает ресурсы;
- количество ресурсов, которое необходимо захватить;
- служебные отметки, если узел, инициирующий запрос, имеет ровно одного “соседа”.

После обработки запроса адресатом, последний генерирует ответ, в котором содержится таблица, состоящая из трех столбцов:

- маршрут до узла, у которого были захвачены ресурсы;
- количество захваченных ресурсов;
- служебные отметки, в случае, если данный узел имеет только одного соседа.

Пусть узлу 1 необходимо захватить $q < Q$ ресурсов. 1 генерирует запрос, в котором передается следующая информация: $(1 \ q \ last)$. Узел 4 после обработки запроса резервирует q ресурсов и генерирует ответ: $(1-2 \ q \ -)$. Очевидно, что необходимо предусмотреть механизм отказа от резервирования ресурсов, в случае, если зарезервировано будет больше, чем необходимо инициатору. Рассмотрим случай, когда узлу 1 необходимо захватить $q = 3Q$ ресурсов. На рис. 8 показана диаграмма последовательности запросов.

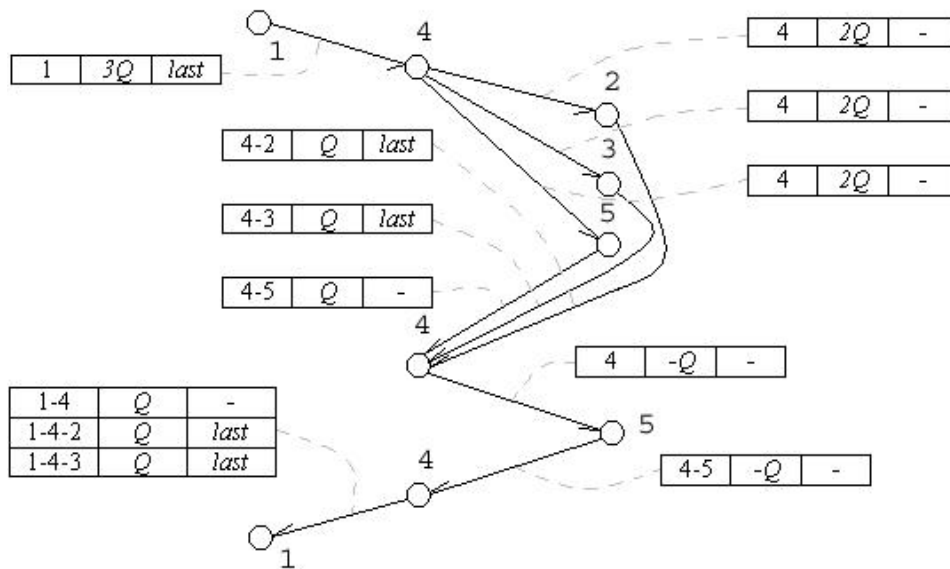


Рис. 8. Диаграмма последовательности запросов

Узел 1 генерирует запрос, в котором передается следующая информация: $(1 \ 3Q \ last)$. 4 после обработки данного запроса резервирует Q ресурсов, но ответ не будет сгенерирован, поскольку 1 имеет только одного “соседа” и ресурсы в количестве $q = 3Q$ захвачены не были. Если же хотя бы одно из двух условий не выполняется, то тогда будет сгенерирован ответ инициатору запроса. 4 генерирует запросы, которые рассылаются узлам $2, 3, 5$. Данные запросы идентичны друг другу: $(4 \ 2Q \ -)$. В свою очередь $2, 3, 5$ присылают следующие ответы соответственно: $(4-2 \ Q \ last)$, $(4-3 \ Q \ last)$, $(4-5 \ Q \ -)$. Нетрудно заметить, что узлом 4 было захвачено $3Q$ ресурсов, а требовалось лишь $2 \cdot Q$. Далее 4 генерирует запрос, в котором отказывается от резервирования части ресурсов $q = 3Q - 2Q = Q$. Отправка осуществляется первому соседу в таблице узла 4 . Данная таблица строится при построении грида так, как показано на рис. 7, 8. Отсюда следует, что 4 отправляет запрос, где отказывается от резервирования ресурсов узлу 5 . Запрос имеет вид: $(4 \ -Q \ -)$. Узел 5 присылает ответ на данный запрос: $(4-5 \ -Q \ -)$. После получения данного ответа, 4 генерирует ответ инициатору захвата ресурсов в виде таблицы.

<i>1-4</i>	<i>Q</i>	-
<i>1-4-2</i>	<i>Q</i>	<i>last</i>
<i>1-4-3</i>	<i>Q</i>	<i>last</i>

Заключение

Был рассмотрен способ построения децентрализованных гридов с регулярной древо-видной фрактальной структурой. Показано, что данная топология обладает свойством тесного мира. Предложен протокол поиска ресурсов в гриде без использования каталога ресурсов

Библиографический список

1. **Aiello, W.** A random graph model for massive graphs / W. Aiello, F. R. K. Chung, L.Lu // ACM Symposium on Theory of Computing (STOC). 2000. P. 171-180.
2. **Albert, R.** Statistical mechanics of complex networks / R. Albert, A.-L. Barabasi // Rev. Modern Phys. 2002. №74. P. 47-97.
3. **Barabasi, A.-L.** Emergence of scaling in random networks / A.-L. Barabasi, R. Albert // Science. 1999. №286. P. 509-512.
4. **Erdos, P.** The evolution of random graphs / P. Erdos, A. Renyi // Publications of the Mathematical Institute of the Hungarian Academy of Sciences. 1960. №5. P. 17-61.
5. **Foster, I.** What is the grid? A three point checklist // Argonne National Laboratory & University of Chicago. 2002.
6. **Foster, I.** The Grid: Blueprint for a New Computing Infrastructure (2nd Edition) / I. Foster, C. Kesselman // San Mateo, CA: Morgan Kaufmann. 2004.
7. **Foster, I.** The Anatomy of the Grid: Enabling Scalable Virtual Organizations / I. Foster, C. Kesselman, S. Tuecke // Inter. J. of High Performance Computing Applications. 2001. № 15. P. 200-222.
8. **Fronczak, A.** Average path length in random networks / A. Fronczak, P. Fronczak, J.-A. Holyst // Physical Review E 70. 2004.
9. **Watts, D.** Collective dynamics of small-world networks / D. Watts, S. Strogatz // Nature. 1998. №363. P. 202-204.
10. **Жаринов, И.В.** Конструирование графов с минимальной средней длиной пути / И.В. Жаринов, В.В. Крылов // Вестник ИЖГТУ. 2008. №4.
11. **Родин, А.В.** Классификации распределенных систем / А.В. Родин, В.Л. Бурцев // Научная сессия МИФИ. 2006.

Дата поступления
в редакцию 02.02.2010

S.A. Anisimov, V.A. Zybin, V.V. Krylov

RESOURCES RETRIEVAL PROTOCOL IN DECENTRALIZED GRIDS, WHICH HAVE SMALL WORLD CHARACTERISTICS

In this article the construction method of decentralized grids was examined using fractals with limited degree vertex. It was shown, this topology displayed small world characteristics. Resources retrieval protocol in decentralized grids was suggested.

Key words: protocol, small world network, decentralized grid, search, resources

УДК 621.396.965

Е.А. Маврычев

**ПРОСТРАНСТВЕННОЕ СГЛАЖИВАНИЕ ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ
КОРРЕЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ В АНТЕННЫХ ПОДРЕШЕТКАХ
С ЧАСТИЧНОЙ КАЛИБРОВКОЙ**

ОАО НПО «ЛЭМЗ»

Рассматривается антенная решетка, состоящая из идентичных линейных эквидистантных подрешеток одинаково ориентированных в пространстве. Предлагается метод, основанный на использовании проекционного алгоритма RARE для частично калиброванных антенных решеток и пространственного сглаживания корреляционной матрицы, позволяющий разрешать и измерять направления прихода коррелированных сигналов.

Ключевые слова: антенная решетка, проекционный алгоритм, пространственное сглаживание.

Введение

Антенные решетки (АР) находят широкое применение в различных областях, таких как радиосвязь, гидро- и радиолокация, сейсмология, радиоастрономия и др. Применение современных методов обработки сигналов в АР позволяет повысить разрешающую способность систем обработки информации. Точная калибровка АР необходима при использовании многих хорошо известных методов оценивания угловых направлений источников сигналов, принимаемых АР. К таким методам относятся метод максимального правдоподобия, Кейпона, MUSIC, MODE и т.д. [1-3]. Во многих практических задачах возникают трудности при калибровке АР. Особенно это касается больших антенных систем, состоящих из пространственно разнесенных подрешеток. В связи с этим получили распространение методы оценивания параметров сигналов, использующие частичное знание геометрии АР [4-7].

Метод RARE (rank reduction) [8-9] позволяет разрешать и оценивать параметры сигналов с помощью АР, состоящей из подрешеток, без знания взаимного расположения подрешеток и их амплитудно-фазовой калибровки. Этот алгоритм можно отнести к классу параметрических проекционных методов, основанных на использовании проектора на подпространство собственного шума, ортогональное сигнальному подпространству. Размерность сигнального подпространства определяется числом источников сигналов, что справедливо для случая некоррелированных сигналов. Прием сигналов с высокой корреляцией приводит к уменьшению размерности сигнального подпространства и невозможности разрешения таких сигналов с помощью метода RARE.

Известно, что применение процедуры пространственного сглаживания корреляционной матрицы (КМ) в проекционных методах, позволяет достичь разрешения сигналов с высокой корреляцией [10-12]. В данной работе рассматривается задача оценивания угловых координат когерентных источников сигналов с помощью АР, состоящей из линейных подрешеток, на основе метода RARE в сочетании с пространственным сглаживанием КМ. Приводятся результаты математического моделирования, подтверждающие возможность разрешения и оценивания параметров коррелированных источников.

Модель антенной решетки

Рассмотрим модель сигналов, принимаемых N элементной АР, состоящей из K идентичных линейных эквидистантных подрешеток, имеющих по M элементов каждая ($N=KM$). Полагаем, что все подрешетки одинаково ориентированы в пространстве. Взаимное расположение подрешеток является произвольным и неизвестным.

Если АР принимает сигнал с направления θ , то комплексные амплитуды в элементах АР представим в виде вектора

$$\mathbf{a}(\theta, \boldsymbol{\alpha}) = \mathbf{V}(\theta)\mathbf{h}(\theta, \boldsymbol{\alpha}). \quad (1)$$

Матрица $\mathbf{V}(\theta)$ размерности $N \times K$, являющаяся функцией информационного параметра θ , зависит от известных геометрических параметров АР и может быть записана в виде

$$\mathbf{V}(\theta) = \begin{bmatrix} \mathbf{v}(\theta) & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{v}(\theta) & & \\ \vdots & & \ddots & \\ \mathbf{0} & & & \mathbf{v}(\theta) \end{bmatrix} = \mathbf{v}(\theta) \otimes \mathbf{I}_K, \quad (2)$$

где $\mathbf{v}(\theta) = [1, \exp(-jkd\sin\theta), \dots, \exp(-jkd(M-1)\sin\theta)]^T$ – вектор комплексных амплитуд сигнала, принимаемого линейной эквидистантной подрешеткой; k – волновое число; d – расстояние между элементами подрешетки; \mathbf{I}_K – единичная матрица размерности $K \times K$, символ \otimes – Кронекерово произведение матриц.

Вектор $\mathbf{h}(\theta, \boldsymbol{\alpha})$ размерности $K \times 1$ зависит от информационного параметра θ и вектора неизвестных параметров $\boldsymbol{\alpha}$, определяющих взаимные положения подрешеток и их взаимную амплитудно-фазовую калибровку. Вектор $\boldsymbol{\alpha}$ содержит неизвестные параметры подрешеток, начиная со второй, относительно первой подрешетки, включая координаты подрешеток $\xi_{x2}, \xi_{y2}, \xi_{x3}, \xi_{y3}, \dots, \xi_{xK}, \xi_{yK}$, разности фаз $\varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_K$ и амплитудные калибровки $\gamma_2, \gamma_3, \dots, \gamma_K$. Тогда вектор $\mathbf{h}(\theta, \boldsymbol{\alpha})$ можно записать как

$$\mathbf{h}(\theta, \boldsymbol{\alpha}) = [1, \gamma_2 \exp(-j\psi_2(\theta)), \dots, \gamma_K \exp(-j\psi_K(\theta))]^T, \quad (3)$$

$$\psi_k(\theta) = \varphi_k + k\xi_{xk} \sin\theta - jk\xi_{yk} \cos\theta.$$

Таким образом, вектор сигнала $\mathbf{a}(\theta, \boldsymbol{\alpha})$ представляется в виде произведения матрицы $\mathbf{V}(\theta)$ и вектора $\mathbf{h}(\theta, \boldsymbol{\alpha})$, в котором матрица $\mathbf{V}(\theta)$ зависит от известных параметров АР, а вектор $\mathbf{h}(\theta, \boldsymbol{\alpha})$ зависит от неизвестных параметров АР.

Пусть АР принимает сигналы от J источников, приходящих с направлений $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_J$. Вектор сигнала $\mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)]^T$, принимаемого АР, запишем в виде

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t), \quad (4)$$

где \mathbf{A} – матрица размерности $N \times J$, состоящая из векторов фазового распределения принимаемых сигналов в АР, т.е. $\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_1, \boldsymbol{\alpha}), \mathbf{a}(\theta_2, \boldsymbol{\alpha}), \dots, \mathbf{a}(\theta_J, \boldsymbol{\alpha})]$; $\mathbf{s}(t)$ – вектор комплексных амплитуд размерности $J \times 1$; $\mathbf{n}(t)$ – вектор собственных шумов АР размерности $N \times 1$. КМ входного сигнала представим следующим образом:

$$\mathbf{R}_{xx} = E\{\mathbf{x}(t)\mathbf{x}^H(t)\} = \mathbf{A}\mathbf{R}_{ss}\mathbf{A}^H + \sigma_0^2\mathbf{I}_N, \quad (5)$$

где $E\{\}$ – статистическое усреднение; σ_0^2 – дисперсия собственного шума; \mathbf{R}_{ss} – матрица взаимной корреляции сигналов различных источников размерности $J \times J$.

Разложение КМ в базис собственных векторов запишем как

$$\mathbf{R}_{xx} = \mathbf{U}_s\boldsymbol{\Lambda}_s\mathbf{U}_s^H + \mathbf{U}_n\boldsymbol{\Lambda}_n\mathbf{U}_n^H, \quad (6)$$

где \mathbf{U}_s – матрица размерности $N \times J$, состоящая из собственных векторов сигнального подпространства; \mathbf{U}_n – матрица размерности $N \times (N-J)$, состоящая из собственных векторов шумового подпространства; $\boldsymbol{\Lambda}_s$ – диагональная матрица размерности $J \times J$, состоящая из собственных чисел сигнального подпространства; $\boldsymbol{\Lambda}_n$ – диагональная матрица размерности $(N-J) \times (N-J)$, состоящая из собственных чисел шумового подпространства, равных мощности собственного шума σ_0^2 .

Выборочная КМ и ее разложение в базис собственных векторов

$$\widehat{\mathbf{R}}_{xx} = \frac{1}{L} \sum_{t=1}^L \mathbf{x}(t) \mathbf{x}^H(t), \quad (7)$$

$$\widehat{\mathbf{R}}_{xx} = \mathbf{U}_s \widehat{\Lambda}_s \widehat{\mathbf{U}}_s^H + \widehat{\mathbf{U}}_n \widehat{\Lambda}_n \widehat{\mathbf{U}}_n^H.$$

Метод RARE

Рассмотрим проекционный метод RARE, предложенный в [8, 9], полагая, что матрица взаимной корреляции сигналов \mathbf{R}_{ss} имеет полный ранг, равный числу источников J . Проектор на шумовое подпространство ортогонален векторам-фазорам принимаемых сигналов $\mathbf{a}(\theta_1, \boldsymbol{\alpha}), \mathbf{a}(\theta_2, \boldsymbol{\alpha}), \dots, \mathbf{a}(\theta_J, \boldsymbol{\alpha})$, т.е.

$$\mathbf{a}^H(\theta, \boldsymbol{\alpha}) \mathbf{U}_n \mathbf{U}_n^H \mathbf{a}(\theta, \boldsymbol{\alpha}) = 0, \quad \theta \in \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_J\}. \quad (8)$$

Введем обозначение

$$\mathbf{B}(\theta) = \mathbf{V}^H(\theta) \mathbf{U}_n \mathbf{U}_n^H \mathbf{V}(\theta) \quad (9)$$

и перепишем уравнение (8) в виде

$$\mathbf{h}^H(\theta, \boldsymbol{\alpha}) \mathbf{B}(\theta) \mathbf{h}(\theta, \boldsymbol{\alpha}) = 0. \quad (10)$$

В общем случае при выполнении условия $K < N - J$ матрица $\mathbf{B}(\theta)$ имеет полный ранг. Тогда выражение (10) будет равно нулю при понижении ранга матрицы $\mathbf{B}(\theta)$ или при условии

$$\det \mathbf{B}(\theta) = 0. \quad (11)$$

Таким образом, направления на источники сигналов будут являться корнями уравнения (11). Оценивание параметров сигналов осуществляется по выборке конечного размера с использованием выборочной КМ $\widehat{\mathbf{R}}_{xx}$. Псевдоспектр, полученный на основе метода RARE, записывается в виде

$$f_{RARE}(\theta) = \frac{1}{\det \widehat{\mathbf{B}}(\theta)}, \quad (12)$$

где матрица $\widehat{\mathbf{B}}(\theta)$ вычисляется на основе оценки КМ:

$$\widehat{\mathbf{B}}(\theta) = \mathbf{V}_1^H(\theta) \widehat{\mathbf{U}}_n \widehat{\mathbf{U}}_n^H \mathbf{V}_1(\theta). \quad (13)$$

Максимумы псевдоспектра (12) соответствуют направлениям на источники сигналов. Оценивание угловых направлений на основе пространственного псевдоспектра (12) называют спектральной разновидностью метода RARE.

Алгоритм RARE для линейных эквидистантных подрешеток может быть представлен в полиномиальной форме [8]. Вектор сигнала линейной эквидистантной подрешетки, приходящего с направления θ , можно записать как $\mathbf{v}(z) = [1, z, \dots, z^{M-1}]^T$, который является параметром комплексной переменной $z = \exp(-jkd \sin \theta)$. Для нахождения оценок угловых направлений на источники необходимо решить уравнение

$$\det \widehat{\mathbf{B}}(z) = 0. \quad (14)$$

Комплексные корни уравнения (14), лежащие внутри окружности единичного радиуса ($|z| \leq 1$), наиболее близкие к границе окружности соответствуют направлениям на источники сигнала [8]. Применение стандартных подпрограмм вычисления корней полиномов позволяет снизить вычислительные затраты на оценивание параметров сигналов.

Метод RARE с пространственным сглаживанием

Разрешение сигналов с помощью проекционных методов зависит от степени их корреляции [11, 12]. При полной корреляции сигналов матрица взаимной корреляции имеет ранг, равный единице, и разрешение с помощью проекционных методов становится невозможным. Для разрешения коррелированных источников применяется процедура пространственного сглаживания КМ [10, 12]. Суть этого метода состоит в том, что АР разбивается на перекрывающиеся подрешетки, для каждой из них вычисляется КМ. Сглаженная КМ равна сумме КМ сигналов отдельных подрешеток. Подрешетки, образуемые для сглаживания КМ, будем называть виртуальными, в отличие от физических подрешеток, из которых непосредственно состоит АР. Образование виртуальных подрешеток показано на рис. 1.

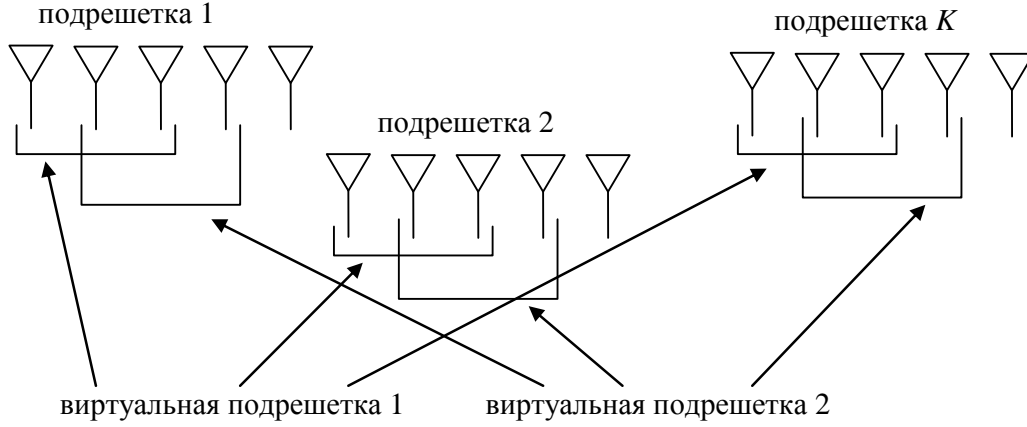


Рис. 1

Пусть Q – число элементов одной физической подрешетки, образующих виртуальную, тогда общее число элементов одной виртуальной подрешетки равно KQ . В результате может быть образовано $P=(M-Q+1)$ виртуальных подрешеток. Вектор сигнала p -й виртуальной подрешетки формируется в виде

$$\mathbf{x}_p(t) = \mathbf{T}_p \mathbf{x}(t), \quad p = 1 \dots P, \quad (15)$$

где $\mathbf{T}_p = \mathbf{E}_p \otimes \mathbf{I}_K$ – матрица селекции для p -й виртуальной подрешетки, в которой матрица \mathbf{E}_p представляется в виде блочной матрицы следующей структуры:

$$\mathbf{E}_p = [\mathbf{0}_{Q \times (p-1)} \quad \mathbf{I}_Q \quad \mathbf{0}_{Q \times (M-Q-p+1)}], \quad (16)$$

где $\mathbf{0}_{nm}$ – нулевая матрица размерности $n \times m$.

Для первой виртуальной подрешетки вектор комплексных амплитуд сигнала, принимаемого с направления θ , записывается в виде, аналогичном (1):

$$\mathbf{a}_1(\theta, \boldsymbol{\alpha}) = \mathbf{V}_1(\theta) \mathbf{h}(\theta, \boldsymbol{\alpha}), \quad (17)$$

где матрица $\mathbf{V}_1(\theta)$ зависит от информационного параметра θ и не зависит от вектора неизвестных параметров геометрии AP $\boldsymbol{\alpha}$:

$$\mathbf{V}_1(\theta) = \mathbf{v}_1(\theta) \otimes \mathbf{I}_K, \quad (18)$$

$$\mathbf{v}_1(\theta) = [1, \exp(-jkd \sin \theta), \dots, \exp(-jkd(Q-1) \sin \theta)]^T.$$

Вектор принимаемого сигнала для p -й виртуальной подрешетки можно записать

$$\mathbf{x}_p(t) = \mathbf{A}_p \mathbf{s}(t) + \mathbf{n}_p(t), \quad (19)$$

где матрица векторов-фазоров принимаемых сигналов, которую можно представить в виде

$$\mathbf{A}_p = \mathbf{A}_1 \mathbf{F}^{p-1}, \quad (20)$$

($\mathbf{A}_1 = [\mathbf{a}_1(\theta_1, \boldsymbol{\alpha}), \mathbf{a}_1(\theta_2, \boldsymbol{\alpha}), \dots, \mathbf{a}_1(\theta_J, \boldsymbol{\alpha})]$ – матрица размерности $KQ \times J$, состоящая из векторов-фазоров сигналов, принимаемых первой виртуальной подрешеткой; $\mathbf{F} = \text{diag}\{\exp(-jkd \sin \theta_1), \exp(-jkd \sin \theta_2), \dots, \exp(-jkd \sin \theta_J)\}$ – диагональная матрица, связывающая векторы сигналов двух соседних виртуальных подрешеток).

КМ входного процесса после пространственного сглаживания

$$\tilde{\mathbf{R}}_{xx} = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P E\{\mathbf{x}_p(t) \mathbf{x}_p^H(t)\} = \mathbf{A}_1 \tilde{\mathbf{R}}_{ss} \mathbf{A}_1^H + \sigma_0^2 \mathbf{I}_N, \quad (21)$$

$$\tilde{\mathbf{R}}_{ss} = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P \mathbf{F}^{p-1} \mathbf{R}_{ss} \mathbf{F}^{1-p}.$$

Чтобы после пространственного сглаживания можно было применить метод RARE, сглаженная матрица взаимной корреляции сигналов $\tilde{\mathbf{R}}_{ss}$ должна иметь полный ранг, для это-

го число подрешеток должно быть не меньше числа сигналов $P \geq J$. Тогда общая размерность AP должна быть в два раза больше числа источников $N \geq 2J$. Разложение сглаженной КМ в базис собственных векторов запишем как

$$\tilde{\mathbf{R}}_{xx} = \tilde{\mathbf{U}}_s \tilde{\mathbf{\Lambda}}_s \tilde{\mathbf{U}}_s^H + \tilde{\mathbf{U}}_n \tilde{\mathbf{\Lambda}}_n \tilde{\mathbf{U}}_n^H, \quad (22)$$

где $\tilde{\mathbf{U}}_s$ - матрица размерности $KQ \times J$, состоящая из собственных векторов, принадлежащих сигнальному подпространству; $\tilde{\mathbf{U}}_n$ - матрица размерности $KQ \times (KQ - J)$, состоящая из собственных векторов шумового подпространства; $\tilde{\mathbf{\Lambda}}_s$ - диагональная матрица размерности $J \times J$, состоящая из собственных чисел сигнального подпространства; $\tilde{\mathbf{\Lambda}}_n$ - диагональная матрица размерности $(KQ - J) \times (KQ - J)$, состоящая из собственных чисел шумового подпространства.

Выборочная КМ после пространственного сглаживания и ее разложение в базис собственных векторов

$$\hat{\tilde{\mathbf{R}}}_{xx} = \frac{1}{LP} \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^L \mathbf{x}_p(t) \mathbf{x}_p^H(t), \quad (23)$$

$$\hat{\tilde{\mathbf{R}}}_{xx} = \hat{\tilde{\mathbf{U}}}_s \hat{\tilde{\mathbf{\Lambda}}}_s \hat{\tilde{\mathbf{U}}}_s^H + \hat{\tilde{\mathbf{U}}}_n \hat{\tilde{\mathbf{\Lambda}}}_n \hat{\tilde{\mathbf{U}}}_n^H.$$

Рассмотрим проекционный метод RARE с использованием сглаженной КМ. При этом полагаем, что сглаженная матрица взаимной корреляции сигналов $\tilde{\mathbf{R}}_{ss}$ имеет полный ранг, равный числу источников J . Аналогично (10), запишем

$$\mathbf{h}^H(\theta, \boldsymbol{\alpha}) \tilde{\mathbf{B}}(\theta) \mathbf{h}(\theta, \boldsymbol{\alpha}) = 0, \quad (24)$$

где матрица $\tilde{\mathbf{B}}(\theta)$ выражается через проектор на шумовое подпространство сглаженной КМ:

$$\tilde{\mathbf{B}}(\theta) = \mathbf{V}_1^H(\theta) \tilde{\mathbf{U}}_n \tilde{\mathbf{U}}_n^H \mathbf{V}_1(\theta). \quad (25)$$

В общем случае при выполнении условия $K < KQ - J$ матрица $\tilde{\mathbf{B}}(\theta)$ имеет полный ранг. Тогда выражение (24) будет равно нулю при условии

$$\det \tilde{\mathbf{B}}(\theta) = 0. \quad (26)$$

Таким образом, направления на источники сигналов будут являться корнями уравнения (26). Псевдоспектр, полученный на основе метода RARE с пространственным сглаживанием (smoothing RARE), запишем в виде

$$f_{S-RARE}(\theta) = \frac{1}{\det \hat{\tilde{\mathbf{B}}}(\theta)}, \quad (27)$$

где матрица $\hat{\tilde{\mathbf{B}}}(\theta)$ вычисляется на основе сглаженной оценки КМ:

$$\hat{\tilde{\mathbf{B}}}(\theta) = \mathbf{V}_1^H(\theta) \hat{\tilde{\mathbf{U}}}_n \hat{\tilde{\mathbf{U}}}_n^H \mathbf{V}_1(\theta). \quad (28)$$

Максимумы псевдоспектра (27) соответствуют направлениям на источники сигналов. Наряду со спектральным методом RARE, может быть использован полиномиальный алгоритм, аналогичный (14).

Результаты моделирования

В качестве примера рассмотрим AP, состоящую из трех одинаково ориентированных подрешеток. Каждая подрешетка имеет 6 элементов, расположенных друг от друга на расстоянии половины длины волны. Координаты второй подрешеткой в длинах волн относительно первой $\xi_{x2}=5,23$, $\xi_{y2}=19,8$ и координаты третьей подрешетки относительно первой $\xi_{x3}=0,67$, $\xi_{y3}=-7,3$. Антенная решетка принимает сигналы от двух источников шумовых сигналов одинаковой мощности, находящихся в направлениях $\theta_1=5^\circ$ и $\theta_2=11^\circ$. Усреднение оценок и вычисление среднеквадратического отклонения (СКО) выполняются по 1000 независимым экспериментам. На рисунках, приведенных ниже, представлены результаты моделиро-

вания, полученные с помощью трех различных методов. Кривая 1 соответствует методу RARE с пространственным сглаживанием КМ, кривая 2 – методу RARE без сглаживания, кривая 3 – методу MUSIC с пространственным сглаживанием для одной подрешетки и кривая 4 соответствует методу MUSIC с пространственным сглаживанием и с усреднением оценок по всем трем подрешеткам.

Рассмотрим случай некоррелированных источников, результаты моделирования для которого приведены на рис. 2, 3. На рис. 2 приведены зависимости СКО ошибки измерения угловых координат от отношения сигнал/шум (ОСШ). При этом КМ оценивалась по 100 выборкам входного процесса. На рис. 3 показаны зависимости СКО ошибки измерения угловых координат от числа выборок, по которым оценивается КМ входного процесса, при ОСШ равном 20 дБ. Как видно, метод RARE с пространственным сглаживанием незначительно уступает в точности методу RARE без сглаживания КМ. В то же время применение алгоритма RARE позволяет значительно повысить точность оценивания по сравнению с MUSIC.

Теперь рассмотрим случай полностью коррелированных источников (рис. 4, 5). На рис. 4 приведены зависимости СКО ошибки измерения угловых координат от ОСШ при оценке КМ по 100 выборкам входного процесса. На рис. 5 показаны зависимости СКО от числа выборок, по которым оценивается КМ входного процесса, при ОСШ, равном 20 дБ. В данном примере алгоритм RARE без пространственного сглаживания не позволяет разрешать источники сигналов.

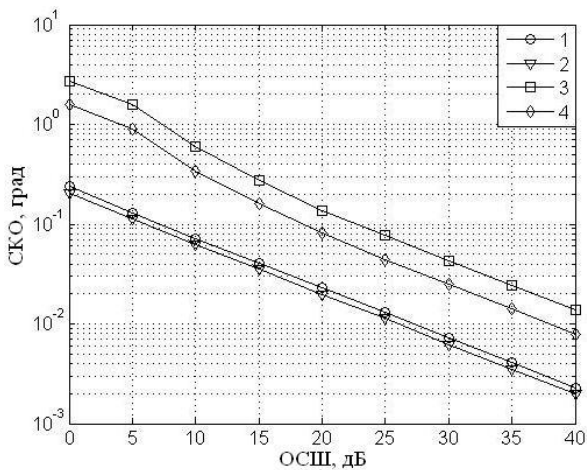


Рис. 2

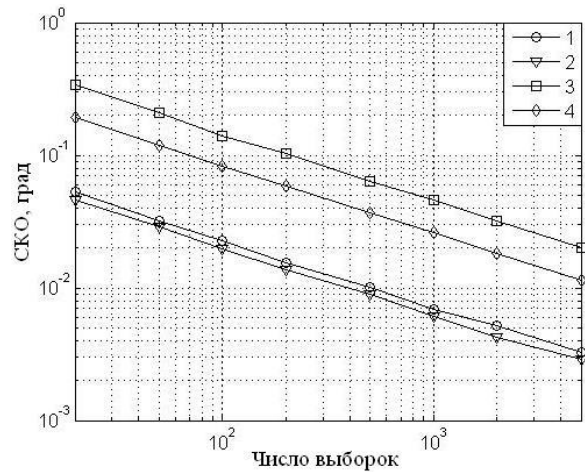


Рис. 3

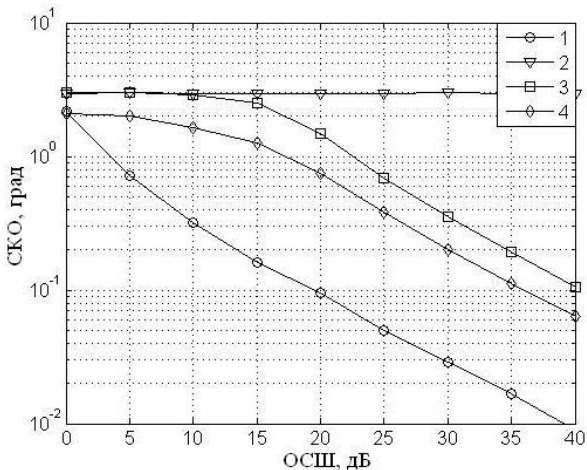


Рис. 4

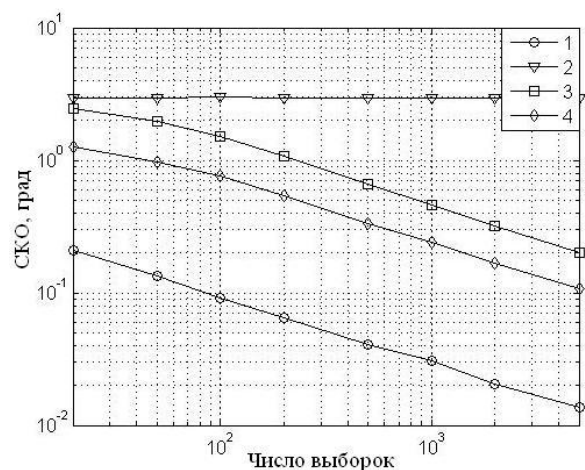


Рис. 5

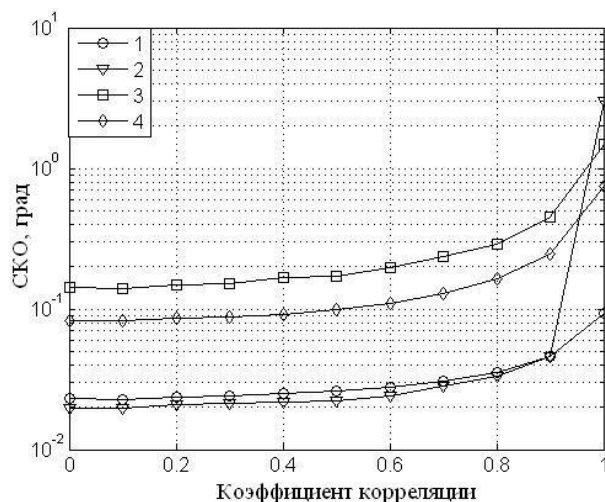


Рис. 6

В последнем примере рассмотрена точность оценивания угловых положений в зависимости от корреляции источников. Результаты моделирования приведены на рис. 6 для ОСШ 20 дБ и оценке КМ по 100 выборкам. Как видно из рис. 6, характеристики метода RARE без пространственного сглаживания начинают значительно ухудшаться при высокой корреляции источников, когда коэффициент корреляции больше 0,9.

Заключение

В работе предложен метод оценивания угловых координат источников коррелированных сигналов с помощью антенных решеток, состоящих из линейных эквидистантных подрешеток с частичной калибровкой. Данный метод основан на использовании проекционного алгоритма RARE, являющегося обобщением хорошо известного метода спектрального оценивания MUSIC, и применением пространственного сглаживания КМ, что позволяет разрешать когерентные сигналы. Представлены результаты моделирования, показывающие эффективность рассмотренного алгоритма.

По полученным результатам можно сделать следующие выводы. Метод RARE без пространственного сглаживания не позволяет разрешать сигналы с высокой корреляцией, в то время как процедура пространственного сглаживания дает возможность разрешения коррелированных сигналов. Метод RARE с пространственным сглаживанием дает значительное преимущество в точности измерения координат по сравнению с методом MUSIC. Это связано с тем, что в методе RARE используется вся апертура AP, а в MUSIC используется только одна подрешетка.

Библиографический список

1. **Barabell, A.J.** Improving the resolution performance of eigenstructure-based direction finding algorithms // Proc. ICASSP, Boston, MA. 1983. P. 336-339.
2. **Stoica, P.** MUSIC, maximum likelihood, and Cramer-Rao bound / P. Stoica, A.Nehorai // IEEE Trans. Acoustics Speech and Signal Processing. 1989. V. 37. P. 720-741.
3. **Stoica, P.** Maximum likelihood methods for direction-of-arrival estimation / P. Stoica, K. Sharman // IEEE Trans. Acoustics Speech and Signal Processing. 1990. V. 38. P. 1132-1143.
4. **Swindlehurst, A. L.** Multiple invariance ESPRIT / A. L. Swindlehurst // IEEE Trans. Signal Processing. 1992. V. 40. P. 867-881.
5. **Sidiropoulos, N. D.** Parallel factor analysis in sensor array processing / N. D. Sidiropoulos, R. Bro, G. B. and Giannakis // IEEE Trans. Signal Processing. 2000. V. 48. P. 2377-2388.
6. **Stoica, P.** Maximum-likelihood bearing estimation with partly calibrated arrays in spatially correlated noise fields / P. Stoica // IEEE Trans. Signal Processing. 1996. V. 44. P. 888-899.

7. **Swindlehurst, A. L.** Exploiting arrays with multiple invariances using MUSIC and MODE / A. L. Swindlehurst, P. Stoica, M. and Jansson // IEEE Trans. Signal Processing. 2001. V. 49. P. 2511-2521.
8. **Pesavento, M.** Direction finding in partly calibrated sensor arrays composed of multiple subarrays / M. Pesavento, A.B. Gershman, K.M. and Wong // IEEE Trans. Signal Processing. 2002. V. 50. P. 2103-2115.
9. **See, C.M.S.** Direction-of-arrival estimation in partly calibrated subarray-based sensor arrays / C.M.S. See, A.B. and Gershman // IEEE Trans. Signal Processing. 2004. V. 52. P. 329-338.
10. **Shan, T.J.** New adaptive processing for coherent signals and interference / T.J. Shan, T. and Kailath // Proc. ICASSP. 1984. P. 335-338.
11. **Коробко, О.В.** Анализ пространственного спектра поля когерентных источников излучения из алгебраических свойств корреляционной матрицы сигналов антенной решетки / О.В. Коробко, Б.И. Таурогинский // Радиотехника и электроника. 1987. Т. 32. № 7. – С. 1403-1408.
12. **Гершман, А.Б.** Анализ собственных чисел корреляционной матрицы входных колебаний адаптивной антенной решетки и возможности углового сверхразрешения в условиях коррелированных внешних источников излучения / А.Б. Гершман, В.Т. Ермолаев // Изв. вузов. Радиофизика. 1988. Т. 31. № 10. – С. 1236-1240.

*Дата поступления
в редакцию 02.02.2010*

Е.А. Mavrychev

SPATIAL SMOOTHING METHOD FOR PARAMETERS ESTIMATION OF CORRELATED SIGNALS IN PARTLY CALIBRATED SUBARRAYS

An antenna array consisting of a linear uniform partly calibrated subarrays with identical orientation is considered. A method based on subspace RARE algorithm for partly calibrated arrays and spatial smoothing of correlation matrix is proposed. This method enables to resolution and direction of arrival estimation of correlated signals.

Key words: antenna array, subspace algorithm, spatial smoothing.

УДК 535.8+621.373.826

С.В. Иванов, А.В. Назаров, Е.А. Попов

КРАЕВАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ КРУГЛОГО ОТКРЫТОГО ФЕРРИТОВОГО ВОЛНОВОДА СО СПИРАЛЬНО ПРОВОДЯЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрен круглый открытый продольно намагниченный ферритовый волновод со спиральнопроводящей поверхностью. Приведена постановка краевой задачи, описана процедура составления дисперсионного уравнения, представлены дисперсионные характеристики нескольких азимутально-симметричных и азимутально-несимметричных волн структуры.

Ключевые слова: феррит, волновод, спирально проводящая поверхность, краевая задача, дисперсия.

Рассмотрим круглый открытый продольно намагниченный ферритовый волновод (ФВ) со спирально проводящей поверхностью (рис. 1), представляющий собой ферритовый стержень радиусом a (область I), находящийся в неограниченной изотропной среде (область II), на поверхность которого намотана идеально проводящая спираль с шагом d . Стержень намагничен до насыщения постоянным магнитным полем \vec{H}_0 , направленным вдоль оси Oz . Угол ψ определяет плотность намотки проводника на ферритовый стержень. Вектор \vec{s} направлен вдоль витков спирали. В направлении этого вектора протекает ток, связанный с распространением электромагнитной волны. Вектор \vec{n} перпендикулярен плоскостям витков спирали и касается ее поверхности. В направлении \vec{n} ток отсутствует.

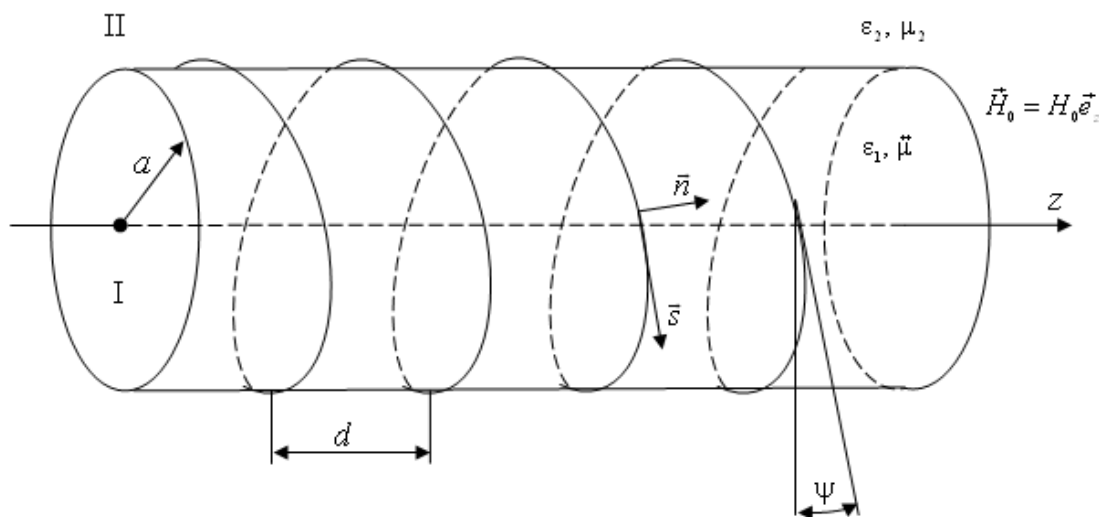


Рис. 1

Диэлектрическую проницаемость феррита считаем постоянной скалярной величиной: $\epsilon_1 = \text{const}$; магнитная проницаемость феррита описывается тензором [1]

$$\vec{\mu} = \begin{vmatrix} \mu & -ik & 0 \\ ik & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu_0 \end{vmatrix}. \quad (1)$$

Элементы μ и k тензора (1) зависят от частоты электромагнитной волны ω и при отсутствии потерь в феррите определяются по формулам:

$$\frac{\mu}{\mu_0} = 1 - \frac{\zeta A}{1 - \zeta^2}, \quad \frac{k}{\mu_0} = \frac{A}{1 - \zeta^2},$$

где $\zeta = \frac{\omega_0}{\omega}$; $A = \frac{\omega_M}{\omega}$; $\omega_0 = \mu_0 \gamma H_0$ – частота свободной прецессии спиновых магнитных моментов электронов; $\omega_M = \mu_0 \gamma M_s$; $\gamma = \frac{|e|}{m_e} = 1,76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг – спиновое гиромагнитное отношение для электрона; H_0 – величина напряженности поля подмагничивания [А/м]; M_s – намагниченность насыщения феррита [А/м].

Диэлектрическая и магнитная проницаемости внешней неограниченной изотропной среды равны соответственно ϵ_2 и μ_2 .

Пусть в структуре, изображенной на рис.1, в положительном направлении оси Oz распространяется монохроматическая электромагнитная волна частоты ω , напряженности электрического и магнитного полей которой имеют зависимость от времени t и координаты z вида $\exp[i(\omega t - \beta z)]$, где β – продольное волновое число.

Для решения задачи о распространении электромагнитных волн вдоль рассматриваемой структуры используем модель спирально проводящего цилиндра. Сущность этой модели [2, 3] состоит в том, что реальная спираль при достаточно малом ($d \ll \lambda$, где λ – длина волны) шаге заменяется системой проводящих колец того же радиуса. Эти кольца плотно прилегают друг к другу, однако гальванического контакта не имеют. При бесконечном увеличении числа таких колец на единицу длины линии (при соответствующем уменьшении до нуля диаметра провода, образующего спираль) в пределе получается сплошной цилиндр с анизотропной поверхностной проводимостью. По такому цилиндру ток протекает вдоль витков спирали (в направлении вектора \vec{s}) и не может протекать в направлении, перпендикулярном их плоскости (в направлении вектора \vec{n}).

Электромагнитное поле в ферритовом стержне (рис. 1, область I) описывается функцией Ψ , являющейся линейной комбинацией продольных компонент векторов напряженностей E_z электрического и H_z магнитного полей и удовлетворяющей уравнению Гельмгольца [4],

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \varphi^2} + \vartheta^2 \Psi = 0, \quad (2)$$

где $\vartheta^2 = \omega^2 \epsilon_1 \mu - \omega^2 k^2 \frac{\epsilon_1}{\mu} - \beta^2 + \omega \beta \xi k \frac{\epsilon_1}{\mu}$; ξ – решение квадратного уравнения

$$\tilde{a} \xi^2 - \tilde{b} \xi - \tilde{c} = 0 \quad (3)$$

с коэффициентами:

$$\tilde{a} = \omega \beta \epsilon_1 \frac{k}{\mu}; \quad \tilde{b} = \omega^2 \left(\epsilon_1 \mu_0 + k^2 \frac{\epsilon_1}{\mu} - \epsilon_1 \mu \right) + \beta^2 \left(1 - \frac{\mu_0}{\mu} \right); \quad \tilde{c} = \omega \beta \mu_0 \frac{k}{\mu}.$$

Уравнение (3) имеет два решения (ξ_1 и ξ_2), которым соответствуют два значения ϑ_1^2 и ϑ_2^2 . Поэтому решениями уравнения (2) будут функции:

$$\Psi_1(r, \varphi) = A_1 J_n(\vartheta_1 r) e^{\mp i n \varphi}; \quad \Psi_2(r, \varphi) = B_1 J_n(\vartheta_2 r) e^{\mp i n \varphi},$$

где A_1 и B_1 – неизвестные амплитудные коэффициенты; $J_n(\vartheta r)$ – функция Бесселя.

Значениям $\pm n$ в выражениях для функций $\Psi_1(r, \varphi)$ и $\Psi_2(r, \varphi)$ соответствуют два независимых решения краевой задачи, описывающих гибридные волны с левой и правой круговой поляризацией.

Продольные компоненты поля в области I выражаются через функции Ψ_1 и Ψ_2 :

$$E_{z1} = \frac{\xi_2 \Psi_1 - \xi_1 \Psi_2}{\xi_2 - \xi_1} e^{-i\beta z}; \quad H_{z1} = i \frac{\Psi_1 - \Psi_2}{\xi_2 - \xi_1} e^{-i\beta z}, \quad (4)$$

поперечные компоненты – через продольные по формулам, приведенным в [5].

Подставляя решения уравнения (2) в формулы (4), получим выражения для продольных компонент поля в области I:

$$E_{z1} = [\xi_2 A_1 J_n(\vartheta_1 r) - \xi_1 B_1 J_n(\vartheta_2 r)] \frac{e^{-i(\pm n\varphi + \beta z)}}{\xi_2 - \xi_1}; \quad (5)$$

$$H_{z1} = i [A_1 J_n(\vartheta_1 r) - B_1 J_n(\vartheta_2 r)] \frac{e^{-i(\pm n\varphi + \beta z)}}{\xi_2 - \xi_1}.$$

Во внешней области II (рис. 1), где среда является изотропной, компоненты электромагнитного поля выражаются через продольные компоненты Π_{z2}^e электрического и Π_{z2}^m магнитного векторов Герца, удовлетворяющих уравнению Гельмгольца и имеющих вид

$$\Pi_{z2}^e = A_2 H_n^{(2)}(\alpha r) e^{-i(\pm n\varphi + \beta z)}; \quad \Pi_{z2}^m = B_2 H_n^{(2)}(\alpha r) e^{-i(\pm n\varphi + \beta z)}, \quad (6)$$

где A_2 и B_2 – неизвестные амплитудные коэффициенты; $\alpha^2 = \varepsilon_2 \mu_2 \omega^2 - \beta^2$; α – поперечное волновое число в области II; $H_n^{(2)}(\alpha r)$ – функция Ханкеля второго рода, по формулам:

$$\vec{E}_2 = \text{grad div } \vec{\Pi}_2^e + \varepsilon_2 \mu_2 \omega^2 \vec{\Pi}_2^e - i\omega \mu_2 \text{rot } \vec{\Pi}_2^m,$$

$$\vec{H}_2 = \text{grad div } \vec{\Pi}_2^m + \varepsilon_2 \mu_2 \omega^2 \vec{\Pi}_2^m + i\omega \varepsilon_2 \text{rot } \vec{\Pi}_2^e.$$

Здесь $\vec{\Pi}_2^{e(m)} = \Pi_{z2}^{e(m)} \vec{e}_z$; \vec{e}_z – единичный вектор оси Oz .

Представление векторов Герца в виде (6) позволяет при $\text{Im}(\alpha) < 0$ описывать экспоненциально убывающие по радиальной координате поля, соответствующие собственным волнам направляющей структуры.

Так как ток по спирально проводящей поверхности рассматриваемой направляющей структуры может протекать лишь в направлении \vec{s} , то на этой поверхности (в силу идеальной проводимости провода, образующего спираль) компонента электрического поля $E_s = E_z \sin \psi + E_\varphi \cos \psi$ будет обращать в нуль, в то время как компоненты E_z и E_φ будут непрерывны. Непрерывной также будет компонента магнитного поля $H_s = H_z \sin \psi + H_\varphi \cos \psi$. Поэтому граничные условия примут вид:

$$E_{z1}(r=a) = E_{z2}(r=a),$$

$$E_{\varphi 1}(r=a) = E_{\varphi 2}(r=a),$$

$$E_{s1}(r=a) = E_{s2}(r=a) = 0,$$

$$H_{s1}(r=a) = H_{s2}(r=a).$$

Реализация граничных условий приводит к системе линейных однородных алгебраических уравнений относительно неизвестных амплитудных коэффициентов A_1, A_2, B_1, B_2 , из условия нетривиальности решений которой (условия равенства нулю ее главного определителя) получается дисперсионное уравнение (ДУ) волн ФВ со спирально проводящей поверхностью

$$\begin{vmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} & 0 \\ u_{21} & u_{22} & u_{23} & u_{24} \\ 0 & 0 & u_{33} & u_{34} \\ u_{41} & u_{42} & u_{43} & u_{44} \end{vmatrix} = 0, \quad (7)$$

$$\begin{aligned}
\text{где } u_{11} &= \frac{\xi_2}{\xi_2 - \xi_1} J_n(\vartheta_1 a), \quad u_{12} = -\frac{\xi_1}{\xi_2 - \xi_1} J_n(\vartheta_2 a), \quad u_{13} = -\alpha^2 H_n^{(2)}(\alpha a), \\
u_{21} &= \frac{\Phi_{1n}(\vartheta_1 a)}{(\xi_2 - \xi_1)(q^2 \omega^4 - p^2)}, \quad u_{22} = -\frac{\Phi_{2n}(\vartheta_2 a)}{(\xi_2 - \xi_1)(q^2 \omega^4 - p^2)}, \quad u_{23} = \beta \frac{n}{a} H_n^{(2)}(\alpha a), \\
u_{24} &= -i\omega\mu_2 \alpha H_n^{(2)'}(\alpha a), \quad u_{33} = \alpha^2 H_n^{(2)}(\alpha a) \sin \psi - \beta \frac{n}{a} H_n^{(2)}(\alpha a) \cos \psi, \\
u_{34} &= i\omega\mu_2 \alpha H_n^{(2)'}(\alpha a) \cos \psi, \quad u_{41} = \frac{Q_{1n}(\vartheta_1 a) \cos \psi}{(\xi_2 - \xi_1)(q^2 \omega^4 - p^2)} + \frac{J_n(\vartheta_1 a) \sin \psi}{\xi_2 - \xi_1}, \\
u_{42} &= -\frac{Q_{2n}(\vartheta_2 a) \cos \psi}{(\xi_2 - \xi_1)(q^2 \omega^4 - p^2)} - \frac{J_n(\vartheta_2 a) \sin \psi}{\xi_2 - \xi_1}, \quad u_{43} = \omega \varepsilon_2 \alpha H_n^{(2)'}(\alpha a) \cos \psi, \\
u_{44} &= i\alpha^2 H_n^{(2)}(\alpha a) \sin \psi - i\beta \frac{n}{a} H_n^{(2)}(\alpha a) \cos \psi.
\end{aligned}$$

$$\text{Здесь } \Phi_{1n}(\vartheta_1 a) = \omega \vartheta_1 (p\mu - q\omega^2 k + q\omega\beta\xi_2) J_n'(\vartheta_1 a) - \frac{n}{a} (p\omega k - p\beta\xi_2 - q\omega^3 \mu) J_n(\vartheta_1 a);$$

$$\Phi_{2n}(\vartheta_2 a) = \omega \vartheta_2 (p\mu - q\omega^2 k + q\omega\beta\xi_1) J_n'(\vartheta_2 a) - \frac{n}{a} (p\omega k - p\beta\xi_1 - q\omega^3 \mu) J_n(\vartheta_2 a);$$

$$Q_{1n}(\vartheta_1 a) = \frac{n}{a} (q\omega^3 \varepsilon_1 \xi_2 + p\beta) J_n(\vartheta_1 a) + \omega \vartheta_1 (q\omega\beta + p\varepsilon_1 \xi_2) J_n'(\vartheta_1 a);$$

$$Q_{2n}(\vartheta_2 a) = \frac{n}{a} (q\omega^3 \varepsilon_1 \xi_1 + p\beta) J_n(\vartheta_2 a) + \omega \vartheta_2 (q\omega\beta + p\varepsilon_1 \xi_1) J_n'(\vartheta_2 a); \quad p = \varepsilon_1 \mu \omega^2 - \beta^2; \quad q = \varepsilon_1 k;$$

штрих означает производную цилиндрической функции по всему аргументу.

Следует отметить, что рассматриваемая краевая задача является несамосопряженной даже при отсутствии потерь в образующих направляющую структуру средах, поскольку число граничных условий прямой и сопряженной задач различно [6]. Так как собственные значения несамосопряженной краевой задачи в общем случае комплексные, наиболее общими решениями ДУ (7) будут комплексные волновые числа, соответствующие при отсутствии потерь спектру комплексных волн.

Корректность работы программы поиска корней ДУ (7), реализованной в среде программирования Borland C++, была проверена путем выполнения предельного перехода от круглого открытого ФВ со спирально-проводящей поверхностью к спиральному волноводу с воздушным заполнением [2, 3].

В табл.1 приведены значения коэффициента замедления β/k_0 (k_0 – волновое число плоской волны в свободном пространстве) азимутально-симметричных волн ($n=0$) спирального волновода с воздушным заполнением при $|\alpha a| > 0,5$, полученные с использованием асимптотической формулы [2, 3]

$$\frac{\beta}{k_0} \approx \frac{1}{\sin \psi} \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \psi}{2(k_0 a)^2}}, \quad (8)$$

а также в результате решения ДУ (7). При этом рассматривался ФВ со спиральнопроводящей поверхностью без потерь с пренебрежимо малой намагниченностью ($M \rightarrow 0$) в отсутствие внешнего поля подмагничивания ($H_0 = 0$) со следующими параметрами: $a = 20$ мм, $\psi = 0,1$ рад, $\varepsilon_1/\varepsilon_0 = \varepsilon_2/\varepsilon_0 = 1$, $\mu/\mu_0 = 1$, $k/\mu_0 \rightarrow 0$ ($k/\mu_0 = 10^{-6}$), $\mu_2/\mu_0 = 1$. Как видно из табл.1, относительное расхождение результатов не превышает 0,1%, что позволяет сделать вывод о

корректной работе созданной программы и возможности ее использования для проведения дальнейших расчетов дисперсионных характеристик волн круглого открытого продольно намагниченного ФВ со спирально проводящей поверхностью.

Таблица 1

$k_0 a$	β / k_0	
	Асимптотическая формула (8)	Корни ДУ (7)
0,5	9,916	9,908
0,6	9,947	9,944
0,7	9,966	9,964
0,8	9,978	9,977

Дисперсионные характеристики первых трех поверхностных волн с азимутальным индексом $n = 0$ круглого открытого продольно намагниченного до насыщения ФВ со спирально проводящей поверхностью без потерь с параметрами: $a = 20$ мм, $\psi = 0,1$ рад, $f_0 = 1,76$ ГГц – частота ферромагнитного резонанса, $M_s = 103,5$ кА/м – намагниченность насыщения феррита, $\varepsilon_1/\varepsilon_0 = 14,8$, $\varepsilon_2/\varepsilon_0 = 1$ представлены на рис. 2.

Так как волны ФВ со спирально проводящей поверхностью даже при отсутствии угловой зависимости у электромагнитного поля являются гибридными, будем условно классифицировать их как HE_{nm} , где первый индекс n означает число вариаций поля по азимутальной координате φ , а второй индекс m – номер волны по порядку следования критических частот.

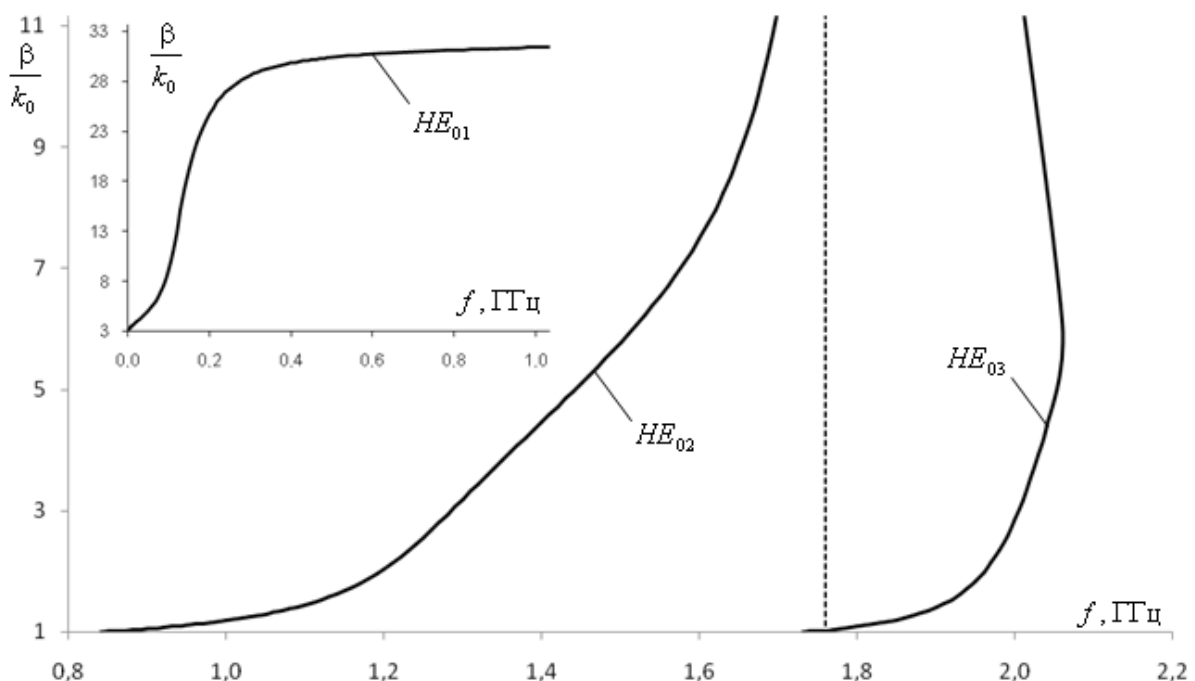


Рис. 2

Как видно из рис.2, волна HE_{01} круглого открытого ФВ со спирально проводящей поверхностью не имеет критической частоты. При этом в дорезонансной области ($f < f_0$) на

частотах $f > 0,35$ ГГц ($k_0 a > 0,15$) величина коэффициента замедления β/k_0 этой волны определяется геометрическим замедлением спирали, то есть величиной угла намотки ψ . Волна HE_{02} обладает нормальной дисперсией, и на частоте ферромагнитного резонанса её дисперсионная характеристика терпит разрыв, наличие которого связано с тем, что на частоте ферромагнитного резонанса терпят разрыв компоненты μ и k тензора магнитной проницаемости (1) феррита без потерь. В зарезонансной области частот ($f > f_0$) дисперсионная характеристика волны HE_{03} имеет участок с сильной аномальной дисперсией, ее коэффициент замедления стремится к бесконечности при стремлении частоты f к частоте ферромагнитного резонанса f_0 справа.

Как было указано выше, в случае несимметричных волн ($n \neq 0$) рассматриваемая краевая задача имеет два независимых решения, описывающих гибридные волны с левым $HE_{nm}^{(+)}$ и правым $HE_{nm}^{(-)}$ вращением плоскости поляризации. Дисперсионные характеристики поверхностных волн с азимутальным индексом $n=1$ круглого открытого продольно намагниченного ФВ со спирально проводящей поверхностью без потерь с теми же параметрами, что и ранее, представлены на рис. 3, где сплошными линиями изображены характеристики волн с левым вращением плоскости поляризации, пунктирными линиями – с правым вращением.

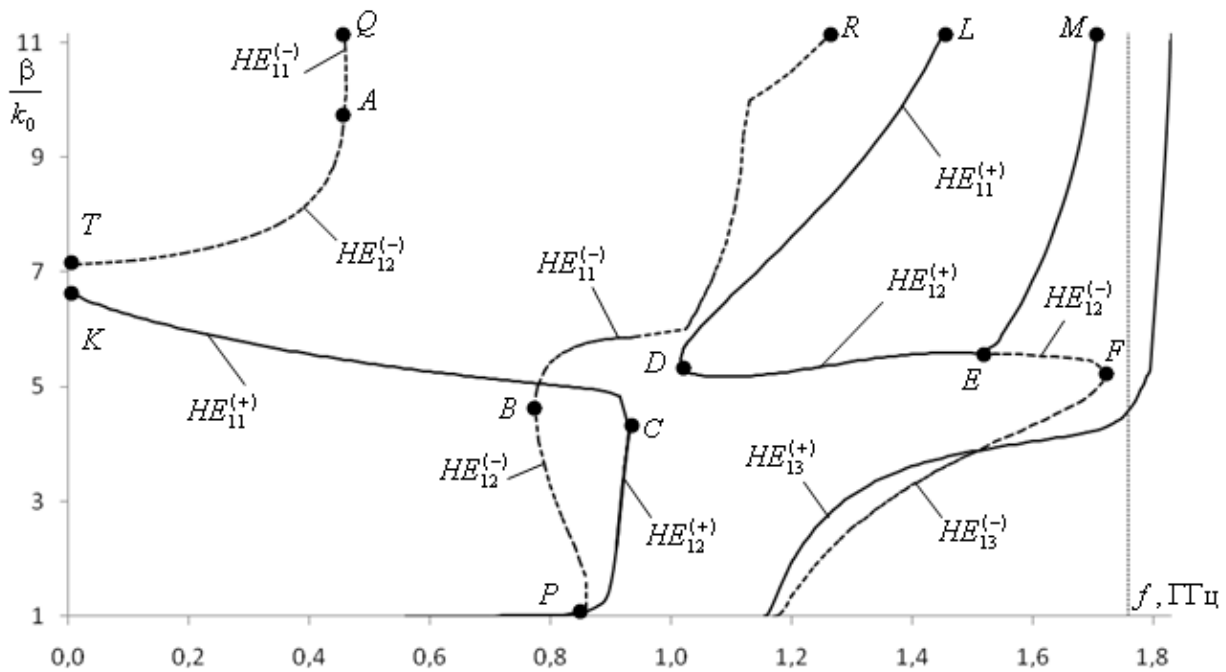


Рис. 3

Сложное поведение дисперсионных характеристик не позволяет использовать в данном случае описанный выше подход к классификации волн. Поэтому будем условно классифицировать волны как HE_{1m} , где второй индекс m означает номер корня ДУ (7) (нумерация корней осуществляется в направлении убывания их значений). На рис. 3 буквами A, B, C, D, F обозначены точки жордановой кратности волновых чисел, в которых происходит слияние дисперсионных характеристик волн $HE_{11}^{(-)}$ и $HE_{12}^{(-)}$ (точки A и B), $HE_{11}^{(+)}$ и $HE_{12}^{(+)}$ (точки C и D), $HE_{12}^{(-)}$ и $HE_{13}^{(-)}$ (точка F).

Из рис. 3 видно, что поверхностная волна $HE_{11}^{(+)}$ на участке KC обладает аномальной, а на участке DL сильной нормальной дисперсией, и её дисперсионная характеристика терпит разрыв на частоте ферромагнитного резонанса.

На дисперсионной характеристике поверхностной волны $HE_{12}^{(+)}$ можно выделить три участка PC , DE и EM . На участке PC волна $HE_{12}^{(+)}$ имеет сильную нормальную дисперсию, на участке DE волна $HE_{12}^{(+)}$ – слабую нормальную дисперсию. В районе точки D , где происходит слияние дисперсионных характеристик волн $HE_{11}^{(+)}$ и $HE_{12}^{(+)}$, волна $HE_{12}^{(+)}$ имеет аномальную дисперсию. На участке EM волна $HE_{12}^{(+)}$ обладает сильной нормальной дисперсией, ее коэффициент замедления стремится к бесконечности при стремлении частоты f к частоте ферромагнитного резонанса f_0 слева.

Дисперсионная характеристика поверхностной волны $HE_{13}^{(+)}$ переходит через частоту ферромагнитного резонанса и имеет в зарезонансной области участок с сильной нормальной дисперсией. Поверхностная волна $HE_{11}^{(-)}$ на участке QA обладает сильной аномальной дисперсией. На участке BR эта волна имеет нормальную дисперсию, её дисперсионная характеристика терпит разрыв на частоте ферромагнитного резонанса. На дисперсионной характеристике поверхностной волны $HE_{12}^{(-)}$ можно выделить участки с аномальной дисперсией PB и EF и участок с нормальной дисперсией TA . Поверхностная волна $HE_{13}^{(-)}$ в дорезонансной области частот обладает нормальной дисперсией.

Заметим, что поскольку, как следует из рис. 3, постоянные распространения волн с левой и правой круговой поляризацией различны, то при распространении в ФВ со спирально проводящей поверхностью изначально определенным образом линейно поляризованной азимутально-несимметричной волны, образованной суперпозицией циркулярно-поляризованных волн с правым и левым вращением, будет происходить поворот плоскости поляризации относительно ее первоначального положения, то есть будет наблюдаться эффект Фарадея.

Таким образом, при отсутствии потерь в феррите дисперсионные характеристики как азимутально-симметричных, так и азимутально-несимметричных волн круглого открытого ФВ со спирально проводящей поверхностью терпят разрыв на частоте ферромагнитного резонанса. На дисперсионных характеристиках волн имеются неоднозначные участки, свидетельствующие о возможности существования в рассматриваемой структуре комплексных волн. Существуют частотные диапазоны, в которых в круглом открытом ФВ со спирально проводящей поверхностью могут распространяться только поверхностные азимутально-несимметричные волны с одной из двух возможных круговых поляризаций. Основной волной структуры является азимутально-симметричная волна HE_{01} , величина коэффициента замедления которой при $k_0 a > 0,15$ определяется геометрическим замедлением спирали.

Библиографический список

1. **Микаэлян, А.Л.** Теория и применение ферритов на сверхвысоких частотах / А.Л. Микаэлян. – М.: Госэнергоиздат, 1963.
2. **Силин, Р.А.** Замедляющие системы / Р.А. Силин, В.П. Сазонов. – М.: Сов. радио, 1966.
3. **Неганов, В.А.** Линейная макроскопическая электродинамика / В.А. Неганов, С.Б. Раевский, В.А. Яровой. – М.: Радио и связь, 2001. Т. 2.
4. **Сулл, Г.** Вопросы волноводного распространения электромагнитных волн в гиротропных средах / Г. Сулл, Л. Уокер. – М.: Иностранная литература, 1955.

5. **Виприцкий Д.Д., Назаров А.В.** // Антенны. 2004. Вып. 1 (80). С. 36.
6. **Раевский, А.С.** Неоднородные направляющие структуры, описываемые несамосопряженными операторами / А.С. Раевский, С.Б. Раевский. – М.: Радиотехника, 2004.

*Дата поступления
в редакцию 02.02.20210*

S.V. Ivanov, A.V. Nazarov, E.A. Popov

**BOUNDARY PROBLEM FOR AN CIRCULAR OPEN FERRITE WAVEGUIDE WITH
THE SPIRAL-CONDUCTING SURFACE**

An circular open longitudinally magnetized ferrite waveguide with the spiral-conducting surface is considered. The statement of the boundary problem is given, the procedure of the dispersion equation formation is described, the dispersion characteristics of some azimuthally symmetric and azimuthally asymmetric waves of the structure are presented.

Key words: ferrite, waveguide, spiral-conducting surface, boundary problem, dispersion.

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ

УДК 533

А.А. Абрашкин¹, Е.М. Громов², В.В. Тютин²

КОРОТКИЕ ВЕКТОРНЫЕ СОЛИТОНЫ ОГИБАЮЩЕЙ В НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ

Институт прикладной физики РАН¹,
Государственный университет – Высшая школа экономики (Нижегородский филиал)²

В рамках пары связанных нелинейных уравнений Шредингера третьего порядка в неоднородных средах с линейным профилем неоднородности найдено точное решение в виде короткого векторного солитона. Описаны траектории движения таких солитонов в зависимости от параметров среды. Полученное решение может быть в частных случаях сведено как к короткому скалярному солитону на линейном профиле неоднородности, так и к хорошо известному протяженному скалярному солитонному решению Чена.

Ключевые слова: дисперсия, нелинейность, неоднородность, солитон, траектория.

Распространение коротких векторных волновых пакетов $\vec{E} = \vec{e}_1 U(x, t) \exp i\omega_1 t - ik_0 x + \vec{e}_2 W(x, t) \exp i\omega_2 t - ik_0 x$, где $U(x, t)$ и $W(x, t)$ - компоненты волнового поля разной поляризации, в нелинейных диспергирующих неоднородных средах с линейной неоднородностью можно описывать системой связанных нелинейных уравнений Шредингера, учитывающих эффекты нелинейной дисперсии третьего порядка (СНУШ - 3):

$$2i \left[\frac{\partial U}{\partial t} + V_g^L \frac{\partial U}{\partial x} + \beta |U|^2 + \sigma_\beta |W|^2 \frac{\partial U}{\partial x} + \mu W \frac{\partial (|U|^2 + \sigma_\mu |W|^2)}{\partial x} \right] +$$

$$+ q \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + 2\alpha |U|^2 + \sigma_\alpha |W|^2 U + i \gamma \frac{\partial^3 U}{\partial x^3} + pxU = 0, \quad (1)$$

$$2i \left[\frac{\partial W}{\partial t} + V_g^L \frac{\partial W}{\partial x} + \beta |W|^2 + \sigma_\beta |U|^2 \frac{\partial W}{\partial x} + \mu W \frac{\partial (|W|^2 + \sigma_\mu |U|^2)}{\partial x} \right] +$$

$$+ q \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + 2\alpha |W|^2 + \sigma_\alpha |U|^2 W + i \gamma \frac{\partial^3 W}{\partial x^3} + pxW = 0. \quad (2)$$

Здесь частота ω и волновое число k связаны нелинейным дисперсионным соотношением $\omega = \omega(k, |U|^2, |W|^2)$; $V_g^L = \frac{\partial \omega}{\partial k} = \frac{\partial \omega_{U,W}}{\partial k}$ - групповая скорость линейных волн; $q = -\frac{\partial^2 \omega}{\partial k^2} = -\frac{\partial^2 \omega_{U,W}}{\partial k^2}$ и $\gamma = -\frac{1}{3} \frac{\partial^3 \omega}{\partial k^3} = -\frac{1}{3} \frac{\partial^3 \omega_{U,W}}{\partial k^3}$ - параметры линейной дисперсии второго и третьего порядков соответственно; $\alpha = \frac{\partial \omega}{\partial |U|^2} = \frac{\partial \omega}{\partial |W|^2}$ - параметр кубичной нелинейности;

$\sigma_{\alpha\beta\mu}$ - коэффициенты нелинейной связи между компонентами разной поляризации; p - параметр неоднородности.

В отсутствие неоднородности ($p = 0$) система уравнений (1)-(2) получена, в рамках этой системы найдены солитонные решения в [1-2], показана устойчивость найденных солитонов.

Для скалярных коротких волновых пакетов (например, при отсутствии одной из компонент $W(x,t) = 0$ система (1)-(2) переходит к одному уравнению, описывающему динамику только $U(x,t)$ - компоненты) описана динамика солитона на линейной неоднородности [3], а также на параболическом ($p \propto x^2$) и периодическом ($p \propto \sin kx$) профиле неоднородности [4].

В данной работе рассматривается движение коротких векторных солитонов огибающей на линейном профиле неоднородности.

Переходя в уравнениях (1)-(2) в движущуюся со скоростью $V(t)$ систему отсчета замкнутой координат $\xi = x - \int_0^t V(\tilde{t}) d\tilde{t}$, $t' = t$ и представляя решение в виде фазомодулированных волновых пакетов

$$\begin{aligned} U(\xi, t) &= u(\xi) \exp \left[i \left(\frac{1}{2} p \xi^2 + \Omega_u t + Q_u t \right) \right], \\ W(\xi, t) &= w(\xi) \exp \left[i \left(\frac{1}{2} p \xi^2 + \Omega_w t + Q_w t \right) \right], \end{aligned} \tag{3}$$

получим

$$\begin{aligned} & 2i \left(-v_u \frac{d^2 u}{d \xi^2} + \beta (|u|^2 + \sigma_\beta |w|^2) \frac{du}{d \xi} + \mu u \left(\frac{d(|u|^2 + \sigma_\mu |w|^2)}{d \xi} \right) + \frac{\gamma d^3 u}{2 d \xi^3} \right) - \\ & - 2\Omega_u u + \alpha u (|u|^2 + \sigma_\alpha |w|^2) + q \frac{d^2 u}{d \xi^2} - \\ & - u \left\{ 2 \frac{dQ_u(t)}{dt} + (V_g - V(t) - \delta_u) p t + \frac{q}{4} p^2 t^2 - p \int_0^t V(\tilde{t}) d\tilde{t} - \frac{\gamma}{8} p^3 t^3 \right\} - \\ & - i \frac{du}{d \xi} \left\{ 2(V(t) - V_g - v_u) - q p t + \frac{3}{4} \gamma p^2 t^2 \right\} - p t \left\{ \frac{3}{2} \frac{\gamma d^2 u}{d \xi^2} + \beta (|u|^2 + \sigma_\beta |w|^2) u + \delta_u u \right\} = 0, \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
 & 2i \left(-v_w \frac{d^2 w}{d \xi^2} + \beta (|w|^2 + \sigma_\beta |u|^2) \frac{dw}{d \xi} + \mu w \left(\frac{d (|w|^2 + \sigma_\mu |u|^2)}{d \xi} \right) + \frac{\gamma d^3 w}{2 d \xi^3} \right) - \\
 & - 2\Omega_w w + \alpha w (|w|^2 + \sigma_\alpha |u|^2) + q \frac{d^2 w}{d \xi^2} - \\
 & - w \left\{ 2 \frac{d Q_w(t)}{dt} + (V_g - V(t) - \delta_w) p t + \frac{q}{4} p^2 t^2 - p \int_0^t V(\tilde{t}) d\tilde{t} - \frac{\gamma}{8} p^3 t^3 \right\} - \\
 & - i \frac{dw}{d \xi} \left\{ 2(V(t) - V_g - v_w) - q p t + \frac{3}{4} \gamma p^2 t^2 \right\} - p t \left\{ \frac{3}{2} \frac{\gamma d^2 w}{d \xi^2} + \beta (|w|^2 + \sigma_\beta |u|^2) w + \delta_w w \right\} = 0
 \end{aligned} \tag{5}$$

где $v_{u,w}$, $\delta_{u,w}$ - параметры, которые будут определены далее. Пусть решение удовлетворяет следующим соотношениям (при которых обращаются в ноль выражения в фигурных скобках в (4)-(5), т.е. указанные уравнения станут автономными и опишут стационарные волновые пакеты):

$$2 V t - V_g - v_{u,w} - q p t + \frac{3}{4} \gamma p^2 t^2 = 0, \tag{6}$$

$$2 \frac{d Q_{u,w}}{dt} t + V_g - V t - \delta_{u,w} p t + \frac{q}{4} p^2 t^2 - p \int_0^t V \tilde{t} d\tilde{t} - \frac{\gamma}{8} p^3 t^3 = 0, \tag{7}$$

$$\frac{3}{2} \frac{\gamma d^2 u}{d \xi^2} + \beta |u|^2 + \sigma_\beta |w|^2 u + \delta_u u = 0, \tag{8}$$

$$\frac{3}{2} \frac{\gamma d^2 w}{d \xi^2} + \beta |w|^2 + \sigma_\beta |u|^2 w + \delta_w w = 0. \tag{9}$$

Из (6) имеем уравнение, описывающее траектории движения

$$\frac{d^2 V}{dt^2} = -\frac{3}{2} \gamma p^2 = const. \tag{10}$$

Из (7) с учетом (6) имеем ранее неопределенную модуляцию фазы

$$Q_{u,w} t = \frac{1}{4} V_g + 2v_{u,w} + \delta_{u,w} p t^2 + \frac{q}{12} p^2 t^3 - \frac{3}{64} \gamma p^3 t^4. \tag{11}$$

Тогда (4)-(5) сводятся к виду

$$\begin{aligned}
 & 2i \left(-v_u \frac{d^2 u}{d \xi^2} + \beta |u|^2 + \sigma_\beta |w|^2 \frac{du}{d \xi} + \mu u \left(\frac{d (|u|^2 + \sigma_\mu |w|^2)}{d \xi} \right) + \frac{\gamma d^3 u}{2 d \xi^3} \right) + \\
 & + \alpha u (|u|^2 + \sigma_\alpha |w|^2) - 2\Omega_u u + q \frac{d^2 u}{d \xi^2} = 0,
 \end{aligned} \tag{12}$$

$$2i \left(-v_w \frac{d^2 w}{d\xi^2} + \beta |w|^2 + \sigma_\beta |u|^2 \frac{dw}{d\xi} + \mu w \left(\frac{d|w|^2 + \sigma_\mu |u|^2}{d\xi} \right) + \frac{\gamma d^3 w}{2 d\xi^3} \right) + \alpha w |w|^2 + \sigma_\alpha |u|^2 - 2\Omega_w w + q \frac{d^2 w}{d\xi^2} = 0. \quad (13)$$

Представим решение (12)-(13) и (8)-(9) в виде $u \xi = A \xi \exp[i \varphi_u \xi]$ и $w \xi = B \xi \exp[i \varphi_w \xi]$. Разделив (12) на действительную и мнимую части, получим

$$\gamma \frac{d^3 A}{d\xi^3} + 2\beta + 2\mu A^2 \frac{dA}{d\xi} + 2\beta\sigma_\beta + 2\mu\sigma_\mu B^2 \frac{dA}{d\xi} + \left[2q \frac{d\varphi_u}{d\xi} - 2v_u - 3\gamma \left(\frac{d\varphi_u}{d\xi} \right)^2 \right] \frac{dA}{d\xi} + \left(q - 3\gamma \frac{d\varphi_u}{d\xi} \right) \frac{d^2 \varphi_u}{d\xi^2} A = 0, \quad (14)$$

$$\left(q - 3\gamma \frac{d\varphi_u}{d\xi} \right) \frac{d^2 A}{d\xi^2} + \alpha A A^2 + \sigma_\alpha B^2 - 2\beta A^2 + \sigma_\beta B^2 \frac{d\varphi_u}{d\xi} - 3\gamma \frac{d^2 \varphi_u}{d\xi^2} \frac{dA}{d\xi} + \left[\gamma \left(\frac{d\varphi_u}{d\xi} \right)^3 - q \left(\frac{d\varphi_u}{d\xi} \right)^2 + 2V \frac{d\varphi_u}{d\xi} - 2\Omega_u - \gamma \frac{d^3 \varphi_u}{d\xi^3} \right] A = 0. \quad (15)$$

Аналогично, разделив (13) на действительную и мнимую части, получим

$$\gamma \frac{d^3 B}{d\xi^3} + 2\beta + 2\mu B^2 \frac{dB}{d\xi} + 2\beta\sigma_\beta + 2\mu\sigma_\mu A^2 \frac{dB}{d\xi} + \left[2q \frac{d\varphi_w}{d\xi} - 2v_w - 3\gamma \left(\frac{d\varphi_w}{d\xi} \right)^2 \right] \frac{dB}{d\xi} + \left(q - 3\gamma \frac{d\varphi_w}{d\xi} \right) \frac{d^2 \varphi_w}{d\xi^2} B = 0, \quad (16)$$

$$\left(q - 3\gamma \frac{d\varphi_w}{d\xi} \right) \frac{d^2 B}{d\xi^2} + \alpha B B^2 + \sigma_\alpha A^2 - 2\beta B^2 + \sigma_\beta A^2 \frac{d\varphi_w}{d\xi} - 3\gamma \frac{d^2 \varphi_w}{d\xi^2} \frac{dB}{d\xi} + \left[\gamma \left(\frac{d\varphi_w}{d\xi} \right)^3 - q \left(\frac{d\varphi_w}{d\xi} \right)^2 + 2V \frac{d\varphi_w}{d\xi} - 2\Omega_w - \gamma \frac{d^3 \varphi_w}{d\xi^3} \right] B = 0. \quad (17)$$

Действительная и мнимая части (8) примут вид

$$\frac{3\gamma d^2 A}{2 d\xi^2} + \beta A^2 + \sigma_\beta B^2 A + \left[\delta_u - \frac{3\gamma}{2} \left(\frac{d\varphi_u}{d\xi} \right)^2 \right] A = 0, \quad (18)$$

$$\frac{d^2 \varphi_u}{d\xi^2} A + 2 \frac{d\varphi_u}{d\xi} \frac{dA}{d\xi} = 0. \quad (19)$$

Аналогично, действительная и мнимая части (9) примут вид

$$\frac{3\gamma d^2 B}{2 d\xi^2} + \beta B^2 + \sigma_\beta A^2 B + \left[\delta_u - \frac{3\gamma}{2} \left(\frac{d\varphi_w}{d\xi} \right)^2 \right] B = 0, \quad (20)$$

$$\frac{d^2 \varphi_w}{d\xi^2} B + 2 \frac{d\varphi_w}{d\xi} \frac{dB}{d\xi} = 0. \quad (21)$$

Уравнения (14)-(21) могут совпадать при условии отсутствия фазовой модуляции $\frac{d\varphi_{u,w}}{d\xi} = 0$, когда все слагаемые (21) обращаются в ноль. В этом случае из (14)-(20) получим:

$$\gamma \frac{d^3 A}{d\xi^3} + 2\beta + 2\mu A^2 \frac{dA}{d\xi} + 2\beta\sigma_\beta + 2\mu\sigma_\mu B^2 \frac{dA}{d\xi} - 2v_u \frac{dA}{d\xi} = 0, \quad (22)$$

$$q \frac{d^2 A}{d\xi^2} + \alpha A A^2 + \sigma_\alpha B^2 - 2\Omega_u A = 0, \quad (23)$$

$$\gamma \frac{d^3 B}{d\xi^3} + 2\beta + 2\mu B^2 \frac{dB}{d\xi} + 2\beta\sigma_\beta + 2\mu\sigma_\mu A^2 \frac{dB}{d\xi} - 2v_w \frac{dB}{d\xi} = 0, \quad (24)$$

$$q \frac{d^2 B}{d\xi^2} + \alpha B B^2 + \sigma_\alpha A^2 - 2\Omega_w B = 0, \quad (25)$$

$$\frac{3\gamma d^2 A}{2 d\xi^2} + \beta A^2 + \sigma_\beta B^2 A + \delta_u A = 0, \quad (26)$$

$$\frac{3\gamma d^2 B}{2 d\xi^2} + \beta B^2 + \sigma_\beta A^2 B + \delta_w B = 0. \quad (27)$$

Будем считать волновые поля разной поляризации пропорциональными ($B = \lambda A$). Тогда, интегрируя (22) и (24) по ξ в пределах $\xi \in \xi + \infty$ при условиях ограниченности волнового поля $A \xrightarrow{\xi \rightarrow +\infty} 0$ и $A'' \xrightarrow{\xi \rightarrow +\infty} 0$, имеем:

$$\frac{d^2 A}{d\xi^2} + \frac{2\beta + \sigma_\beta \lambda^2 + 2\mu + \sigma_\mu \lambda^2}{3\gamma} A^3 - \frac{2v_u}{\gamma} A = 0, \quad (28)$$

$$\frac{d^2 A}{d\xi^2} + \frac{\alpha + \sigma_\alpha \lambda^2}{q} A^3 - \frac{2\Omega_u}{q} A = 0, \quad (29)$$

$$\frac{d^2 A}{d\xi^2} + \frac{2\beta 1 + \sigma_\beta \lambda^2}{3\gamma} A^3 + \frac{2\delta_u}{3\gamma} A = 0, \quad (30)$$

$$\frac{d^2 A}{d\xi^2} + \frac{2\beta 1 + \sigma_\beta \lambda^2 + 2\mu 1 + \sigma_\mu \lambda^2}{3\gamma} A^3 - \frac{2v_w}{\gamma} A = 0, \quad (31)$$

$$\frac{d^2 A}{d\xi^2} + \frac{\alpha 1 + \sigma_\alpha \lambda^2}{q} A^3 - \frac{2\Omega_w}{q} A = 0, \quad (32)$$

$$\frac{d^2 A}{d\xi^2} + \frac{2\beta 1 + \sigma_\beta \lambda^2}{3\gamma} A^3 + \frac{2\delta_w}{3\gamma} A = 0. \quad (33)$$

Для совместности системы уравнений (28)-(33) необходимо выполнение ряда условий:

$$\mu = 0, \quad v_u = v_w = v, \quad \Omega_u = \Omega_w, \quad \delta_u = \delta_w = \delta, \quad (34)$$

$$\frac{2\beta 1 + \sigma_\beta \lambda^2}{3\gamma} = \frac{2\beta 1 + \sigma_\beta \lambda^2}{3\gamma} = \frac{\alpha 1 + \sigma_\alpha \lambda^2}{q} = \frac{\alpha 1 + \sigma_\alpha \lambda^2}{q}, \quad (35)$$

$$\frac{2v}{\gamma} = \frac{2\Omega}{q} = -\frac{2\delta}{3\gamma}. \quad (36)$$

Из (35) следует $\lambda^2 = 1$, причем (35) примет вид:

$$\frac{2\beta 1 + \sigma_\beta}{3\gamma} = \frac{\alpha 1 + \sigma_\alpha}{q}. \quad (37)$$

В итоге определяются ранее неопределенные параметры δ и v :

$$v = \gamma \frac{\Omega}{q}, \quad \delta = -3\gamma \frac{\Omega}{q}. \quad (38)$$

Окончательно система уравнений (28)-(33) с учетом ограничений (34)-(38) имеет точное решение в виде стационарной уединенной волны (солитона):

$$A(\xi, t) = \frac{A_0}{\cosh \xi / \Delta} \cdot \exp \left\{ i \left[\frac{1}{4} A_0^2 \alpha 1 + \sigma_\alpha t + \frac{1}{2} p t + Q t \right] \right\}. \quad (39)$$

Координата центра солитона

$$\xi = x - \left(V_g^L + \gamma \frac{A_0^2 \alpha 1 + \sigma_\alpha}{4q} \right) t - \frac{1}{4} q p t^2 - \frac{1}{8} \gamma p^2 t^3.$$

Нелинейная фазовая модуляция

$$Q t = \frac{1}{4} \left(V_g - \gamma \frac{A_0^2 \alpha (1 + \sigma_\alpha)}{4q} \right) p t^2 + \frac{q}{12} p^2 t^3 - \frac{3\gamma}{64} p^3 t^4.$$

Скорость движения короткого векторного солитона в неоднородной среде

$$V t = \frac{d\xi}{dt} = - \left(V_g^L + \gamma \frac{\alpha (1 + \sigma_\alpha)}{4q} A_0^2 \right) - \frac{1}{2} q p t - \frac{3}{8} \gamma p^2 t^2, \text{ или, с учетом (37),}$$

$$V t = \frac{d\xi}{dt} = - V_g^L + \beta (1 + \sigma_\beta) A_0^2 - \frac{1}{2} q p t - \frac{3}{8} \gamma p^2 t^2.$$

При использовании замены $\tau = pt$ это выражение принимает вид

$$V \tau = V_0 - \frac{1}{2} q \tau - \frac{3}{8} \gamma \tau^2, \text{ где начальная скорость солитона определяется его амплитудой и нелинейными параметрами среды } V_0 = - V_g^L + \beta (1 + \sigma_\beta) A_0^2.$$

Полученное векторное солитонное решение (39) в частном случае при $\sigma_\alpha \beta = 0$ сводится к ранее найденному решению в виде коротких скалярных солитонов [3], которое при отсутствие дисперсии 3-го порядка ($\gamma = 0$) сводится к хорошо известному солитонному решению Чена [5].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 10-02-00129).

Библиографический список

1. **Воронцов, Д.Е.** Короткие векторные солитоны огибающей / Д.Е. Воронцов [и др.] // Изв. вузов. Радиофизика. 2002. Т. 45. № 7. С. 614–624.
2. Short vector soliton / E.M. Gromov [at al.] // Physics Letters A. 2001. V. 287. issue 3-4. P. 233–239.
3. **Gromov, E.M.** Propagation of short nonlinear wave packets and solitons in smoothly inhomogeneous media // Physics Letters A. 1997. V. 227. P. 67–71.
4. **Gromov, E.M.** Short intense wave packets in smoothly inhomogeneous media / E.M. Gromov, V.V. Tyutin, D.E. Vorontzov // Physics Letters A. 1999. V. 257. P. 182–188.
5. **Chen, H.H.** Nonlinear wave and soliton propagation in media with arbitrary inhomogeneities / H.H. Chen, C.S. Liu // Phys. Fluids. 1978. V.21. P. 377.

Дата поступления

в редакцию 26.01.20210

A.A. Abrashkin, E.M. Gromov, V.V. Tyutin

SHORT VECTOR ENVELOPE SOLITONS IN INHOMOGENEOUS MEDIUM

Propagation of the short vector envelope solitons in a inhomogeneous medium with linear potential in coupled third – order nonlinear Shrodinger equations frame is considered. Explicit vector soliton solution is obtained. The explicit solution for the solitons trajectories is studied. In particular cases this solitons solution can be reduced as to the short scalar soliton solution on linear inhomogeneity profile, as to well – known Chen soliton solution.

Key words: dispersion, nonlinearity, inhomogeneity, soliton, trajectory.

УДК 53

Ю.П. Бодунова¹, С.А. Коноплев², В.Б. Лисин¹**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ ВОЛН
В ПУЗЫРЬКОВОЙ СУСПЕНЗИИ**Нижегородский филиал института машиноведения РАН¹,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

Численными и аналитическими методами исследовано распространение и взаимодействие нелинейных солитоноподобных волн в жидкости с пузырьками газа, описываемые двухволновым уравнением Накорякова-Покусаева-Шрейбера (НПШ). Показано, что они существуют в окне «непрозрачности» для линейных волн и при встречном взаимодействии могут распадаться на вторичные локализованные волны.

Ключевые слова: пузырьковая суспензия, двухволновое уравнение, локализованная волна, солитон, встречное столкновение, обгонное взаимодействие.

1. Постановка задачи

Среда, в которой скорость распространения возмущений зависит от частоты осцилляции, называется диспергирующей. Таким свойством обладают, в частности, газожидкостные смеси. Простейшей моделью в данном случае является идеальная, покоящаяся, неограниченная по объему жидкость с равномерно распределенными в ней газовыми пузырьками, сохраняющими массу и сферическую форму. Пузырьки находятся на достаточном удалении друг от друга, так что непосредственные столкновения отсутствуют. Эффективные радиусы присоединенных масс жидкости меньше расстояния между пузырьками, и взаимодействие осуществляется только через поле давлений. Система уравнений, описывающих распространение возмущений в такой среде, состоит из уравнения движения смеси, уравнения непрерывности и уравнения осцилляции пузырьков [1-3]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} = 0,$$

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 = \frac{1}{\rho_1} (p_2 - p_\infty), \quad (2)$$

где u , p и $\rho = (1 - \varphi)\rho_1 + \varphi\rho_2$ – соответственно, скорость, давление и плотность смеси; ρ_1 , ρ_2 – плотности жидкости и газа; φ – объемная доля газовых пузырьков в смеси; R – радиус пузырьков, p_2 – давление газа в пузырьках; $p_\infty = \text{const}$ – давление газа вне пузырьков. Изменение давления в газовом пузырьке связано с изменением плотности смеси соотношением

$$p_2 = c_0^2 \left[1 + \frac{(\gamma + 1)}{2\varphi_0 \rho_0} \rho \right] \rho. \quad (3)$$

Здесь c_0 – скорость звука в невозмущенной смеси, а остальные обозначения совпадают с обозначениями в [1]. Система (1)-(3) может быть приведена к одному уравнению:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - c_0^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \beta \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - c_1^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \right) = \alpha \frac{\partial^2 p^2}{\partial t^2}, \quad (4)$$

где c_1 – скорость звука в чистой жидкости; β – параметр дисперсии, $\alpha = (\gamma + 1)/2\gamma\rho_0$ – коэффициент нелинейности. Уравнение (4) похоже на уравнение Буссинеска, но в отличие от него имеет четвертую производную по времени и описывает два типа волн, сильно взаимодействующих в окрестности внутреннего резонанса. Назовем его уравнением НПШ (Накорякова-Покусаева-Шрейбера), по первым буквам фамилий авторов, впервые применивших (4) для изучения распространения и взаимодействия нелинейных волн в жидкостях с газовыми пузырьками. Уравнение (4) содержит два волновых оператора со скоростями c_0 и c_1 . Основной сигнал распространяется со скоростью c_0 , а возмущения, описываемые оператором высшего порядка, выделяют предвестник сигнала, который распространяется со скоростью c_1 .

Уравнение НПШ является сложным для аналитического и численного исследования, поэтому обычно рассматривают его одноволновый вариант, сводящийся к уравнению Кортевега-де Вриза [1, 3-5]. Однако, как показывает анализ, свойства нелинейных волн, полученных в рамках одноволнового приближения, отличаются от свойств стационарных волн полного уравнения [7, 8] и, кроме того, в рамках одноволнового приближения нельзя исследовать взаимодействия локализованных волн при встречных столкновениях [9, 10]. В настоящей работе проведено исследование процессов распространения и взаимодействия локализованных волн в рамках полного уравнения НПШ.

2. Анализ дисперсионных свойств линейных волн

В линейном приближении свойства решений уравнения (4) полностью определяются его дисперсионными свойствами [6]. Подставляя в него решение в виде бегущей волны $p \propto \exp[i(\omega t - kx)]$, находим, что ее частота ω и волновое число k связаны дисперсионным соотношением (рис. 1, а):

$$\omega^2 - c_0^2 k^2 - \frac{c_0^2}{c_1^2 \omega_0^2} \omega^2 (\omega^2 - c_1^2 k^2) = 0. \quad (5)$$

Здесь $\omega_0^2 = c_0^2/\beta c_1^2 = 3\gamma\rho_0/\rho_1 R_0^2$ – квадрат резонансной частоты Миннаерта [1]. Дисперсионное соотношение можно записать также и для фазовой скорости волны $v_f = \omega/k$ (рис. 1, б):

$$\frac{v_f^2}{c_0^2} = \frac{1 - \tilde{\omega}^2}{1 - \tilde{\omega}^2 c_0^2/c_1^2}, \quad (6)$$

где введена безразмерная частота $\tilde{\omega} = \omega/\omega_0$.

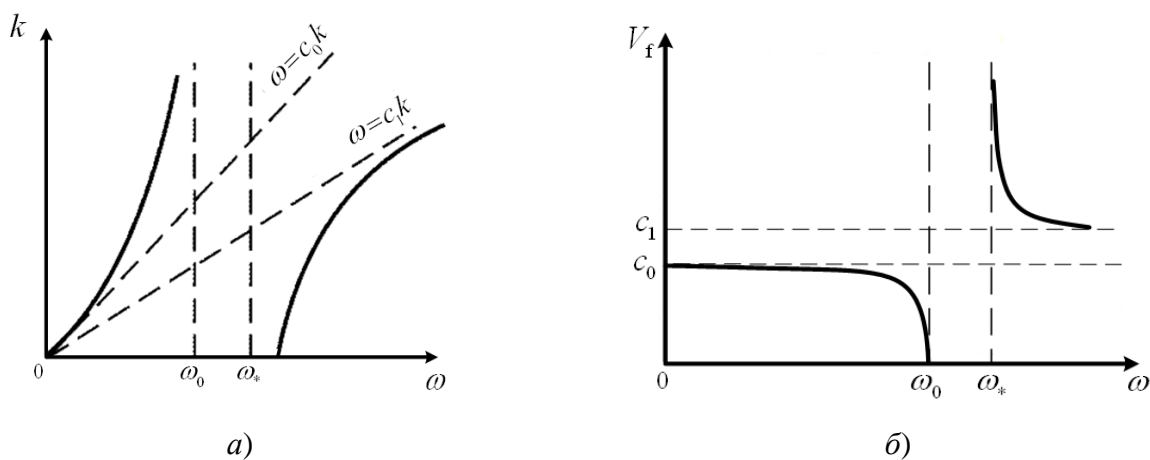


Рис. 1. Дисперсионные зависимости для суспензии:

- а – связь между волновым числом и частотой;
- б – зависимость фазовых скоростей от частоты

Из рисунков видно, что в отличие от уравнения Буссинеска, уравнение НПШ обладает двумя дисперсионными ветвями, между которыми имеется окно «непрозрачности» в интервале частот от $\omega = \omega_0$ до $\omega = \omega_* = \omega_0(c_1/c_0)$ и в интервале скоростей от c_0 до c_1 . Иначе говоря, пузырьковая суспензия является фильтром акустических волн. В диапазоне частот от $\omega = \omega_0$ до $\omega = \omega_* = \omega_0(c_1/c_0)$ формула (6) дает для скорости чисто мнимое значение, и поэтому волна давления является не распространяющейся. Фазовая скорость низкочастотной моды всегда меньше c_0 , а высокочастотной моды всегда больше c_1 . При $\tilde{\omega} \rightarrow 1$ фазовая скорость низкочастотной волны уменьшается до нуля. В этом случае каждый пузырек в системе осциллирует со своей собственной частотой, и фазовая скорость равна нулю. При частоте колебаний $\omega = \omega_*$ получаем бесконечно большое значение фазовой скорости волны скорости. При дальнейшем увеличении частоты фазовая скорость стремится к скорости волны в чистой жидкости (рис. 1, б).

3. Нелинейные уединенные волны

Будем искать решение уравнения (4) в виде стационарной волны:

$$p(x,t) = p(\xi = x - Vt). \quad (7)$$

Здесь $\xi = x - Vt$ – бегущая координата; V – скорость стационарной волны, подставив (7) в уравнение (4), последнее запишется в виде

$$p_{\xi\xi\xi\xi} V^2 (V^2 - c_1^2) + \frac{1}{\beta} p_{\xi\xi} (V^2 - c_0^2) - \frac{\alpha}{\beta} V^2 (p^2)_{\xi\xi} = 0. \quad (8)$$

Проинтегрируем (8) по переменной ξ два раза и, учитывая условия локализации волны $|p| \rightarrow 0$, $|p_\xi| \rightarrow 0$ и $|p_{\xi\xi}| \rightarrow 0$ при $\xi \rightarrow \pm\infty$, получим

$$p_{\xi\xi} + \frac{V^2 - c_0^2}{\beta V^2 (V^2 - c_1^2)} p - \frac{\alpha}{\beta (V^2 - c_1^2)} p^2 = 0. \quad (9)$$

Коэффициенты уравнения (9) являются функциями скорости стационарной волны:

$$a = \frac{V^2 - c_0^2}{\beta V^2 (V^2 - c_1^2)}, \quad b = -\frac{\alpha}{\beta (V^2 - c_1^2)}. \quad (10)$$

Тогда (9) можно записать в следующем виде:

$$p_{\xi\xi} + ap + bp^2 = 0.$$

Знак первого коэффициента меняется дважды при переходе скорости стационарной волны через значения c_0 и c_1 , а знак второго – один раз.

Структура фазовой плоскости уравнения (9) зависит от параметров V , c_0 и c_1 . На рис. 2 показаны фазовые портреты динамической системы для различных соотношений между ними.

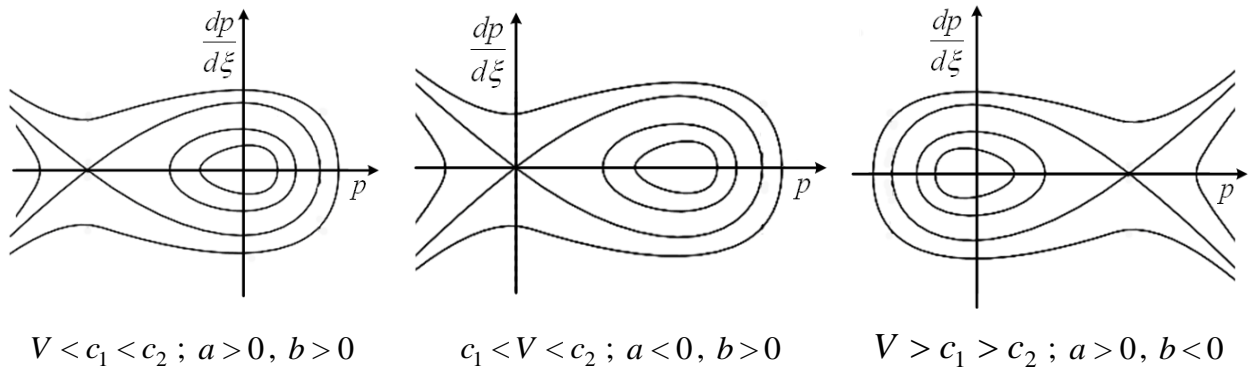


Рис. 2. Фазовые портреты динамической системы

Из рис. 2 видно, что решение в виде уединенной волны с нулевыми асимптотиками при $\xi \rightarrow \pm\infty$ возможно лишь для случая, когда ее скорость удовлетворяет условию $c_1 < V < c_2$. Это означает, что нелинейные локализованные волны могут существовать в окне «непрозрачности» для линейных возмущений (рис. 1, б).

Будем искать решение в виде локализованной волны

$$p(\xi) = \frac{A}{ch^2(\xi/\Delta)}. \quad (11)$$

Оно удовлетворяет уравнению (9), если его ширина Δ , амплитуда A и скорость V связаны двумя соотношениями

$$\Delta = 2\sqrt{\frac{\beta V^2(c_1^2 - V^2)}{V^2 - c_0^2}}, \quad A = \frac{3}{2\alpha} \left(1 - \frac{c_0^2}{V^2}\right). \quad (12)$$

Из соотношений (12) следует, что в пузырьковой суспензии стационарными могут быть только волны с положительным градиентом давления ($A > 0$), т.е. волны сжатия. На рис. 3 приведены графики зависимости ширины (рис. 3, а) и амплитуды уединенной волны (рис. 3, б) от скорости.

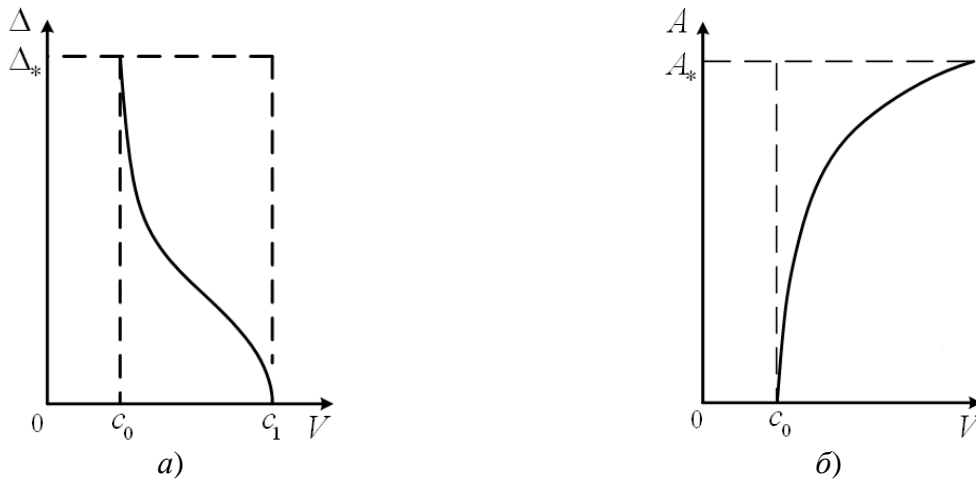


Рис. 3. Связь между параметрами уединенной волны:
а – зависимость ширины от скорости; б – зависимость амплитуды от скорости

Для анализа взаимодействия нелинейных волн удобно ввести параметр подобия

$$\sigma = \frac{\alpha A \Delta^2}{6\beta(c_1^2 - V^2)}. \quad (13)$$

Для стационарной волны (солитона) он равен единице. При $\sigma < 1$ преобладают эффекты дисперсии над нелинейностью, и начальное возмущение с течением времени расплывается, превращаясь в квазилинейный волновой пакет. При значениях $\sigma > 1$ преобладают нелинейные эффекты, и начальное возмущение по мере распространения может распасться на вторичные уединенные волны и квазилинейный волновой пакет [9, 10].

4. Результаты численного моделирования

Для численного моделирования уравнения (4) использовались неявные трехслойные разностные схемы с порядком аппроксимации $O(\tau^2, h^2)$. Реализовывалась данная схема с использованием метода прогонки. При численном моделировании начальные условия задавались в соответствии с решениями (11)-(12), а граничные условия реализовывались с помощью введения фиктивных узлов, дающих ту же точность аппроксимации, что и разностная схема. Задача решалась со следующими параметрами: шаг по координате был равен $h = 0,07$,

т.е. на длительность солитона приходилось примерно $\Delta/h \approx 9$ пространственных шагов по сетке. Шаг по времени находился из условия устойчивости разностной схемы и выбирался равным $\tau = 0,0008$, т.е. на один шаг по пространственной координате приходилось примерно девять шагов по времени.

Анализ результатов численного моделирования показал, что при $\sigma = 1$ начальное возмущение совпадает с солитоном, поэтому с течением времени оно не изменяло своей формы, распространялось со скоростью, зависящей от амплитуды, и было устойчиво относительно малых возмущений.

Эволюция слабонелинейной волны

В случае, когда $\sigma < 1$ волна не является стационарной. На рис. 4 представлены результаты численных расчетов нелинейной эволюции волны давления (рис. 4, а) и интеграла от давления (рис. 4, б) при параметре подобия $\sigma = 0,1$. В качестве начального условия в начале координат задавалось избыточное давление. При этом интеграл от давления представлял собой «ступеньку». С течением времени начальное возмущение распалось на две волны, бегущие в противоположных направлениях. Из графиков видно, как от начальной «ступеньки» давления отделяется слабое квазигармоническое возмущение, бегущее с большей скоростью.

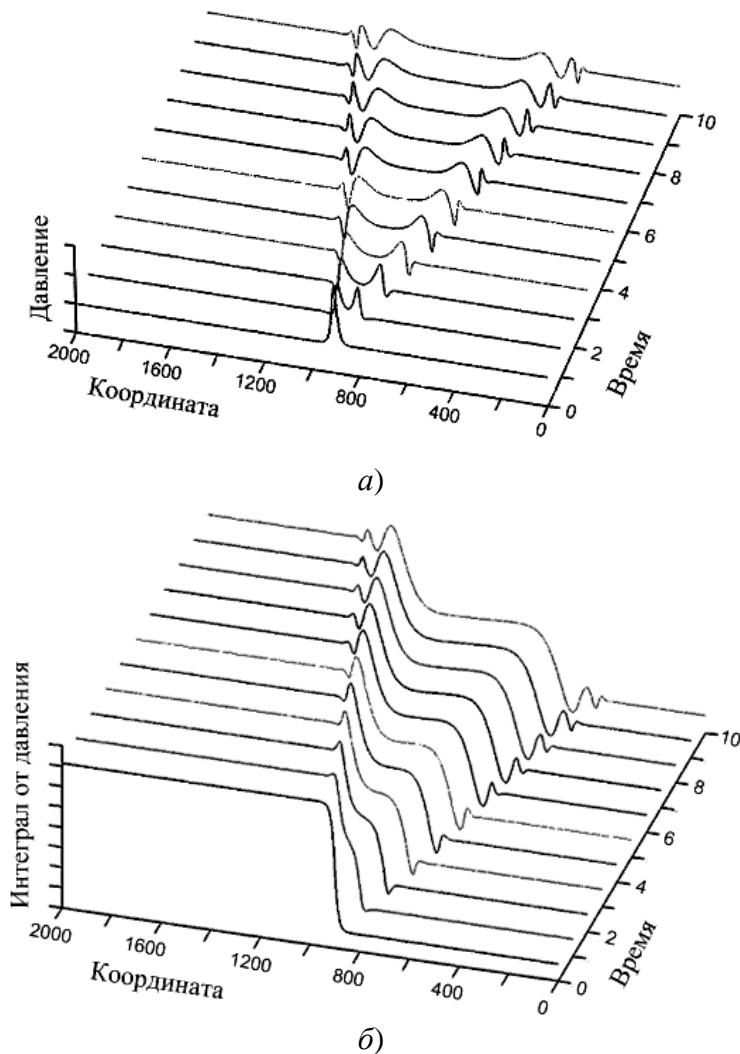


Рис. 4. Образование бегущих волн из начального возмущения давления:

а – эволюция волны давления при $\sigma = 0,1$;

б – эволюция интеграла от давления при $\sigma = 0,1$

Распад начального возмущения на солитоны

Если параметр подобия $\sigma > 1$, то начальное условие распадается на несколько уединенных волн («солитонов»). Для исследования этого процесса амплитуда начальной волны задавалась равной $A=30$, а ее ширина Δ выбиралась из условия, чтобы параметр подобия (13) изменялся в пределах $\sigma = 3, \dots, 8$. Вводился параметр, характеризующий временную длительность солитона $T_0 = \Delta/V$, в нашем случае задавалось $T_0 \approx 81\tau$, т.е. солитон смещался на расстояние, равное своей длительности за 81 шаг по времени. Шаг по времени находился из условия устойчивости разностной схемы. Абсолютные значения шагов по времени и координате были те же, что и в предыдущем случае.

Профиль начального возмущения мог задаваться в виде солитоноподобной (колоколообразной) волны (11), либо в виде полусинусоиды

$$\begin{aligned} p(x,0) &= A \sin\left(\frac{x}{\Delta}\right), & x < 100, \\ p(x,0) &= 0, & x > 100, \end{aligned} \quad (14)$$

либо в виде сглаженной полусинусоиды

$$\begin{aligned} p(x,0) &= A \left(1 - \cos\left(\frac{x}{\Delta}\right)\right), & x < 100, \\ p(x,0) &= 0, & x > 100. \end{aligned} \quad (15)$$

При задании начального условия в виде (14) на «подошве» волны, т.е. при $p=0$, имелись разрывы производных, а при начальном условии вида (15) их не было. Число солитонов, образующихся из начального возмущения, зависело от величины параметра подобия. Так, на рис. 5 показан результат нелинейной эволюции начального импульса (14), распавшегося на семь «солитонов» через промежуток времени $t_1 = 5 \cdot 10^4 \tau$.

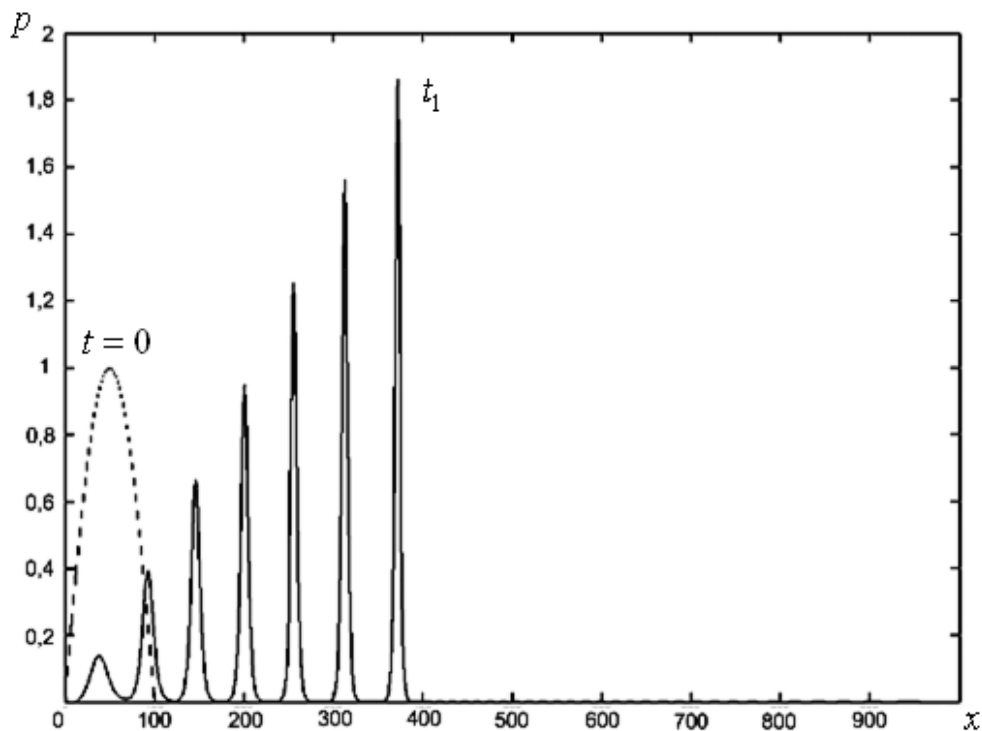


Рис. 5. Распад начального возмущения на семь солитонов

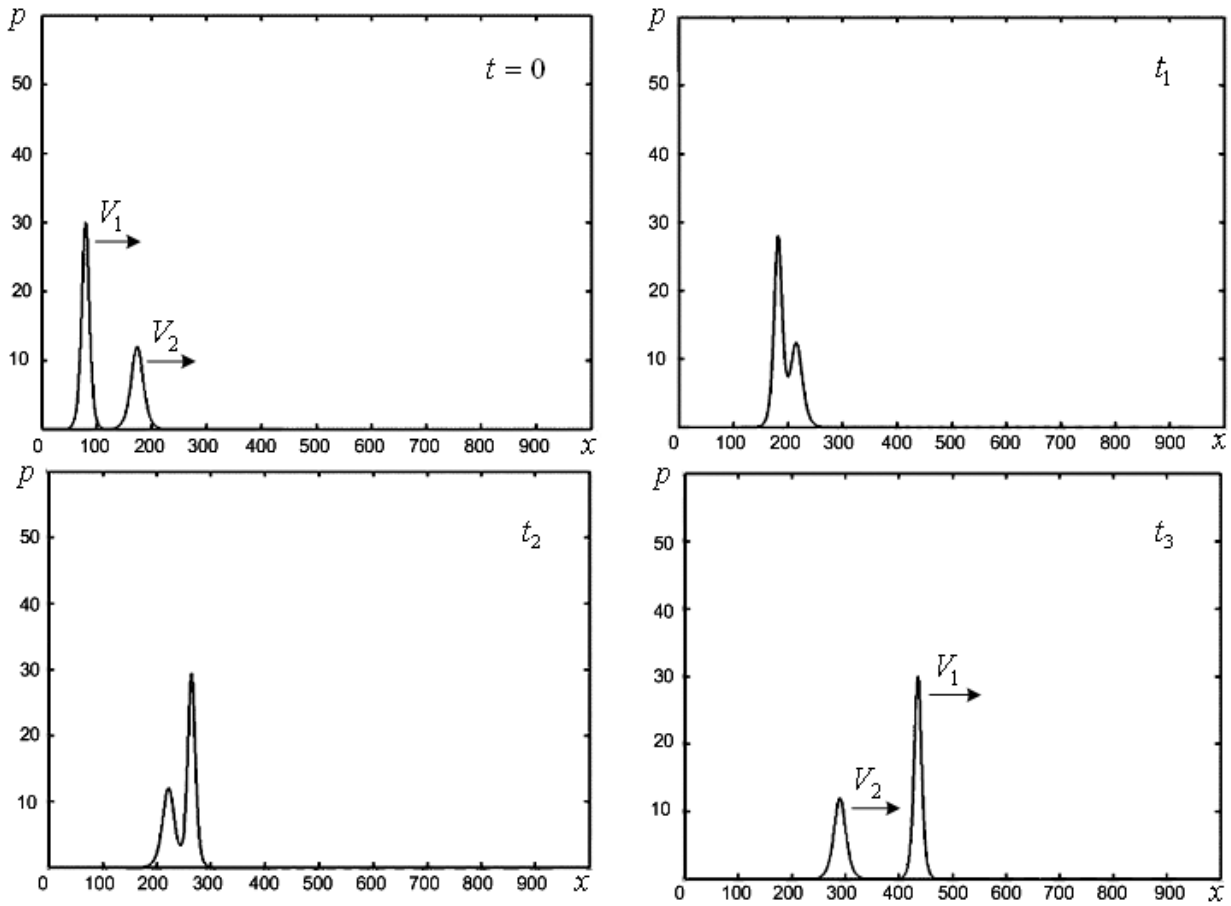


Рис. 6. Обгонное взаимодействие локализованных волн

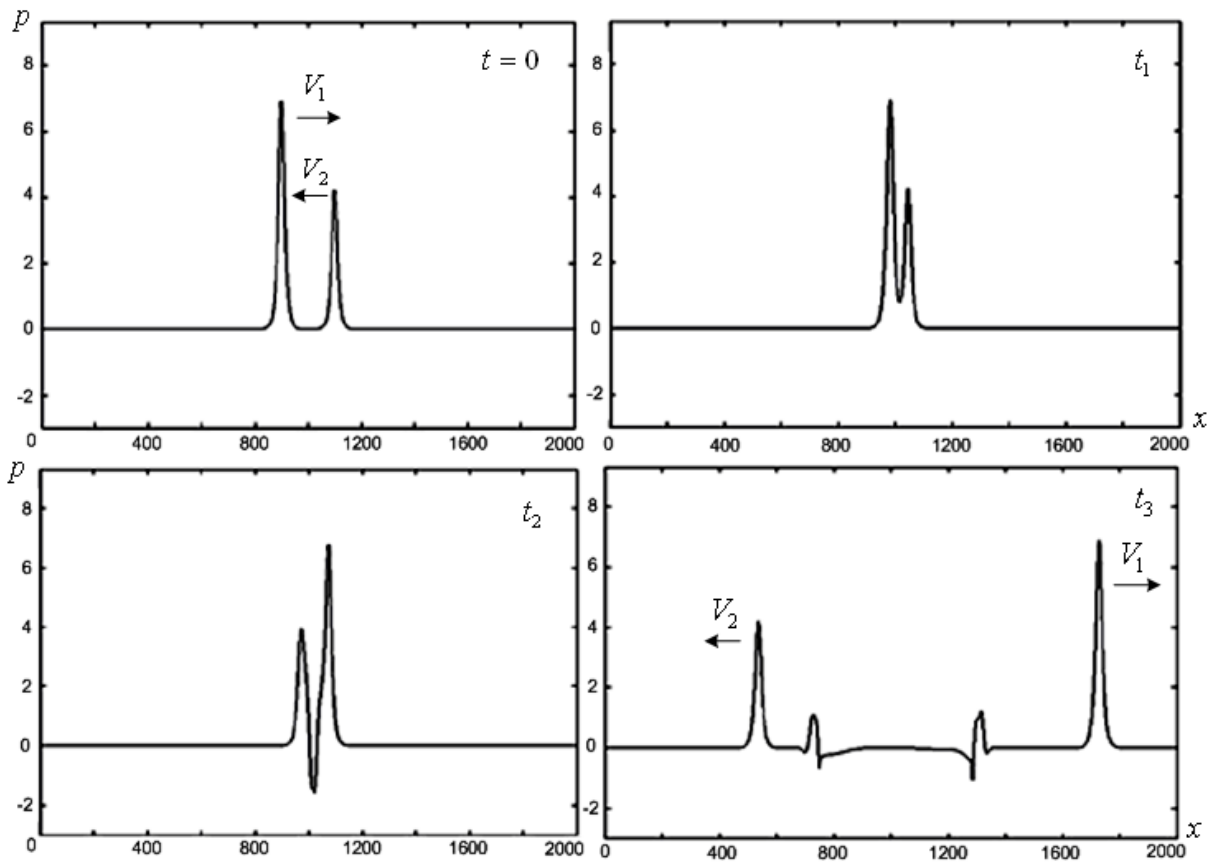


Рис. 7. Встречное взаимодействие уединенных волн

Взаимодействие уединенных волн

Для исследования взаимодействия волн начальные условия задавались в виде двух солитонов (11) с различными амплитудами, а их центры масс были разнесены на расстояние $\Delta x = |\mu_2 - \mu_1|$:

$$p_0(x, t) = A_1 ch^{-2} \left(\frac{x - V_1 t - \mu_1}{\Delta_1} \right) + A_2 ch^{-2} \left(\frac{x - V_2 t - \mu_2}{\Delta_2} \right). \quad (16)$$

Здесь $\mu_{1,2}$ – координаты центров масс солитонов при $t = 0$. Шаги по времени и координаты были выбраны следующим образом: $h = 0,07$, $\tau = 0,0008$. Величины амплитуд начальных возмущений были равны $A_1 = 30$, $A_2 = 12$, а их ширина выбиралась так, чтобы параметры подобия обеих волн были равны единице. На рис. 6 представлены результаты моделирования обгонного взаимодействия двух солитонов.

Из рис. 6 видно, что после выхода из области взаимодействия солитоны сохраняют свою индивидуальность, что находится в полном соответствии с теорией солитонов.

Однако нелинейные волны уравнения (9) обладают свойствами, отличающими их от классических солитонов. А именно, при встречных столкновениях они могут расщепляться, порождая вторичные локализованные волны, если их амплитуды превышают некоторое критическое значение. Так, на рис. 7 приведены результаты численных расчетов взаимодействия однополярных уединенных волн при встречных столкновениях. Начальные скорости солитонов равнялись $V_1 = -2$, и $V_2 = 2,2$. Из рис. 7 видно, что первичные локализованные волны после взаимодействия расщеплялись, порождая вторичные локализованные волны меньшей амплитуды.

Заключение

Проведенные исследования показали, что солитоноподобные волны в жидкости с пузырьками газа, описываемые двухволновым уравнением (4), могут существовать только в окне «непрозрачности» для линейных волн. Во многом они похожи на солитоны, описываемые уравнением Кортевега-де Вриза, и однако при взаимодействиях они проявляют новые свойства, отличающие их от классических солитонов.

Авторы признательны А.И. Потапову за помощь в постановке задачи и обсуждении полученных результатов. Работа выполнена при финансовой поддержке грантом РФФИ (проект, 09-02-97053-р_поволжье).

Библиографический список

1. **Накоряков, В.Б.** Волновая динамика газо- и парожидкостных сред / В.Б. Накоряков, Б.Г. Покусаев, И.Р. Шрейбер. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 249 с.
2. **Наугольных, К.А.** Нелинейные волновые процессы в акустике / К.А. Наугольных, Л.А. Островский. – М.: Наука, 1990. – 239 с.
3. **Нигматулин, Р.И.** Динамика многофазных сред / Р.И. Нигматулин. – М.: Наука, 1987. Т. 2. – 360 с.
4. **Ким, Д.Ч.** Физическая природа акустических солитонов в жидкости с распределенными пузырьками газа / Д.Ч. Ким // ДАН, 2008. Т. 418. Вып. 5. С. 619–623.
5. **Ким, Д.Ч.** К теории акустических солитонов в жидкости с распределенными пузырьками газа / Д.Ч. Ким // ЖТФ, 2007. Т. 77. Вып. 6. С. 8–12.
6. **Островский, Л.А.** Введение в теорию модулированных волн / Л.А. Островский, А.И. Потапов. – М.: Физматлит, 2003. – 400 с.
7. **Алексеев, В.Н.** Распространение стационарных звуковых волн в пузырьковых средах / В.Н. Алексеев, С.А. Рыбак // Акуст. журн. 1995. Т. 41. Вып. 5. С. 690–698.
8. **Potapov, A.I.** Normal waves in a nonlinear dispersive medium / A. I. Potapov, Yu.P. Bodunova // Nonlinear Dynamics / Proc. of the Second Intern. Conference. – Kharkov National Technical University. 2007. P. 231–236.

9. **Коноплев, С.А.** Численное моделирование взаимодействия нелинейных уединенных волн в среде с пространственной дисперсией // Проблемы механики и акустики сред с микро- и наноструктурой: НАНОМEX-2009: тез. докл. Первой Всероссийской конференции / НГТУ. – Н. Новгород. 2009. С. 116–124.
10. **Бодунова, Ю.П.** Распространение и взаимодействие нелинейных волн в среде с микроструктурой / Ю.П. Бодунова, С.А. Коноплев // Проблемы механики и акустики сред с микро- и наноструктурой: НАНОМEX-2009: тез. докл. первой Всероссийской конференции / НГТУ. – Н. Новгород. 2009. С. 111–112.

*Дата поступления
в редакцию 26.01.2010*

U.P. Bodunova, S.A. Konoplev, V.B. Lysin

INTERACTION OF NONLINEAR LOCALIZED WAVES IN THE BUBBLE SUSPENSION

Soliton-like waves propagation and interaction in a fluid with bubbles of the gas, which described by two wave NPSH-equation are investigated by numerical and analytical methods. It is shown, that they exist in a window of "blackness" for the linear waves and at head-on interaction they can split-up on the secondary solitary waves.

Key words: bubble suspension, two wave equation, localized wave, soliton, head-on collision, overtaking interaction.

УДК 551.466.6

Г.В. Шевченко¹, А.Г. Чернов¹, П.Д. Ковалев¹, И.И. Горин²**РЕЗОНАНСНЫЕ КОЛЕБАНИЯ В ЗАЛИВАХ И БУХТАХ:
НАТУРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток²,
Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск¹

В сентябре–ноябре 2008 г. в бухте Алексеева на о. Попова (экспериментальная база ТОИ ДВО РАН) на двух донных станциях, установленных на внутренней и прилегающей акваториях, исследованы волновые процессы. Спектральный анализ материалов выявил наличие двух хорошо выраженных пиков на внутренней станции на периодах 10,5 и 2,7 мин, обусловленных резонансными колебаниями в бухте. Методами численного моделирования определена пространственная структура этих колебаний, отвечающих нулевой и первой собственным модам бассейна. Для нулевой моды, период которой соответствует диапазону периодов цунами, показана возможность многократного возрастания высоты волны в удаленной части бухты по сравнению с внешним шельфом. Данный пример подтверждает возможность резонансного усиления цунами в различных бухтах подобного типа.

Ключевые слова: измеритель придонного гидростатического давления, длинные волны, цунами, бухта, резонансные колебания, численное моделирование

Несмотря на большое число работ по исследованию собственных колебаний в заливах и бухтах, из-за большого разнообразия форм колебаний многие особенности их формирования изучены еще недостаточно. В частности, это относится к бухтам с резкими изменениями глубины в районе входа. Примером такого бассейна является бухта Алексеева на о. Попова в районе г. Владивосток. Она сравнительно простой формы, но имеет особенности рельефа в горловине, поэтому представляет собой подходящий объект для исследования. Цунами в районе г. Владивосток (мыс Басаргина, бухта Тихая) в мае 1983 г. достигали высоты 4–5 м [6, 7]. На некоторых участках побережья о. Русский высота заплесков достигала 4 м [3]. Однако в обзоре материалов обследования этих участков подобных высот не отмечалось [6]. Топография береговой черты островов Русский и Попова очень изрезана. Из-за наличия бухт различной конфигурации в некоторых из них периоды резонансных колебаний (сейш) могут оказаться близкими к периодам цунами, подходящих из открытого моря. В этом случае возможны локальные усиления волн, многократно увеличивающие их воздействие на береговые объекты. Однако большие заплески на необжитых участках могли не попасть в поле зрения специалистов, так как первостепенный интерес представляет ущерб хозяйственным объектам.

Штормовые нагоны – это крупномасштабные подъемы уровня, обусловленные падением приземного атмосферного давления и действием касательного напряжения ветра (в случае его ориентации в сторону берега) при прохождении над исследуемой областью циклона или тайфуна. Сгонно-нагонные колебания уровня моря в данном районе достаточно велики, на отдельных участках побережья они также могут значительно усиливаться за счет возбуждения сейш в заливах и бухтах.

Данные вопросы для островов Попова и Русский исследованы слабо, хотя проблема усиления колебаний в бухтах различной конфигурации по сравнению с внешним шельфом представляет значительный научный интерес и имеет выраженный прикладной аспект, связанный с оценкой риска воздействия опасных явлений на участки побережья. Организация натурных экспериментов с прямым измерением характеристик длинноволновых процессов внутри и вне изучаемого бассейна – важнейший элемент при решении подобных задач, осо-

бенно в сочетании с численным моделированием распространения волн, выполняемым с учетом реального рельефа дна и топографии береговой черты.

В связи с этим Институт морской геологии и геофизики (ИМГиГ) ДВО РАН при содействии Тихоокеанского океанологического института (ТОИ) ДВО РАН организовал пробный эксперимент с постановкой в бухте Алексеева на о. Попова двух автономных донных регистраторов волнения и уровня (АРВ), разработанных СКТБ ЭлПА (г. Углич) совместно с сотрудниками Нижегородского государственного технического университета [5]. Выбор места обусловлен тем, что это хороший пример бухты с широким входом и сравнительно простой топографией, на котором можно отчетливо показать эффекты, связанные с усилением колебаний на резонансных частотах. Кроме того, при проведении подобных экспериментов необходимо учитывать такие обстоятельства, как наличие плавсредств для постановки и подъема приборов, а также обеспечение их безопасности. Здесь расположена экспедиционная база ТОИ, благодаря помощи сотрудников которой были решены вопросы организации эксперимента и сохранности датчиков. Помимо этого, в бухте Алексеева ранее были выполнены детальные промерные работы, что позволяло использовать результаты батиметрической съемки для численного моделирования волновых процессов.

Записи продолжительностью около двух месяцев позволили детально рассмотреть усиление длинноволновых колебаний в бухте по сравнению с внешним шельфом, характер изменчивости спектра длинных волн при различных погодных условиях и таким образом оценить возможное влияние резонансных условий объекта при воздействии опасных явлений.

1. Организация эксперимента и характеристика полученных материалов

Бухта Алексеева расположена в северо-западной части о. Попова, представляет собой бассейн почти прямоугольной формы протяженностью около 1600 м, максимальной шириной около 600 м. Широкий вход ориентирован в Амурский залив, глубины в кутовой части сравнительно небольшие (3–8 м), но резко увеличиваются по мере приближения к горловине. Для водоемов подобной формы характерно интенсивное проявление нулевой моды собственных колебаний, четверть длины которой укладывается в бухте, а узловая линия находится вблизи входа [8, 9]. Одноузловая продольная сейша, обычно играющая важную роль в формировании колебаний уровня в заливах, вряд ли может быть существенной в данном случае из-за слабого отражения на открытой границе.



Рис. 1. Батиметрическая карта района проведения работ.

Врезка – батиметрическая карта бухты Алексеева:

♦ – размещение автономных регистраторов волнения и уровня

Инструментальные измерения начались 18 сентября 2008 г. и производились с частотой 1 Гц, погрешность составляла 6 см. Приборы были выставлены при помощи моторной лодки в двух точках: С – в кутовой части ($42^{\circ}59,0'$ с.ш., $131^{\circ}43,7'$ в.д.) на глубине около 5 м; F – на внешнем шельфе, на некотором удалении от открытой границы бухты ($42^{\circ}59,4'$ с.ш., $131^{\circ}42,8'$ в.д.) на глубине около 25 м (рис. 1). Расстояние между станциями составило около $0,9'$ по долготе и $0,4'$ по широте, или примерно 1136 м по прямой. Приборы подняты 23 ноября 2008 г. и заменены новыми для продолжения исследований в зимних условиях.

Таким образом, получены записи волновых процессов продолжительностью чуть более двух месяцев осеннего сезона, для которого типично усиление вариаций приземного атмосферного давления и возрастание скорости ветра. Поэтому можно было рассчитывать на выявление интересных особенностей волнового режима в бухте и на подходах к ней в различных погодных условиях.

Основное внимание в данной работе уделено длинноволновым процессам, в частности резонансным колебаниям уровня в бухте – сейшам. Для их выделения из материалов измерений с дискретностью 1 с, содержащих ветровое волнение, данные осреднялись с временным окном 1 мин и весовыми коэффициентами фильтра Кайзера–Бесселя. Это позволяет уменьшить погрешность одного отсчета до $0,1$ см и снизить влияние волнения, которое может быть весьма значительным при стандартном прямоугольном фильтре. Исследованию характеристик ветрового волнения внутри и вне бухты, которое возможно на основе измерений придонного давления [2], предполагается посвятить отдельную работу.

В записях доминировали приливные колебания уровня, хотя в данном районе они сравнительно невелики, их характерный размах составлял 25–30 см. Устойчивая регистрация приливных вариаций, а также надежная оценка гармонических постоянных основных приливных волн, подтверждаемая сравнением с известными оценками для этого участка, являются индикатором высокого качества исследования. В остаточных рядах, полученных путем вычитания из исходных значений предвычисленного прилива, периодическая компонента не проявляется (рис. 2).

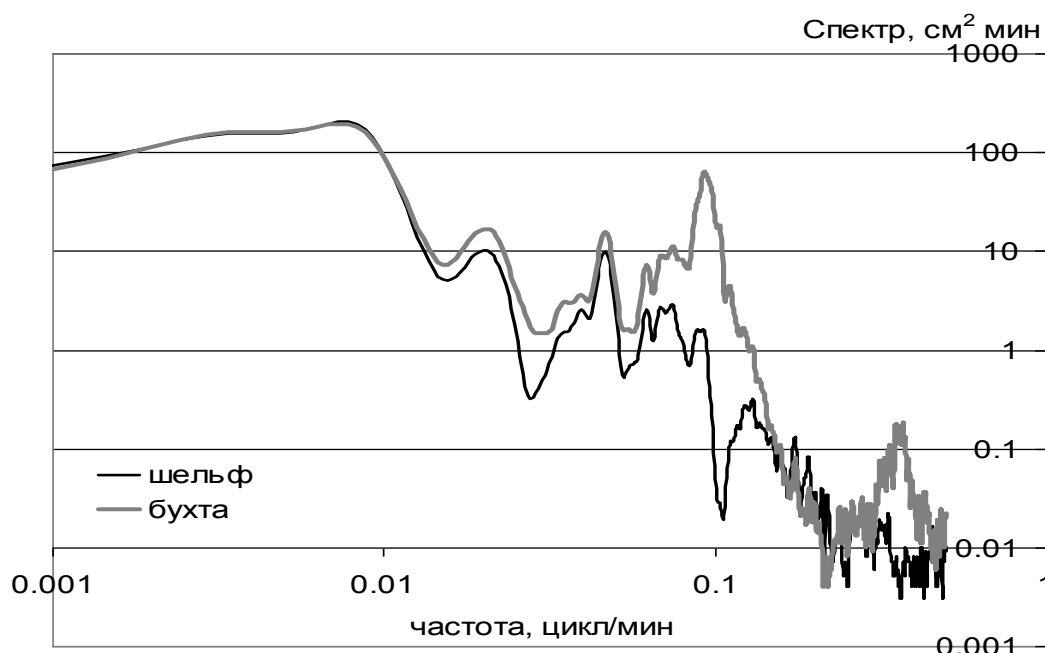


Рис. 2. Графики спектральной плотности колебаний на станциях С (1) и F (2), рассчитанные по отрезкам записи в спокойную погоду 20–21 октября 2008 г. и в штормовую 17–18 ноября 2008 г. Число степеней свободы равно 22

На фоне приливов не наблюдается сколько-нибудь значимых сгонно-нагонных вариаций уровня, очевидно, погодные условия в период измерений были стабильны, над районом

не проходили глубокие циклоны или тайфуны, которые вызвали бы существенный штормовой нагон. Наиболее выраженные отклонения волнового режима от стационарного наблюдались во второй декаде октября.

2. Анализ материалов натуральных экспериментов

Из записей непериодических колебаний уровня моря для детального спектрального анализа отобраны пять синхронных отрезков продолжительностью 2 сут.: за 20–21 сентября, 7–8, 20–21 и 22–23 октября, 17–18 ноября. Интенсивность волновых процессов в эти периоды заметно различалась, что, скорее всего, обусловлено погодными условиями, так как основным источником непериодических колебаний является воздействие на морскую поверхность переменного приземного атмосферного давления и напряжения ветра. По этим отрезкам рассчитывались спектральные и взаимоспектральные характеристики записей. Рассмотрим более подробно две ситуации: 20–21 октября и 17–18 ноября, когда различия спектральных характеристик проявились в наибольшей степени.

Первая из них отвечала самому низкому уровню энергии колебаний в диапазоне периодов проявления цунами (от 2 мин до 2 ч), которому в данной работе уделялось основное внимание. Вероятно, это было обусловлено спокойными погодными условиями, хотя измерения метеорологических параметров не делались, и данное утверждение не является точным. Расчеты производились по отрезку длительностью 8 ч с половинными сдвигами, число степеней свободы 22.

Значения спектральной плотности по измерениям внутри бухты существенно выше, чем на более мористой станции. В наибольшей степени это проявилось на периодах 2,5–3 мин, 8–12 мин и 25–60 мин. Особенно значимое различие отмечено на периодах наиболее выраженного пика (10,5 мин) и двойного пика в высокочастотной части спектра (2,6–2,8 мин). Примечательно, что на периоде 10,5 мин в спектре колебаний на удаленной станции также отмечен слабый максимум, при этом уже на периоде 10 мин – глубокий минимум. Скорее всего, последний экстремум отвечает нулевой моде собственных колебаний бухты, он может иметь отклик в прилегающей акватории – аналогичный эффект наблюдался, например, в Малокурильской бухте на о. Шикотан [1]. Причем в бассейне с широким входом, к которому относится рассматриваемый объект, это особенно вероятно. Для собственных мод, имеющих узловые линии внутри бухты, связь с открытым морем обычно отсутствует, и на периоде максимума около 2,7 мин на внешней станции нет никакого, даже слабого, пика.

В спектрах колебаний на обеих станциях имеется также хорошо выраженный максимум с периодом около 20,5 мин. Этот период слишком большой, чтобы быть связанным с собственными колебаниями бухты. Вероятно, он зависит от резонансных условий прилегающего участка шельфа (так называемой шельфовой сейшей, когда стоячие колебания образуются в результате отражения волн от берега и кромки шельфа).

На внешней станции отмечен хорошо выраженный пик с периодом около 48 мин, однако внутри бухты, где уровень энергии колебаний существенно выше в диапазоне 25–60 мин, данный максимум выделяется в меньшей степени. Скорее всего, он связан с одноузловой поперечной сейшей Амурского залива.

Можно также отметить слабый максимум с периодом около 2 ч.

Функция когерентности имеет высокие значения в диапазонах периодов 100–120; 20–21; 10,5–16; 6–8 и 3,5–4 мин (рис. 3). Весьма примечателен резко выраженный минимум на периодах 9–10 мин, на котором было выявлено существенное различие в спектрах колебаний на разных станциях.

Фазовый спектр на периодах более 20 мин практически не имеет наклона, который бы указывал на распространение длинных волн от внешней станции к внутренней (рис. 3). Слабый наклон отмечен на периодах от 10 до 20 мин, но оценить по нему фазовую скорость затруднительно, так как когерентность на данном участке недостаточно высокая. На периоде

главного максимума (10,5 мин) фаза составляет около $7\pi/4$, затем на периоде 10 мин скачком меняется на π , после чего скорость распространения длинных волн несколько увеличивается.

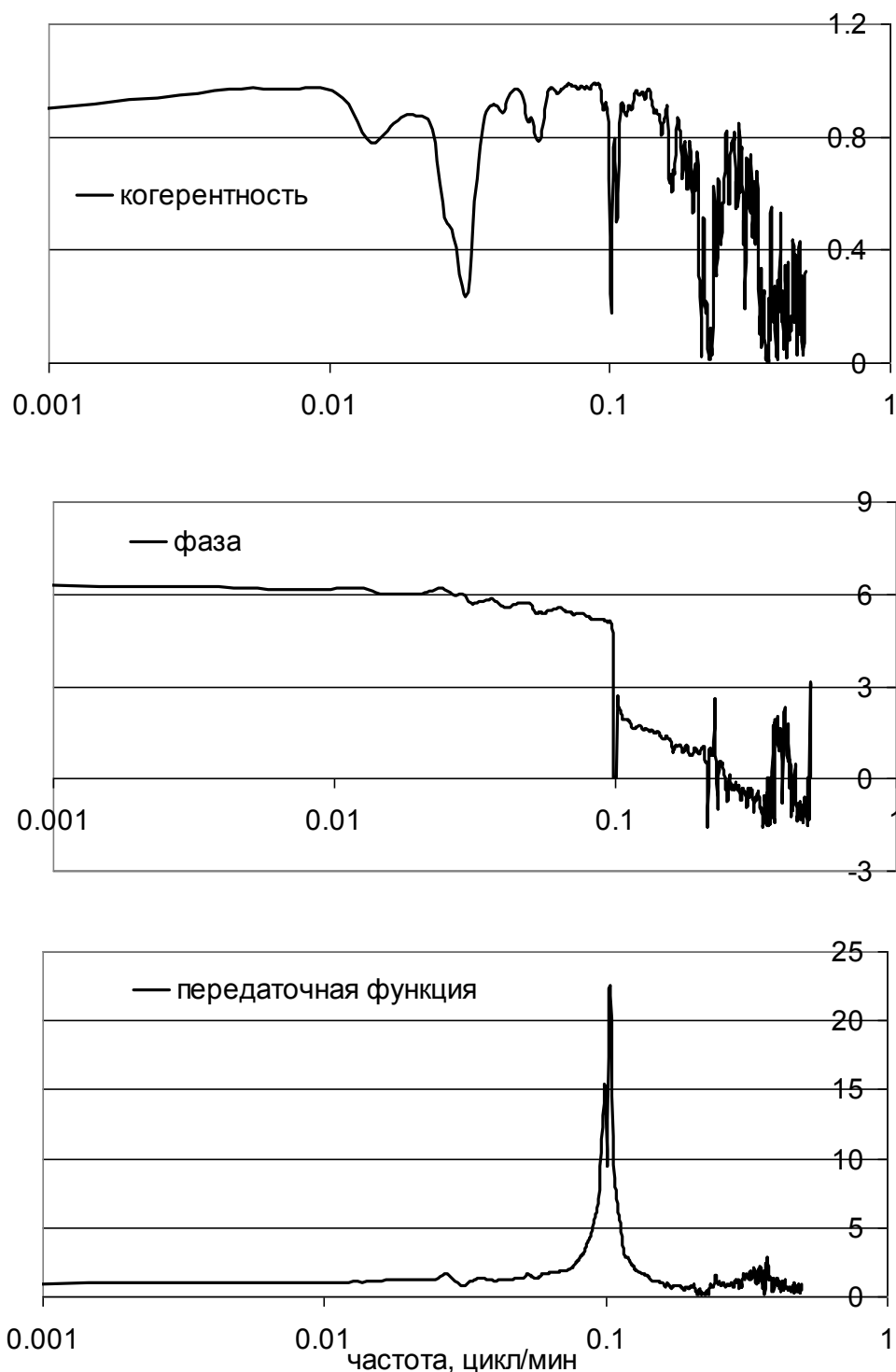


Рис. 3. Когерентность фазовый сдвиг (в радианах) и передаточная функция от станции F к C в спокойную погоду 20–21 октября 2008 г

Наибольший интерес представляет передаточная функция, отражающая среднее по анализируемой записи изменение амплитуды колебаний на внутренней станции по сравнению с внешней. Здесь резко выделяется двоянный максимум на периодах около 10,5 и 10 мин, от-

вечающий нулевой моде собственных колебаний бухты Алексеева. Усиление на периоде главного максимума очень велико, примерно вдвое выше, чем на периоде основной моды собственных колебаний Малокурильской бухты [1]. Здесь рельефно проявляются различия между нулевыми модами колебаний для бухт с узким и широким входами. Для случая узкого входа колебания в бухте определяются соотношением между площадью ее зеркала и поперечным сечением в горловине, и пространственные вариации амплитуды на внутренней акватории сравнительно невелики. Для бухт с широким входом (а именно к таким относится бухта Алексеева) характерно значительное увеличение амплитуды колебаний по мере удаления от открытой границы внутрь бассейна, и в его кутовой части возможно резкое усиление цунами.

На периодах, отвечающих максимумам в спектре на внутренней станции с периодами 2,6–2,8 мин, коэффициенты усиления составляли 2,9 и 3,2 соответственно.

При усилении колебаний в штормовую погоду 17–18 ноября наблюдались заметные различия спектральных и взаимоспектральных характеристик записей (рис. 2, б, 3). Значительно вырос уровень энергии колебаний на обеих станциях, в особенности на периоде высокочастотного максимума на С – в данном случае выделяется один максимум на периоде около 2,7 мин, и значение спектральной плотности в 30 раз выше, чем при спокойной погоде. Для сравнения: на периоде 10,5 мин отмечено увеличение примерно в шесть раз.

На периодах более 20 мин различие в спектрах между ближней и удаленной станциями, по сравнению с рассмотренным выше случаем, значительно уменьшилось, при этом максимум на периоде около 48 мин стал более выраженным, в особенности внутри бухты. Максимум с периодом около 20,5 мин, как и ранее, четко выделяется на спектрах обеих станций.

Значения функции когерентности значительно возросли при штормовых условиях, особенно в низкочастотной области, где по данным на 20–21 октября наблюдался значительный минимум (рис. 3). Резко выраженные минимумы когерентности сохранились, но стали более узкими (периоды 4,5–5; 9–10 и 30–40 мин).

Существенно изменился по сравнению со спокойной погодой и фазовый спектр (рис. 3). Заметный наклон отмечен на периодах от 10 до 60 мин, где ранее практически отсутствовал. Несмотря на провал функции когерентности в отмеченном выше диапазоне периодов, оцененная скорость распространения волн между станциями по формуле

$$c = L (\omega_2 - \omega_1) / (\varphi_2 - \varphi_1),$$

где L – расстояние между станциями (1136 м), φ_i и ω_i – значения фазы и частоты для двух точек фазового спектра. Для указанного интервала получаем значение фазовой скорости около 14,4 м/с, что отвечает скорости длинных волн в акватории со средней глубиной около 20 м, это неплохо согласуется с реальными глубинами в изучаемом районе. На периоде около 10 мин сдвиг фаз резко изменяется и становится равным нулю, затем также резко возрастает до $3\pi/4$, и далее наклон линии фазового спектра заметно увеличивается, что отвечает уменьшению фазовой скорости до 13,6 м/с. Эти различия могут быть обусловлены длинноволновой дисперсией, а также, что на наш взгляд более вероятно, вариациями направления распространения длинных волн из области открытого моря в сторону бухты при спокойных и штормовых условиях, особенно заметными в диапазоне периодов 3–10 мин (исключая неустойчивые значения фазового сдвига в диапазоне периодов, отвечающего провалу функции когерентности). На периоде высокочастотного максимума на внутренней станции сдвиг фаз составляет $\pi/2$.

Структура передаточной функции практически не изменилась по сравнению со спокойными погодными условиями, лишь немного увеличилось значение коэффициента усиления на периоде главного максимума (рис. 3).

В остальных рассмотренных ситуациях спектральные характеристики занимали промежуточное положение. Так, значения функции когерентности по измерениям 20–21 сентября и 22–23 октября были выше, чем 20–21 октября, но ниже, чем 17–18 ноября. Наклоны фазового спектра при спокойной погоде также были наименьшими, а при штормовой – наиболее крутыми.

3. Численное моделирование длинноволновых колебаний

Для изучения пространственной структуры резонансных колебаний в бухте Алексеева было выполнено численное моделирование длинноволновых процессов на всей акватории Амурского залива. Необходимость этого связана с тем, что при исследовании нулевой моды собственных колебаний нельзя ограничиться моделированием волновых процессов только во внутренней акватории. Помимо этого значительный интерес представляла интерпретация натуральных наблюдений резонансных пиков на периодах 20,5 и 8 мин. Использовалась численная модель на основе уравнений мелкой воды, записанных в декартовых координатах [4]:

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0, \quad (3)$$

где η – смещение уровня моря; D – полная глубина бассейна; g – ускорение силы тяжести; n – коэффициент шероховатости дна. В расчетах принималось значение $n = 0,0025 \text{ м}^{-1/3}\text{с}$, характерное для естественного дна (песок, мелкая галька). M и N – компоненты расхода воды (интегрированного по глубине) вдоль широтного и меридионального направлений соответственно:

$$M = u(h + \eta), \quad (4)$$

$$N = v(h + \eta), \quad (5)$$

где u и v – компоненты горизонтальных скоростей частиц воды.

Использовалась конечно-разностная реализация данной модели, входящая в состав исследовательского комплекса NAMI-DANCE [4], предназначенного для моделирования цунами и являющегося модификацией известного японского кода TUNAMI. Комплекс был доработан для решения задач моделирования свободных колебаний в заливах и бухтах.

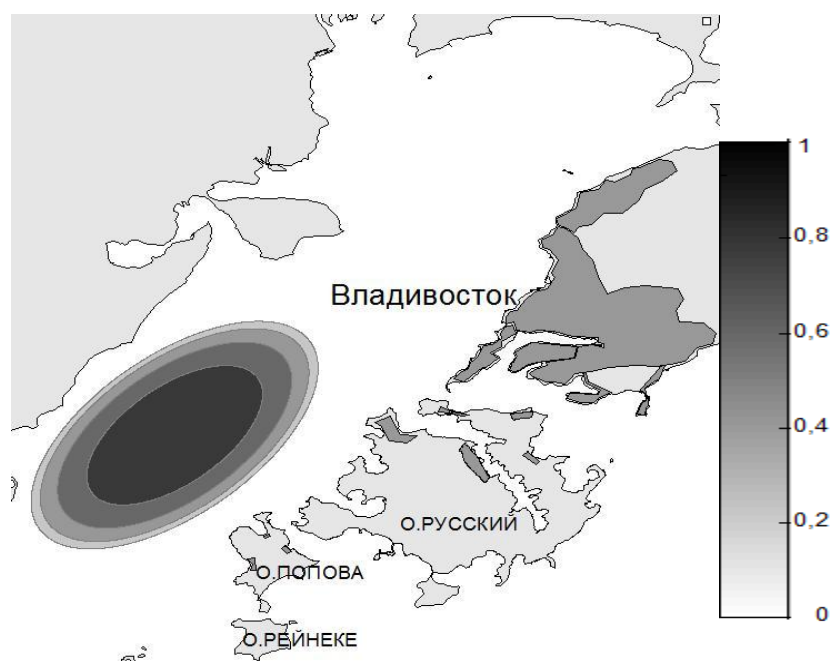


Рис. 4. Начальное возмущение при моделировании длинноволновых процессов в исследуемом районе

Для расчетов использовался метод вложенных сеток, внутри бухты пространственный шаг составлял 25 м. Надежно определить характеристики расчетных волн можно для периодов, превышающих тот, при котором шаг сетки равен половине длины волны при минимальной глубине моря 0,5 м, что составляет около 20 с. Для моделирования волновых движений в Амурском заливе использовался шаг 150 м. В качестве начальных условий для модели задавалось положительное возвышение водной поверхности эллиптического типа:

$$\eta(x, y, t = 0) = H \sqrt{1 - \frac{x^2}{(x_0 - d_1)^2} - \frac{y^2}{(y_0 - d_2)^2}}, \quad (6)$$

расположенное в центре Амурского залива с максимальной высотой 0,5 м (рис. 4). На морских границах (проливах) ставилось условие свободного ухода, точное в рамках линейной теории мелкой воды, простейшей геометрии и отсутствия диссипации:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \sqrt{gh} \frac{\partial \eta}{\partial n} = 0. \quad (7)$$

Пространственная производная от уровня вычисляется по нормали к внешней границе расчетной области. На береговой границе (на глубине 0,5 м в последних морских точках) задавалось условие полного отражения:

$$u = 0 \text{ или } \frac{\partial \eta}{\partial n} = 0. \quad (8)$$

Временной шаг для расчета выбирался из условия Куранта для конечно-разностных схем:

$$\frac{\Delta x}{\Delta t}, \frac{\Delta y}{\Delta t} > \sqrt{gh_{\max}}, \quad (9)$$

где Δx и Δy – шаг расчетной сетки по осям x и y (в наших расчетах расстояния между узлами сетки по оси x и y одинаковые); Δt – шаг по времени; h_{\max} – максимальная глубина бассейна. Была задана равномерная сетка цифровых мареографов – точек, в которых сохранялось возвышение свободной поверхности воды η на каждом шаге по времени. Мареографы устанавливались на глубинах более 2 м. Необходимо отметить, что глубины в бухте Алексеева, несмотря на ее симметричную форму, распределены неравномерно, и северо-восточная часть имеет меньшую глубину, чем юго-западная. Из-за этого на рисунках с пространственным распределением спектральных амплитуд наблюдается некоторое смещение пучностей к юго-западному берегу бухты.

Расчет проводился на 12 ч реального времени. С целью уменьшения влияния начального источника из расчетных волнограмм удалялась «первая волна», рассматривались только хвостовые отрезки записей. Записи цифровых мареографов приводились к секундной дискретности, и для каждой рассчитывалась оценка спектральной плотности. Размер окна выбирался исходя из гипотезы об ожидаемых периодах собственных колебаний. Для представленных результатов размер окна составлял 2048 с (~34 мин). Оценки сравнивались с результатами спектрального анализа натуральных данных в соответствующих точках (F и C). По результатам численного моделирования также были выделены резонансные пики в спектре на периодах около 10 и 2,7 мин, для наиболее наглядного представления пространственной структуры этих собственных мод вычислялась средняя спектральная амплитуда

$$\bar{A}^2(\omega_j) = \int_{\omega_1}^{\omega_2} S(\omega) d\omega, \quad (10)$$

где $S(\omega)$ – рассчитанная спектральная плотность; ω_j – резонансная частота; $\omega_{1,2} = \omega_j \pm \Delta$ – окрестность пика. Интегрирование проводилось численно, методом трапеций по пяти соседним точкам.

Пространственное распределение средней амплитуды колебаний для основного пика с периодом 10,5 мин показано на рис. 5, а. Из рисунка видно, что оно хорошо согласуется с представлениями о структуре колебаний нулевой моды резонансных колебаний в бухте с широким входом – узловая линия находится вблизи открытой границы (несколько смещена во внешнюю часть акватории), станция F – на незначительном удалении от нее. Наблюдается значительная интенсивность колебаний во внутренней части бухты. Именно здесь можно ожидать наиболее резкого роста высот волн цунами, если их период будет близок к 10 мин, что весьма вероятно. Таким образом, экспедиционная база ТОИ находится в наиболее опасном месте бухты.

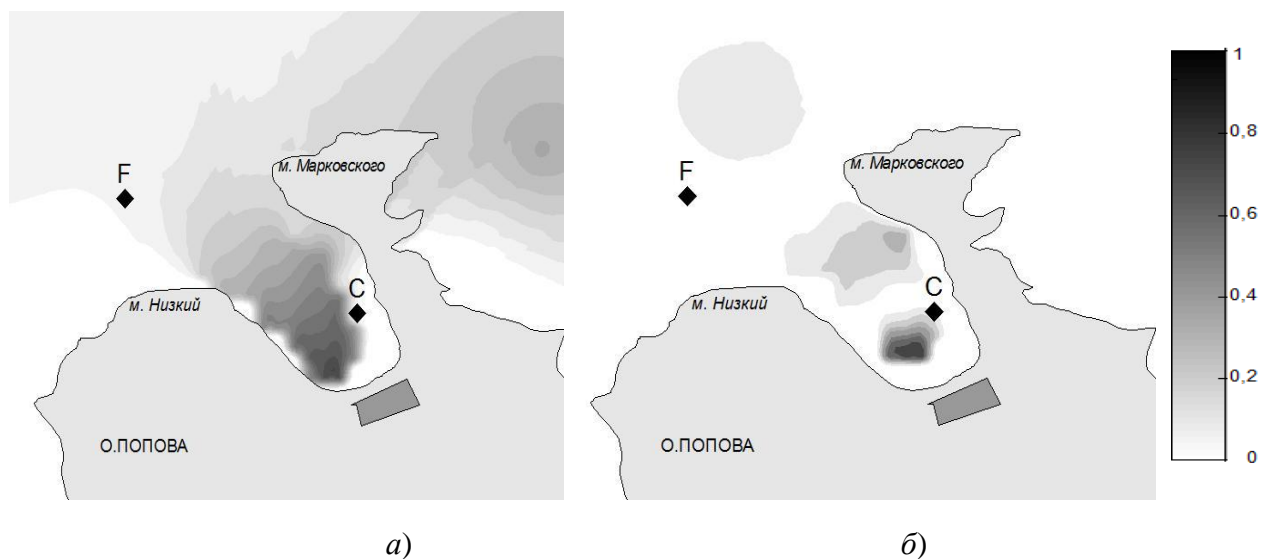


Рис. 5. Пространственное распределение средней амплитуды колебаний для резонансных периодов 10,5 (а) и 2,7 мин (б)

На данном периоде выделяется еще одна область с заметным усилением интенсивности колебаний, расположенная на небольшом удалении от исследуемой бухты, в проливе между островами Русский и Попова. Вероятность некоторой связи между колебаниями в проливе и бухте существует, однако определить ее характер по результатам только вычислительного эксперимента нам не удалось.

Пространственная структура средней амплитуды для резонансного периода 2,7 мин выглядит несколько необычно. Данная мода имеет две пучности: одна, более выраженная, расположена в глубине бухты, ближе к ее южному приглубому берегу, вторая, более слабая, – к северу от нее, в районе изгиба линии берега. Узловая линия одна, она имеет ориентацию восток–северо-восток – запад–юго-запад. Таким образом, указанный период отвечает одноузловой сейше бухты, правда, ее сложно назвать продольной или поперечной, так как в некотором смысле ее структура соответствует стоячим колебаниям по диагонали бухты. Станция С расположена в зоне с умеренной интенсивностью колебаний, следовательно, в точках к югу и юго-западу амплитуды волн могут быть значительно выше. Вероятность возбуждения цунами на периоде 2,7 мин мала, скорее всего, эти колебания могут заметно усиливаться в штормовую погоду.

Заключение

В результате анализа материалов измерений волновых процессов, полученных в сентябре–ноябре 2008 г. в бухте Алексеева (о. Попова), выявлено наличие двух хорошо выраженных пиков на внутренней станции на периодах 10,5 и 2,7 мин. Эти пики обусловлены резонансными колебаниями данного бассейна – соответственно нулевой и первой моды. На станции, установленной на внешнем шельфе, присутствует слабый пик на периоде 10,5 мин, более высокочастотный пик отсутствует.

Методами численного моделирования исследована пространственная структура этих колебаний, имеющих узловые линии на открытой границе и посередине бухты, и пучности в ее кутовой части. Доказана возможность существования продольной одноузловой сейши между входом и удаленной частью бухты в полуоткрытых бассейнах, когда градиент глубин на открытой границе ограничивает излучение волновой энергии в океан.

Для нулевой моды, период которой отвечает диапазону периодов цунами, подтверждена возможность многократного (в 8-10 раз) усиления высоты волны в удаленной части бухты по сравнению с внешним шельфом. Таким образом, если подходяще цунами представляет собой цуг волн с периодом около 10 минут и амплитудой 20 см, она представляет реальную опасность для расположенных на берегу бухты объектов.

Возбуждение при цунами более высокочастотной первой моды резонансных колебаний представляется маловероятным, их эффективная генерация может быть связана с интенсивным ветровым волнением [8, 9]. На это указывает значительное, примерно в 30 раз, увеличение уровня спектральной плотности на периоде 2,7 мин при усилении волнения 17-18 ноября по сравнению со спокойными погодными условиями. Для сравнения, на периоде основной моды уровень энергии колебаний вырос в 6 раз, таким образом, при штормовых ситуациях могут возбуждаться обе моды собственных колебаний, но вклад более высокочастотной составляющей существенно выше.

СКБ САМИ А.И. Зайцеву за помощь в расчетах.

Работа Авторы благодарны заместителю директора В.Б.Лобанову и начальнику экспериментальной базы П.С.Зимину (ТОИ ДВО РАН) за поддержку и помощь в организации исследований, а также заведующему лабораторией вычислительной гидродинамики выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ 09-05-00591-а, 09-05-00971-а, 09-05-90706-моб_ст, 09-05-91222-СТ_a.

Библиографический список

1. Джумагалиев, В.А. Теоретическая и экспериментальная оценка передаточных особенностей побережья Малокурильской бухты, о. Шикотан / В.А. Джумагалиев, А.Б. Рабинович, И.В. Файн // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 1994. Т. 30. № 5. С. 711–717.
2. Опыт эксплуатации волнографа-мареографа ВМ-04 / И.М. Кабатченко [и др.] // Океанология. 2007. Т. 47/ № 1. С. 150–155.
3. Геолого-географические, экологические и культурно-исторические предпосылки освоения и развития территории острова Русский в связи с подготовкой проведения форума АТЭС и последующей эксплуатацией территории / Г.Л. Кофф [и др.]. – М.: ВСЕГЕИ, 2008. – 109 с.
4. Модифицированный вычислительный комплекс «ЦУНАМИ» для оценки рисков, связанных с цунами / А.А. Куркин [и др.] // Известия АИН. Прикладная математика и механика. 2004. Т. 9. С. 88–100.
5. Проблемы создания аппаратно-программного комплекса для исследования гидродинамики шельфовой зоны / А.О. Лухнов [и др.] // Изв. АИН. Прикладная математика и механика. 2006. Т. 18. С. 120–123.
6. Полякова, А.М. Характеристика процессов волнения в заливе Петра Великого // Современное состояние и тенденции изменения природной среды залива Петра Великого Японского моря / А.М. Полякова. – М.: ГЕОС, 2008. С. 110–133.

7. **Полякова, А.М.** Цунами в Приморье 26 мая 1983 года и его последствия / А.М. Полякова. – Владивосток: ТОИ ДВНЦ, 1988. – 40 с.
8. **Рабинович, А.Б.** Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение / А.Б. Рабинович. – Л.: Гидрометеиздат, 1993. – 240 с.
9. **Rabinovich, A.B.** Seiches an harbor oscillations // Handbook of Coastal and Ocean Engineering; ed. Y.C. Kim. Chapter 9, World Scientific Publ., Singapoure, 2009. P. 193–236.

*Дата поступления
в редакцию 29.01.2010*

G.V. Shevchenko, A.G. Chernov, P.D. Kovalev, I.I. Gorin

**RESONANT OSCILLATIONS IN GULFS AND BAYS:
NATURAL EXPERIMENTS AND NUMERICAL MODELLING**

Wave processes measurements were carried out in the Alekseeva Harbor on the Popova Island (where experimental base of POI FEB RAS is located) during September-November of 2008. Two bottom stations were installed inside and outside the harbor area. Spectral analysis of obtained data discovered the existence of two well-expressed peaks on the station which placed inside the Alekseeva harbor with periods 10,5 and 2,7 min. They are caused by resonant harbor oscillations. Spatial structure of these oscillations which correspond to zeroth and first harbor resonant modes were studied by numerical modeling. For the zeroth mode oscillation, which period is typical for tsunami, possibility of wave height multiply amplification in the inner part of the harbor in comparison with adjacent shelf was shown. The possibility of resonant tsunami amplification in the different harbors of the Vladivostok's near shore area was demonstrated by this example.

Key words: bottom pressure gauge, long waves, tsunami, harbor, resonant oscillations, numerical modeling.

ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 519.874

В.С. Власов

ЗАДАЧИ УПОРЯДОЧЕНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Рассматриваются задачи построения расписаний выполнения комплекса операций при планировании производства микросэлектронных изделий. Для решения поставленных задач предлагаются вычислительные процедуры метода ветвей и границ с использованием эвристических схем нахождения верхних оценок.

Ключевые слова: комбинирование алгоритмов, оптимальное расписание, стохастические и детерминированные алгоритмы

Содержательное описание

Рассматривается задача построения расписания выполнения комплекса операций при планировании производства микросэлектронных изделий [1]. Микросэлектронное производство изготавливает большие интегральные схемы по различным технологиям. Используется позаказная система планирования. Каждый заказ включает в себя наборы партий пластин, из которых изготавливаются интегральные схемы. Каждая партия пластин определяет количество кристаллов, которые поступят на операцию сборки. Технология изготовления кристаллов, определяемых одной партией пластин, до операции резки одинакова. Для каждой партии пластин задан перечень технологических операций, которые выполняются на оборудовании, причем для каждой технологической операции однозначно определено оборудование, на котором эта технологическая операция должна выполняться. Для каждой технологической операции определено время ее выполнения на оборудовании. Время выполнения технологической операции любого изделия одинаково и определяется оборудованием, на котором эта технологическая операция выполняется. Некоторые технологические операции объединяются в группы (групповые операции), которые должны выполняться последовательно и без перерывов. Для операций, являющихся завершающимися для изделий, заданы директивные сроки (директивные операции). Для части технологических операций (операции с пролеживанием) задано время пролеживания – минимально возможный интервал времени до начала выполнения следующей технологической операции. Для некоторых технологических операций (операции с межоперационным временем) задано межоперационное время – максимально возможный интервал времени до начала следующей технологической операции. Требуется построить расписание выполнения комплекса операций таким образом, чтобы выбранная мера эффективности была минимальной. Особенности рассматриваемого технологического процесса производства микросэлектронных изделий позволяют отдельно рассматривать две взаимозависимые задачи – конвейерную задачу, позволяющую оптимизировать функционирование системы от момента запуска партии пластин до стадии резки, и сетевую задачу – оптимизирующую процесс производства от стадии резки до выпуска готовой продукции.

Математические модели

Конвейерная модель

До стадии резки процесс изготовления кристаллов можно представить с помощью модели построения конвейерного расписания [2, 3]. На содержательном уровне конвейерная модель может быть описана следующим образом. На нескольких станках должны пройти обработку несколько операций. Для каждой операции задан порядок ее обработки на станках. Каждый станок одновременно не может выполнять более одной операции, а операции обрабатываются на станках без перерывов. Порядок выполнения операций на каждом станке одинаков.

Пусть i - номер станка, j - номер операции, $T = \|t_{ij}\|$ - $m \times n$ действительная матрица, элемент $t_{ij} \geq 0$ которой определяет время выполнения операции j на станке i , $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$. Допустимое решение для конвейерной схемы производства определяется матрицей $X = \|x_{ij}\|$ - размерами $m \times n$, элемент которой x_{ij} - определяет момент начала выполнения операции j на станке i , $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$, для которой выполняются ограничения:

$$x_{ij} \geq x_{i-1j} + t_{i-1j}, \quad i = \overline{2, m}, \quad j = \overline{1, n},$$

(обработка операции на станке может начаться не раньше, чем эта операция завершит обработку на предыдущем станке),

$$x_{ij} \geq x_{ik} + t_{ik}, \quad \text{или} \quad x_{ik} \geq x_{ij} + t_{ij}, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n},$$

(на станке одновременно не может обрабатываться более одной операции),

$$\text{если } x_{ij} \geq x_{ik}, \text{ то } x_{sj} \geq x_{sk}, \quad i = \overline{1, m}, \quad s = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n},$$

(порядок обработки операций одинаков на всех станках - перестановочность расписания),

$$x_{ij} \geq 0, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n},$$

(естественные условия на переменные).

Сетевая модель

После стадии резки технология изготовления кристаллов в общем случае задается сетевой канонической структурой, которая предполагает (в отличие от конвейерной схемы), что у операции могут быть несколько непосредственно предшествующих и несколько непосредственно следующих операций. Каноничность сетевой структуры означает, что никакая операция не может быть активизирована до тех пор, пока не завершится выполнение всех ей предшествующих операций. Связи между операциями (технология изготовления изделий) задаются ориентированным графом без петель и контуров, элементам которого поставлены в соответствие некоторые характеристики. Пусть $T = \{0, 1, 2, \dots, T_0\}$ - множество тактов планирования; $J = \{1, 2, \dots, n\}$ - множество всех операций, подлежащих выполнению; $I = \{1, 2, \dots, m\}$ - множество различных видов оборудования; $K(j)$ - множество операций, непосредственно предшествующих операции с номером j , $j \in J$. Обозначим через t_i - время выполнения операции на i -м оборудовании, $i \in I$; $\varphi(j)$ - функцию, определенную на множестве J ($j \in J$) со значениями из множества I ($\varphi(j) \in I$), которая задает номер оборудования, на котором должна выполняться соответствующая операция.

Пусть $G(j_s)$ - множество групповых операций, начинающихся с операции j_s , $G(j_s) = \{j_s, j_k, \dots, j_t\}$, $j_s \in J$. Введем множество операций, являющихся начальными для соответствующих им групп - $G = \{\lambda_1, \dots, \lambda_k\}$, $\lambda_1, \dots, \lambda_k \in J$. Обозначим через t_j^{\min} - время пролеживания j -й операции, $j \in J^{\min}$, где J^{\min} - множество операций, для которых определено время пролеживания; t_j^{\max} - межоперационное время j -й операции, $j \in J^{\max}$, где J^{\max} - множество операций, для которых определено межоперационное время. Пусть D_j - директивный срок окончания выполнения операции j , $j \in J^D$, где J^D - множество директивных операций, $J^D \subseteq J$.

В качестве варьируемых параметров математической модели выступают n -мерные целочисленные векторы \vec{x} и \vec{y} , компоненты которых определяют такты начала и окончания выполнения операций.

В качестве ограничений системы выступают условия каноничности, условия непрерывности выполнения операций, условия совместности и ограничения для групповых операций, операций с пролеживанием и операций с межоперационным временем.

Постановка оптимизационных задач

В рамках построенных математических моделей ставятся различные оптимизационные задачи. Постановка задачи определяется двумя факторами: множеством допустимых решений и критерием оптимальности. Множество допустимых решений задается системой ограничений математической модели.

Для конвейерной схемы критерий оптимальности может быть формально представлен в виде функционала $F(X) = \max_{j=1,n} (x_{mj} + t_{mj}) \rightarrow \min$, который определяет минимизацию времени завершения работ от момента запуска партий пластин до стадии резки.

Для сетевой модели рассмотрим два типа оптимизационных задач. Первый тип связан с возможными *нарушениями директивных сроков*. При этом на систему накладываются штрафные санкции. Для каждой директивной операции определим функцию штрафа, связанную с возможным нарушением директивного срока. Тогда группа частных критериев, связанных с возможными нарушениями директивных сроков, определяется частными критериями оптимальности: $f_j(y_j, D_j) \rightarrow \min, j \in J^D$. В качестве обобщенного критерия оптимальности можно рассмотреть аддитивную свертку частных критериев $F^D(\vec{y}) = \sum_{j \in J^D} f_j(y_j, D_j) \rightarrow \min$. Функционал $F^D(\vec{y})$ определяет количество тактов нарушения

сроков выполнения директивных операций. Минимизация функционала отражает стремление своевременно завершить выполнение работ.

Другой тип оптимизационных задач связан с *простоем оборудования*. Определим для каждого оборудования функцию простоя, связанную с неиспользованием оборудования на некотором временном участке. Время занятости оборудования на произвольном интервале $[0, t]$ при $t \in T$, находится как сумма времен выполнения операций, времена начала и окончания которых принадлежат рассматриваемому интервалу, а также времен выполнения операций, начавшихся на интервале $[0, t]$, но не завершённых к моменту времени t . Тогда время занятости i -го оборудования на интервале $[0, t]$ можно рассчитать как:

$$f_i^{\text{занят}}(\vec{x}, \vec{y}) = f_i^{\text{полн}}(\vec{y}) + f_i^{\text{част}}(\vec{x}, \vec{y}),$$

$$\text{где } f_i^{\text{полн}}(\vec{y}) = \sum_{j: y_j \leq t} t_{(j)}, j \in J, (j) = i, i \in I,$$

$$f_i^{\text{част}}(\vec{x}, \vec{y}) = t - x_k, x_k < t < y_k, k \in J, (k) = i, i \in I.$$

Тогда функция, определяющая время простоя i -го оборудования на интервале $[0, t]$ будет определяться как $f_i(\vec{x}, \vec{y}) = t - f_i^{\text{занят}}(\vec{x}, \vec{y}), i \in I$. Определим частные критерии оптимальности, связанные с минимизацией времени простоя конкретного оборудования, как $f_i(\vec{x}, \vec{y}) \rightarrow \min, i \in I$.

В качестве обобщенного критерия оптимальности будем рассматривать аддитивную свертку частных критериев по каждому виду оборудования при условии, что $t = \max_{j \in J} y_j$:

$$\Phi(\vec{x}, \vec{y}) = \sum_{i \in I} f_i(\vec{x}, \vec{y}) \rightarrow \min.$$

Функционал $\Phi(\bar{x}, \bar{y})$ определяет количество тактов суммарного простоя оборудования на интервале от такта начала планирования до такта, соответствующего окончанию выполнения всех запланированных операций. Минимизация функционала отображает стремление максимизировать загрузку оборудования.

Поставленные задачи относятся к классу NP-трудных, и для их решения в работе предлагается использовать вычислительные процедуры метода ветвей и границ с определением оценок на основе стохастических и детерминированных алгоритмов.

При этом изложенные процедуры метода ветвей и границ применимы для решения как общей задачи построения расписания микроэлектронного производства, так и задачи построения конвейерного расписания. Это позволило произвести декомпозицию решения задачи на построение решения конвейерной задачи до стадии резки и решение сетевой задачи с меньшим числом операций для следующих этапов производства.

Алгоритм решения задачи методом ветвей и границ

Различают четыре основные вычислительные процедуры метода ветвей и границ, которые делятся на индивидуальные, зависящие от специфики задачи, и универсальные, которые являются общими для любых решаемых задач. К индивидуальным процедурам относятся процедура оценок (в общем случае нахождение верхней и нижней оценок) и процедура ветвления. К универсальным процедурам относятся процедура отсева (отбрасывания неперспективных направлений) и процедура останова (определение оптимальности найденного решения).

Индивидуальные процедуры метода ветвей и границ

Процедура оценок включает в себя определение верхней (достижимой) оценки V и нижней оценки H . Рассмотрим перестановку $\rho = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n)$, $\rho_j \in J$, $j = \overline{1, n}$. Если перестановка ρ соответствует условиям математической модели, то такую перестановку будем называть “допустимой”. Очевидно, что допустимая перестановка однозначно определяет решение системы, а тем самым соответствует некоторому расписанию, для которого можно найти значение критерия решаемой задачи, которое и определяет верхнюю (достижимую) оценку. В качестве верхней оценки выбирается минимальное значение критерия для допустимых перестановок, сгенерированных различными стохастическими и детерминированными алгоритмами.

Нахождение значений нижних оценок определяется с учетом, как длительностей выполнения операций, так и каноничности сетевой модели.

Процедура ветвления рассматривает все допустимые варианты построения допустимых перестановок - на каждом шаге ветвления выбор осуществляется только из тех операций, непосредственно предшествующие для которых уже выполнены.

Универсальные процедуры метода ветвей и границ

Процедура отсева предполагает, что если значение верхней (достижимой) оценки в одной из вершин дерева ветвлений не больше значения нижней оценки в другой вершине, то вторая вершина исключается из рассмотрения не в ущерб оптимальности.

Процедура останова определяет окончание процесса вычислений. Если осталась неотброшенной лишь одна вершина, в которой значения оценок совпадают, то найдено оптимальное решение задачи, которое определяется перестановкой, соответствующей верхней (достижимой) оценке.

Основным достоинством метода ветвей и границ является то, что, остановив вычисления в любой момент времени, лучшее значение верхней оценки (рекорд) может быть принято за эвристическое решение задачи. Основным недостатком метода является необходимость определения оценок в каждой вершине дерева ветвления, а при большом числе исходных параметров число вершин становится очень большим, что не позволяет провести рассмотрение всех вершин дерева ветвлений.

Получение совокупности верхних оценок Алгоритм-построитель расписания

Алгоритм-построитель расписания формирует из произвольной перестановки ρ допустимую перестановку с учетом особенностей каноничности системы и специфики микроэлектронного производства (групповые операции, операции с пролеживанием и межоперационным временем). Схематично работу алгоритма можно представить в следующем виде:

$$\rho \rightarrow \rho^{\text{кан}} \rightarrow \rho^{\text{доп}},$$

где ρ – исходная перестановка; $\rho^{\text{кан}}$ – перестановка с учетом сетевой модели; $\rho^{\text{доп}}$ – допустимая перестановка, удовлетворяющая всем ограничениям системы.

Использование алгоритма-построителя расписания позволяет производить формирование перестановок, как для конвейерной задачи, так и общей задачи микроэлектронного производства с использованием одних и тех же разработанных алгоритмов.

Стохастические алгоритмы

Генетический алгоритм. В основу эволюционно-генетических алгоритмов заложена идея наследственности в биологических популяциях. Структура данных алгоритма состоит из набора хромосом. Работа алгоритма продолжается до тех пор, пока не будет выполнен критерий останова. В рассмотренной постановке расписание определяется допустимой перестановкой из n элементов. Представление допустимой перестановки формально является генетическим и задает хромосому в виде упорядоченной последовательности из n генов (n – мерного вектора). Ген, соответствующий j -й компоненте, определяет номер операции, которая будет выполняться j -й по порядку, $j = \overline{1, n}$. Работа генетического алгоритма основана на использовании ряда операторов кроссовера и мутации, которые, используя допустимые генотипы “родительских” особей, сохраняют допустимость генотипов потомков.

Алгоритм simulated annealing. Используется аналогия между процессом нахождения решения задачи и моделью охлаждения термодинамической системы. Считается, что процесс протекает при постоянно понижающейся температуре. На каждой итерации при температуре T система с некоторой вероятностью может перейти из состояния с энергией E_1 в состояние с энергией E_2 . Эта вероятность рассчитывается как $P(\Delta E) = e^{-\Delta E/kT}$, где $\Delta E = E_2 - E_1$ и k – постоянная Больцмана. Работа алгоритма начинается с выбора случайного состояния π_1 , удовлетворяющего ограничениям системы, для которого находится значение критерия E_1 . Применяется оператор перехода из состояния π_1 в состояние π_2 и находится значение E_2 для этого состояния. Если $\Delta E \leq 0$ или $P(\Delta E) > \xi$, где ξ – случайное число, равномерно распределенное в диапазоне $[0, 1]$, то π_2 принимается за текущее состояние системы. После этого происходит ее охлаждение. Условием останова алгоритма является охлаждение системы до заданной температуры.

Алгоритм ant colonies. Идея алгоритма основана на моделировании поведения муравьев, связанного с их способностью быстро находить кратчайший путь от муравейника к источнику пищи и адаптироваться к изменяющимся условиям, находя новый кратчайший путь. При движении муравей метит свой путь феромоном, и эта информация используется другими муравьями для выбора пути. Дойдя до преграды, муравьи с равной вероятностью будут обходить ее справа и слева. Поскольку движение муравьев определяется концентрацией феромона, то следующие муравьи будут предпочитать более насыщенный феромоном путь, продолжая обогащать его феромоном. Моделирование испарения феромона гарантирует нам, что найденное локально оптимальное решение не будет единственным – муравьи будут искать и другие пути. В основе предлагаемого алгоритма лежит n -мерная квадратная матрица $P(t) = \|p_{ij}(t)\|$, определяющая состояние системы на такт работы алгоритма t . Элемент матрицы $p_{ij}(t)$ в такт t определяет вероятность того, что операция с номером i будет входить в искомую перестановку j -й по порядку. При этом в силу канонической особенности задачи,

вероятность выбора операции, для которой не выполнены все предыдущие, приравнивается нулю. В основу стратегии построения перестановки заложены как элементы стохастичности, так и «предыстория» жизни системы, которая отображается матрицей $P(t)$. Каждая допустимая перестановка однозначно определяет расписание, а тем самым и значение критерия задачи, соответствующее этому расписанию.

Детерминированные алгоритмы

Фронтальный алгоритм. Предлагаемый алгоритм основан на идеологии «жадных алгоритмов»: включенная в строящееся расписание на каком-то шаге работы алгоритма операция в дальнейшем из расписания не исключается, причем для ее выполнения используются все доступные к данному моменту времени ресурсы в максимально возможном объеме.

На подготовительном этапе для каждой операции j производится расчет временных характеристик: находятся моменты раннего начала выполнения t_j^{PH} , раннего окончания выполнения t_j^{PK} , позднего начала t_j^{PN} , позднего окончания t_j^{PK} выполнения операций, и резервы времени операций $r_j = t_j^{PN} - t_j^{PH} = t_j^{PK} - t_j^{PK}$, $j \in J$. Пусть t – произвольный такт планирования, $t \in T$. Назовем «фронтом операций» множество $F(t)$ – множество операций, любая из которых может начать выполняться с такта t , $t \in T$. Установим соответствие между фронтом операций и допустимой перестановкой, для чего перейдем от множества $F(t)$ к вектору $\rho(t)$, компоненты которого и будут определять порядок выполнения операций. Определим вектор $\rho(t)$ следующим образом. Если $F(t) = \{j_1, j_2, \dots, j_k\}$, то $\rho(t) = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_k)$, $\rho_1 \neq \rho_q$, $\rho_1, \rho_q \in F(t)$, где ρ_q – номер операции, выполняемой q -й по порядку. Для чего упорядочим операции из множества $F(t)$ по неубыванию резервов времени. Далее последовательно просматриваем операции построенного вектора и включаем в строящееся расписание те из них, для которых свободно соответствующее оборудование. После этого изменяем значение такта планирования и заново формируем фронт операций, соответствующий этому такту.

Алгоритм, основанный на решении задачи о назначениях. Тот факт, что перестановки из n натуральных чисел можно представить в виде квадратных бистохастических булевых матриц, позволил для определения верхних оценок использовать хорошо разработанный аппарат решения задач о назначениях. Будем предполагать, что с использованием понятия предшества “ \prec ” между операциями, которое задается совокупностью множеств $K(j)$, $j \in J$, на множестве операций определяются линейный порядок π . Пусть $Y = \|y_{ij}\|$ – квадратная матрица порядка n , где $y_{ij} = 1$, если $i \pi j$, и $y_{ij} = 0$ в противном случае, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, n}$. Рассмотрим задачу о назначениях с матрицей неизвестных Y . Пусть P – множество различных перестановок из n натуральных чисел, а B – множество различных n -мерных бистохастических булевых матриц. Рассмотрим соответствие $\Gamma = (Q, P, B)$, где $Q = P \times B$. Соответствие Γ является функциональным, инъективным, всюду определенным и сюръективным, т.е. взаимнооднозначным (биективным). Отсюда генерировать различные перестановки можно посредством решения задач о назначениях, для чего необходимо связать значения критерия, зависящие от коэффициентов функционала, со значениями критерия решаемой исходной задачи. Это можно сделать, например, используя в качестве матрицы, определяющей коэффициенты критерия задачи о назначениях, найденную в результате работы алгоритма *ant colonies* матрицу $P(t) = \|p_{ij}(t)\|$. Кроме того, так как у задачи о назначениях в общем случае существует множество оптимальных решений, то имеет смысл рассматривать все оптимальные решения задачи о назначениях, для каждого решения находить соответствующую перестановку, строить по ней допустимую перестановку, и выбирать из построенных допустимых перестановок наилучшую, с точки зрения критерия исходной решаемой задачи.

Метод комбинирования алгоритмов

Так как предложенные алгоритмы используют перестановку (или набор перестановок) в качестве исходных данных, а результатом работы алгоритмов также являются перестановки, то для наиболее эффективного решения задачи предлагается последовательное использование алгоритмов. Перестановка, соответствующая лучшему значению критерия рассматриваемой задачи, полученная одним из алгоритмов, используется как начальная для другого алгоритма. Тем самым с помощью предложенных алгоритмов можно генерировать различные схемы построения допустимых расписаний, а тем самым определять верхнюю (достижимую) оценку в методе ветвей и границ.

Заключение

Таким образом, не смотря на то, что рассматриваемые задачи относятся к классу NP-трудных, и то, что реальные производственные задачи имеют большие размерности, применение метода ветвей и границ с использованием эвристических алгоритмов для нахождения верхних оценок позволяет в реальном времени находить допустимые решения задач планирования. Это связано с тем, что, даже рассмотрев не все вершины дерева ветвления, в процессе решения задачи многократно применяются различные алгоритмы нахождения верхних оценок. А так как верхние оценки для рассматриваемого метода ветвей и границ являются достижимыми, то они определяют допустимые решения исходной задачи, лучшее решение (с точки зрения критерия) может быть принято за эвристическое решение поставленной задачи.

Полученные в работе результаты легли в основу созданных диалоговых программных средств решения задач распределения ресурсов при планировании процесса изготовления изделий микроэлектронного производства. Проведенный вычислительный эксперимент показал высокую степень качества разработанных алгоритмов оптимизации. Так, для конвейерной задачи для тестовых примеров (число операций до 1000) отклонения значений критериев на найденных решениях относительно значений нижних оценок не превысили 6%.

Библиографический список

1. Прилуцкий, М.Х. Оптимизационные задачи распределения ресурсов при планировании производства микроэлектронных изделий / М.Х. Прилуцкий, В.С. Власов // Системы управления и информационные технологии. 2009. №1(35). С. 38–43.
2. Прилуцкий, М.Х. Метод ветвей и границ с эвристическими оценками для конвейерной задачи теории расписаний / М.Х. Прилуцкий, В.С. Власов // Вестник Нижегородского государственного университета. Математическое моделирование и оптимальное управление / Изд-во ННГУ. Нижний Новгород. 2008. Вып. 3. С. 147–153.
3. Прилуцкий, М.Х. Метод комбинирования эвристических алгоритмов для конвейерных задач теории расписаний / М.Х. Прилуцкий, В.С. Власов // Исследовано в России. 2007. С. 901–905. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2007/086.pdf>

*Дата поступления
в редакцию 02.02.2010*

V.S. Vlasov

SEQUENCING AND ALLOCATION PROBLEM AT MICROELECTRONIC PRODUCTION

Scheduling problem of complex operation at microelectronic production is considered. Branch and bound method with heuristic schemes for finding the top estimations are offered.

Key words: algorithms combination, the optimum schedule, stochastic and deterministic algorithms

УДК 519.847

М.Х. Прилуцкий, М.С. Куликов

ОБ ОДНОЙ СПЕЦИАЛЬНОЙ ЗАДАЧЕ КВАДРАТИЧНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Рассматривается специальный класс задач квадратичного программирования, для решения которых разработан алгоритм с вычислительной сложностью $O(n^2)$.

Ключевые слова: специальная задача квадратичного программирования, аналитическое решение, оптимальность.

Введение

В работе рассматривается специальный класс задач квадратичного программирования, специфика которых заключается в том, что область допустимых решений задается совокупностью двусторонних ограничений на переменные, а критерии представляют собой суммы квадратов отклонений переменных и сумм переменных от заданных величин. Существует широкий класс прикладных задач, формализация которых приводит их в класс задач квадратичного программирования с указанной спецификой. Это задачи объемно-календарного планирования [1], задачи распределения мощностей каналов передачи данных провайдером сети ИНТЕРНЕТ [2]. В качестве примера такой задачи рассмотрим задачу распределения производительности купола по газовым скважинам [3].

Задача распределения производительности купола по газовым скважинам

Рассматривается сложная система, описывающая функционирование газового промысла. Газовый промысел обслуживает газовое месторождение, объекты добычи которого по геолого-техническим и территориальным признакам разделяются на несколько куполов. Каждый газовый купол состоит из ряда кустов газовых скважин. Газовые скважины одного купола обслуживаются установкой предварительной подготовки газа, и соединены между собой и установкой газопроводом. Процесс добычи газа описывается следующей схемой. Предполагается, что начальное пластовое давление (давление на забое любой скважины) купола известно. Объем добычи газа из скважины регулируется системой кранов-регуляторов, при этом очевидно, что при открытых кранах скважина дает максимальный объем добычи, но при этом устьевое давление скважины будет минимально, а при закрытых кранах – объем добычи газа минимален, а устьевое давление скважины максимально. В общем случае функция, определяющая устьевое давление газа скважины от объема добытого газа, является квадратичной монотонно невозрастающей функцией. Так как изменение пластового давления газа происходит достаточно медленно, то в данной работе предполагается, что на выбранном интервале планирования можно пренебречь квадратичной составляющей и считать, что функции, определяющие зависимость забойного давления скважины от объема добываемого газа на заданном интервале времени, линейные. Предполагается, что известен плановый объем газа, который должен поступать на установку предварительной подготовки газа, и заданы «эталонные» значения давления для каждой скважины. Под «эталонным» давлением здесь понимается устьевое давление скважины, которое способствует качественной работе скважины. Как правило, эталонные давления скважин одного купола близки друг другу. Требуется определить условия эффективного функционирования рассматриваемой системы, которые связаны с выполнением требований по плановому объему добываемого газа и стремлением получить устьевые давления скважин, близкие к эталонным.

Пусть $J = \{1, 2, \dots, n\}$ – множество скважин. Для каждой скважины заданы величины $P_j^+, P_j^-, Q_j^+, Q_j^-$, определяющие соответственно допустимые диапазоны изменения давлений и дебитов скважин, $j \in J$. Для установки предварительной подготовки газа заданы величины P^+, P^-, Q^+, Q^- , определяющие соответственно допустимые диапазоны изменения давления и объема газа, поступающего в единицу времени. Заданы линейные функции $f_j(x_j) = a_j x_j + b_j$, $j \in J$, определяющие для каждой скважины зависимости величин объемов добываемого газа от давления. Предполагается, что задан π – плановый объем газа, который должен поступать на установку в единицу времени, и известны величины ρ_j , определяющие эталонные значения устьевого давления для скважин, $j \in J$.

Требуется найти такой вектор $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, где x_j – давление, которое должно быть установлено на скважине j , $j \in J$, для него выполняются ограничения:

$$P_j^- \leq x_j \leq P_j^+, j \in J, \quad (1)$$

$$Q_j^- \leq f_j(x_j) \leq Q_j^+, j \in J, \quad (2)$$

$$x_j \geq 0, j \in J \cup \{0\}, \quad (3)$$

и достигает минимального значения критерий:

$$F(\vec{x}) = \left(\sum_{j=1}^n (a_j x_j + b_j) - \pi \right)^2 + \left(\sum_{j=1}^n (x_j - \rho_j) \right)^2 \rightarrow \min. \quad (4)$$

Здесь ограничения (1) определяют предельные значения давления на скважинах, а ограничения (2) – предельные объемы газа, добываемого со скважин, ограничения (3) являются естественными условиями на переменные.

После преобразований задача (1)-(4) может быть сведена к виду:

$$\Phi(\vec{x}) = \min \left\{ \left(\sum_{i=1}^n a_i x_i - \alpha \right)^2 + \sum_{i=1}^n (x_i - \rho_i)^2 \mid c_i \leq x_i \leq d_i, i = \overline{1, n} \right\}, \quad (5)$$

где $\alpha = \sum_{j=1}^n b_j - \pi$, $c_j = \max(P_j^-, P^-, f_j^-(Q_j^+))$, $d_j = \min(P_j^-, P^-, f_j^-(Q_j^-))$.

Замечание 1

Давление на входе установки предварительной подготовки газа y зависит от объема поступившего газа как $f(y) = a_0 y + b_0$. Учитывая, что скважины и установка предварительной подготовки газа соединены общей трубой, то устьевые давления газа во всей системе будут выравниваться. Отсюда в качестве эталонных давлений, так как объем планируемой добычи равен π , могут быть выбраны величины $\rho_j = \frac{\pi - b_0}{a_0}$, $j \in J$.

Алгоритм решения

Для решения задачи (5) могут быть применены классические методы решения задач квадратичного программирования (см., например, [4]). Однако специфика рассматриваемых задач – область допустимых решений задается совокупностью двусторонних ограничений на переменные, а критерии представляют собой суммы квадратов отклонений переменных и сумм переменных от заданных величин – позволила для их решения предложить эффективный алгоритм с вычислительной сложностью $O(n^2)$.

Рассмотрим выражение:

$$\frac{\partial \Phi(\vec{x})}{\partial x_i} = 2a_i \left(\sum_{j=1}^n a_j x_j - \alpha \right) + 2(x_i - \rho_i) = 0. \quad (6)$$

Домножим на a_i :

$$a_i^2 \left(\sum_{j=1}^n a_j x_j - \alpha \right) + (a_i x_i - a_i \rho_i) = 0.$$

Просуммируем по i :

$$\left(\sum_{i=1}^n a_i^2 \right) \left(\sum_{i=1}^n a_i x_i - \alpha \right) + \left(\sum_{i=1}^n a_i x_i - \sum_{i=1}^n a_i \rho_i \right) = 0.$$

Отсюда получим

$$\sum_{i=1}^n a_i x_i = \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_i^2 + 1} \left(\alpha \sum_{i=1}^n a_i^2 + \sum_{i=1}^n a_i \rho_i \right). \quad (7)$$

Подставив (7) в (6), получим

$$x_i^* = \rho_i + a_i \alpha - \frac{a_i}{A \sum_{j=1}^n a_j^2 + 1} \left(\alpha \sum_{j=1}^n a_j^2 + \sum_{j=1}^n a_j \rho_j \right), \quad i = \overline{1, n}. \quad (8)$$

Если вектор \vec{x}^* удовлетворяет ограничениям задачи (5), то он определяет ее решение. Если нет, то переменные, которые вышли за пределы ограничений задачи (5), принимают соответствующие граничные значения, и исключаются из рассмотрения. Сокращенная задача решается заново. Алгоритм имеет вычислительную сложность $O(n^2)$.

Оптимальность алгоритма

Покажем, что найденное решение оптимально:

Из математического анализа известно (критерий Сильвестра), что для функции нескольких переменных необходимым и достаточным условием существования локального минимума является:

- 1) обращением в 0 частных производных первого порядка;
- 2) положительность главных миноров матрицы частных производных второго порядка.

Первое условие выполняется (по построению точек x_i^* проверим выполнение второго условия):

$$\frac{\partial^2 \Phi'}{\partial x_i^2} = 2a_i^2 + 2, \quad i = \overline{1, n};$$

$$\frac{\partial^2 \Phi'}{\partial x_i \partial x_j} = 2a_i a_j, \quad i \neq j.$$

Рассмотрим главный минор порядка m :

$$M^m = \begin{vmatrix} 2a_1^2 + 2 & 2a_1 a_2 & \dots & 2a_1 a_m \\ 2a_2 a_1 & 2a_2^2 + 2 & & 2a_2 a_m \\ \vdots & & & \\ 2a_m a_1 & 2a_m a_2 & \dots & 2a_m^2 + 2 \end{vmatrix} = (2)^m \begin{vmatrix} a_1^2 + 1 & a_1 a_2 & \dots & a_1 a_m \\ a_2 a_1 & a_2^2 + 1 & & a_2 a_m \\ \vdots & & & \\ a_m a_1 & a_m a_2 & \dots & a_m^2 + 1 \end{vmatrix} =$$

$$\begin{aligned}
&= (2)^m a_1 \begin{vmatrix} a_1 + \frac{1}{a_1} & a_2 & \dots & a_m \\ a_2 a_1 & a_2^2 + 1 & & a_2 a_m \\ \vdots & & & \\ a_m a_1 & a_m a_2 & \dots & a_m^2 + 1 \end{vmatrix} = (2)^m a_1^2 \begin{vmatrix} 1 + \frac{1}{a_1^2} & a_2 & \dots & a_m \\ a_2 & a_2^2 + 1 & & a_2 a_m \\ \vdots & & & \\ a_m & a_m a_2 & \dots & a_m^2 + 1 \end{vmatrix} = \\
&= (2)^m a_1^2 a_2^2 \dots a_m^2 \begin{vmatrix} 1 + \frac{1}{a_1^2} & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 1 + \frac{1}{a_2^2} & & 1 \\ \vdots & & & \\ 1 & 1 & \dots & 1 + \frac{1}{a_m^2} \end{vmatrix}.
\end{aligned}$$

Эта матрица линейными преобразованиями сводится к диагональной, с диагональными элементами > 0 :

$$\begin{vmatrix} \frac{1}{a_1^2} & -\frac{1}{a_2^2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{a_2^2} & -\frac{1}{a_3^2} & & 1 \\ \vdots & & & & \\ 0 & 0 & 0 & & 0 \\ 1 & 1 & & \dots & 1 + \frac{1}{a_m^2} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{1}{a_1^2} & -\frac{1}{a_2^2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{a_2^2} & -\frac{1}{a_3^2} & & 1 \\ \vdots & & & & \\ 0 & 0 & 0 & & 0 \\ 0 & 1 + \frac{a_1^2}{a_2^2} & & \dots & 1 + \frac{1}{a_m^2} \end{vmatrix} \dots \text{и т.д.}$$

$\Rightarrow \det M^m > 0$, так как определитель диагональной матрицы равен произведению ее диагональных элементов. Таким образом, второе условие выполнено, следовательно, точка $(x_1^*, x_2^* \dots x_i^* \dots x_n^*)$ является точкой локального минимума. По каждой из переменных функция является квадратичной и при удалении от точки минимума строго возрастает.

Таким образом, если точка $(x_1^*, x_2^* \dots x_i^* \dots x_n^*)$ попадает в область, определенную в (5), то это оптимальное решение. Если точка $(x_1^*, x_2^* \dots x_i^* \dots x_n^*)$ лежит за пределами области, то наилучшее значение следует искать на границе, наиболее близкой к точке минимума.

Замечание 2

Нетрудно показать, что для более общей задачи с положительными коэффициентами A , B и k_i :

$$\Phi(\bar{x}) = \min \left\{ A \left(\sum_{i=1}^n a_i x_i - \alpha \right)^2 + B \sum_{i=1}^n k_i (x_i - \rho_i)^2 \mid c_i \leq x_i \leq d_i, i = \overline{1, n} \right\},$$

решение находится с помощью соотношений:

$$x_i^* = \frac{1}{B} \left(B \rho_i + A \alpha \frac{a_i}{k_i} - \frac{A \frac{a_i}{k_i}}{A \sum_{j=1}^n \frac{a_j^2}{k_j} + B} \left(A \alpha \sum_{j=1}^n \frac{a_j^2}{k_j} + B \sum_{j=1}^n a_j \rho_j \right) \right), \quad i = \overline{1, n}.$$

Библиографический список

1. **Прилуцкий, М.Х.** Многокритериальные многоиндексные задачи объёмно-календарного планирования // Известия академии наук. Теория и системы управления. 2007. №1. С. 78–82.
2. **Прилуцкий, М.Х.** Многокритериальная задача распределения производительности купола по газовым скважинам / М.Х. Прилуцкий, Е.В. Васильев, В.Е. Костюков // Системы управления и информационные технологии. 2007. № 3.2(29). С. 291–296.
3. **Афраймович, Л.Г.** Многоиндексные задачи распределения ресурсов в иерархических системах / Л.Г. Афраймович, М.Х. Прилуцкий // Автоматика и телемеханика. 2006. №6. С. 194–205.
4. **Зуховицкий, С.И.** Линейное и выпуклое программирование / С.И. Зуховицкий, Л.И. Авдеев. М.: ФИЗМАТЛИТ, 1967. – 460 с.

*Дата поступления
в редакцию 02.02.2010*

M.Kh. Prilutskii , M.S. Kulikov

ABOUT ONE SPECIAL TASK OF QUADRATIC PROGRAMMING

In this work is considered a special class of quadratic programming problems for the solving of which an algorithm with computation complexity $O(n^2)$ was elaborated.

Key words: special task of quadratic programming, analytical solution, optimality.

УДК 004.932

Д.А. Пиманкин, Б.А. Кисельман

ОЦЕНКА ДВИЖЕНИЯ ЧАСТОТНЫМИ МЕТОДАМИ В СИСТЕМАХ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева

Предлагается метод детектирования и анализа движения в последовательности пространственно совмещенных динамических изображений на основе комплексного ДПФ. Показана эффективность метода в ряде задач по сравнению с традиционными частотными методами.

Ключевые слова: комплексное ДПФ, движущиеся объекты, фоновое изображение, разностное изображение, бинарное изображение, сегментация изображений.

Введение

В прикладных задачах обработки видеопотоков движение возникает в двух случаях. *Во-первых*, при относительном перемещении сенсорной системы (камеры) и наблюдаемой сцены. *Во-вторых*, при изменениях в самой наблюдаемой сцене (движении некоторых объектов) [5, 7]. В данной работе рассматривается задача детектирования и анализа движения объектов при условии неподвижности сенсорной системы, т.е. предполагается, что все кадры последовательности динамических изображений пространственно совмещены.

Использование преобразования Фурье для анализа движения объектов

Частотные методы заключаются в использовании преобразования Фурье для нахождения оценок скоростей подвижных объектов.

Для начала рассмотрим последовательность $f(x, y, t)$, $t = 0, 1, \dots, K-1$, состоящую из K цифровых бинарных изображений размерами $M \times N$. При этом будем полагать, что камера неподвижна. Предположим, что на изображении присутствуют как стационарные компоненты, так и равномерно движущиеся объекты.

Для всех кадров этой последовательности умножим значение каждого пикселя на $\exp(j2\pi a_x x)$, а затем просуммируем взвешенные пиксели. Введем функцию от времени g_x :

$$g_x(t, a_x) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y, t) \exp(j2\pi a_x x), \quad t = 0, 1, \dots, K-1, \quad (1)$$

где a_x – некоторое положительное число.

Аналогично, зависимость суммы взвешенных значений пикселей от времени для оси y :

$$g_y(t, a_y) = \sum_{y=0}^{N-1} \sum_{x=0}^{M-1} f(x, y, t) \exp(j2\pi a_y y), \quad t = 0, 1, \dots, K-1. \quad (2)$$

Если в последовательности изображений не происходит движения, то $g_x = C_1 = \text{const}$ и $g_y = C_2 = \text{const}$.

Предположим, что одиночный единичный пиксель с начальной абсциссой x_0 перемещается вдоль оси x с постоянной скоростью v_x . В функции g_x ему будет соответствовать комплексная экспонента $\exp(j2\pi a_x(x_0 + v_x t))$ [1].

Таким образом, каждому пикселю, движущемуся с постоянной скоростью, в функции g_x соответствует комплексная экспонента. Приведенные рассуждения обобщаются на любую группу пикселей, т.е. если некоторый объект (под объектом подразумевается группа связан-

ных пикселей) поступательно движется вдоль оси x со скоростью v_x пикселей/кадр, то соответствующая ему комплексная экспонента будет иметь частоту $v_x a_x$.

Применяя дискретное преобразование Фурье к реальным частям функций (1) и (2), соответственно получаем:

$$G_x(u_x, a_x) = \sum_{t=0}^{K-1} \operatorname{Re}[g_x(t, a_x)] \exp\left(\frac{-j2\pi u_x t}{K}\right), \quad u_x = 0, 1, \dots, K-1, \quad (3)$$

$$G_y(u_y, a_y) = \sum_{t=0}^{K-1} \operatorname{Re}[g_y(t, a_y)] \exp\left(\frac{-j2\pi u_y t}{K}\right), \quad u_y = 0, 1, \dots, K-1. \quad (4)$$

Стационарным компонентам последовательности изображений соответствует некоторый постоянный член C в функции g . На графике зависимости модуля G от частоты он отобразится в виде пика в нуле. Равномерно движущемуся объекту будет соответствовать пик на частоте $|v_x|a_x$, что определяет отсчет $u_x' = K|v_x|a_x$ и, как следствие, симметрию ДПФ действительной функции, $K(1 - |v_x|a_x)$. Это может не приниматься во внимание [4].

Итак, в спектре Фурье имеется пик на частоте $|v_x|a_x$ ($u_x' = K|v_x|a_x$). При делении этой частоты на a_x получим $|v_x|$, т.е. модуль проекции скорости на ось x в пикселях/кадр. Аналогичными рассуждениями можно получить $|v_y|$ – модуль проекции скорости на ось y :

$$|\hat{v}_x| = \frac{u_x'}{Ka_x}. \quad (5)$$

$$|\hat{v}_y| = \frac{u_y'}{Ka_y}. \quad (6)$$

Поскольку t меняется с целым шагом от 0 до $K-1$, то целесообразно ограничить a_x числами $1/K, 2/K, \dots, 1/2$.

Недостаточная частота дискретизации может стать причиной ошибки, связанной с наложением спектров. Поскольку $u_x' = K|v_x|a_x$, одна из возможностей избежать ее состоит в выборе в качестве a_x ближайшего целочисленного значения к величине $a = u_{\max} / (K|v_{\max}|)$, где u_{\max} – максимальная частота (номер отсчета), определяемая величиной K , а v_{\max} – максимальная ожидаемая скорость объекта [1].

Для случая, когда в последовательности изображений присутствует лишь один объект, знак составляющей скорости в направлении оси x можно определить, рассчитав первую производную от действительной части и вторую производную от мнимой части функции g_x по времени:

$$J_{1x} = \frac{d \operatorname{Re}[g_x(t, a_x)]}{dt} \Big|_{t=n}, \quad (7)$$

$$J_{2x} = \frac{d^2 \operatorname{Im}[g_x(t, a_x)]}{dt^2} \Big|_{t=n}. \quad (8)$$

Одинаковые знаки J_{1x} и J_{2x} в некоторый момент времени $t = n$ означают, что составляющая скорости v_x положительна. Разные знаки J_{1x} и J_{2x} показывают, что эта компонента отрицательна. В случае нулевого значения одной из величин J_{1x} и J_{2x} рассматривается следующий ближайший момент времени $t = n \pm \Delta t$. Все приведенные рассуждения применимы и для оси y [1].

Анализ недостатков и модификация метода

При непосредственном применении формул (1) и (2) к полутоновому изображению функцию g_x (здесь и далее будем рассматривать только ось x) можно представить в следующем виде:

$$g_x(t, a_x) = \sum_{(x,y) \in P} [Q(x, y, t) - F(x, y)] \exp(j2\pi a_x x) + C, \quad t = 0, 1, \dots, K-1, \quad (9)$$

где $F(x, y)$ – изображение фоновой составляющей; $Q(x, y, t)$ – яркость точек объекта; P – множество точек, принадлежащих движущемуся объекту.

Здесь постоянная составляющая

$$C = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} F(x, y) \exp(j2\pi a_x x). \quad (10)$$

Для случая малых объектов (под малыми подразумеваются объекты, площадь которых достаточно мала для того, чтобы можно было пренебречь неоднородностью участка фонового изображения, заслоняемого объектом):

$$Q(x, y, t) - F(x, y) \approx Q(x_0, y_0, t) - F(x_0, y_0), \quad (x, y) \in P, \quad (11)$$

где x_0 и y_0 – координаты центра объекта P .

С учетом (11) приближенно запишем формулу (9) в виде

$$g_x(t, a_x) \approx [Q(x_0, y_0, t) - F(x_0, y_0)] \sum_{(x,y) \in P} \exp(j2\pi a_x x) + C, \quad t = 0, 1, \dots, K-1. \quad (12)$$

Видно, что множитель, стоящий перед суммой зависит от текущего положения объекта, что вносит дополнительную ошибку в конечный результат оценки скорости.

Теперь вернемся к анализу последовательности бинарных изображений. Распишем функцию g_x для группы пикселей (протяженностью L пикселей), движущихся вдоль оси x :

$$g_x(t, a_x) = \exp(j2\pi a_x (x_0 + v_x t)) \cdot [A_0 + A_1 \cdot \exp(j2\pi a_x) + \dots + A_{L-1} \cdot \exp(j2\pi a_x (L-1))] + C. \quad (13)$$

Введем величину A , зависящую только от геометрии объекта и значения a_x :

$$A = A_0 + A_1 \cdot \exp(j2\pi a_x) + A_2 \cdot \exp(j2\pi a_x \cdot 2) + \dots + A_{L-1} \cdot \exp(j2\pi a_x (L-1)), \quad (14)$$

тогда формула (13) запишется в виде

$$g_x(t, a_x) = |A| \cdot \exp(j \cdot \arg(A)) \cdot \exp(j2\pi a_x (x_0 + v_x t)) + C. \quad (15)$$

Как видим, недостатком классического метода является то, что из значения модуля функции G_x в точке u_x' (из амплитуды комплексной экспоненты) невозможно извлечь никакой информации о размерах объекта. В крайнем случае это может привести к полной нераспознаваемости объекта.

Предположим, что объект имеет размеры 8×8 пикселей и $a = 0,125$. В этом случае, независимо от скорости поступательного движения, он остается совершенно нераспознаваем. Комплексные экспоненты, соответствующие объекту, взаимно уничтожаются. Тот же самый эффект будет наблюдаться при размерах объекта кратных 8 (рис. 2, a).

Рассмотрим 4- либо 8-связанную область (примеры 4- и 8-связанных областей приведены на рис. 1) площадью S и протяженностью L вдоль оси x . Предлагается каждой такой об-

ласти поставить в соответствие ее центральный пиксель и величину площади S . Таким образом, суммирование L комплексных экспонент с различными фазовыми сдвигами заменяется умножением одной экспоненты на площадь области S .

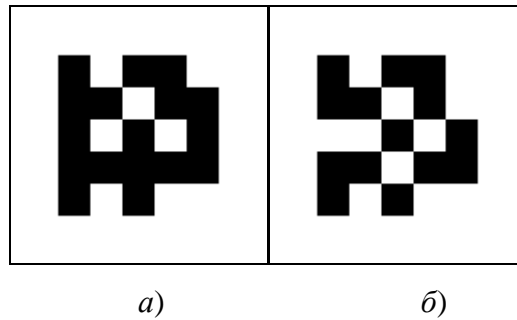


Рис. 1. Пример 4- (а) и 8-связанной (б) областей

Теперь имеется возможность по значениям функции G_x оценить площадь объекта:

$$\hat{S} = \frac{2 \cdot |G_x(u'_x, a_x)|}{K} \quad (16)$$

Графики зависимостей модулей функций G_y (для классического и модифицированного методов) от частоты приведены на рис. 2.

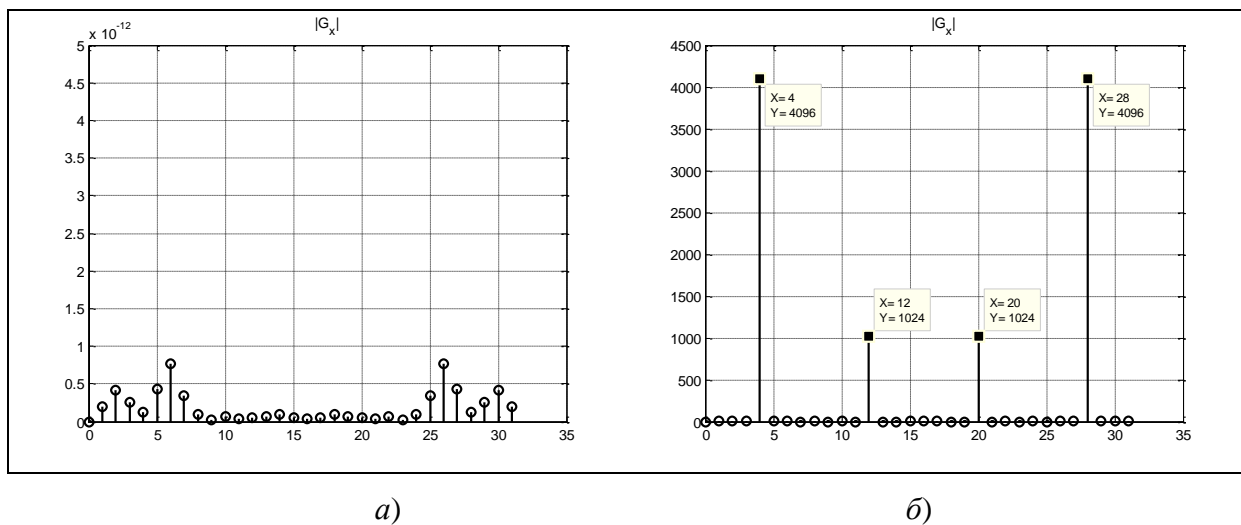


Рис. 2. Графики зависимостей $|G_y|$ от частоты: классический метод (а) и предлагаемый новый метод (б)

Применение формул (7) и (8) существенно затрудняется, если объектов два и больше.

Знак составляющей скорости вдоль осей будем находить при помощи ДПФ. Для этого преобразование Фурье будем искать не от действительной части функции g , а от самой комплексной функции.

Применяя преобразование Фурье к функции (1), получаем:

$$G_x(u_x, a_x) = \sum_{t=0}^{K-1} g_x(t, a_x) \exp\left(\frac{-j2\pi u_x t}{K}\right), \quad u_x = 0, 1, \dots, K-1. \quad (17)$$

При этом симметрия ДПФ пропадает. Пики в левой и правой частях амплитудно-частотного спектра показывают наличие движения объекта по направлению оси x и против нее соответственно.

Теперь формула для оценки значения скорости (со знаком) запишется в виде

$$\epsilon_x = \begin{cases} \frac{u'_x}{K \cdot a_x}, & \text{если } u'_x \in \left[1, \frac{K}{2} - 1\right], \\ \frac{u'_x - K}{K \cdot a_x}, & \text{если } u'_x \in \left[\frac{K}{2} + 1, K\right]. \end{cases} \quad (18)$$

Графики зависимостей модулей функций G_y (для действительного и комплексного ДПФ) от частоты приведены на рис. 3.

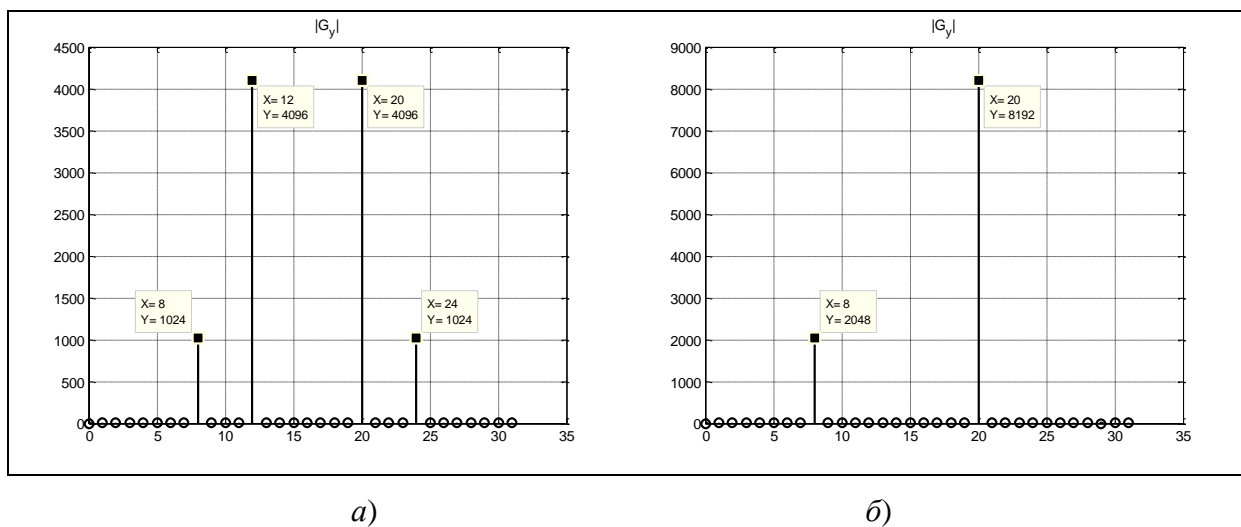


Рис. 3. Графики зависимостей $|G_y|$ от частоты: ДПФ от $\text{Re}(g_y)$ (а) и ДПФ от g_y (б)

Формула для оценки площади объекта (16) также изменится и запишется в виде

$$\hat{S} = \frac{|G_x(u'_x, a_x)|}{K}. \quad (19)$$

Анализ последовательностей полутоновых изображений

Перед применением предлагаемого метода исходные изображения необходимо предварительно сегментировать (бинаризовать с выделением движущихся объектов).

Воспользуемся следующей моделью последовательности динамических изображений:

$$f(x, y, t) = Q(x, y, t) \cdot B(x, y, t) + F(x, y) \cdot [1 - B(x, y, t)] + \xi(x, y, t), \quad (20)$$

где $F(x, y)$ – изображение фоновой составляющей; $Q(x, y, t)$ – яркость точек объекта; ξ – некоррелированный по пространству и между кадрами гауссов шум с нулевым средним и дисперсией σ_ξ^2 ;

$$B(x, y, t) = \begin{cases} 1, & \text{если точка } (x, y) \text{ принадлежит объекту,} \\ 0, & \text{если точка } (x, y) \text{ принадлежит фону.} \end{cases}$$

Задача бинаризации с выделением объектов заключается в нахождении некоторого приближения $B(x, y, t)$.

Эффективная сегментация является отдельной достаточно сложной задачей [3].

При тестировании предлагаемого метода бинаризация осуществлялась при помощи нахождения разностных изображений.

Будем считать, что СКО σ_ξ шума достаточно мало по сравнению с диапазоном яркостей наблюдаемого изображения, известна минимальная площадь объектов и имеется возможность хранить некоторое количество кадров, предшествовавших текущему.

Разностное изображение между двумя кадрами, взятыми в различные моменты времени t_i и t_j , определяется следующим образом:

$$d_{ij}(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{если } |f(x, y, t_i) - f(x, y, t_j)| > D, \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (21)$$

где D – заранее заданный порог.

Единичные значения изображения $d_{ij}(x, y)$ соответствуют движению. Побочные единичные пиксели, вызванные шумом, устраняются поиском 4- либо 8-связанных компонент, и, если площадь меньше некоторого порога T , удалением последних [1].

Для сглаживания контуров объектов, а также заполнения узких разрывов, углублений и отверстий к изображению применяется операция замыкания по некоторому примитиву b [7].

Результаты эксперимента

При моделировании работы предлагаемого метода использовалась последовательность полутоновых изображений размером 256×256 и глубиной цвета 8 бит/пиксель. Каждый кадр является следствием наложения на фоновое изображение объектов и добавления гауссова шума с нулевым средним и СКО σ_ξ .

Каждый из объектов представляет из себя прямоугольную область с равномерным распределением яркости и постоянной скоростью поступательного движения ($v_x = \text{const}$, $v_y = \text{const}$).

Значения параметров, использованных при моделировании, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры моделирования

Параметр	Значение	Параметр	Значение
K – количество кадров	32	I_1 – яркость пикселей первого объекта	200
S_1 – площадь первого объекта, пикс	64	I_2 – яркость пикселей второго объекта	200
S_2 – площадь второго объекта, пикс	256	σ_ξ – СКО шума	0,1
v_{1x} – составляющая скорости первого объекта вдоль оси x	3	T – пороговое значение площади области	16
v_{1y} – составляющая скорости первого объекта вдоль оси y	4	D – пороговое значение разности изображений	16
v_{2x} – составляющая скорости второго объекта вдоль оси x	1	a_x – коэффициент	4/32
v_{2y} – составляющая скорости второго объекта вдоль оси y	– 6	a_y – коэффициент	2/32

Один из кадров последовательности динамических изображений и результат бинаризации этого кадра приведены на рис. 4.

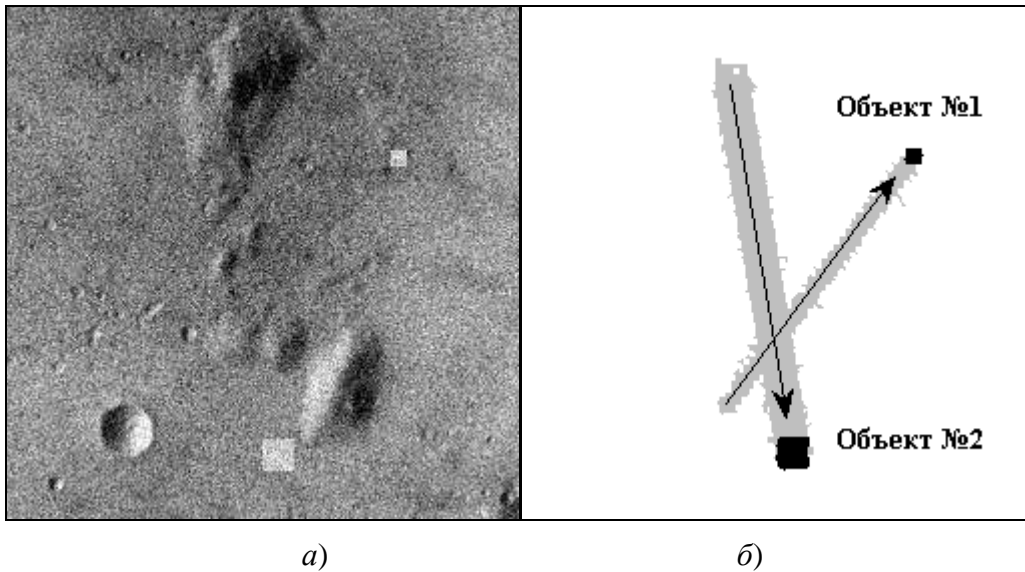


Рис. 4. Кадр из последовательности динамических изображений $f(x, y, t)$ размером 256×256 (а) и результат бинаризации с выделением подвижных объектов (б)

Графики зависимостей модулей функций G_x и G_y от частоты приведены на рис. 5.

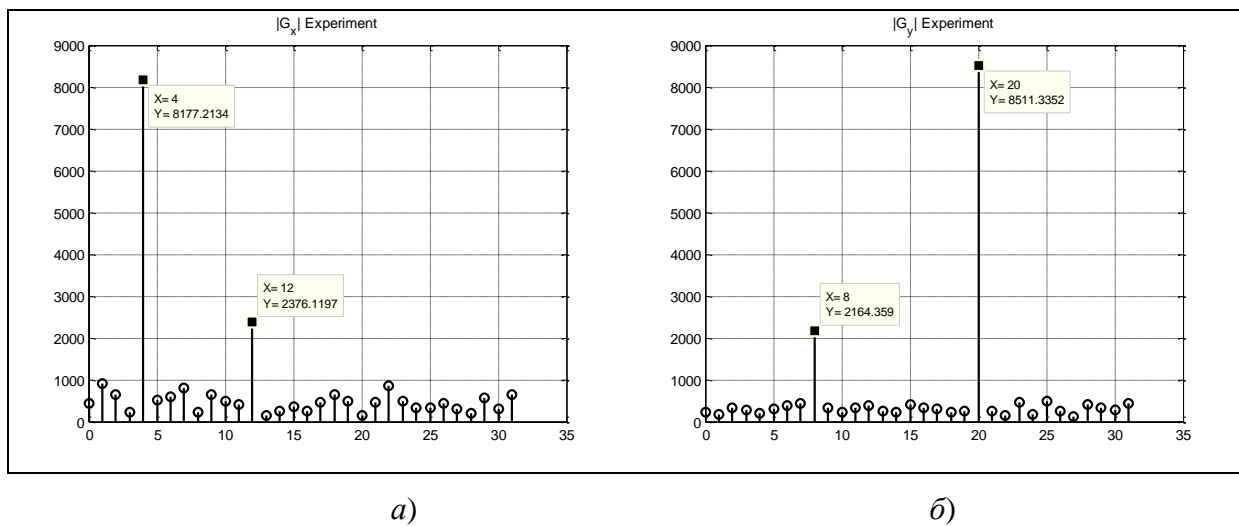


Рис. 5. Графики зависимостей $|G_x|$ от частоты (а) и $|G_y|$ от частоты (б)

Таблица 2

Результаты эксперимента

Номер объекта	1	2
Частота локального максимума u_x	12	4
Частота локального максимума u_y	8	20
Оценка скорости v_x , пикс/кадр	3	1
Оценка скорости v_y , пикс/кадр	4	-6
Оценка площади S_x , пикс	74	256
Оценка площади S_y , пикс	68	266

На практике для выполнения морфологических операций, а также расчета ДПФ, применяются быстрые алгоритмы [2, 6].

Из табл. 2 видно, что найденные оценки скоростей движения объектов соответствуют истинным значениям скоростей. Оценки площадей также найдены с достаточно высокой точностью. При этом следует отметить, что качество работы алгоритма, в частности, точность оценки размеров объектов, во многом зависит от качества выполнения операции бинаризации.

Итак, результаты экспериментальных исследований доказывают эффективность предложенного метода в ряде задач по сравнению с классическим подходом.

Заключение

В данной работе предложен и экспериментально исследован алгоритм нахождения оценок скоростей движения и площадей объектов в последовательности пространственно совмещенных динамических изображений частотными методами. Показана эффективность применения эквивалентной замены областей связанных пикселей и использования комплексного ДПФ в задачах детектирования и анализа движения.

Библиографический список

1. **Гонсалес, Р.** Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005.
2. **Кормен, Т.** Алгоритмы: построение и анализ / Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест, К. Штайн. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2009.
3. **Прэтт, У.** Цифровая обработка изображений / У. Прэтт. – М.: Мир, 1982.
4. **Рабинер, Л.** Теория и применение цифровой обработки сигналов / Л. Рабинер, Б. Гоулд. – М.: Мир, 1978.
5. **Форсайт, Д.** Компьютерное зрение. Современный подход / Д. Форсайт, Ж. Понс. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004.
6. **Хуанг, Т.С.** Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений: преобразования и медианные фильтры / Т.С. Хуанг. – М.: Радио и Связь, 1984.
7. Шапиро, Л. Компьютерное зрение / Л. Шапиро, Д. Стокман. – М.: Бином, 2006.

*Дата поступления
в редакцию 02.02.2010*

D.A. PIMANKIN, V.A. KISELMAN FREQUENCY-BASED MOTION ESTIMATION IN COMPUTER VISION SYSTEMS

We propose a method of motion detection and analysis in a sequence of spatially correspondent dynamic images, based on complex DFT. In a specific range of tasks the represented method is proved to be more effective in comparison to conventional frequency methods.

Key words: complex DFT, moving objects, background image, difference image, binary image, image segmentation.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ

УДК 621.9

И.Н. Фролова¹, А.И. Лаптев²

СПОСОБ АВТОМАТИЗАЦИИ ВЫБОРА СРЕДСТВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОСНАЩЕНИЯ

ПКО «Теплообменник»¹,

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

Статья посвящена вопросам автоматизации процедуры технологического проектирования. Дан краткий обзор проблем, стоящих перед разработчиками систем автоматизированного проектирования технологических процессов. Предложено решение проблемы автоматического выбора средств технологического оснащения. Рассмотрен универсальный подход к описанию всех элементов технологической системы.

Ключевые слова: технологическая подготовка производства, средства технологического оснащения, технологическая система.

Актуальность автоматизации процесса выбора средств технологического оснащения для изготовления изделия

Перед каждым предприятием машиностроительного профиля на переднем плане стоит задача оптимизации технической подготовки производства. В общем виде, техническую подготовку производства можно представить как совокупность конструкторской подготовки производства, технологической подготовки производства и организационной подготовки производства.

Автоматизация конструкторской подготовки производства в настоящее время находится на удовлетворительном уровне и представлена CAD/CAE системами, которые позволяют существенно сократить сроки разработки конструкции нового изделия и повысить его качество.

Организационная подготовка производства также может быть автоматизирована системами MES, ERP, MRP.

С автоматизацией технологической подготовки производства дело обстоит сложнее. Для выявления подлежащих автоматизации компонентов, рассмотрим структуру технологической подготовки производства по этапам:

- планирование технологической подготовки производства – прогнозирование, планирование и моделирование технологической подготовки производства;
- технологическое проектирование – распределение номенклатуры между цехами и подразделениями предприятия, разработка технологических маршрутов движения объектов производства, разработка техпроцессов изготовления и контроля деталей, сборки и испытаний и всей прочей технологической документации, типизация технологических процессов, разработка базовых и групповых процессов, технико-экономическое обоснование технологических процессов;

- выбор оборудования – выбор и обоснование универсального, специального, агрегатного и нестандартного оборудования, выдача заданий на проектирование этого оборудования, а также на проектирование гибких автоматических, автоматизированных, роботизированных линий и комплексов, конвейеров, транспортных средств и т.п.;
- выбор и технологическое конструирование оснастки – выбор необходимого специального, универсального и унифицированного оснащения, проектирование (технологическое конструирование) оснастки, технико-экономические обоснования выбора и применения оснастки;
- нормирование.

Современные САПР ТП представляют возможности по автоматизации ведения технологической документации и автоматизации поиска техпроцессов аналогов. По существу, процесс технологического проектирования остается ручным процессом. Открытым остается вопрос о рациональном выборе средств технологического оснащения. Процесс выбора остается ручным, а ведь от него зависит технологический маршрут движения объектов производства.

Итак, одной из основных задач по автоматизации технологической подготовки производства является автоматизация процесса выбора средств технологического оснащения для изготовления изделия.

Автоматизация выбора средств технологического оснащения

На данный момент, в системах САПР ТП привязка оборудования к технологическому процессу осуществляется вручную. По сути дела отсутствует автоматизация процесса, стоящего во главе угла технологического проектирования. Следовательно не правомочно говорить об автоматизации процесса технологического проектирования без автоматизации процедуры выбора средств технологического оснащения. Таким образом, существующие САПР ТП не более чем редакторы технологических процессов.

Для выбора средств технологического оснащения нам необходимо знать:

- из чего выбирать (база данных средств технологического оснащения);
- для чего выбирать (информация о детали: вид поверхности, точность, качество поверхности);
- как выбирать (процедура выбора и оптимизация выбора по заданному критерию).

Решение первого вопроса – создание баз данных средств технологического оснащения. На первый взгляд весьма простая процедура, однако, содержание этих баз данных должно соответствовать некоторым требованиям, а именно:

- содержать информацию о средствах технологического оснащения в виде, обеспечивающем привязку средств технологического оснащения к детали и друг к другу (приспособления к станку, инструмента к приспособлению);
- иметь возможность легкого проведения дополнения и изменения;
- иметь привязку к системам организационной подготовки производства.

Информация о поверхностях детали должна поставляться непосредственно с САД-системы и должна автоматически приводится к единому для всей технологической системы виду.

Процедура выбора средств технологического оснащения должна быть оптимизирована по критериям, задаваемым системами автоматизации организационной подготовки производства, т.е., как говорилось выше, иметь привязку к этим системам.

Предлагаемый метод автоматизации выбора средств технологического оснащения базируется на единстве описания всех элементов технологической системы (станка, приспособления, инструмента, детали).

Единство математических основ описания элементов технологической системы

Для описания элементов технологической системы, необходимо рассмотреть структуру каждого элемента в отдельности. Анализ элементов структуры поможет выявить метод общего их описания.

Функции элементов технологической системы приведена на рис. 1–3.

Из рис. 1–3 видно, что элементы технологической системы имеют схожие функции (с точки зрения технологии), которые можно описать как функцию базирования и функцию формообразования. Цепочка выбора элементов технологической системы выглядит следующим образом:

- анализ обрабатываемой поверхности. Как итог – множество движений формообразования (т.к. поверхность можно получить различными способами и для различной модели инструмента – точечной, линейной, поверхностной). Сравнивая потребные движения формообразования с движениями формообразования имеющегося оборудования можно выделить множество возможного оборудования для обработки заданной поверхности или выявить невозможность обработки на имеющемся оборудовании;
- анализ технологических баз детали. Сравнивая технологические базы детали с описанием подсистемы базирования заготовки на станке, делаем вывод о возможности закрепления детали на данной единице оборудования. Тем самым сужаем множество возможного оборудования для обработки детали;
- анализ баз приспособления. Приспособление как переходный элемент между оборудованием и инструментом (деталью) имеет два комплекта баз. Первый комплект характеризует применимость указанного приспособления на данном оборудовании (т.е. возможно ли закрепить приспособление на станке), второй – применимость данного приспособления для базирования данного инструмента (детали). Поскольку выбор приспособления ограничивается как оборудованием, так и инструментом (деталью), целесообразно приспособление выбирать последним, после определения множеств остальных элементов технологической системы;
- анализ инструмента. Первым признаком инструмента является модель формообразования, осуществляемая этим инструментом. Модель формообразования принимается на этапе анализа обрабатываемой поверхности. Тем самым значительно ограничивается множество инструмента. Второе ограничение возникает после определения множества оборудования. Оборудование ограничивает возможные движения инструмента. Если оборудование не способно воспроизвести заданные движения формообразования, делают вывод о неприменимости данной связки оборудование – инструмент или об использовании приспособления, выполняющего недостающие движения формообразования (револьверная головка с приводом инструмента на токарных обрабатывающих центрах).

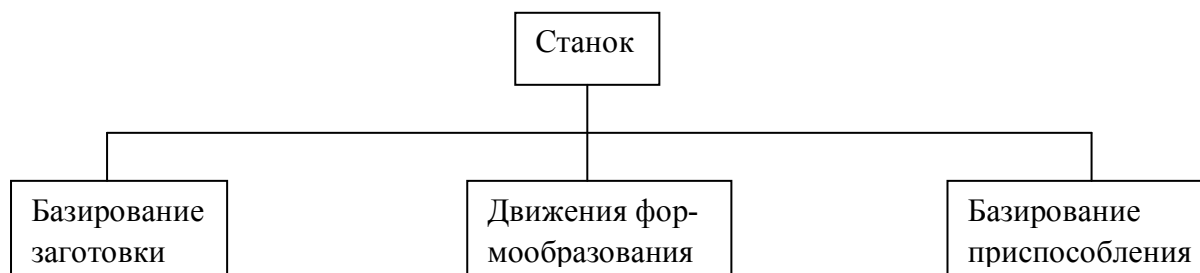


Рис. 1. Функциональная схема станка



Рис. 2. Функциональная схема приспособления

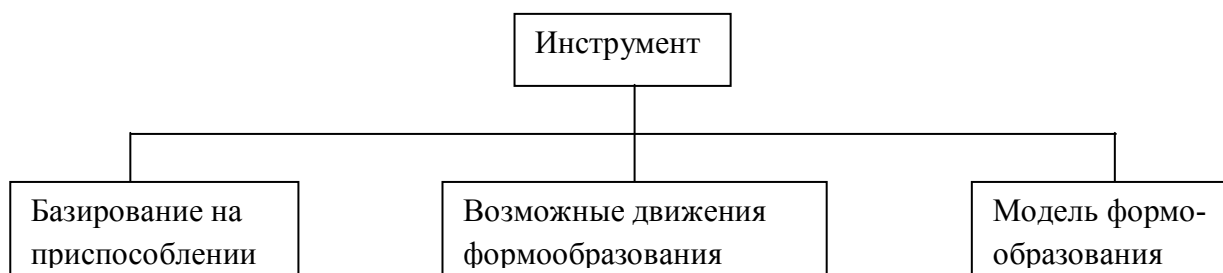


Рис. 3. Функциональная схема инструмента

Идея автоматизированного выбора средств технологического оснащения базируется на сравнении потребных баз с имеющимися и потребных движений формообразования с имеющимися. Поскольку базы являются поверхностями, а поверхности получаются совокупностью движений направляющей и образующей, можно рассмотреть единый математический аппарат для анализа как баз, так и движений формообразования. Поскольку описания функций элементов технологической системы производятся в собственной системе координат (оборудования, инструмента или приспособления), необходимо совершать перевод собственной системы координат в глобальную. Такой перевод можно рассматривать как движение собственной системы координат до совмещения с глобальной, т.е. математический аппарат для перехода к глобальной системе координат един с аппаратом анализа баз и движений формообразования.

При рассмотрении заданных движений (станка, приспособления, систем координат) удобно представлять систему как совокупность систем координат. Начало O и оси X , Y , Z системы координат при этом увязываются с конструктивными или технологическими базами элемента технологической системы. Такими базами преимущественно являются направляющие, шпиндельные опоры, точно обработанные плоскости и цилиндрические поверхности.

Твердое тело, как известно, может иметь шесть степеней свободы. Поскольку звенья технологической системы обладают лишь одной степенью свободы в относительном движении, то с каждым звеном однозначно связывается один из приведенных в табл. 1 символов.

Таблица 1

Обозначение координатных движений

Вид движения	Направление	Символ движения
Поступательное	Вдоль оси X	1
	Вдоль оси Y	2
	Вдоль оси Z	3
Вращательное	Вдоль оси X	4
	Вдоль оси Y	5
	Вдоль оси Z	6

Рассмотрим в качестве примера технологическую систему, состоящую из токарного станка, цилиндрической заготовки и нескольких резцов. Токарный станок имеет собственную систему координат, привязанную к оси шпинделя (рис. 4). В этой системе координат движения формообразования (движения узлов станка) в соответствии с табл. 1 имеют вид 631.

Базирование заготовки в патрон осуществляется по цилиндрической поверхности, которая получается совокупностью вращательного и поступательного движений. В системе координат станка такой состав движений отражается символами 63 (порядок значения не име-

ет, при любом сочетании заданного вращательного и поступательного движений получается цилиндрическая поверхность).

Базирование инструмента осуществляется в резцедержатель по плоским поверхностям. Плоская поверхность описывается сочетанием двух прямолинейных движений. В системе координат станка базовая плоскость ZX опишется как 13.

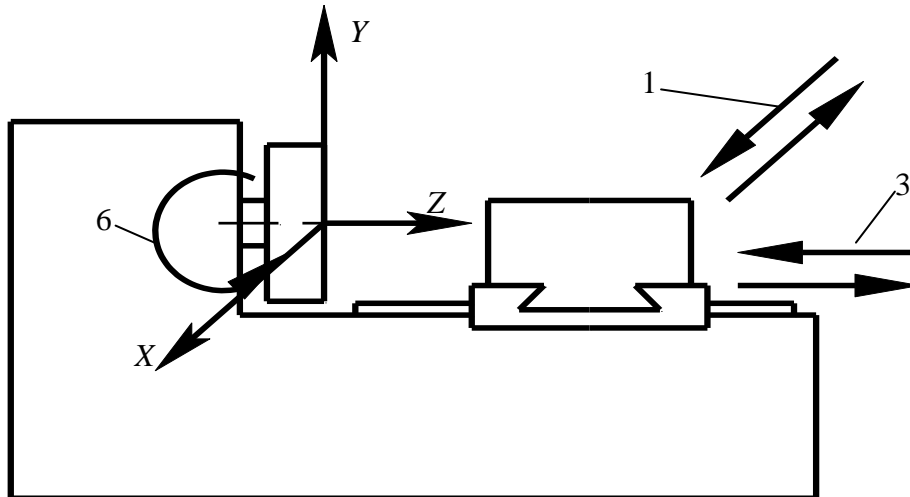


Рис. 4. Собственная система координат токарного станка

При переходе к глобальной системе координат система координат станка совершит поворот (один или несколько) до совмещения с глобальной. Пусть глобальная система координат ориентирована, как показано на рис. 5 (индексами С отмечена собственная система координат, индексами Г - глобальная).

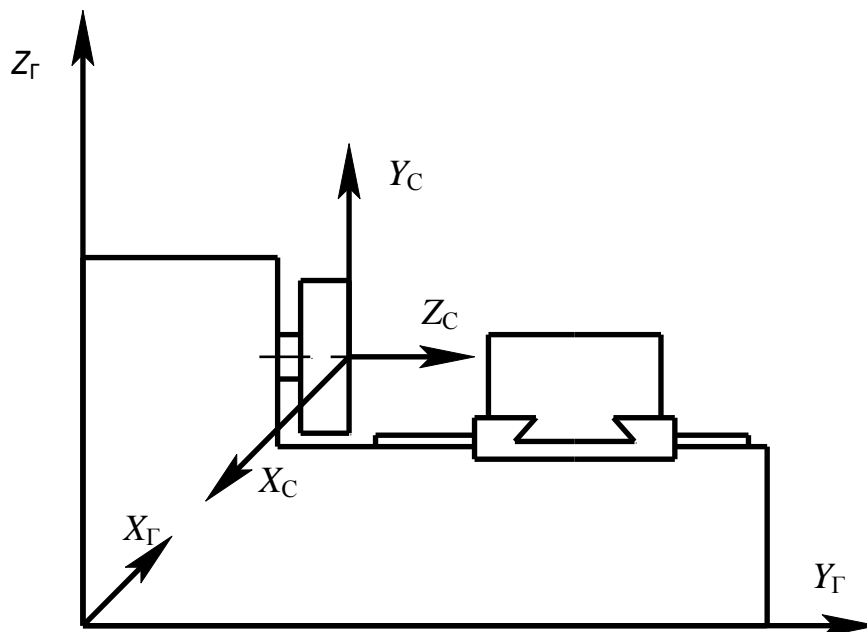


Рис. 5. Переход от собственной системы координат станка к глобальной

Переход от собственной системы координат к глобальной осуществляется с помощью поворота собственной системы координат вокруг оси X на $+90^\circ$, затем поворота полученной переходной системы координат вокруг оси Z на 180° . Таким образом, оператор перехода к глобальной системе координат кодируется как 466 (один символ означает поворот на 90°).

Поворот системы координат на 180° не влияет на изменение координатных кодов, поэтому его можно отбросить. Оператор перехода примет вид 4.

Можно сформулировать простое правило, благодаря которому с помощью координатного кода в собственной системе координат и оператора перехода можно получить координатный код в глобальной системе координат: при повороте системы координат вокруг оси на 90° символы координатного кода, характеризующие движение относительно этой оси не меняются, относительно других осей меняются местами. То есть при повороте собственной системы координат на 4, код 631 примет вид 521. Сформулированное правило можно свести в табл. 2 для удобства использования.

Координатный код базирования заготовки примет вид 52, базирования инструмента – 12.

Таблица 2

Правило преобразования координатного кода

Исходный символ кода	Оператор поворота системы координат		
	4	5	6
1	1	3	2
2	3	2	1
3	2	1	3
4	4	6	5
5	6	5	4
6	5	4	6

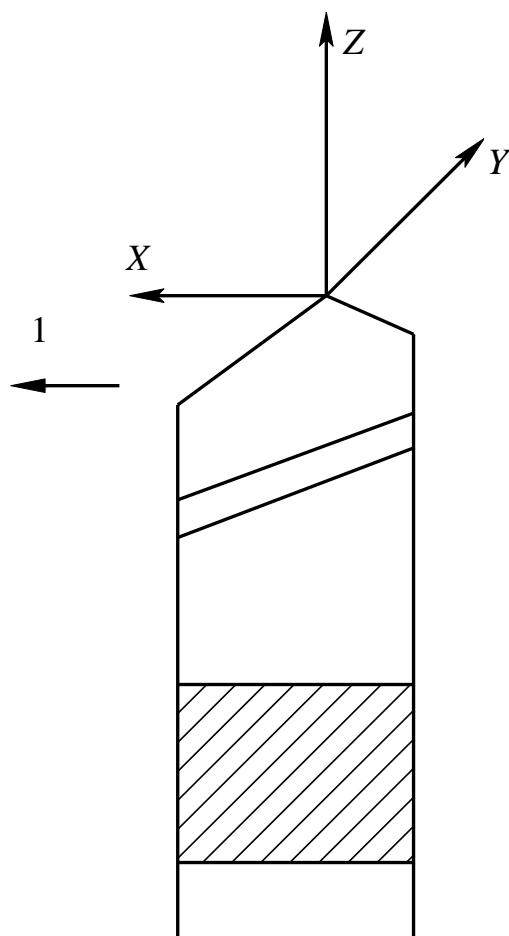


Рис. 6. Собственная система координат токарного резца с державкой прямоугольного сечения

Токарный резец с державкой прямоугольного сечения базируется по плоскостям. Систему координат инструмента примем, как показано на рис. 6. Система координат приведена в вершину резца (принято, что резец производит формообразование по точечной модели. Рассмотрение модели формообразования и связанных с ней координатных преобразований выходит за рамки данной статьи). Координатный код базирования резца имеет вид 13. Координатный код разрешенных движений формообразования (возможных движений подачи) – 1. Резец устанавливается в резцедержатель станка таким образом, чтобы ось Z резца совпала с осью X собственной системы координат станка (рис. 4, 6). Оператор преобразования системы координат резца в собственную систему координат станка имеет вид 5 (рис. 7). Координатный код базирования инструмента в системе координат станка примет вид 31, координатный код разрешенных движений формообразования в системе координат станка примет вид 3.

Резцовая головка с аналогичной режущей частью имеет координатный код базирования 63 (базирование по цилиндрической поверхности) в собственной системе координат инструмента и координатный код разре-

шенных движений формообразования 1. В собственной системе координат станка координатный код базирования инструмента примет вид 41, координатный код разрешенных движений формообразования – 3.

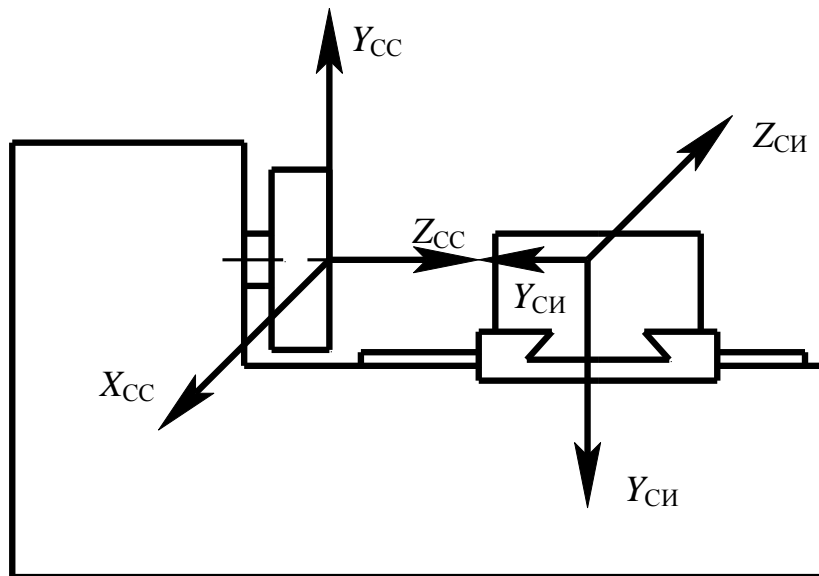


Рис. 7. Собственные системы координат станка (CC) и инструмента (CI)

Проанализируем полученные данные. Сведем в табл. 3 данные по станку и инструментам. Инструмент 1 – резец токарный с державкой прямоугольного сечения, инструмент 2 – резцовая головка. Формообразующие возможности инструментов одинаковы. Однако резцовая головка имеет базирующую подсистему несовместимую с базирующей подсистемой станка, что отражено в несовпадении координатных кодов базирующих подсистем.

Анализируя табл. 3 можно сделать вывод, что выбор средств технологического оснащения может осуществляться в автоматическом режиме. Кодирование инструмента осуществляется по каталогу (в современных каталогах указываются формообразующие возможности инструмента), как и кодирование станка. Специальных навыков для этого не требуется.

Таблица 3

Анализ возможностей использования инструмента на данном оборудовании

Характеристики	Координатные коды в собственной системе координат станка		
	Станок	Инструмент 1	Инструмент 2
Базирование	13	31	41
Формообразующие возможности	31	3	3

Выводы:

- на сегодняшний день САПР ТП не автоматизирует выбор средств технологического оснащения, что значительно тормозит автоматизацию технологической подготовки производства;
- выбор средств технологического оснащения может осуществляться без участия технолога в автоматическом режиме при соответствующем кодировании элементов технологической системы;

- предложенная методика кодирования элементов технологической системы проста в использовании (для кодирования станка и инструмента нет нужды в специальных навыках, кроме навыков работы с каталогами станко-инструментальных фирм) и использует единый математический аппарат для любого элемента системы.

*Дата поступления
в редакцию 26.01.2010*

I.N. Frolov, O.I. Kutilova

**THE ANALYSIS OF MODERN SYSTEMS OF THE AUTOMATION
DESIGN OF TECHNOLOGICAL PROCESSES**

In a paper computer-aided design methods, modern systems of computer-aided design of technological processes are considered and the analysis of the most widespread programs for projection of technological processes is made.

Key words: computer-aided design, technological process.

УДК 621.9

И.Н. Фролова¹, О.И. Кутилова²**АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ (САПР ТП)**ПКО «Теплообменник»¹,Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

В статье рассмотрены методы автоматизированного проектирования, современные системы автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП) и произведен анализ наиболее распространенных программ для проектирования технологических процессов.

Ключевые слова: автоматизированное проектирование, технологический процесс.

Современное машиностроительное производство испытывает постоянно возрастающую потребность в полноценных высокоэффективных САПР ТП.

Существуют три основных метода автоматизированного проектирования технологических процессов [1]:

- индивидуальное проектирование;
- проектирование на основе группового технологического процесса;
- проектирование технологического процесса методом синтеза.

Метод индивидуального проектирования заключается в ручной компоновке необходимой последовательности операций и переходов с использованием имеющейся в САПР ТП базы данных (база содержит списки наименования операций, переходов, перечни оборудования и оснастки). Предполагается также разработка технологического процесса на основе процесса-аналога, т.е. разработанных ранее технологических процессов (при этом проектирование сводится к редактированию имеющегося технологического процесса). Для поиска процесса-аналога необходимо решить задачу поиска детали-аналога. При этом могут использоваться специальные классификаторы деталей и алгоритмы поиска.

Проектирование на основе группового технологического процесса базируется на предварительно выполненном группировании деталей и разработке группового технологического процесса (групповой технологический процесс используется в качестве шаблона, который настраивается на параметры конкретной детали).

Метод синтеза технологического процесса состоит в алгоритмическом формировании технологического процесса на основе имеющегося геометрического и технологического описания детали. Данный метод по настоящее время находит ограниченное применение, поскольку не реализовано строгое математическое описание формирования структуры технологического процесса на основе геометрии детали и технологических атрибутов.

Большинство широко используемых программ для разработки технологических процессов на практике применяется примерно одинаково, а именно в диалоговом режиме с некоторой степенью автоматизации отдельных шагов. Типичные приемы работы инженера-технолога выглядят в таком случае примерно так: из имеющихся в программе справочников последовательно выбираются технологическая операция, оборудование, технологические переходы (текст которых при необходимости редактируется), инструмент. При этом в зависимости от того, насколько полно и тщательно настроена база данных соответствующей программы, эти шаги могут быть до некоторой степени автоматизированы. При наличии уже разработанного в программе техпроцесса-аналога технолог просто копирует его в разрабатываемую технологию (целиком или выбрав необходимый фрагмент), после чего корректирует.

Когда описание техпроцесса сформировано на экране, комплект документации необходимого вида распечатывается. Таким или похожим способом работают большинство технологов – практически независимо от того, какую программу они при этом используют.

Этот способ существенно ускоряет разработку технологической документации в сравнении с обычным ручным способом и в то же время не требует особо трудоемкой настройки программного обеспечения. Относительно хорошо зарекомендовавший себя метод автоматической генерации техпроцессов на основании ТП комплексной детали, во-первых, годится только для однотипных и не очень сложных деталей, а во-вторых, требует серьезной подготовки. Как минимум, необходимо придумать саму комплексную деталь и ее элементы, разработать групповой техпроцесс. Вопрос же полностью автоматической генерации технологии изготовления на любую деталь пока остается открытым и на сегодняшний день практического решения не имеет.

Еще одним весьма распространенным приемом автоматизации разработки технологической документации был способ «кодирования» деталей с последующим автоматическим созданием на ЭВМ маршрутных и операционных карт. Инженер-технолог заполнял специальную форму (карту), в которой по определенным правилам кодировал обрабатываемые поверхности заготовки. Оператор вводил эти коды с карты в специальную программу, которая выдавала уже почти готовый техпроцесс (комплект документов). Распечатанные документы при необходимости дополнялись и исправлялись вручную. Такой способ требовал специальной подготовки. Программы были совершенно не интерактивны. Для получения желаемого результата требовалось еще и правильно закодировать деталь, что не очень просто. Несмотря на это, описанный подход практически избавлял рядового технолога от рутинной работы по ручному заполнению маршрутных и операционных карт, благодаря чему снискал большую популярность.

Примерами отечественных программ для проектирования технологических процессов являются САПР ТП «Вертикаль», «Т-Flex Технология» и «ТехноПро». Данные системы являются крупнейшими отечественными САПР ТП в странах СНГ и в целом отражают степень автоматизации разработки технологических процессов в отечественном машиностроении.

Порядок работы пользователя в САПР ТП «Вертикаль» ориентирован на привычный технологу процесс формирования «бумажной» технологической документации. Быстрый доступ ко всем справочным данным многократно сокращает время поиска информации, необходимой для принятия технологических решений. В системе «Вертикаль» реализованы различные методы проектирования: на основе техпроцесса-аналога; с использованием библиотеки часто повторяемых технологических решений; типовых и групповых технологических процессов; проектирование с использованием библиотеки конструкторско-технологических элементов; заимствование технологических решений из ранее разработанных технологий; диалоговый режим проектирования с использованием баз данных системы.

«Т-Flex Технология» - полнофункциональная программа для автоматизации технологической подготовки производства, обладающая гибкими современными средствами разработки технологических проектов любой сложности. Эта САПР ТП позволяет получать по спроектированным моделям и чертежам всю необходимую технологическую документацию. Система «Т-Flex Технология» поддерживает различные методы проектирования:

- диалоговое проектирование с использованием баз технологических данных;
- проектирование на основе техпроцесса-аналога;
- заимствование технологических решений из ранее разработанных технологий;
- проектирование с использованием библиотеки технологических решений;
- проектирование групповых и типовых технологических процессов;
- из общего технологического процесса;
- автоматическое проектирование с использованием библиотеки технологических решений.

«Т-Flex Технология» является приложением к PDM-системе «Т-Flex DOCs». Благодаря этому в технологическом модуле используется необходимая технологом часть функциональности PDM. В результате создается единое информационно-справочное пространство

для технологов и конструкторов. Например, с помощью средств «T-Flex DOCs» обеспечивается работа с общими для конструкторов и технологов справочными данными. Состав изделия, а также все разрабатываемые технологии сохраняются в общей базе данных на сервере, что при соответствующем разграничении доступа к информации позволяет организовать коллективную работу над проектами.

Система «ТехноПро» предназначена для проектирования операционной технологии, включая операции: заготовительные, механической и термической обработки, нанесения покрытий, слесарные, технического контроля, сборки и др. В «ТехноПро», наряду с оригинальным методом проектирования по «общим технологическим процессам», реализованы и традиционные методы: по типовому, групповому, технологическому процессу-аналогу. Технолог сам выбирает метод проектирования, наиболее подходящий в конкретном случае, а также способ его использования: автоматический, полуавтоматический, диалоговый или их сочетание.

Анализ некоторых отечественных САПР ТП [2] представлен в виде табл. 1. В строках таблицы приведены элементы процесса проектирования технологии, подлежащие автоматизации (или элементы ТПП – технологической подготовки производства). В столбцах – степень автоматизации этих элементов, применительно к рассмотренным выше САПР ТП. САПР анализировались применительно к процессу механической обработки изделия.

Таблица 4

Анализ некоторых отечественных САПР ТП

Элементы ТПП	САПР ТП		
	«Вертикаль»	«T-FLEX Технология»	«ТехноПро»
Автоматический ввод исходных данных об изделии (геометрия)	Только из САПР «КОМПАС». Геометрическая модель используется для обзора	Отсутствует	Отсутствует
Формирование структуры технологического процесса по геометрическим элементам модели	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует
Автоматическое формирование технологических эскизов на основе 3D-модели детали	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует
Автоматическое управление изменениями	Только в связке с «ЛЮЦМАН:PLM»	Только в связке с «T-FLEX Docs»	Отсутствует
Автоматическое формирование технологической документации	Присутствует	Присутствует	Присутствует
Универсальность по отношению к САД-системе	Не универсальна. Необходим модуль интеграции под конкретную САПР	Не универсальна. Необходим модуль интеграции под конкретную САПР	Нет необходимости, поскольку информация с 3D-модели не используется
Наличие технологических справочников	Присутствует	Присутствует	Присутствует
Связь с распространенными БД и СУБД	Присутствует	Присутствует	Присутствует. Примечание: необходимо наличие MS Access на рабочей станции
Интеграция в единое информационное пространство предприятия	Вместе с «ЛЮЦМАН:PLM», либо необходим модуль интеграции	Вместе с «T-FLEX Docs», либо необходим модуль интеграции	Необходим модуль интеграции

В результате анализа выявлены следующие недостатки существующих САПР ТП (и как следствие проблемы в отечественной ТПП):

- реализация индивидуального метода проектирования и метода проектирования на основе группового технологического процесса накладывает ограничения, присущие этим методам (невозможность автоматического формирования технологического процесса или его части на основе геометрии детали, получаемой с 3D-модели, недостаточная интеграция в единое информационное пространство предприятия);
- отсутствие автоматического ввода исходных данных об изделии (данные интерпретируются технологом, хотя имеются все предпосылки для передачи этой функции САПР ТП);
- автоматическое формирование технологических эскизов отсутствует.

Анализ показывает, что на данный момент возможности автоматизации ТПП, представляемые методами индивидуального и группового проектирования практически исчерпаны. Однако процесс проектирования технологического процесса остается практически ручной работой, что увеличивает долю по времени ТПП в жизненном цикле изделия. Возникает острая необходимость в разработке САПР ТП, функционирующей на основе метода синтеза технологического процесса. В настоящее время разрабатываются алгоритмы, позволяющие описать структуру технологического процесса в зависимости от геометрических параметров детали. Развитие САПР систем позволяет присваивать поверхностям 3D-моделей технологические атрибуты, которые могут быть использованы в качестве параметров в сформированной структуре технологического процесса. База данных оборудования и оснастки, имеющаяся в PDM-системе предприятия позволяет без дублирования информации встроить САПР ТП в единое информационное пространство предприятия. Гибкость проектируемого технологического процесса обуславливается ассоциированием структуры технологического процесса с 3D-моделью детали, а также импортом из внешней базы данных параметров технологического процесса (имеющееся оборудование, партия выпуска и т.д.).

Таким образом, можно сделать вывод, что качественное изменение в ТПП произойдет при реализации в полной мере метода синтеза технологического процесса, поскольку остальные методы проектирования технологического процесса исчерпали свои возможности, не удовлетворяя потребностей технологов в степени автоматизации ТПП.

Библиографический список

1. Зильбербург, Л.И. Информационные технологии в проектировании и производстве / Л.И. Зильбербург, В.И. Молочник, Е.И. Яблочников. – СПб.: Политехника, 2008.
2. САПР технологических процессов: учебник для студ. высш. учеб. заведений / А.И. Кондаков. – М.: Академия, 2007.

*Дата поступления
в редакцию 26.01.2010*

I.N. Frolov, O.I. Kutilova

THE ANALYSIS OF MODERN SYSTEMS OF THE AUTOMATION DESIGN OF TECHNOLOGICAL PROCESSES

In a paper computer-aided design methods, modern systems of computer-aided design of technological processes are considered and the analysis of the most widespread programs for projection of technological processes is made.

Key words: computer-aided design, technological process.

УДК 621. 771 : 669.14.018.27

В.В. Галкин

ОЦЕНКА ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В ЗАГОТОВКЕ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ, РАСКАТЫВАЕМОЙ ВАЛКОМ НА КЛИН ПО ПЛИТЕ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Дана оценка деформированного состояния материала в заготовке прямоугольного сечения, раскатываемой валком на клин по плите. Определено положение зоны интенсивной деформации по толщине в зависимости от величины обжатия. Исследование проводилось на основе определения механических и эксплуатационных характеристик листовых заготовок стали 50ХГФА, которые из прокатанного рессорного листа в его характерных зонах по толщине вырезались послойно методом проволоочной электро-эрозионной обработки.

Ключевые слова: неравномерность деформированного состояния, очаг деформации, направление главных тангенциальных напряжений.

Одной из основных задач в расчетах процессов пластической деформации является определение строения геометрического очага деформации. Это позволяет объективно оценить развивающиеся в металле процессы деформирования и реально прогнозировать структурообразование металла. Современное представление об очаге деформации указывает на значительную сложность строения этого объема. Оно включает активно движущие и пассивные поверхности, свободные поверхности, основные направления истечения металла и границы устойчивой локализации деформации. Зона сильно деформированного металла (ядро деформации) является определяющей в формировании всех остальных зон, зависит от величины и формы контактной поверхности инструмента с заготовкой. Она может иметь форму конуса, пирамиды, однако всегда, согласно модели С.И. Губкина, располагается вдоль направления главных тангенциальных напряжений, по которым, в первую очередь, происходит деформация.

Строение очага деформации при осадке и продольной прокатке подробно изучены в работах Я.М. Охрименко и А.И. Целикова. Процесс прокатки на клин заготовки прямоугольного сечения на плите является периодическим, однако, в отличие от продольной прокатки, имеет постоянно изменяющийся очаг деформации, в силу того, что закон формоизменения задается активно движущимся инструментом – валком, который, кроме поступательного движения, имеет перпендикулярное прокатываемой поверхности заготовок движение. В силу того, что исследованию очага деформации прокатки полосы на клин на плите посвящено не очень много работ, очевидна актуальность проблемы его исследования.

Изделия с клинообразной рабочей поверхностью широко применяются. Они являются либо оружием (меч, секира, дротик), либо орудиями труда (нож, топор). Первые исследования строения очага деформации при прокатке в технологическом процессе проводились на основании данных о неравномерности течения металла в его объеме. Для этого с начала XX в., применялись методы, основанных на замере деформации прокатанных винтов, помещенных в исходную заготовку, и изгиба вертикальных линий, нанесенных на боковую поверхность прокатываемой полосы (метод линий Холленберга). Основным их недостатком является неточность, а также тот факт, что они не позволяют определить геометрию и строение очага деформации, а следовательно, оценить динамику процесса. Несмотря на изложенное, для прокатки заготовки рессорного листа из стали 50ХГФА (рис. 1), автором статьи совместно с инженерными работниками ОАО «ГАЗ» были использованы изложенные методики [1].

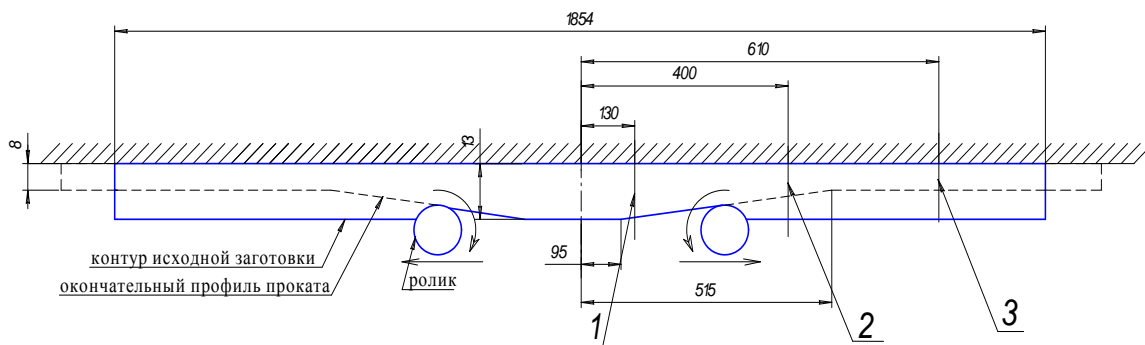


Рис. 1. Схема двухсторонней раскатки валками на клин заготовки прямоугольного сечения на плите с указанием исследуемых зон со степенями обжатия ε :
 1 – 4%; 2 – 23%; 3 – 40%

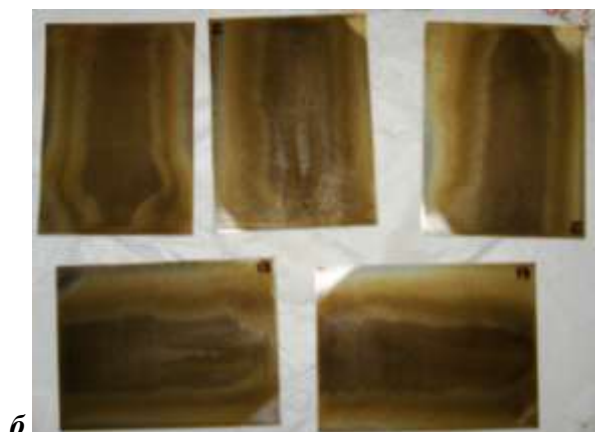
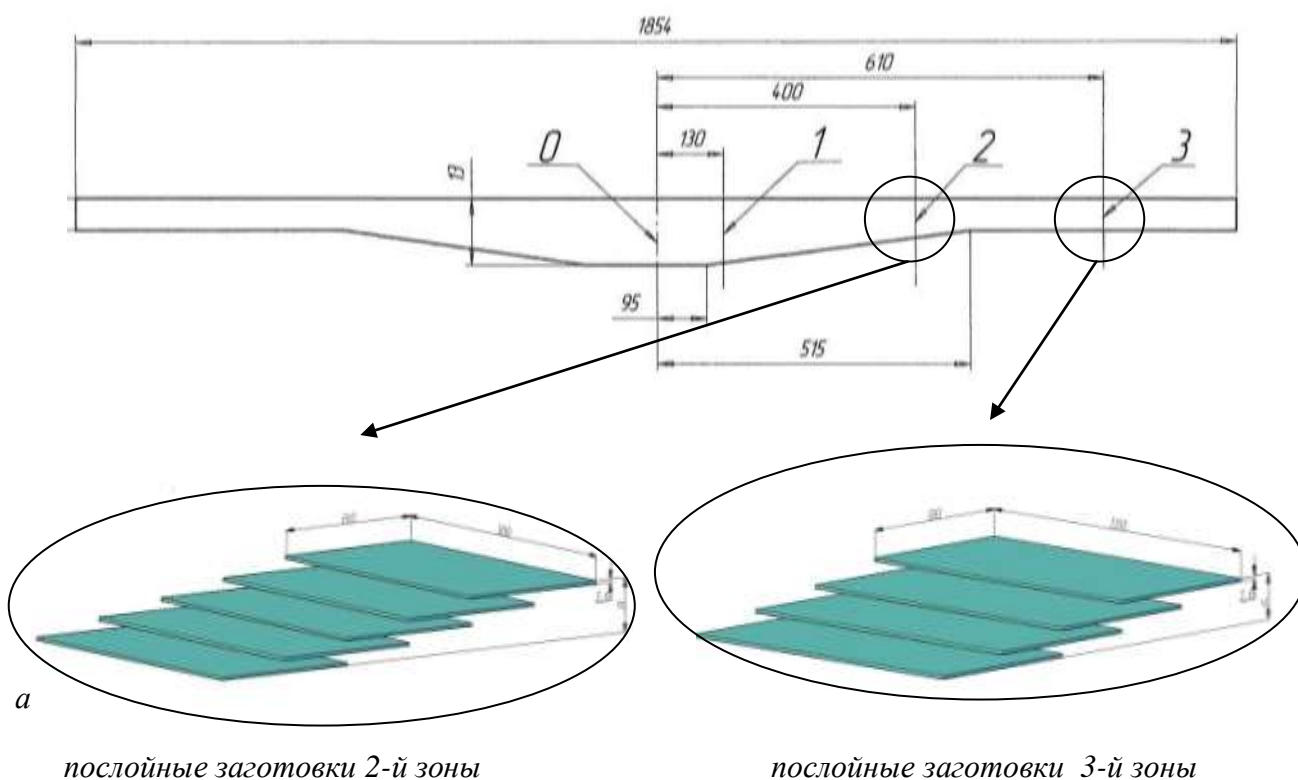


Рис. 2. Расположение зон прокатанной полосы рессорного листа (а) для изготовления образцов из послойных заготовок (б) со степенями обжатия ε :
 2 – 23%; 3 – 40%

Их результаты показали неравномерное течение слоев прокатываемой заготовки по толщине в зависимости от степени обжатия с определенной закономерностью: с начала прокатки и до степени деформации $\epsilon \approx 20\%$ наибольшую интенсивность деформации имеют слои, контактируемые с инструментом – валком, далее она смещается на слои, контактируемые с неподвижной опорой прокатного стана. При дальнейшем увеличении степени деформации до $\epsilon \approx 40\%$, вновь с незначительным отличием более интенсивно деформируются прокатываемые слои заготовки.

В последнее время с развитием вычислительной техники, метод конечных элементов (МКЭ) на основании создания современных программных продуктов, приобрел значительное применение. Его результаты, как правило, являются обязательными данными (расчетами) при разработке технологии с применением пластической деформации. Поэтому рассматриваемый технологический процесс был проанализирован с применением программного комплекса DEFORM [2].

Основным недостатком первых двух указанных методов является их неточность и как следствие невозможность определения положения зоны наибольшей деформации по толщине прокатываемой заготовки в зависимости от степени обжатия. Математическое моделирование основано на методе конечных элементов (МКЗ), что в свою очередь требует подтверждения результатами структурно-механических исследований.

С целью устранения этих недостатков исследование данной работы проводилось по направлению определения механических характеристик прокатываемого материала по толщине в зависимости от степени обжатия. Для этого в прокатанном рессорном листе вырезались заготовки длиной 100 мм, положение середины которых показаны на рис. 6. Далее заготовки разрезались методом проволочной электроэрозионной обработки на пластины толщиной 1,5 мм, из которых изготавливались два срединных и два крайних образца для одноосного растяжения и циклических испытаний на усталость.

Результаты механических испытаний в виде кривых упрочнения приведены на рис. 3 и 4. В частности, предел текучести $\sigma_{0,2}$ имеет следующие значения:

- при степени обжатия $\epsilon \approx 23\%$ по краю полосы значения находились в интервале 581...676 МПа, по середине – 536...651 МПа;
- при степени обжатия $\epsilon \approx 40\%$ по краю полосы значения находились в интервале 265...524 МПа, по середине – 486...594 МПа.

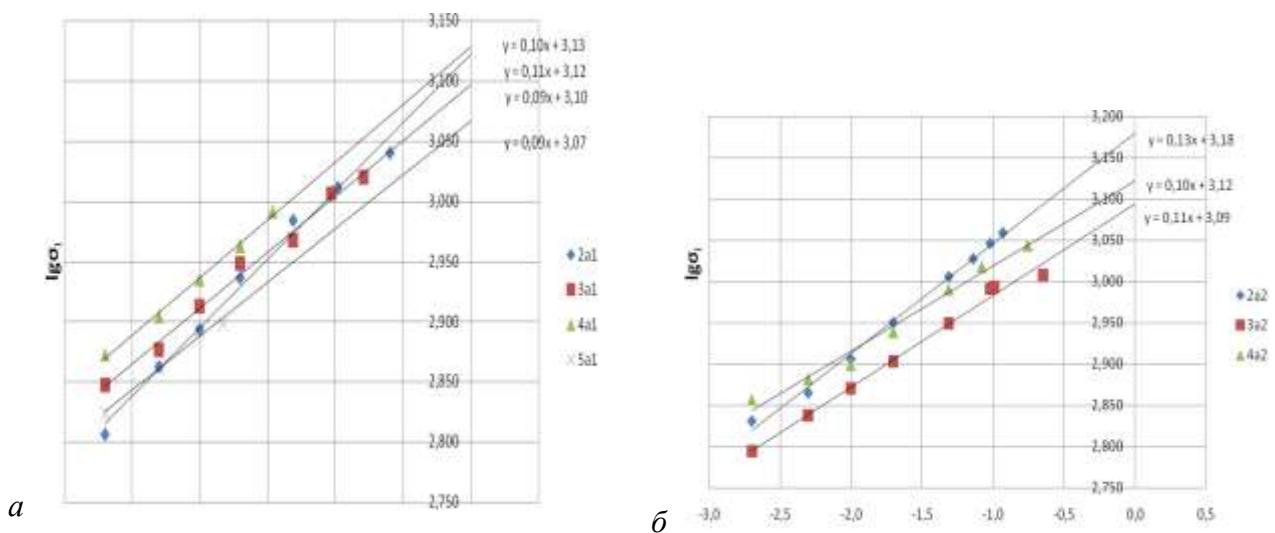


Рис. 3. Кривые деформационного упрочнения стали 50XГФА (образцы 2-й зоны), прокатанной со степенью обжатия $\epsilon \approx 23\%$:

а – образцы по краю полосы; б – образцы по середине полосы

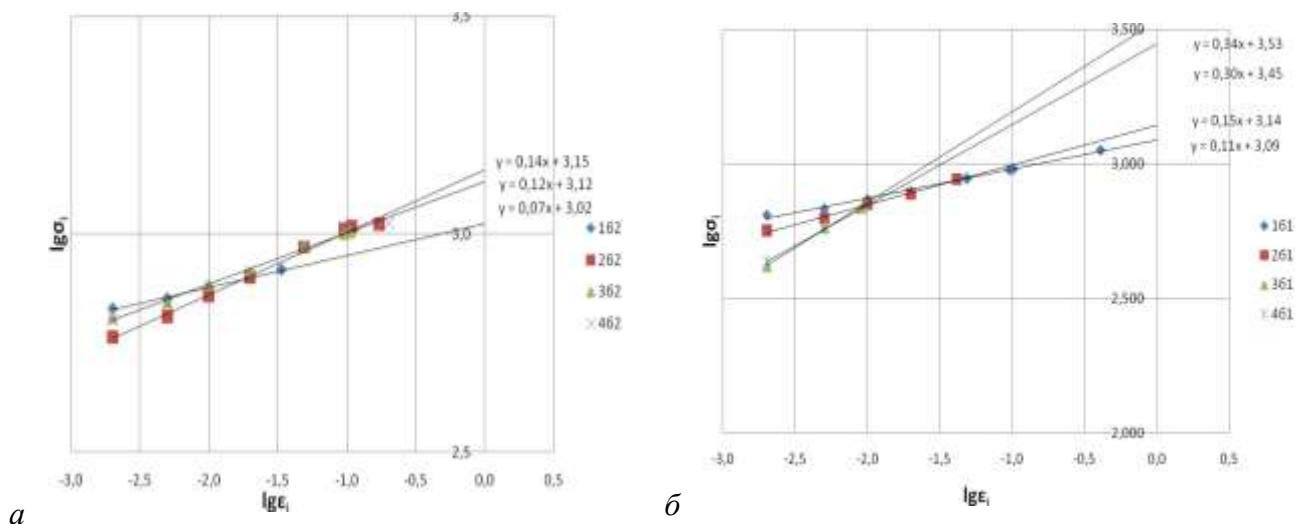


Рис. 4. Кривые деформационного упрочнения стали 50XГФА (образцы 3-й зоны), прокатанной со степенью обжатия $\varepsilon \approx 40\%$:

a – образцы по краю полосы; *б* – образцы по середине полосы

Для объяснения полученных результатов отметим тот факт, что если при холодной обработке наблюдается повышение сопротивления деформированию (упрочнение или наклеп) по мере увеличения степени деформации, то при горячей обработке процессы упрочнения и разупрочнения происходят одновременно. При этом скорость рекристаллизации зависит от степени деформации. Тем самым, чем быстрее протекает рекристаллизация, а она определяется повышением показателей пластичности и уменьшением прочностных характеристик, тем большая степень деформации предшествовала рассматриваемому моменту времени. Контроль температуры полосы в процессе прокатки осуществлялся с помощью инфракрасного пирометра «Микрон MSOP» (США). Результаты замеров показали, что падение температуры не произошло, и прокатка выполнялась при постоянной температуре.

Исходя из сказанного следует:

- при малых степенях деформации до 23% наибольшая деформация соответствует слоям металла со стороны заготовки, прокатываемой роликом;
- при степенях деформации 40% – слоям, которые прилегают к неподвижному основанию прокатного стана.

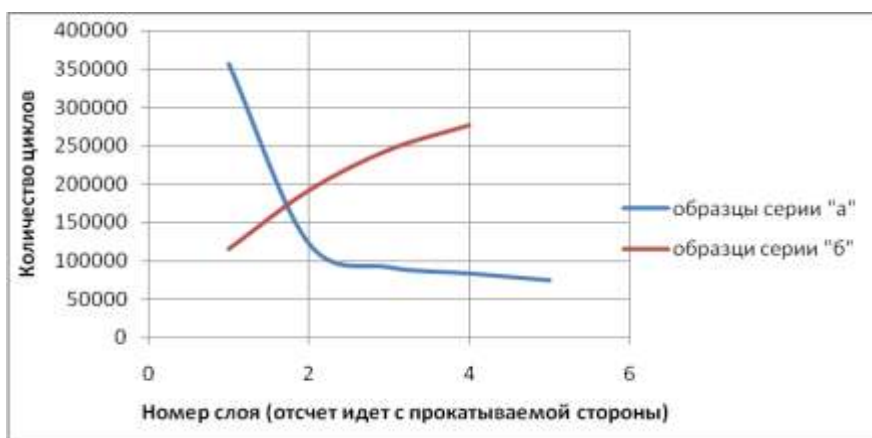


Рис. 5. Зависимость усталостной выносливости образцов, прокатанных со степенью обжатия:

1 – $\varepsilon \approx 23\%$ 2 – 40%

Результаты испытаний на усталость в целом качественно подтвердили данные деформированного состояния по механическим характеристикам. Слои металла, имеющие большую интенсивность рекристаллизационных процессов, и как следствие, лучшую залечиваемость дефектов структуры, получаемых при деформации, имели большую эксплуатационную долговечность.

Данные механических испытаний, по результатам которых было определено положение зоны наибольшей деформации по толщине прокатываемой заготовки в зависимости от степени обжатия, были проанализированы согласно модели очага деформации С.И. Губкина [3].

На рис. 6 для двух положений валка показаны направления главных сдвигающих напряжений и траекторий смещаемых объемов.

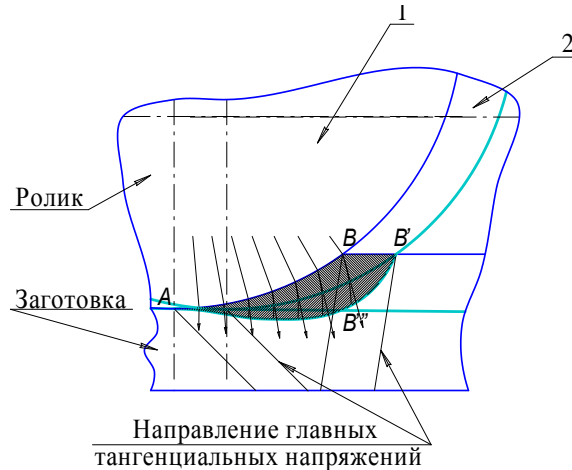


Рис. 6. Схема направления главных сдвигающих напряжений и траекторий смещаемых объемов при раскатке на клин заготовки на плите

В первом положении цилиндрическая поверхность валка контактирует с заготовкой по длине окружности $\cup AB$, во втором - $\cup A' B'$, причем $\cup AB > \cup A' B'$. Интервалу между двумя положениями роликов соответствует смещение объема материала из положения $AB B'$ в положение $A B'' B'$, форма которого определена на основе равенства смещаемых объемов и траекторий перемещения его точек. По правилу С.И. Губкина [3] деформация происходит по месту пересечения направлений смещения металла и максимальных напряжений. Поэтому для напряжений, выходящих из точки A конца периметра контакта валка с заготовкой, вся деформация происходит в ее границах, для выходящих из точки B начала периметра контакта – частично в границах прокатываемой заготовки и частично в границах смещаемого объема.

Данная ситуация характерна для любых степеней обжатия. Однако следует иметь в виду, что по мере увеличения обжатия, с изменением отношения длины контакта инструмента к текущей высоте прокатываемой полосы, происходит изменение формы и размеров зоны локализации деформации. При обжатиях до $\epsilon < 20\%$ зона локализации представляет собой область, образованную сомкнутыми вершинами двух конусов, при этом более активен конус с стороны полосы контактируемой с валком. При $\epsilon = 20\%$ двухсторонний конус меняется на односторонний, вершина которого лежит на поверхности заготовки, контактируемой с неподвижной плитой прокатного стана. При $\epsilon > 20\%$ форма конуса изменяется на тороидальную поверхность.

Выводы

1. Данные механических характеристик материала по слоям прокатанной в горячем состоянии заготовки рессорного листа из стали 50ХГФА с учетом того обстоятельства, что в условиях горячей деформации повышение степени деформации способствует развитию рекристаллизационных процессов и снижению получаемого упрочнения (наклепа), позволяют

выполнить оценку деформированного состояния по его толщине. Зона ее наибольшей интенсивности меняет свое положение в зависимости от степени обжатия: с ее увеличением до 20% она смещается от прокатываемой поверхности к поверхности, которая прилегает к неподвижному основанию прокатного стана. При дальнейшем увеличении она вновь начинает смещаться к прокатываемой поверхности.

2. Причиной неравномерности деформированного состояния по толщине прокатанной заготовки рессорного листа является изменение конфигурации очага деформации. По мере увеличения обжатия происходит изменение формы и размеров зоны локализации деформации. При $\varepsilon < 20\%$ она представляет область, образованную сомкнутыми вершинами двух конусов, при этом положение вершин находится в толщине заготовки; при $\varepsilon = 20\%$ - область, имеющую форму одностороннего конуса, вершина которого лежит на поверхности заготовки, контактируемой с плитой прокатного стана; при $\varepsilon > 20\%$ - области, имеющую форму тороидальной поверхности.

Библиографический список

1. Исследование неравномерности деформации в заготовке прямоугольного сечения, прокатанной на клин / В.В. Галкин [и др.] // Заготовительные производства в машиностроении. 2007. № 1. С. 30-34.
2. **Галкин, В.В.** Моделирование процесса прокатки заготовок рессор переменного сечения / В.В. Галкин // Изв. СамНЦ РАН. 2008. №3. С. 911-914.
3. **Пресняков, А.А.** Очаг деформации в обработке металлов давлением / А.А. Пресняков. – Алма-Ата: Наука. 1988.

*Дата поступления
в редакцию 02.02.2010*

V.V. Galkin

ESTIMATION OF THE DEFORMED CONDITION IN PREPARATION OF THE RECTANGULAR SECTION, UNROLLED SHAKY ON A WEDGE ON A PLATE

The estimation of the deformed condition of a material in preparation of the rectangular section, unrolled shaky on a wedge on a plate is given. Position of a zone of intensive deformation on a thickness depending on size reduction is defined. Research was spent on the basis of definition of mechanical and operational characteristics of sheet preparations of a steel 50HGFA which from rolled spring sheet in its characteristic zones on a thickness were cut out layer-by-layer by a method wire electroerosion processings.

Key words: non-uniformity of the deformed condition, the deformation centre, a direction of the main tangential pressure.

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

УДК 621.039

С.С. Бородин, С.М. Дмитриев, М.А. Легчанов, Д.Н. Солнцев, А.Е. Хробостов

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕМЕШИВАЮЩИХ РЕШЕТОК В ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ ТВСА-АЛЬФА РЕАКТОРА ТИПА ВВЭР

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева

Представлены результаты и анализ экспериментальных данных по исследованию локального массообмена и гидродинамики потока теплоносителя в ТВСА-АЛЬФА реакторов типа ВВЭР с системой поясов перемешивающих решеток типа «порядная прогонка».

Ключевые слова: ядерный реактор, тепловыделяющая сборка, гидродинамика теплоносителя, межканальный массообмен, перемешивающая решетка.

Введение

Уровень развития современного реакторостроения в значительной мере зависит от гидродинамики и массообмена теплоносителя в активной зоне ядерного реактора. Необходимость исследования процессов массообмена и гидродинамики продиктована тем, что ядерные реакторы представляют собой высокоэнергонапряженные аппараты, в которых эти процессы проявляются в весьма сложной форме. Успешная эксплуатация реакторных установок типа ВВЭР во многом определяется полнотой и надежностью гидродинамического и теплофизического обоснования активной зоны при различных режимах работы ЯЭУ. В настоящее время становится актуальным вопрос о создании реакторных установок ВВЭР, работающих на более высоком уровне мощности. Для этого требуется улучшение теплогидравлических характеристик ТВС, а также одновременное снижение сопротивления самих тепловыделяющихборок. Данные характеристики во многом зависят от тепломассообменных процессов, происходящих в активных зонах водо-водяных реакторов.

В разработанной в ОАО «ОКБМ Африкантов» ТВСА-АЛЬФА для интенсификации массообмена применяются перемешивающие решетки (ПР), которые позволяют турбулизовать поток в пределах отдельных ячеек и улучшить перемешивание теплоносителя между ячейками. Одним из вариантов оптимизации конструкции ТВСА-АЛЬФА реактора ВВЭР является применение системы ПР типа «порядная прогонка», которые устанавливаются с поворотом каждой решетки относительно предыдущей на угол 60° по часовой стрелке, изменяя тем самым направление движения теплоносителя.

В связи со сложностью математического описания течения потока теплоносителя в активных зонах ядерных реакторов необходимо проведение экспериментальных исследований на масштабных и полноразмерных моделях. С одной стороны, для обоснования теплотехнической надежности активных зон РУ типа ВВЭР с ТВСА с ПР необходимо определить влияние конструкции таких решеток на гидродинамику и массообмен теплоносителя. С другой – оптимальная конструкция ПР требует поиска вариантов, обеспечивающих наиболее благо-

приятное сочетание таких параметров, как интенсивность перемешивания, гидравлические потери.

Экспериментальный стенд и методика проведения исследований

Исследования локальных характеристик межъячеечного массообмена потока теплоносителя проводились на аэродинамическом экспериментальном стенде методом диффузии газового трассера на 57-стержневой модели фрагмента активной зоны реактора ВВЭР, включающей в себя сегменты трех топливных кассет ТВСА и межкассетное пространство. Экспериментальная модель (ЭМ) (рис. 1) выполнена с коэффициентом геометрического подобия $K_r=4,4$ и состоит из шестигранного чехла, твэлов-имитаторов, поясов дистанционирующих решеток, двух поясов перемешивающих решеток типа «порядная прогонка».

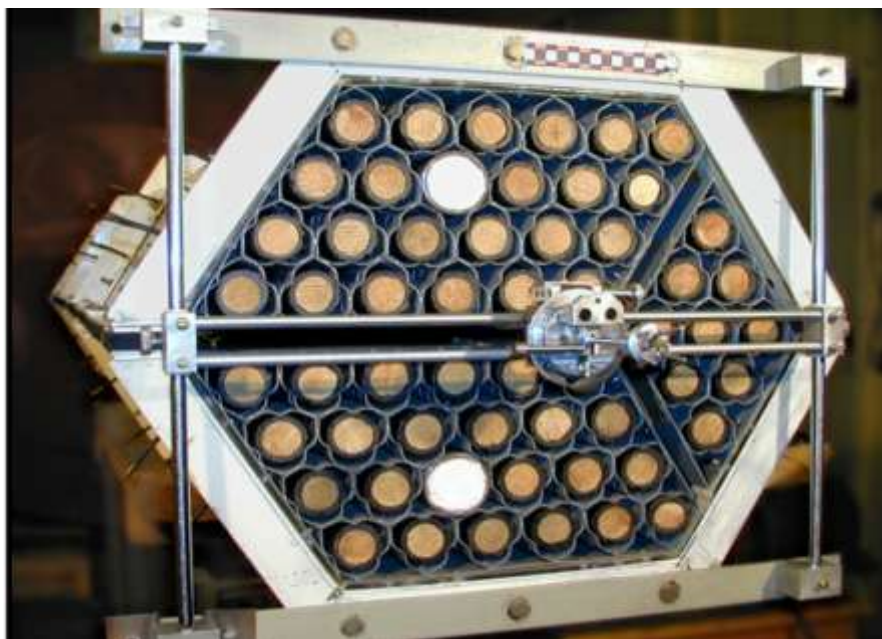


Рис. 1. Экспериментальная модель

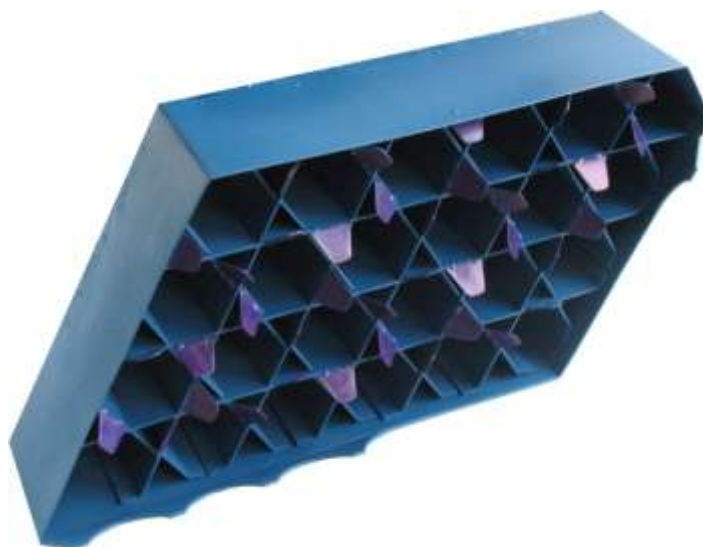


Рис. 2. Фрагмент пояса перемешивающей решетки

Перемешивающие решетки имеют турбулизирующие дефлекторы (рис. 2), которые улучшают перемешивание потока теплоносителя. Величина угла отгиба турбулизирующего

дефлектора составляла 30° , а высота – 19,8 мм, что соответствует высоте 4,5 мм натурального дефлектора.

Исследование локальных характеристик межъячеечного массообмена потока теплоносителя в модели фрагмента активной зоны реактора ВВЭР с ТВСА-АЛЬФА осуществлялось методом диффузии примесей (метод трассера). Данный метод основан на регистрации поперечного потока массы по некоторой переносимой субстанции (краски, соли, газа и т.д.).

Подвод трассера из газового баллона осуществлялся через запорную и регулируемую арматуру, расходомерное устройство и впускной зонд. Для равномерного распределения газа по сечению ячейки предусмотрены короткие Г-образные штуцеры, на выходе из которых установлены специальные рассеивающие насадки. Для отбора проб трассера использовался зонд, выполненный в виде трубки Пито-Прандля и позволяющий определять значения осевой скорости, статического и полного давлений в исследуемой точке, а также одновременно выполняющий функцию транспортного газопровода для подачи трассера в газоанализатор.

Для определения коэффициента межканального массообмена в ЭМ за второй перемешивающей решеткой типа «порядная прогонка» газоанализатором измерялась концентрация пропанового трассера в характерных зонах по сечению модели (рис. 3). Исследования проводились для трех характерных вариантов подачи трассера: стандартная область, уголковая область и область межкассетного зазора (подача трассера в зоны №22, №20 и №3 соответственно).

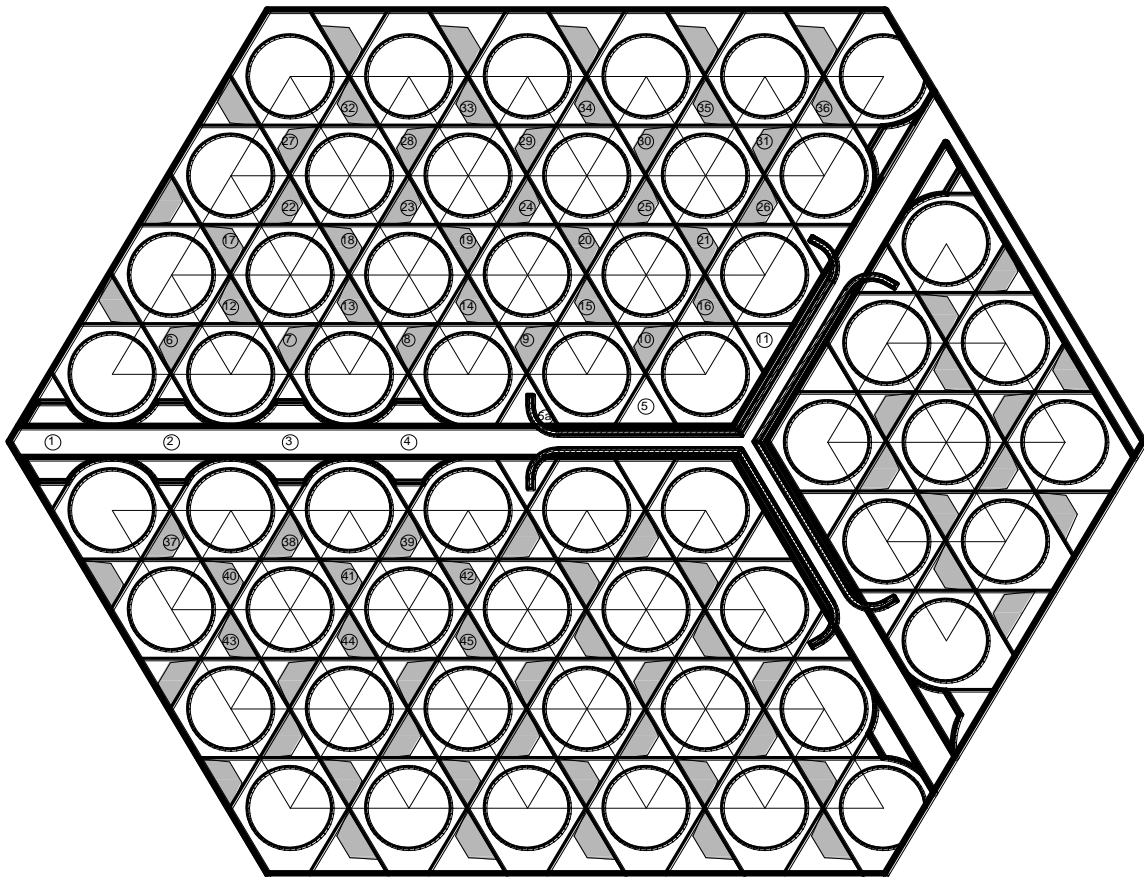


Рис. 3. Расположение зон измерения в поперечном сечении ЭМ

Для обоснования представительности экспериментальных исследований гидродинамических характеристик модели фрагмента активной зоны реактора ВВЭР с ТВСА-АЛЬФА необходимо соблюдение равенства местного гидравлического сопротивления натуральных перемешивающих решеток ТВСА-АЛЬФА и ПР экспериментальной модели. Коэффициент гидравлического сопротивления перемешивающей решетки ЭМ составил $\xi_{\text{ПР}} = 0,54$ (рис. 4). Полученное значение соответствует гидравлическому сопротивлению натуральных ПР.

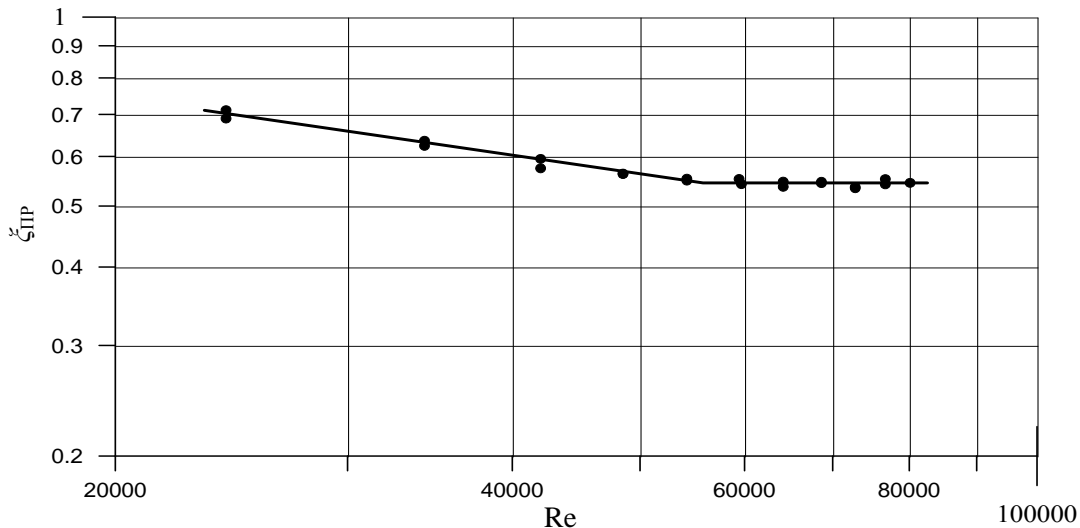


Рис. 4. Зависимость коэффициента местного гидравлического сопротивления пояса ПР типа «порядная прогонка» от числа Re

Результаты исследования распределения концентрации трассера в экспериментальной модели фрагмента активной зоны реактора ВВЭР с ТВСА-АЛЬФА при постановке системы двух ПР типа «порядная прогонка»

Все экспериментальные исследования проводились в диапазоне чисел Re от 80000 до 100000 на участке стабилизированного автомодельного течения теплоносителя, что подтверждено соответствующими исследованиями. По полученным данным строились графики зависимости концентрации трассера от относительной координаты по длине экспериментальной модели, а также картограммы распределения концентрации трассера в поперечном сечении ЭМ.

Комплексный анализ результатов исследований изменения концентрации трассера по длине экспериментальной модели для характерных зон ТВСА-АЛЬФА позволил заключить следующее:

1. Стандартная область:

- распространение трассера из ячейки инъекции обусловлено ориентацией турбулизирующих дефлекторов (рис. 5).

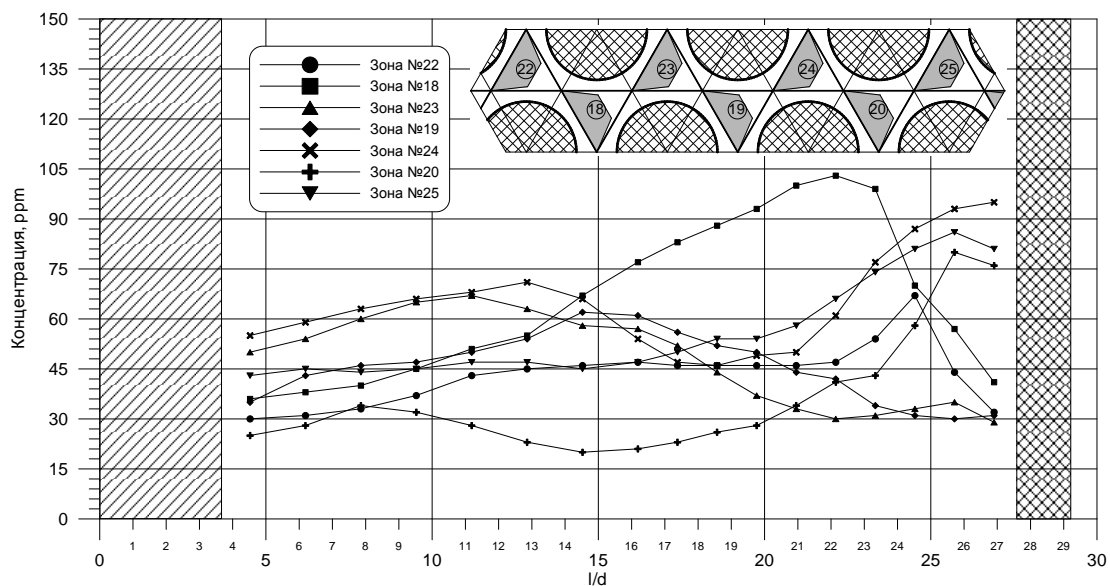


Рис. 5. Распределение концентрации трассера по длине ЭМ за вторым поясом ПР типа «порядная прогонка» при подаче трассера в стандартную область

- распространение пропана из верхнего сегмента ЭМ (при подаче в ячейку №22) охватывает, помимо стандартной области, также область межкассетного зазора и первый ряд нижнего сегмента экспериментальной модели (рис. 6).

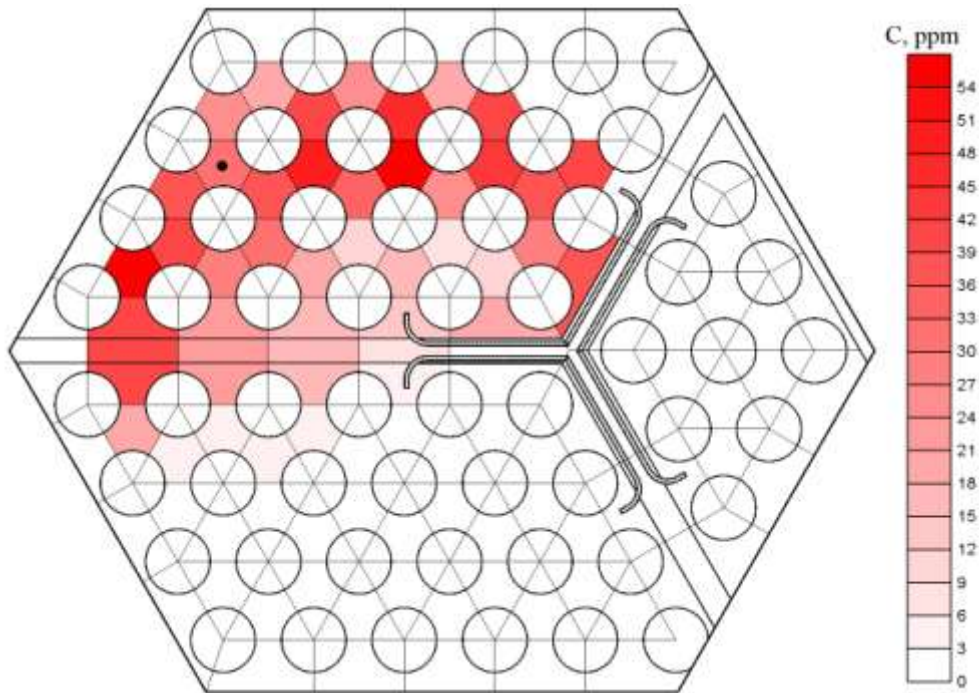


Рис. 6. Распределение концентраций трассера в выходном сечении ЭМ при его подаче в стандартную область

2. Угловая область:

- при подаче пропана в ячейку №20 происходит интенсивное перемешивание трассера в угловой области, что вызывает отсутствие застойных зон в данной области (рис. 7).

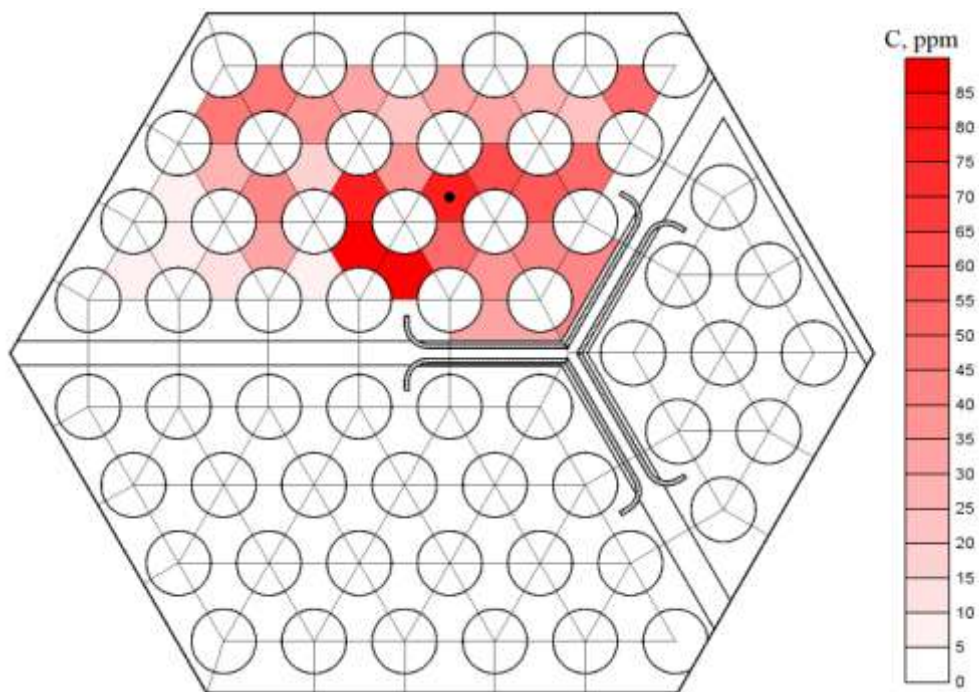


Рис. 7. Распределение концентраций трассера в выходном сечении ЭМ при его подаче в угловую область

- концентрация трассера по направлению турбулизирующих дефлекторов остается постоянной, это связано с тем, что за вторым поясом ПР трассер уже «достаточно хорошо перемешан» по сечению ЭМ первым поясом ПР (рис. 8).

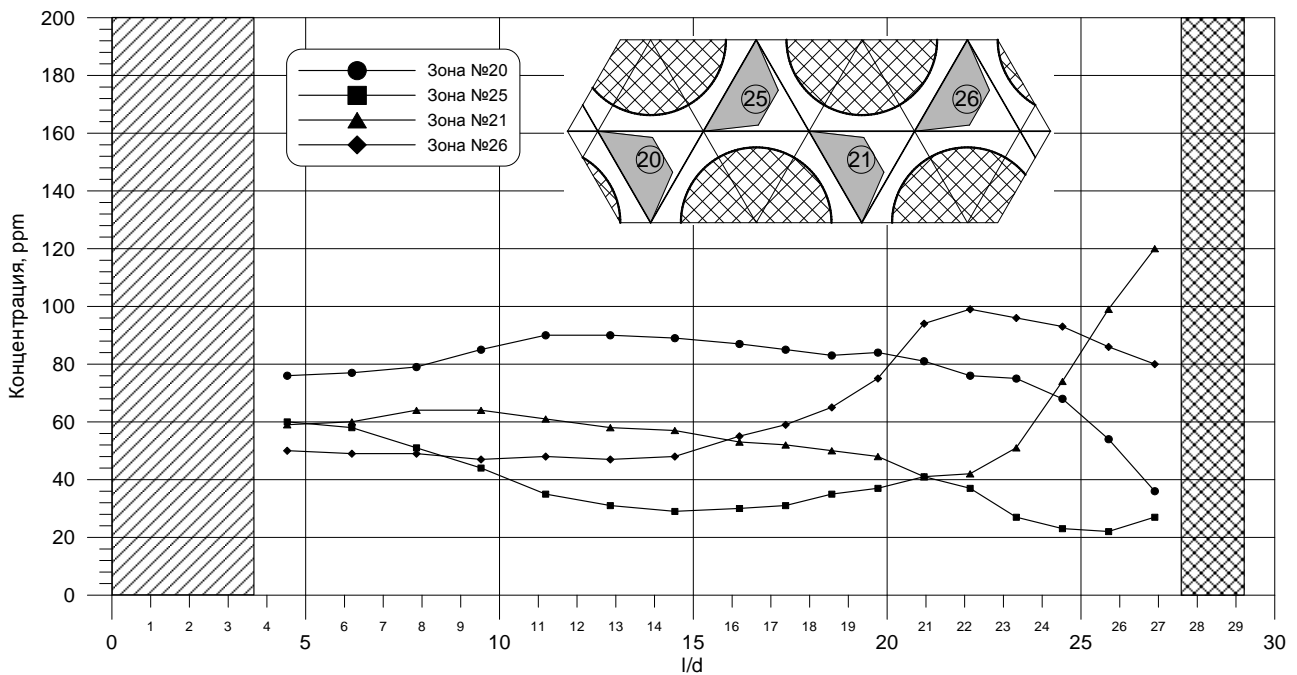


Рис. 8. Распределение концентрации трассера по длине ЭМ за вторым ПР типа «порядная прогонка» при его подаче в угловую область

3. Межкассетный зазор:

- при подаче пропана в ячейку №3 в данной зоне наблюдается максимальное значение концентрации в межкассетном зазоре по всей длине ЭМ (рис. 9).

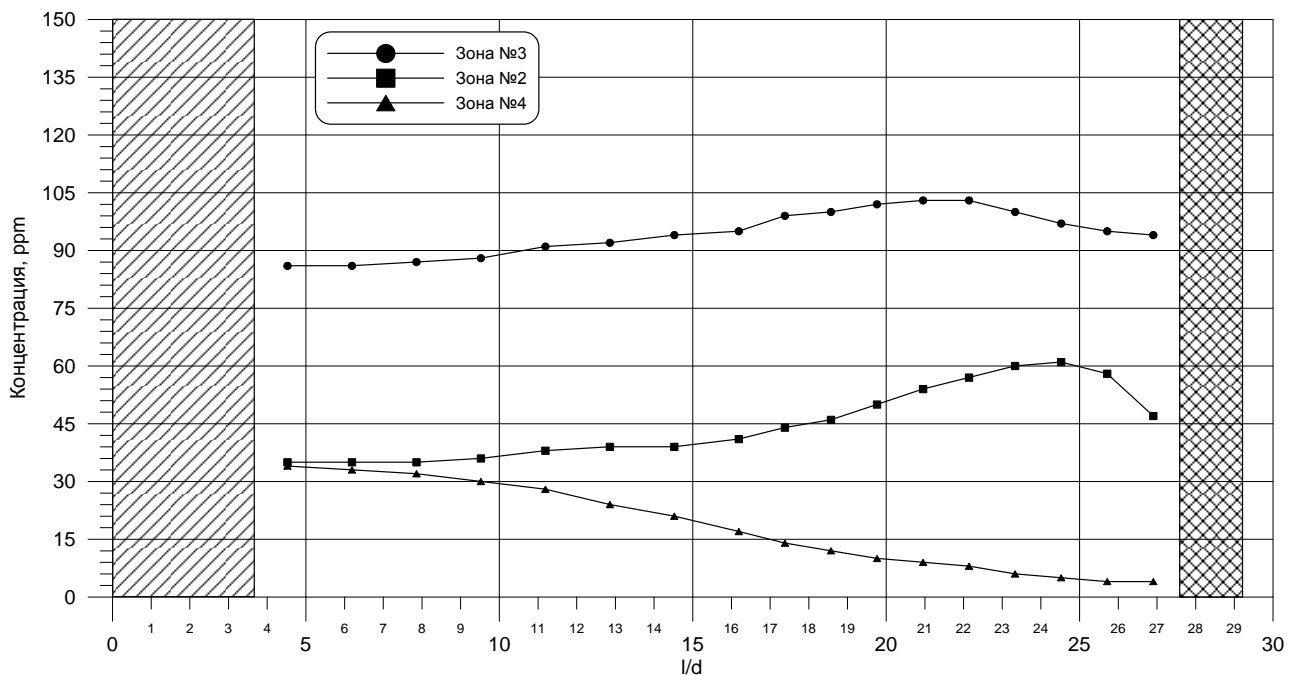


Рис. 9. Распределение концентрации трассера по длине ЭМ за вторым поясом ПР типа «порядная прогонка» при его подаче в область межкассетного зазора

- существует направленное течение потока теплоносителя, обусловленное расположением обода в виде «кремлевской стены», и направление лопаток турбулизирующих дефлекторов. Глубина распространения газа трассера из межкассетного зазора охватывает область трех периферийных рядов твэлов соседних ТВСА-АЛЬФА (рис. 10).

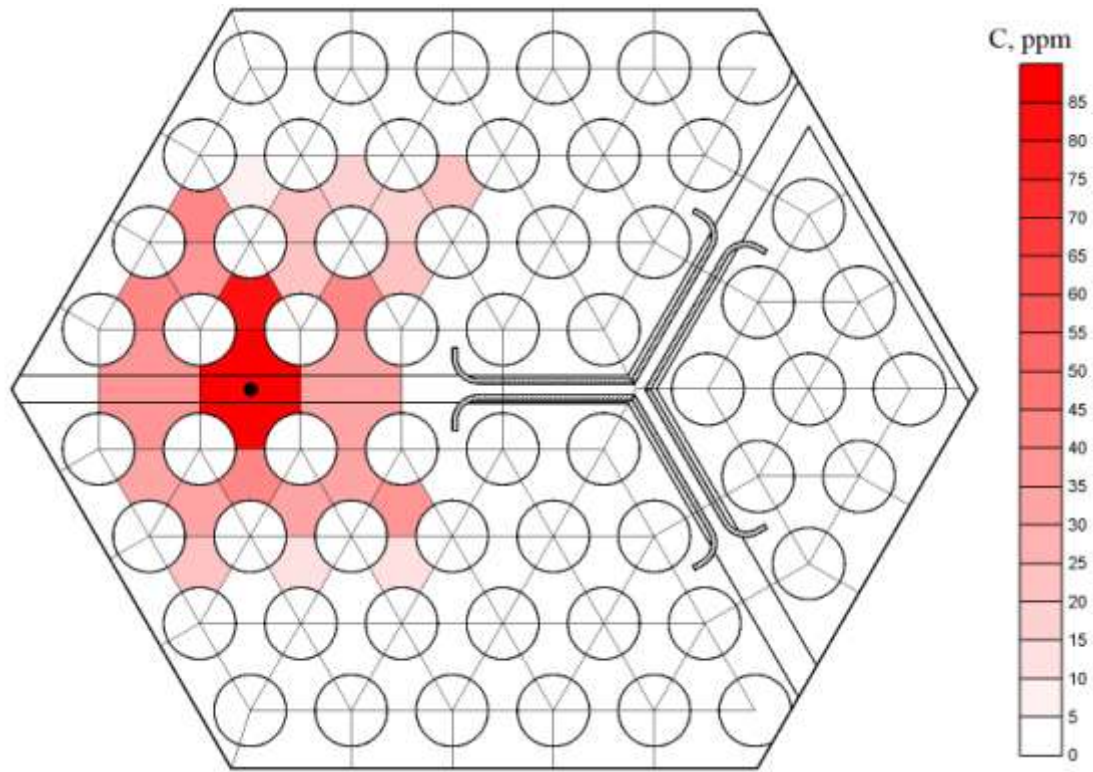


Рис. 10. Распределение концентраций трассера в выходном сечении ЭМ при его подаче в область межкассетного зазора

Заключение

На основе комплексного анализа экспериментальных данных по исследованию гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в ТВСА реакторов ВВЭР при постановке системы двух ПР типа «порядная прогонка» сделаны следующие выводы:

1. Показано, что после двух ПР типа «порядная прогонка» происходит более равномерное распределение концентрации пропана в поперечном сечении экспериментальной модели по сравнению с постановкой ПР типа «закрутка вокруг твэла».
2. Показано, что за дефлекторами ПР происходит направленное, постепенно затухающее движение трассера, обусловленное соответствующим расположением дефлекторов.
3. Экспериментально определено, что в уголкового области происходит равномерное распределение трассера за двумя ПР типа «порядная прогонка».
4. Глубина распространения газа трассера из межкассетного зазора охватывает область трех периферийных рядов твэлов соседних ТВСА-АЛЬФА с двумя ПР типа «порядная прогонка». Этот факт показывает лучшее перемешивание потока теплоносителя при постановке в ТВСА-АЛЬФА системы двух решеток типа «порядная прогонка» по сравнению с постановкой одной ПР типа «закрутка вокруг твэла» или «порядная прогонка».

Полученные результаты могут быть использованы в качестве банка экспериментальных данных для верификации программ поочередного расчета активных зон водо-водяных ядерных реакторов с ТВСА-АЛЬФА. По экспериментальным данным определяется эффективность ПР, находятся коэффициенты турбулентного и эффективного (включая конвективный) межъячеечного массообмена.

*Дата поступления
в редакцию 02.02.2010*

S.S. Borodin, S.M. Dmitriev, M.A. Legchanov, D.N. Solncev, A.E. Khrobostov

**INVESTIGATION OF EFFICIENCY OF MIXING GRIDS FOR DETECTION
THE OPTIMAL DESIGN OF FUEL ASSEMBLY OF REACTORS VVER**

The results and analysis of experimental data on investigation of the local mass-transfer and hydrodynamics of heat-transfer flow in alternative fuel assembly of reactor VVER at use of system of mixing grids «flowing along the rod lines» type are submitted.

Key words: nuclear reactor, fuel assembly, hydrodynamics of heat carrier, mass exchange, mixing grid.

УДК 621.039.534

М.А. Антоненков, П.А. Боков, Д.В. Кузнецов, А.В. Безносков, Т.А. Бокова

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ТРЕНИЯ И ИЗНАШИВАНИЯ КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВИНЦОВОМ И СВИНЕЦ-ВИСМУТОВОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯХ РЕАКТОРНЫХ КОНТУРОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева проводятся экспериментальные и расчетно-теоретические исследования процессов, сопровождающих трение в среде свинца и эвтектики свинец-висмут при температурах 350 – 550°C в элементах механизмов реакторных контуров. Эти исследования необходимы для обоснованного проектирования и эксплуатации циркуляционных контуров, исполнительных механизмов систем управления и защиты реактора, механизмов перегрузки ядерного топлива и др., а также для прогнозирования процессов изнашивания поверхностей элементов трубной системы парогенераторов и активной зоны реактора, в которых возможно контактное трение.

Ключевые слова: высокотемпературный теплоноситель, свинец, трение, изнашивание, контактные поверхности

Проведенные исследования подшипниковых узлов скольжения центробежных, диагональных и осевых циркуляционных насосов в расплавах свинца и эвтектики свинец-висмут при температуре 350 – 550°C выявили особенности работы таких подшипников. К ним относятся: невозможность создания гидродинамических подшипников, вследствие малой вязкости жидких металлов и несмачивания материала контактирующих поверхностей с оксидными защитными покрытиями свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителями. Возможна работа в этих теплоносителях подшипников сухого трения, лабиринтно-винтовых и гидростатических подшипников. Последние подшипники являются оптимальными для насосов реакторных контуров. Для обоснования их оптимальных конструкции проводится исследование особенностей гидродинамики течения тяжелых жидкометаллических теплоносителей в щелях (узких каналах) с оксидными покрытиями при варьируемом содержании кислорода и других примесей в теплоносителе, в том числе и в кольцевых щелях с вращающимся валом.

Проводятся экспериментальные исследования процессов контактного трения оболочек стержней-поглотителей нейтронов относительно их чехлов, заполненных расплавом тяжелого жидкого металла, при штатных температурах, моделировании скоростей и усилий перемещения стержня в чехле при контроле содержания кислорода в жидком металле и, соответственно, различных физико-химических состояниях приповерхностного слоя контакта поверхностей твердого и жидкого металлов.

Экспериментальные исследования работы зубчатых зацеплений из стали и чугуна при температурах 450 - 500°C в среде расплава свинца и эвтектики свинец-висмут при контролируемом и варьируемом содержании кислорода в жидком металле позволили определить временные зависимости изнашивания зубьев шестерен и колес в зависимости от их чисел оборотов, удельного давления и др. Исследования позволили определить характер изнашивания поверхностей зубьев в среде жидкого металла в зависимости от условий испытаний.

Проведенные исследования позволяют обоснованно рассчитывать, оптимально проектировать и назначать условия эксплуатации механизмов реакторных контуров со свинцовым (БРЕСТ) и свинец-висмутовым (СВБР) теплоносителями.

Особенности контактного слоя: конструктивный материал – свинец-висмутовый, свинцовый теплоноситель.

Как показывают расчетно-теоретические и экспериментальные исследования авторов, к

основным условиям, определяющим ресурсную работоспособность и трибологию в целом подшипников скольжения насосов и зубчатых зацеплений, работающих в среде высокотемпературных свинец-висмутового и свинцового теплоносителей относятся:

- рабочий диапазон температур;
- наличие и характеристики оксидных покрытий (пленок) на поверхностях конструкционных материалов;
- рабочий диапазон нагрузок в зоне контакта;
- содержание и физико-химический состав примесей в жидком металле;
- рабочий диапазон относительных скоростей контактных поверхностей и омывающего их жидкометаллического теплоносителя, условия его обмена с основной массой теплоносителя в контуре;
- примененные конструкционные материалы;
- исходная шероховатость поверхностей, режим обкатки (начальный период эксплуатации) трущихся пар.

Особенностью работы контактных пар в среде свинцового и свинец-висмутового теплоносителей является невозможность применения традиционных смазочных материалов (масел и др.). Тяжелые жидкометаллические теплоносители при рабочих температурах [400-600⁰С] не могут рассматриваться в качестве смазочного материала, вследствие несмачиваемости ими металлических поверхностей, с покрытиями, обеспечивающими работоспособность конструкционных материалов [1], а также вследствие вязкости теплоносителей. При этом теплоноситель «выдавливается» (вытекает) из зазора между контактирующими твердыми поверхностями. Особенностью трибологии в среде свинцового и свинец-висмутового теплоносителей является высокая эффективность отвода тепла, выделяющегося в зоне контакта. Экспериментально показано, что температурный перепад между поверхностью твердого металла и потоком омывающего его жидкого не превышает 10⁰С.

Работоспособность конструкционных материалов в контакте со свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителями в условиях реакторных контуров обеспечивается формируемыми и доформируемыми на поверхностях оксидными защитными покрытиями, обеспечивающими их несмачивание в этих теплоносителях.

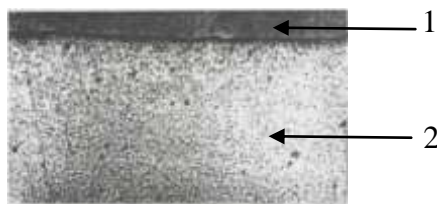


Рис. 1. Фото внутреннего края поперечного шлифа стенки трубы из стали типа 08Х18Н10Т после испытаний в контакте с эвтектикой свинец при температуре 500⁰С:
1 – покрытия с отложениями примесей; 2 – сталь

При этом в районе контакта твердого и жидкого металлов наружный (внешний) слой теплоносителя обладает специфическими свойствами (поверхностным сгущением энергии и др.). Частицы примесей (оксидов теплоносителя и др.) концентрируются на поверхности твердого металла, образуя отложения. Оксидные покрытия и возможные отложения примесей при контакте поверхностей с «выдавленным» (отсутствующим) теплоносителем формируют характеристики «сухого» трения. Они препятствуют непосредственному контакту стальных (оголенных, без покрытий) поверхностей, их свариванию, вырывам или другим видам разрушений.

Характеристики контактных поверхностей в системах с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями могут изменяться в процессе обязательной операции обкатки меха-

низмов для введения их в работу по прямому назначению. Назначение обкатки – формирование защитных покрытий на контактных поверхностях и приработка пар трения, во время которой формируется микро- и макрогеометрия поверхностей контактных пар. Сформированные в процессе обкатки защитные оксидные пленки и отложения примесей выступают в роли твердого смазывающего вещества, существенно (на порядок и более) уменьшающего значение коэффициента трения. Эти покрытия значительно уменьшают, а иногда предотвращают износ контактных поверхностей.

При разрушении защитных оксидных покрытий возможно под действием молекулярных сил разрушение поверхностей контакта за счёт механизмов схватывания – приваривания, сцепления местных соединений и др. Такие процессы с образованием локальных вырывов, канавок и других нарушений геометрии поверхностей неоднократно фиксировались авторами в подшипниках скольжения, на поверхностях зубчатых зацеплений на поверхностях трения оболочек поглотителей нейтронов о поверхность чехла в среде тяжелых жидкометаллических теплоносителей. Эти негативные процессы требуют доформирования (восстановления) защитных оксидных пленок на оголенных участках.

Подшипники скольжения лопастных насосов в контурах со свинец-висмутовым и свинцовым теплоносителями

В реакторных контурах перспективных установок со свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителями одной из важнейших и специальных единиц оборудования являются циркуляционные насосы. Для конструктивных схем таких насосов, как правило, погружных осевого типа, характерно наличие «длинного» вала с нижним подшипником скольжения, расположенным в объеме жидкого металла под его свободным уровнем вблизи рабочего колеса насоса. Подшипники скольжения лопастных насосов традиционно подразделяют на гидродинамические, гидростатические и подшипники сухого трения.

Гидродинамические подшипники

Экспериментальные и расчетно-теоретические исследования авторов показали невозможность создания гидродинамических подшипников, работающих в среде свинцового и свинец-висмутового теплоносителей по следующим причинам. Традиционный процесс работы таких подшипников, основанный на создании гидродинамической подъемной силы, подразумевает два необходимых условия: полное смачивание жидкой смазкой поверхностей вала и втулки смазочной жидкостью и большую вязкость этой жидкости.

В подшипниковых узлах контуров со свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителями оба этих условия отсутствуют. Вследствие малой вязкости при рабочих температурах, расчет по традиционным методикам (для условий смачивания маслами) дает малые значения относительных и абсолютных величин зазоров между валом и втулкой, не позволяющие создавать такие конструкции.

Стойкость сталей и чугунов в рассматриваемых теплоносителях при рабочих температурах (450-600⁰С) может быть обеспечена только при формировании на поверхностях конструкционных материалов защитных оксидных покрытий (пленок), несмачиваемых теплоносителем. Эффект несмачивания исключает возможность образования гидродинамического клина из жидкометаллического теплоносителя между контактными поверхностями. Он выдавливается из зазора. Силы трения между поверхностью жидкого металла, имеющей свойства свободной поверхности, и оксидной пленкой незначительны и не позволяют удерживать жидкий металл в зазоре между валом и втулкой. Подшипник переходит в режим сухого трения.

Подшипники сухого трения

Для подшипников скольжения насосов экспериментальных стендов достаточно ресурса работы в несколько лет и менее. В соответствии с обязательными остановками стендов, в соответствии с программами их работ, допустима достаточно простая и быстрая замена (раз в

один – два года) подшипниковых пар, в отличие от условий работы подшипников насосов реакторных контуров.

К особенностям работы подшипников сухого трения в среде свинцового и свинец-висмутового теплоносителей можно отнести следующее:

- обязательное наличие оксидных покрытий (пленок) на поверхностях деталей конструкций;
- интенсивный отвод жидкими металлами теплоты, выделяющейся в зоне трения.

Под режимом сухого трения традиционного понимается режим, при котором между трущимися поверхностями отсутствует жидкая или пластическая смазка, смачивающая поверхности трения. Возможно наличие сухого смачивающего вещества, находящегося в твердой фазе, например, оксидных пленок на поверхностях металлов, а также периодическое или постоянное смывание контактных поверхностей маловязкой жидкостью, не смачивающей поверхности, не являющейся смазкой.

На рис. 2 представлены конструкции насосов НЦС-01 и НЦС-04 разработки Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева (НГТУ), на которых исследовались и отработывались варианты конструкций подшипников сухого трения в среде перекачиваемых свинца и эвтектики свинец-висмут при температуре 350-510⁰С. Основные характеристики насоса НЦС-04 (в составе стенда ФТ-2 НГТУ): подача 6-8 м³/ч; напор – 4-6 м.ст.ж., рабочая среда – свинец; температура перекачиваемой среды – 350-510⁰С; частота вращения вала – 800-1500 мин⁻¹. Насос – центробежный, погружного типа.

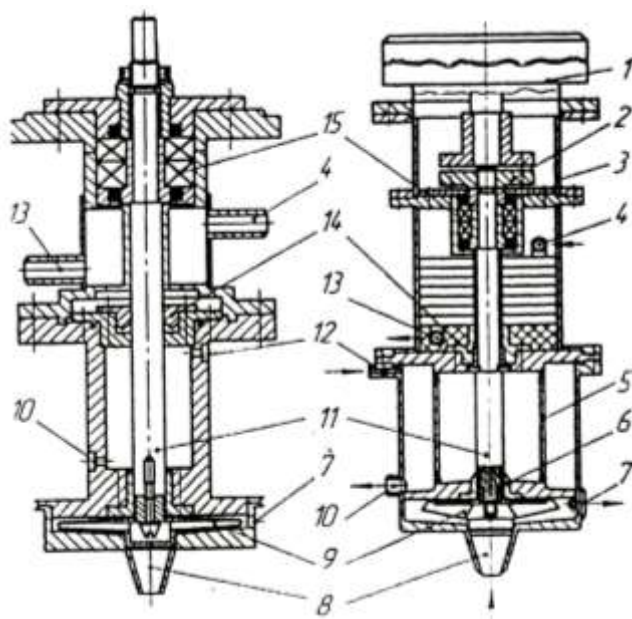


Рис. 2. Конструктивные схемы электронасосов НЦС-01 (а) и НЦС-04 (б):

- 1 – электродвигатель; 2 – муфта; 3 – стакан; 4 – подвод охлаждающей воды;
 5 – кронштейн; 6 – втулка подшипника скольжения (съемная); 7 – штуцер напорный;
 8 – патрубок всасывающий; 9 – колесо рабочее; 10 – отвод организованных протечек;
 11 – вал; 12 – штуцер газовый; 13 – отвод охлаждающей воды; 14 – узел уплотнения вала;
 15 – верхний подшипниковый узел

На рис. 3 представлены в качестве примера фото подшипникового узла сухого трения до начала испытаний и после 950 ч работы в среде свинца при температуре 480-510⁰С. После этой серии испытаний втулка вала имела неравномерный износ как в радиальном, так и в осевом направлениях. Максимальное изменение диаметра вала составило 0,3 мм. На поверхностях втулки и вала подшипника зафиксированы кольцевые царапины и борозды глубиной

1,0 мм и шириной до 2,0 мм. Поверхности, несмотря на явно выраженный характер износа, покрыты плотной оксидной пленкой черного цвета, смачивание поверхности свинцом отсутствует.

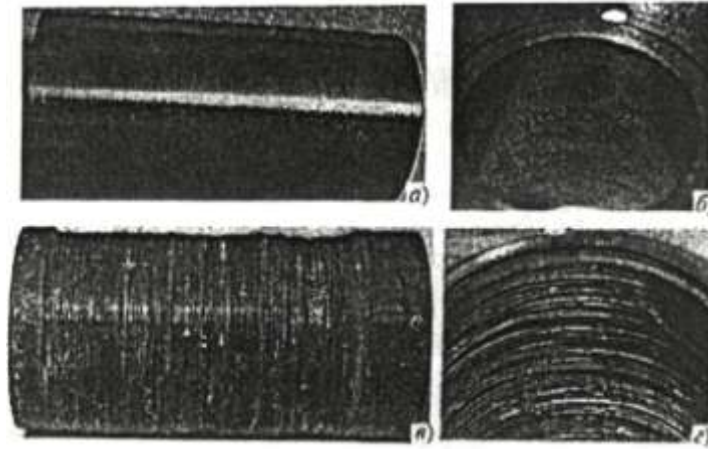


Рис. 3. Втулки вала (а) и подшипник (б) до испытаний, наружная (в) и внутренняя (г) поверхности втулки подшипника после 950 ч работы

Возможной причиной интенсивного изнашивания поверхностей подшипника явилось отсутствие (непроведение) режимов начальной обкатки и целенаправленного формирования защитных оксидных покрытий на этих поверхностях. Кроме начального момента эксплуатации (нескольких десятков часов), замечаний к работе насосов не имелось. Операции по замене подшипникового узла, которые не являлись необходимыми с точки зрения эксплуатации насоса, были совмещены с остановкой стенда, согласно программе испытаний, и осуществлены легко, без каких-либо задержек и затруднений.

Основные характеристики насоса НЦС-1 в составе стенда ФТ-312 (рис. 2): подача 1-2 м³/ч; напор – 2 м ст.ж.; рабочая среда – свинцовый теплоноситель с температурой 450-500⁰С – 1710 ч и эвтектический сплав свинец-висмут с температурой 480-500⁰С – 100 ч; частота вращения вала – 800-1500 мин⁻¹. На рис. 4 представлены фото поверхностей вала и втулки подшипника после указанного цикла испытаний. Втулка вала имела примерно равномерный износ с максимальной величиной 0,4 мм. На её поверхности обнаружен единичный дефект в виде замкнутой борозды глубиной 0,2-0,4 мм, шириной около 0,2 мм. Состояние поверхности втулки подшипника аналогично состоянию втулки вала.

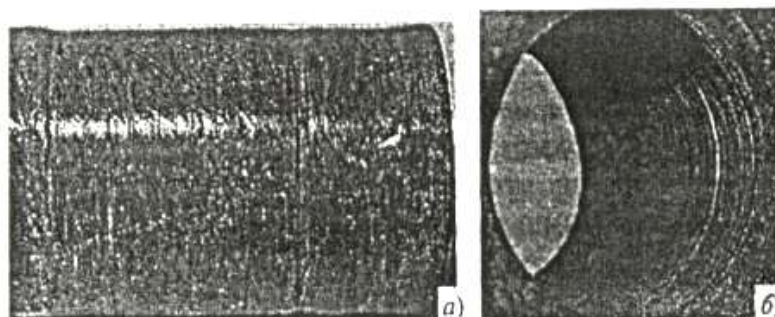


Рис. 4. Поверхности втулок вала (а) и подшипника (б) НЦС-01 после испытаний

Результаты других проведенных авторами испытаний указанных подшипников, а также подшипников сухого трения других насосов, показали аналогичные результаты. Замечаний к работе механизмов из-за подшипников сухого трения не имелось.

Большой износ поверхностей подшипника насоса НЦС-04 по сравнению с аналогичным износом подшипника насоса НЦС-01 объясняется существенной разницей в статических и динамических нагрузках этих насосов при относительно одинаковых рабочих поверхностях подшипников.

Результаты работы указанных и других насосов, разработанных и испытанных в НГТУ, подтверждают возможность применения подшипников сухого трения в насосах для перекачивания свинцового, свинец-висмутового и свинец-литиевого теплоносителей с температурой 510°C (возможно и более высокой) в экспериментальных и сдаточных стендах со временем до замены подшипниковых узлов не менее 1500-2000 ч.

Гидродинамические подшипники

Главные циркуляционные насосы для перекачки свинец-висмутового теплоносителя в реакторных установках опытной и серийных отечественных атомных подводных лодок имели гидростатические подшипники скольжения. Такие подшипники обеспечивают режим жидкостной смазки с использованием в качестве рабочей среды жидкометаллический теплоноситель, подаваемый либо за счёт напора собственного насоса, либо специальным вспомогательным насосом.

Исследования, проводимые авторами, применительно к перспективным реакторным установкам энергоблоков со свинцовым (БРЕСТ) и свинец-висмутовым (СВБР) теплоносителями [2] показали, что для исключения отказов, вследствие забивания зазоров гидростатического подшипника, целесообразно организовывать подачу теплоносителя к его дросселям через приемную камеру, образованную вращающейся и неподвижной стенками. На рис. 5 представлено фото рабочих поверхностей гидростатического подшипника насоса стенда ФТ-1 НГТУ после порядка 40 лет работы с циркуляцией свинец-висмутового теплоносителя один-два месяца в году. Режим работы насоса: подача (эвтектика свинец-висмут) – до $10\text{ м}^3/\text{ч}$, температура – $250\text{-}450^{\circ}\text{C}$ (кратковременно до 500°C), частота вращения вала – 1000 мин^{-1} .

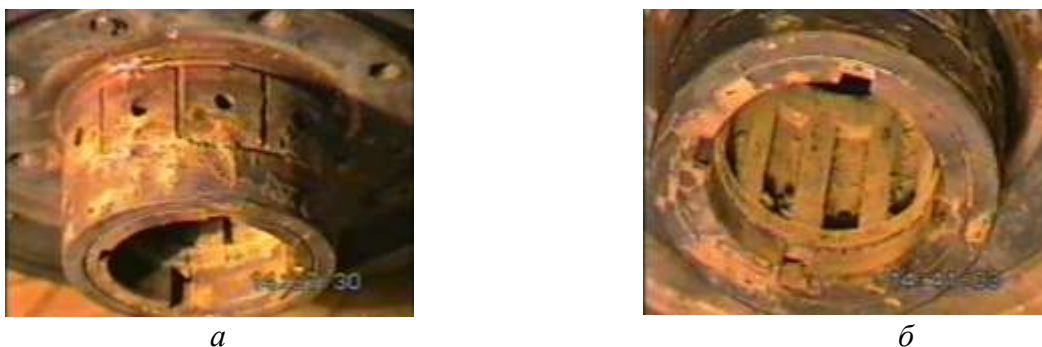


Рис. 5. Фотография гидростатического подшипника насоса стенда ФТ-1:
а – дросселирующие отверстия; *б* – рабочая поверхность с напорными камерами

Вначале эксплуатации стенда при разборке насоса неоднократно фиксировалось забивание полостей вертикальных пазов (полостей) гидростатического подшипника оксидами теплоносителя. После введения периодических технологических обкаток контура на стенде, оксиды из пазов исчезли, что фиксировалось при разборках насоса (рис. 5), и подшипник перешел в расчётный режим работы.

Гидростатические подшипники скольжения являются, вероятно, оптимальными, практически безыносными (при соблюдении требований по технологии теплоносителя) конструкциями подшипников скольжения, работающими в среде свинцового и свинец-висмутового теплоносителей. В настоящее время в НГТУ проводятся исследования и отработка таких подшипников применительно к реакторным установкам БРЕСТ и СВБР (рис. 6).

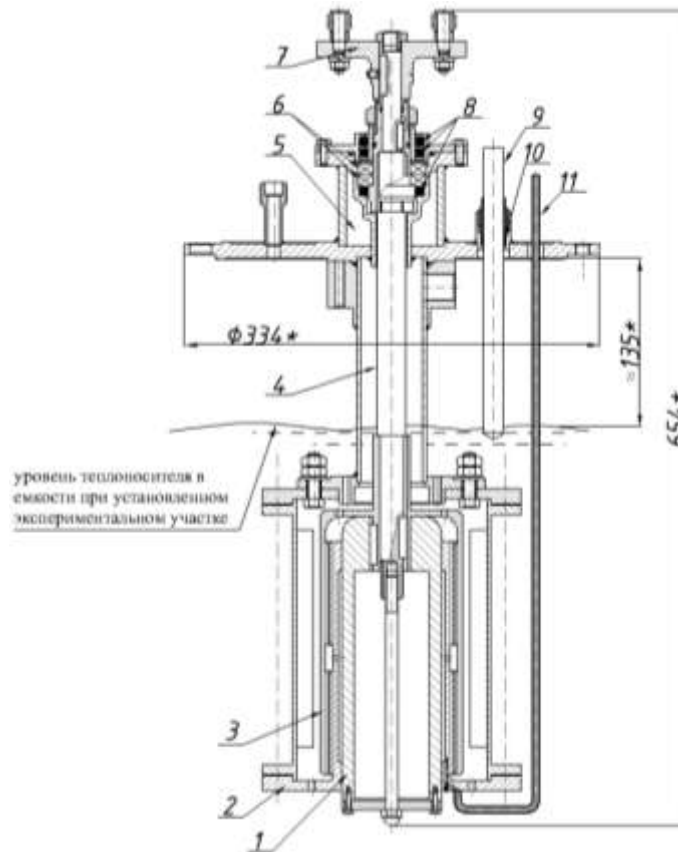


Рис. 6. Выемная часть экспериментального участка:

1 – вал ГСП; 2 – винт лабиринтно-винтового насоса; 3 – втулка лабиринтно-винтового насоса; 4 – вал; 5 – холодильник; 6 – шарикоподшипники; 7 – втулочно-пальцевая муфта; 8 – манжеты; 9 – датчик активности кислорода; 10 – гермоввод; 11 – отбор давления из рабочей камеры ГСП

Контактное трение оболочек стержней-поглотителей активной зоны реакторов на быстрых нейтронах

В НГТУ проводятся экспериментальные исследования процессов контактного трения оболочек стержней-поглотителей нейтронов относительно их чехлов с проточными или непроточными свинец-висмутовым или свинцовым теплоносителями (рис. 7).

Целью работ является исследование процессов и характеристик изнашивания контактных поверхностей в исполнительных органах систем управления и защиты реакторов типа БРЕСТ и СВБР. Испытания проводятся при штатных материалах и штатных температурах (450-600⁰С), моделировании скоростей перемещения стержней-поглотителей относительно их чехлов и усилий перемещений стержней-поглотителей. В процессе исследований контролируется и варьируется содержание кислорода в теплоносителе, и, соответственно, состояние оксидных защитных покрытий (пленок) на приповерхностном слое контакта поверхностей жидкого и твердого металлов. Обнаружено, что в результате гидродинамических усилий со стороны жидкого металла происходит радиальное перемещение стержней-поглотителей в пределах допусков в чехлах. Это может приводить к изменению (пульсациям) реактивности и локальных энерговыделений, а также интенсифицирует процессы изнашивания поверхностей. Зафиксирована интенсификация изнашивания оголенных, не защищенных пленками поверхностей, и резкое снижение, вплоть до прекращения изнашивания при формировании и доформировании защитных оксидных покрытий. Рекомендуется исключить работу таких исполнительных органов системы регулирования мощности реактора в непроточном режиме с глубоким раскислением теплоносителя между стержнем-поглотителем и его чехлом.

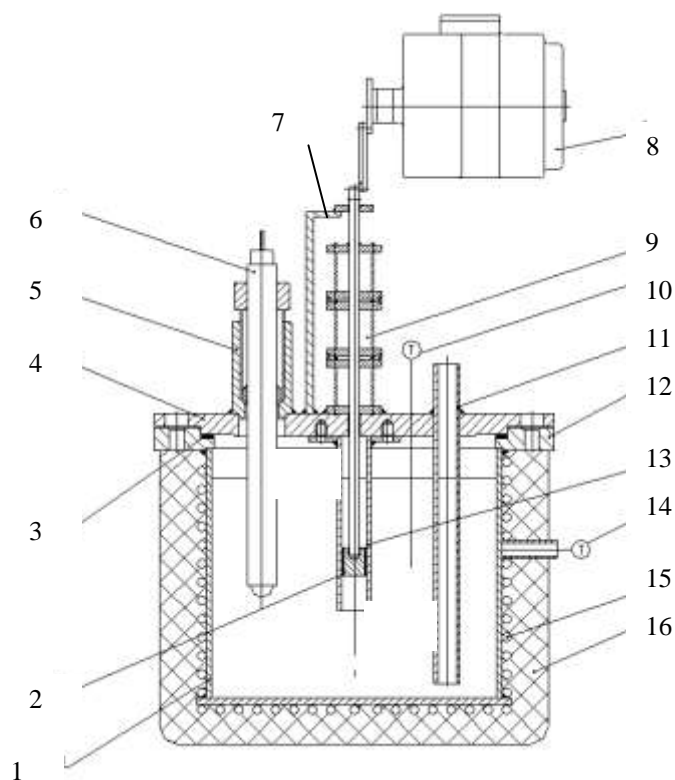
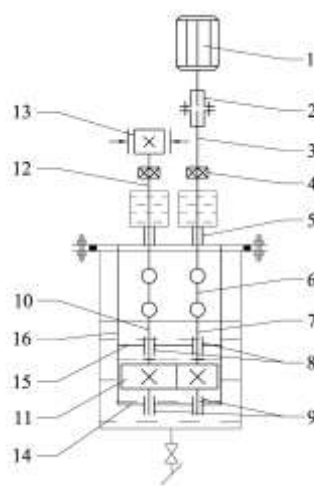


Рис. 7. Схема экспериментального стенда:

- 1 – емкость; 2 – оболочка поглотительного элемента; 3 – прокладка; 4 – крышка;
 5 – узел уплотнения датчика термодинамической активности;
 6 – датчик термодинамической активности; 7 – штанга; 8 – двигатель; 9 – сифон;
 10 – погружной термопреобразователь; 11 – трубка; 12 – фланец; 13 – чехол;
 14 – термопреобразователь; 15 – электрообогрев; 16 – теплоизоляция; 17 – вентиль



а



б

Рис. 8. Фотография (а) и схема (б) экспериментальной установки по исследованию работы зубчатых зацеплений из стали и чугуна в свинцовом и свинец-висмутовом теплоносителях:

- 1 – электродвигатель; 2 – муфта пальчиковая; 3 – вал привода шестерни; 4 – радиально-осевой шарикоподшипник; 5 – радиальный подшипник скольжения; 6 – карданный вал;
 7 – шестерня; 8 – радиально-упорный подшипник; 9 – радиальный подшипник; 10 – вал колеса;
 11 – колесо; 12 – вал тормоза; 13 – ленточный тормоз; 14 – нижняя опорная плита;
 15 – верхняя опорная плита; 16 – штанга крепления

В НГТУ проводился комплекс исследований работы зубчатых зацеплений из стали и чугуна в свинцовом и свинец-висмутовом теплоносителях. Условия испытаний: температура 450-500⁰С; контролируемое и варьируемое содержание кислорода в теплоносителе 10⁻⁵-10⁰; число оборотов вала $n = 300-1500 \text{ мин}^{-1}$; окружная скорость шестерни и колеса в районе контакта – 1,3-4,7 м/с; передаточное число $u=2$; защитный газ – аргон, водород, аргоно-водородная смесь; - передача – прямозубая, цилиндрическая, наружного зацепления с эвольвентным профилем; межосевое расстояние зацепления – 50 мм. На рис. 8 приведен пример конструктивной схемы испытательного стенда. На рис. 9 представлены примеры износа элементов зубчатых зацеплений в среде тяжелых жидкометаллических теплоносителей. Условия испытаний: температура свинца 450⁰С; термодинамическая активность кислорода в свинце на линии насыщения, скорость вращения шестерни 500 об/мин (окружная скорость шестерни на делительной окружности 1,05 м/с); контактное напряжение 758 МПа, число циклов нагружения зуба $13,8 \cdot 10^6$; сталь 40Х13 после закалки в масле ($HRC 47 - 49$).



Рис. 9. Фотография вершины зуба шестерни со следами пластической деформации и отслаивания стали

Состояние зубьев в процессе испытаний контролировалось неразрушаемым способом через 24-100 ч работы. При этом стенд останавливался, расхолаживался, после чего фиксировалась геометрия зубьев зацепления путем снятия из отпечатков. Фиксирование осуществлялось вдавливанием зубьев в расплавленную сургучную массу. После её застывания и обработки получали слепок соответствующего зуба. Затем производили цифровую фотосъемку торца слепка, обработку полученных изображений и измерение характерных размеров зуба по фотографии слепка. После этих замеров, установку собирали и вводили в дальнейшую работу. На рис. 10 представлен пример фото зубчатых колес до и после одной серии испытаний.



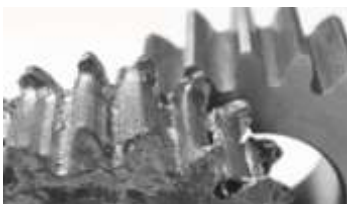



Узел	Этап эксперимента		
	Первый		Второй
Шестерня			
Зубчатое колесо			

Рис. 10. Фотографии зубчатых колес до и после проведения экспериментов

Исследования проводились в несколько этапов с различными их условиями. На рис. 10 представлены примеры изменения относительной ширины и зуба на длительной

окружности и относительной площади S зуба шестерни для нескольких этапов одной серии экспериментов. На рис. 11 показаны изменения ширины b зуба на делительной окружности (а) и относительной площади S зуба (б) шестерни на этапе эксперимента. Определялись виды изнашивания контактных поверхностей [3].

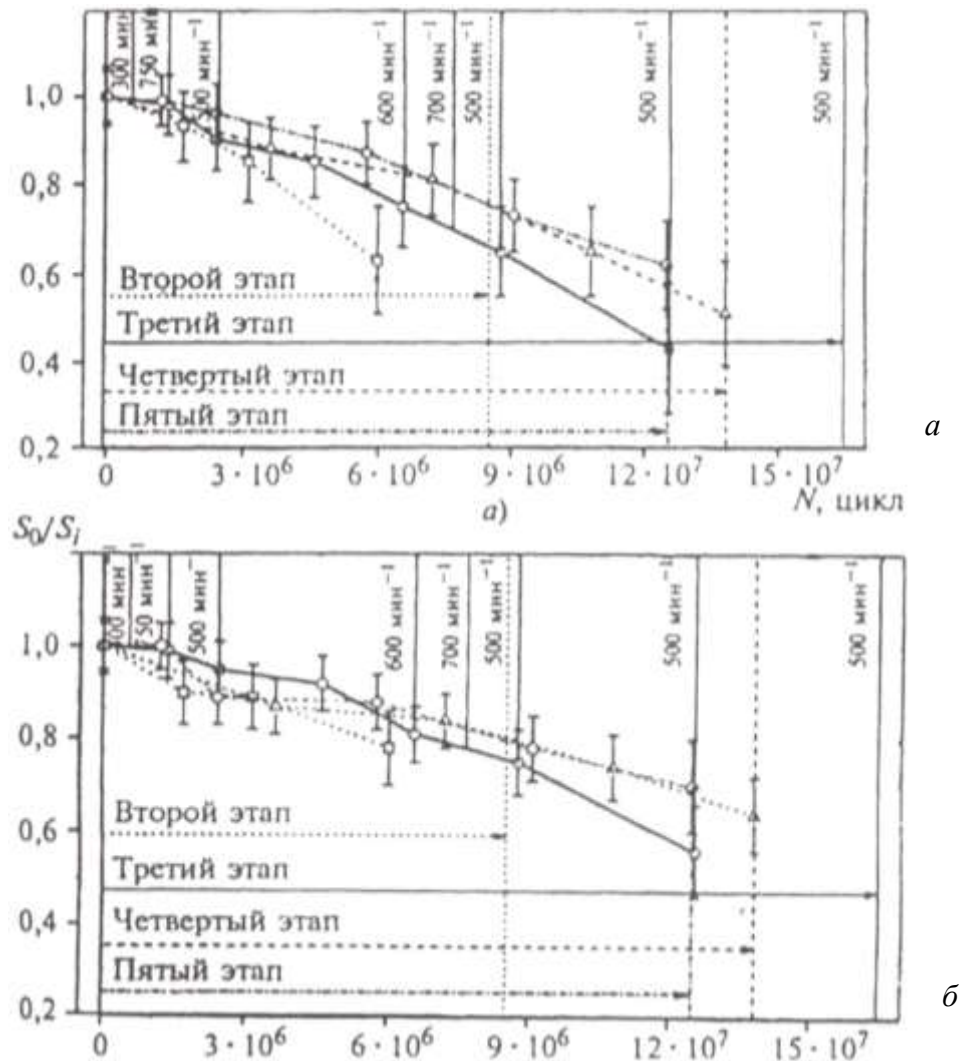


Рис. 11. Изменения ширины зуба b на делительной окружности (а) и относительной площади S зуба (б) шестерни на этапе эксперимента:

..... второй этап; ----о---- третий (частота вращения шестерни 300 мин^{-1} – время работы 2% от времени эксплуатации; 500 мин^{-1} – 61%; 600 мин^{-1} – 25%; 700 мин^{-1} – 6%; 750 мин^{-1} – 6%); ---Δ--- - четвертый; ----◇----- - пятый. Горизонтальные стрелки – время эксплуатации на соответствующем этапе

В результате работ экспериментально доказана возможность работы зубчатых зацеплений, изготовленных из стали и чугуна в свинцовом и свинец-висмутовом теплоносителях при следующих условиях: температура $450\text{-}500^{\circ}\text{C}$; содержании кислорода в жидком металле, близкое к насыщению; контактное напряжение в зацеплении около 800 МПа ; частота вращения 500 мин^{-1} и менее; окружная скорость на длительной окружности до $2,5 \text{ м/с}$ в течение более 500 ч [4].

Возможным направлением увеличения ресурса зубчатых зацеплений является применение более жаростойких сталей, чем $40\text{X}13$, и чугунов, более чем $\text{C}420$, а также повышение качества обработки контактных поверхностей и точности изготовления зацеплений.

Библиографический список

1. **Безносков, А.В.** Тяжелые жидкометаллические теплоносители в атомной энергетике / А.В. Безносков, Ю.Г. Драгунов, В.И. Рачков. – М.: ИздАт, 2007. С. 434.
2. Специфика циркуляционных насосов реакторных контуров со свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителями / А.В. Безносков [и др.] // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2009. №4.
3. Виды изнашивания контактных поверхностей в высокотемпературных свинцовом и свинец-висмутовом теплоносителях / А.В. Безносков [и др.] // Атомная энергия. 2009. № 12.
4. Особенности работы подшипников скольжения и зубчатых зацеплений в тяжелом жидкометаллическом теплоносителе / А.В. Безносков [и др.] // Вестник машиностроения. 2009. №2.

*Дата поступления
в редакцию 02.02.2010*

М.А. Antonenkov, P.A. Bokov, D.V. Kuznetsov, A.V. Besnosov, T.A. Bokova

**PECULIARITIES OF FRICTION AND DEPRECIATION
OF CONTACT SURFACES IN HIGH-TEMPERATURE LEAD AND LEAD-BISMUTH
COOLANTS OF REACTOR CIRCUITS**

Experimental and calculation-theoretical studies of the processes accompanying friction in the medium of lead and lead-bismuth eutectic at the temperatures 350 – 550°C in the elements of reactor circuit mechanisms are carried out at the Nizhny Novgorod State Technical University. These studies are required for adequate design engineering and maintenance of circulation circuits, executing mechanisms of control and reactor shielding systems, and mechanisms of overcharging of atomic fuel. This research is also needed to predict the processes of depreciation of surface elements of the steam generator pipe system and of the reactor core, in which contact friction can occur.

Key words: high-temperature coolant, lead, friction, depreciation, contact surfaces

УДК 621.372.831

И.Н. Данилов, В.К. Майстренко, С.Е. Пилипосян**РАСЧЕТ СТЫКА ДВУХ КРУГЛЫХ ВОЛНОВОДОВ
РАЗНОГО СЕЧЕНИЯ МЕТОДОМ ЛЕММЫ ЛОРЕНЦА**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева

Одним из методов решения сложных дифракционных задач электродинамики является метод, основанный на применении леммы Лоренца. В данной работе продемонстрирован самый общий подход к решению задачи о скачкообразной нерегулярности в линии передачи на примере расчета дифракции симметричных волн на стыке двух круглых волноводов различного сечения. Рассматриваемая задача является тестовой для исследования и апробации данного метода, на основе которого планируется дальнейшее исследование более сложных структур. Результат работы – решение дифракционной задачи для симметричных волн на ось-симметричном стыке поперечного сечения круглого волновода. Проведено исследование сходимости рассмотренного метода и сравнение численных результатов решения указанных задач с результатами, представленными в известных работах по расчету аналогичных дифракционных структур.

Ключевые слова: волновод, сочленение, симметричные волны, дифракционная задача, численные результаты, ось-симметричный стык, волновод круглого сечения.

Введение

В настоящее время в технической электродинамике наиболее актуальными являются дифракционные задачи, к которым относятся задачи по расчёту электрических характеристик соединений различных направляющих структур СВЧ (сверхвысокочастотного) и КВЧ (крайне высокочастотного) диапазона. В том случае, если структуры имеют различную форму поперечного сечения или соединение этих направляющих структур является несоосным, то возникают трудности при создании адекватных математических моделей сложных физических процессов, имеющих место в задачах дифракции.

Одним из методов решения дифракционных задач электродинамики является метод, основанный на применении леммы Лоренца [1]. В данной работе продемонстрирован самый общий подход к решению задачи о скачкообразной нерегулярности в линии передачи на примере расчета дифракции симметричных волн на стыке двух круглых волноводов различного сечения. При этом, в силу общности подхода к составлению интегрального уравнения, удается показать все достоинства предлагаемого метода, заключающиеся, благодаря инвариантности задачи по отношению к месту расположения вспомогательных источников, в достаточно простой процедуре ее алгебраизации. С другой стороны, выбор симметричных волн позволяет, в связи с простой структурой их полей, получить расчетный алгоритм, для реализации которого не требуется проведения существенных аналитических преобразований. Рассматриваемая задача является тестовой для исследования и апробации данного метода, на основе которого планируется дальнейшее исследование более сложных структур, расчет которых другим методом невозможен либо нецелесообразен из-за громоздкости вычислений и больших затрат машинного времени.

Постановка задачи

Исследование данного метода проводилось на основе тестовой задачи о соосном стыке двух круглых экранированных волноводов, различного поперечного сечения. Исследуемая структура изображена на рис. 1.

Ступенчатая нерегулярность в волноведущей структуре представляет собой объём, ограниченный поверхностью $S = S_1 + S_2 + S_8$, где поверхности S_1, S_2, S_8 ограничивают объём

V , в котором существуют электромагнитные поля \vec{E}_1 и \vec{H}_1 ; \vec{E}_2 и \vec{H}_2 , созданные источниками $\vec{j}_1^{e,m}$ и $\vec{j}_2^{e,m}$ соответственно.

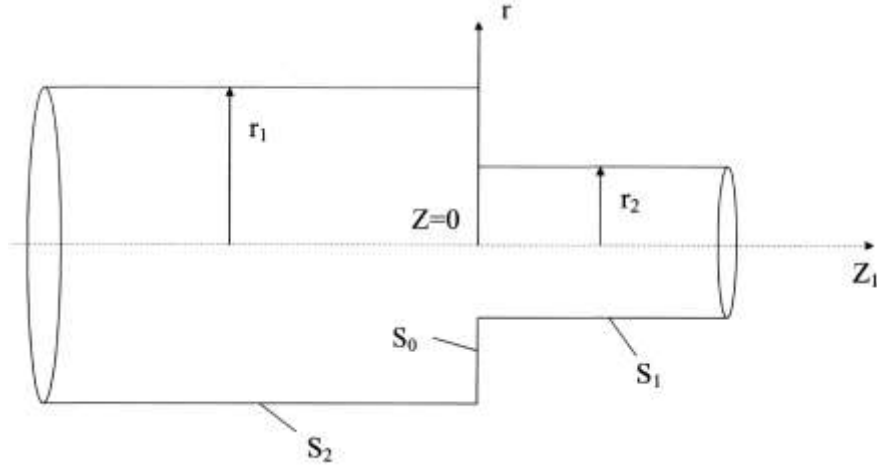


Рис. 1. Ступенчатая нерегулярность в круглом волноводе

Согласно лемме Лоренца, эти поля связаны соотношением

$$\oint_S \left[\vec{E}_1 \vec{H}_2 \right] - \left[\vec{E}_2 \vec{H}_1 \right] d\vec{S} = \int_V \left(\vec{j}_1^e \vec{E}_2 - \vec{j}_2^e \vec{E}_1 - \vec{j}_1^m \vec{H}_2 + \vec{j}_2^m \vec{H}_1 \right) dV, \quad (1)$$

где \vec{E}_1, \vec{H}_1 - поля, переносящие в рассматриваемом сочленении энергию, эти поля удовлетворяют уравнениям Максвелла и граничным условиям

$$E_{\tau/s} = 0, H_{n/s} = 0 \quad (2)$$

Эти поля создаются реальными источниками $\vec{j}_1^{e,m}$; $\vec{j}_2^{e,m}$ - вспомогательные источники, создающие поля \vec{E}_2 и \vec{H}_2 (эти источники располагаются вблизи стыка). Поля \vec{H}_2 удовлетворяют нулевому граничному условию, когда $z_1 \rightarrow \infty$.

Далее следуем методике, описанной в работах [2, 3].

В силу граничных условий (2), уравнение (1) можно переписать в следующем виде:

$$\oint_S \left[\vec{H}_1 \vec{E}_2 \right] d\vec{S} = \int_V \left(\vec{j}_1^e \vec{E}_2 - \vec{j}_2^e \vec{E}_1 - \vec{j}_1^m \vec{H}_2 + \vec{j}_2^m \vec{H}_1 \right) dV, \quad (3)$$

В неограниченном пространстве источники $\vec{j}_1^{e,m}$ создадут поле сферической волны \vec{E}_0, \vec{H}_0 . В этом случае уравнение (1) запишется как:

$$\int_{V_\infty} \left(\vec{j}_1^e \vec{E}_2 - \vec{j}_2^e \vec{E}_0 - \vec{j}_1^m \vec{H}_2 + \vec{j}_2^m \vec{H}_0 \right) dV = 0, \quad (4)$$

Располагая источники $\vec{j}_2^{e,m}$ вблизи стыка $z_1 = 0$ и удаляя $S_{1,2}$ в ∞ , вычитая из уравнения (3) уравнение (4), получаем

$$\int_S \left[\vec{H}_1 \vec{E}_2 \right] d\vec{S} = \int_V \left(\vec{j}_2^e (\vec{E}_0 - \vec{E}_1) - \vec{j}_2^m (\vec{H}_0 - \vec{H}_1) \right) dV, \quad (5)$$

При выводе уравнения (5) учтена тождественность интегрирования по бесконечному объёму V_∞ и по объёму источников V .

Выбираем в качестве вспомогательных источников элементарные электрические и магнитные диполи:

$$\vec{j}_{1,2}^{e,m} = \vec{I}_2^{e,m} \delta(\vec{r} - \vec{r}_{j1,2}^{e,m}), \quad (6)$$

где \vec{r} и $\vec{r}_{j1,2}^{e,m}$ - соответственно координаты точек наблюдения и точек источников. Воспользовавшись свойством δ - функций, из (5) получаем:

- для случая, когда вспомогательное поле создаётся магнитным диполем,

$$\int_S [\vec{H}_1 \vec{E}_2] dS = \vec{I}_2^m \vec{H}_1(\vec{r}_{j2}^m); \quad (7)$$

- для случая, когда вспомогательное поле создаётся электрическим диполем,

$$\int_S [\vec{H}_1 \vec{E}_2] dS = -\vec{I}_2^e \vec{E}_1(\vec{r}_{j2}^e). \quad (8)$$

В выражениях (6)-(8) $I^{e,m}$ – амплитуды вспомогательных источников $\vec{j}^{e,m}$.

Решая интегральные уравнения (7), (8) при граничных условиях (2), определяем искомые поля \vec{E}_1 , \vec{H}_1 в нерегулярной линии передач. При этом отсутствуют ограничения на вид функции, описывающей продольный профиль экранирующей поверхности (поверхность может быть как плавной, так и ступенчатой).

Рассмотрим исследуемую структуру, изображённую на рисунке 1. На стык из $z_1 \rightarrow -\infty$ со стороны волновода I (радиус r_1) может падать любая собственная волна этой направляющей структуры. В результате дифракции этой волны на стыке в волноводе I появляются бесконечный набор отражённых волн с коэффициентами отражения R_q^E (для E -волн) и R_{q1}^H (для H -волн), а в волноводе II (радиус r_2) - бесконечный набор прошедших волн с коэффициентами прохождения B_k^E (для E -волн) и B_{k1}^H (для H -волн).

Вектора Герца в областях I и II записываются так:

$$\begin{aligned} \Pi_{z_I}^E(r, \varphi) &= J_n(\alpha_{Iq}^E r) \Phi_n(\varphi) \exp(-j\beta^E z) + \sum_{q=1}^{\infty} R_q^E J_n(\alpha_{Iq}^E r) \Phi_n(\varphi) \exp(j\beta^E z), \\ \Pi_{z_I}^H(r, \varphi) &= J_n(\alpha_{Iq_1}^H r) \Phi_n(\varphi) \exp(-j\beta^H z) + \sum_{q_1=1}^{\infty} R_{q_1}^H J_n(\alpha_{Iq_1}^H r) \Phi_n(\varphi) \exp(j\beta^H z), \\ \Pi_{z_{II}}^E(r, \varphi) &= \sum_{k_1=1}^{\infty} B_{k_1}^E J_n(\alpha_{IIk_1}^E r) \Phi_n(\varphi) \exp(-j\beta^E z), \\ \Pi_{z_{II}}^H(r, \varphi) &= \sum_{k_1=1}^{\infty} B_{k_1}^H J_n(\alpha_{IIk_1}^H r) \Phi_n(\varphi) \exp(-j\beta^H z). \end{aligned} \quad (9)$$

Связь волновых чисел выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} (\alpha_{nm}^E)^2 - \varepsilon\mu\omega^2 &= (\beta_{nm}^E)^2, \\ (\alpha_{nm}^H)^2 - \varepsilon\mu\omega^2 &= (\beta_{nm}^H)^2, \end{aligned}$$

где ε - абсолютная диэлектрическая проницаемость среды; β - постоянная распространения; M - абсолютная магнитная проницаемость среды; α_{nm}^E и α_{nm}^H - поперечные волновые числа E и H волн круглого волновода соответственно.

Вид зависимости поля по азимутальной координате выражен функциями:

$$\Phi_n(\varphi) = \cos(n\varphi) \quad \text{и} \quad \Phi'_n(\varphi) = -\sin(n\varphi), \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

В интегральной записи леммы Лоренца фигурирует электромагнитное поле вспомогательных источников – электрических и магнитных диполей. Компоненты электромагнитного

поля, созданного магнитным источником в сферической системе координат (ρ, θ, γ) , записываются в следующем виде [4]:

$$\begin{aligned} E_\gamma^h &= \frac{jkI_0^m L}{4\pi} \sin(\theta) \frac{\exp(-jk\rho)}{\rho} \left(1 + \frac{1}{jk\rho}\right), \\ H_\rho^h &= \frac{I_0^m L}{2\pi j\omega\mu_0\mu} \cos(\theta) \left(\frac{\exp(-jk\rho)}{\rho^3} + jk \frac{\exp(-jk\rho)}{\rho^2}\right), \\ H_\theta^h &= \frac{I_0^m L}{4\pi j\omega\mu_0\mu} \sin(\theta) \left(\frac{\exp(-jk\rho)}{\rho^3} + jk \frac{\exp(-jk\rho)}{\rho^2} - k^2 \frac{\exp(-jk\rho)}{\rho}\right). \end{aligned} \quad (10)$$

Компоненты электромагнитного поля, излученного электрическим диполем, могут быть записаны таким образом [4]:

$$\begin{aligned} H_\gamma^e &= \frac{jkI_0^e L}{4\pi} \sin(\theta) \frac{\exp(-jk\rho)}{\rho} \left(1 + \frac{1}{jk\rho}\right), \\ E_\rho^e &= \frac{I_0^e L}{2\pi j\omega\varepsilon_0\varepsilon} \cos(\theta) \left(\frac{\exp(-jk\rho)}{\rho^3} + jk \frac{\exp(-jk\rho)}{\rho^2}\right), \\ E_\theta^e &= \frac{I_0^e L}{4\pi j\omega\varepsilon_0\varepsilon} \sin(\theta) \left(\frac{\exp(-jk\rho)}{\rho^3} + jk \frac{\exp(-jk\rho)}{\rho^2} - k^2 \frac{\exp(-jk\rho)}{\rho}\right). \end{aligned} \quad (11)$$

где $k = \omega\sqrt{\mu\varepsilon}$ - постоянная распространения плоской волны в свободном пространстве; μ_0, ε_0 - соответственно относительная магнитная, диэлектрическая проницаемость среды.

Индексы e и h соответствуют компонентам поля, излучаемого электрическим и магнитным диполем.

В выражениях (10), (11) сферические координаты, связанные со вспомогательными источниками (рис. 2), выражаются через цилиндрические координаты направляющей системы следующим образом:

$$\begin{aligned} \rho &= \sqrt{(r \sin \varphi \pm r_u \sin \varphi_u)^2 + (z_1 \pm c)^2 + (r \cos \varphi \pm r_u \cos \varphi_u)^2} = \\ &= \sqrt{r^2 + r_u^2 + z_1^2 \pm 2z_1c + c^2 \pm 2rr_u \cos(\varphi - \varphi_u)}, \\ \theta &= \arctg \frac{\sqrt{(r \sin \varphi \pm r_u \sin \varphi_u)^2 + (z_1 \pm c)^2}}{r \cos \varphi \pm r_u \cos \varphi_u}, \\ \gamma &= \arctg \frac{z_1 \pm c}{r \sin \varphi \pm r_u \sin \varphi_u}. \end{aligned} \quad (12)$$

Полагая, что поле (вспомогательное) создается магнитным диполем, в этом случае используется уравнение (7). Левая часть этого уравнения записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} \int_S ([\vec{H}_1 \times \vec{E}_2^h]) d\vec{S} &= \int_{S_1} [\{\vec{H}_{1_I}^H\} + \sum_{q=1}^{\infty} R_{q_1}^H \vec{H}_{1_I}^H + \sum_{q=1}^{\infty} R_q^E \vec{H}_{1_I}^E] \times \vec{E}_2^h d\vec{S}_{/r=r_1} + \\ &+ \int_{S_\delta} [\{\sum_{k=1}^{\infty} B_k^E \vec{H}_{1_{II}}^E + \sum_{k_1}^{\infty} B_{k_1}^H \vec{H}_{1_{II}}^H\} \times \vec{E}_2^h] d\vec{S}_{/z_1=0} + \int_{S_2} [\{\sum_{k=1}^{\infty} B_k^E \vec{H}_{1_{II}}^E + \sum_{k_1=1}^{\infty} B_{k_1}^H \vec{H}_{1_{II}}^H\} \times \vec{E}_2^h] d\vec{S}_{/r=r_2}, \end{aligned} \quad (13)$$

где S_1 - боковая поверхность волновода I радиуса r_1 ; S_2 - боковая поверхность волновода II радиуса r_2 ; S_δ - поверхность торцевого сочленения (кольцо внутренний радиус r_1 , внешний r_2).

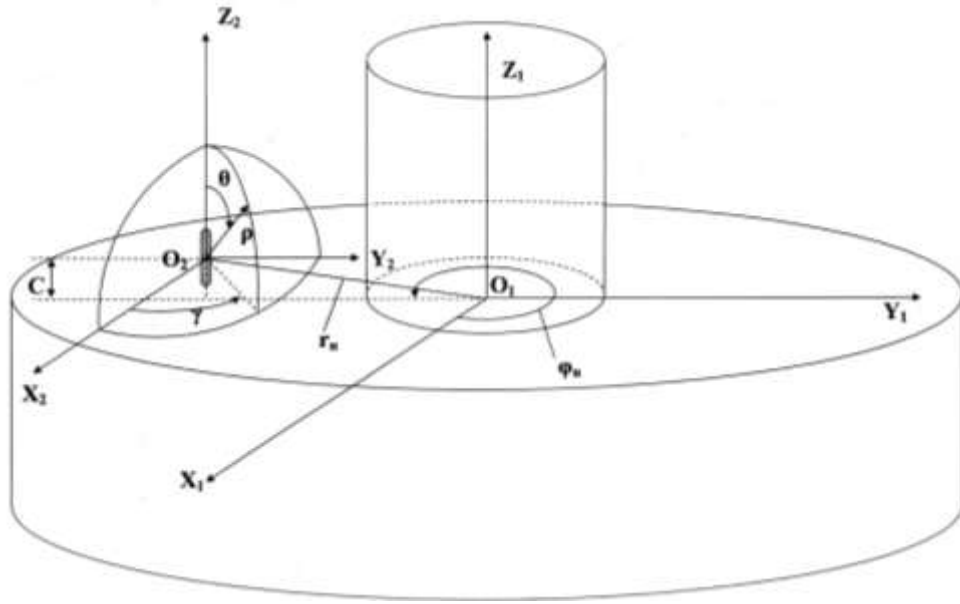


Рис. 2. Продольное расположение вспомогательных источников в сочленении двух волноводов

Если вспомогательное поле создаётся электрическим диполем, то воспользуемся уравнением (8). Левая часть этого уравнения выглядит следующим образом:

$$\int_S ([\vec{H}_1 \times \vec{E}_2^e]) d\vec{S} = \int_{S_1} [\{\vec{H}_{1l}^{\{H\}}\} + \sum_{q=1}^{\infty} R_{q1}^H \vec{H}_{1l}^H + \sum_{q=1}^{\infty} R_q^E \vec{H}_{1l}^E] \times \vec{E}_2^e d\vec{S}_{/r=r_1} + \int_{S_\delta} [\{\sum_{k=1}^{\infty} B_k^E \vec{H}_{1ll}^E + \sum_{k_1=1}^{\infty} B_{k_1}^H \vec{H}_{1ll}^H\} \times \vec{E}_2^e] d\vec{S}_{/z_1=0} + \int_{S_2} [\{\sum_{k=1}^{\infty} B_k^E \vec{H}_{1ll}^E + \sum_{k_1=1}^{\infty} B_{k_1}^H \vec{H}_{1ll}^H\} \times \vec{E}_2^e] d\vec{S}_{/r=r_2}. \quad (14)$$

Правая часть уравнения (7) при данном расположении источников в покоординатной записи выглядит следующим образом:

$$\vec{I}_2^m \vec{H}_1(\vec{r}_{j2}) = I_{0_2}^m L H_{z_1l}^H(r_u, \varphi_u) + \sum_{q_1=1}^{\infty} R_{q_1}^H I_{0_2}^m L H_{z_1l}^H(r_u, \varphi_u) + \sum_{k_1=1}^{\infty} B_{k_1}^H I_{0_2}^m L H_{z_1ll}^H(r_u, \varphi_u) = \\ = I_{0_2}^m L(\alpha_{lmm}^H)^2 J_n(\alpha_{lmm}^H r_u) \cos(n\varphi_u) \exp(-j\beta_{nm}^H z) + \sum_{q_1=1}^{\infty} R_{q_1}^H I_{0_2}^m L(\alpha_{lq_1}^H)^2 J_n(\alpha_{lq_1}^H r_u) \cos(n\varphi_u) \exp(j\beta_{q_1}^H z) + \\ + \sum_{k_1=1}^{\infty} B_{k_1}^H I_{0_2}^m L(\alpha_{llk_1}^H)^2 J_n(\alpha_{llk_1}^H r_u) \cos(n\varphi_u) \exp(-j\beta_{k_1}^H z),$$

где (r_u, φ_u, z_u) - координаты мнимого источника.

Правая часть уравнения (8) при этом же расположении источников в покоординатной записи представлена ниже:

$$-\vec{I}_2^e \vec{E}_1(\vec{r}_{j2}) = -I_{0_2}^e L E_{z_1l}^E(r_u, \varphi_u) - \sum_{q=1}^{\infty} R_q^E I_{0_2}^e L E_{z_1l}^E(r_u, \varphi_u) - \sum_{k=1}^{\infty} B_k^E I_{0_2}^e L E_{z_1ll}^E(r_u, \varphi_u) = \\ = -I_{0_2}^e L(\alpha_{lmm}^E)^2 J_n(\alpha_{lmm}^E r_u) \cos(n\varphi_u) \exp(-j\beta_{nm}^E z) - \sum_{q=1}^{\infty} R_q^E I_{0_2}^e L(\alpha_{lq}^E)^2 J_n(\alpha_{lq}^E r_u) \cos(n\varphi_u) \exp(j\beta_q^E z) - \\ - \sum_{k=1}^{\infty} B_k^E I_{0_2}^e L(\alpha_{llk}^E)^2 J_n(\alpha_{llk}^E r_u) \cos(n\varphi_u) \exp(-j\beta_k^E z),$$

Подставляя полученные компоненты полей в выражение на основе леммы Лоренца и записывая его в $(q+k)$ точках с координатами (r_u, φ_u, z_u) , получаем систему $(q+k)$ алгебраических уравнений относительно неизвестных амплитудных коэффициентов $R_q^E, B_k^H, R_{q_1}^E, B_{k_1}^H$, которая решается в том или ином приближении в зависимости от числа учитываемых волн в стыкуемых волноводах.

Полную количественную и качественную информацию о дифракционных характеристиках скачкообразного сужения круглого волновода в одномодовом диапазоне содержат зависимости модуля и фазы коэффициента отражения от частоты, а также коэффициента прохождения H_{01} и E_{01} волн. Данные зависимости представлены на рис. 3 – рис. 6.

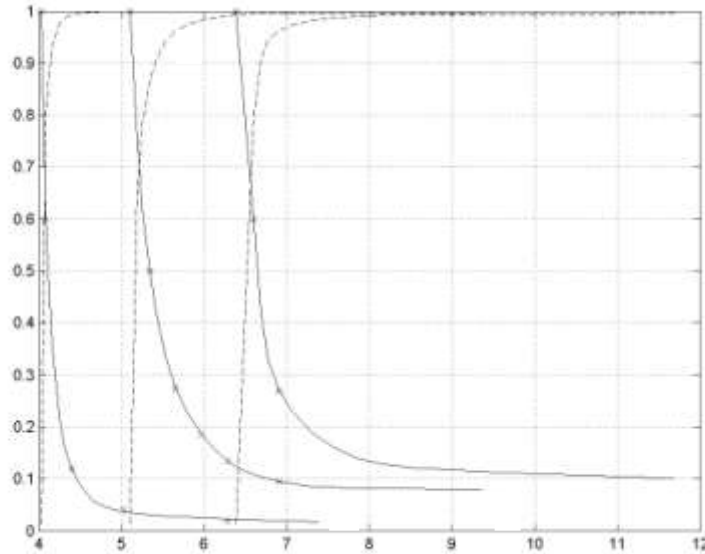


Рис. 3. Зависимости модуля коэффициента отражения и приведенного модуля коэффициента прохождения (штриховая линия) от нормированного волнового числа ka_1 для H_{01} волны при соотношении размеров волнопроводов:
1 - $N=a_1/a_2=0,6$; 2 - $N=a_1/a_2=0,75$; 3 - $N=a_1/a_2=0,95$

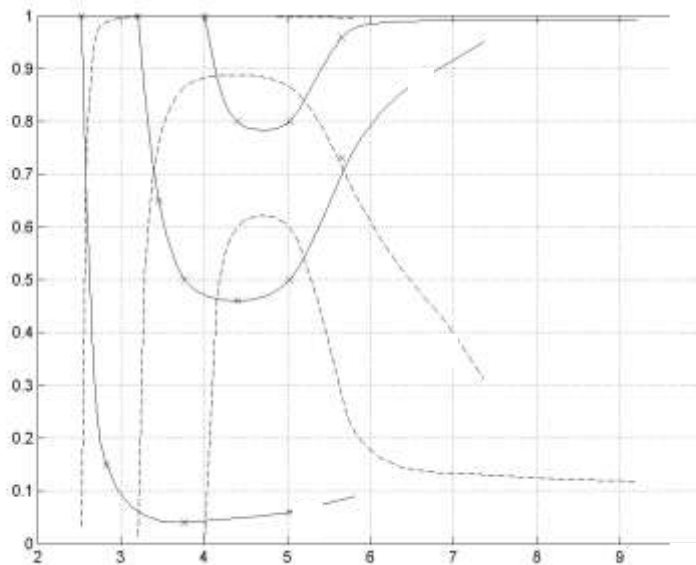


Рис. 4. Зависимости модуля коэффициента отражения и приведенного модуля коэффициента прохождения (штриховая линия) от нормированного волнового числа ka_1 для E_{01} волны при соотношении размеров волнопроводов:
1 - $N=a_1/a_2=0,6$; 2 - $N=a_1/a_2=0,75$; 3 - $N=a_1/a_2=0,95$

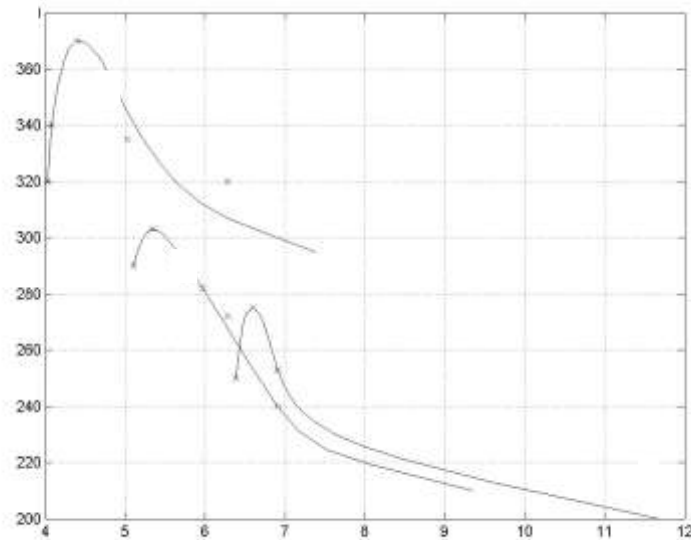


Рис. 5. Зависимости фазы модуля коэффициента отражения от нормированного волнового числа ka_1 для H_{01} волны при соотношении размеров волноводов:
 1 – $N=a_1/a_2=0,6$; 2 – $N=a_1/a_2=0,75$; 3 – $N=a_1/a_2=0,95$

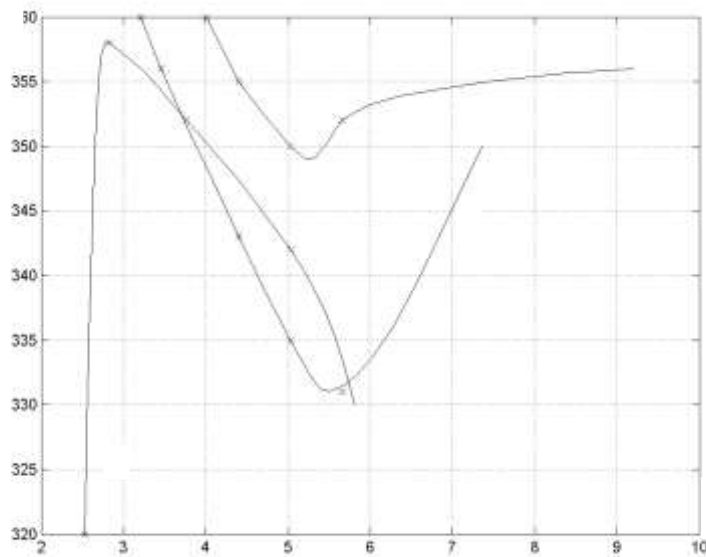


Рис. 6. Зависимости фазы модуля коэффициента отражения от нормированного волнового числа ka_1 для E_{01} волны при соотношении размеров волноводов:
 1 – $N=a_1/a_2=0,6$; 2 – $N=a_1/a_2=0,75$; 3 – $N=a_1/a_2=0,95$

При решении рассматриваемой дифракционной задачи поле на стыке двух волноводов представлялось в виде набора прошедших и отраженных симметричных H -волн (в случае возбуждения стыка H_{01} -волной). В том случае, когда стык двух волноводов возбуждается E_{01} -волной, поле на стыке представляется в виде набора симметричных E -волн. В первом случае в качестве вспомогательных источников выбираются магнитные диполи, во втором – электрические. Представленные результаты получены при учете семи волн в каждом волноводе при продольном расположении источников каждого вида.

Одномодовый режим рассеяния на симметричной ступеньке в круглом волноводе с H_{01} волной реализуется в диапазоне $3,832 \frac{a_1}{a_2} \leq \frac{2\pi a_1}{\lambda} \leq 7,016 \frac{a_1}{a_2}$. Зависимости $|R_1^H|$ от $2\pi a_1/\lambda$ вдали

от критических частот практически прямолинейные и $|R_1^H| < 0.2$. В окрестности точки $\lambda = \lambda_{кр}$ характеристики ступеньки изменяются наиболее резко.

Крестиками на рис. 5 – рис. 6 изображены значения $|R_1^H|$, взятые из работы [5], которые можно принимать за эталонные, так как задача в данной работе решалась электродинамически строгим методом полуобращений в высоком приближении, когда в стыкуемых волноводах учитывалось большое число (более десяти в каждом волноводе) волн. Как видно из рисунков и из таблицы 1, расхождения между результатами, полученными на основе разработанного алгоритма в третьем приближении, и данными из [5] не превышают 7,8%, а в седьмом - 0.48%

Таблица 1

$N=(a_1/a_2)$	Номер приближения K	Величина отклонения коэффициента отражения H_{01} волны от значений в работе[5]			Величина отклонения коэффициента отражения E_{01} волны от значений в работе[5]		
		$N \cdot ka_1$			$N \cdot ka_1$		
		3,832	5,424	7,016	2,405	3,963	5,520
0,95	1	0,2322	0,0738	0,0219	0,1226	-0,0314	-0,0407
	3	0,0264	0,0211	-0,0173	0,0779	-0,0136	0,0031
	7	0,0014	-0,0011	0,0009	0,00012	-0,00013	-0,00031
0,75	1	0,1845	0,0328	0,0341	-0,2419	-0,0913	-0,1721
	3	0,0027	-0,0061	0,0212	-0,0185	0,0184	-0,1005
	7	0,0021	0,00031	0,0029	-0,0048	-0,00441	-0,00026
0,6	1	0,0211	0,0908	0,2047	-0,1209	-0,1795	-0,0443
	3	0,0045	-0,0559	-0,0361	-0,0052	-0,0232	0,0109
	7	-0,0013	-0,009	-0,00611	0,00448	0,000112	-0,00602

Это показывает, что благодаря инвариантности разработанного алгоритма расчета ступенчатых нерегулярностей по отношению к месту расположения вспомогательных источников с использованием его можно получить достаточно точные результаты уже в невысоких приближениях.

Характер зависимостей $|R_1^E|$ от $2\pi a_1/\lambda$ для модуля коэффициента отражения E_{01} -волны существенно отличается от случая H_{01} -волны. Волна E_{01} является единственной распространяющейся симметричной E -волной в диапазоне $2,405 \frac{a_1}{a_2} \leq \frac{2\pi a_1}{\lambda} \leq 5,520 \frac{a_1}{a_2}$.

При сопоставимых величинах a_2/a_1 уровень коэффициента отражения E_{01} -волны заметно выше, чем H_{01} -волны.

Зависимость $|R_1^H|$ от a_2/a_1 показывает, что переход через критическую частоту H_{01} -волны в узком волноводе приводит к резкому уменьшению коэффициента отражения на ма-

лом интервале a_2/a_1 . Для E_{01} -волны аналогичные зависимости имеют более плавный характер (рис. 3 – рис. 5).

Таблица 2

$N=(a_1/a_2)$	Номер приближения	Относительная погрешность выполнения закона сохранения энергии для H_{01} волны (в %)								
		$N \cdot ka_1$								
		3.832	4.23	4.628	5.026	5.424	5.822	6.220	6.618	7.016
0,95	1	10,371	5,8953	4,7449	4,4456	4,4661	4,6436	4,9208	5,2401	5,6066
	3	0,4983	0,2602	0,1917	0,1624	0,1497	0,1433	0,1401	0,1423	0,1451
	7	0,00623	0,003686	0,00286	0,00248	0,00227	0,00215	0,00207	0,00203	0,00201
0,75	1	6,5592	3,6601	2,6921	2,1325	1,8827	1,7267	1,7225	1,6789	1,6366
	3	0,1827	0,1523	0,1048	0,0927	0,1823	0,1423	0,0482	0,0929	0,9951
	7	0,00878	0,00710	0,00655	0,00629	0,00614	0,00605	0,00599	0,00595	0,00592
0,6	1	9,5991	5,4147	4,1459	3,6665	3,4808	3,4545	3,5159	3,6488	3,8044
	3	0,9232	0,5142	0,3567	0,287	0,246	0,2245	0,2119	0,2049	0,2001
	7	0,00867	0,00754	0,0072	0,00716	0,00715	0,00719	0,00725	0,00733	0,00741
$N=(a_1/a_2)$	Номер приближения	Относительная погрешность выполнения закона сохранения энергии для E_{01} волны (в %)								
		$N \cdot ka_1$								
		2,405	2,794	3,184	3,573	3,963	4,352	4,741	5,131	5,520
0,95	1	12,47	6,8852	5,4731	4,9448	4,8864	4,98	5,2117	5,4886	5,832
	3	0,3871	0,1445	0,1184	0,1035	0,0965	0,0920	0,0897	0,0891	0,0897
	7	0,0782	0,0682	0,0649	0,0633	0,0623	0,0616	0,0611	0,0608	0,0605
0,75	1	7,295	4,4286	3,8135	3,7234	3,8967	4,1619	4,4971	4,8643	5,276
	3	0,9726	0,5132	0,3589	0,2852	0,2475	0,2114	0,2034	0,2001	0,1992
	7	0,00828	0,00878	0,00961	0,0105	0,0114	0,0124	0,0134	0,0144	0,0153
0,6	1	9,813	5,8585	4,7669	4,4442	4,4685	4,6469	4,9244	5,2407	5,6036
	3	1,834	1,019	0,6766	0,532	0,4452	0,3895	0,3532	0,3270	0,3112
	7	0,00384	0,00234	0,00185	0,00160	0,00146	0,00136	0,00130	0,00125	0,00121

Поведение линий фазы коэффициента отражения показательно в том смысле, что в пределах одноволнового диапазона фаза коэффициента отражения H_{01} -волны изменяется более существенно, чем E_{01} -волны.

С целью проверки действенности разработанного алгоритма были исследованы сходности результатов, которые представлены в табл. 1.

При решении системы уравнений в том или ином приближении при конечном числе точек, в которые помещаются вспомогательные источники, их координаты можно выбирать произвольным образом. Оптимальное же их расположение определяется из следующих условий:

1. Выполнения закона сохранения энергии, которое иллюстрирует табл. 2. Для одномерного режима рассеяния на ступеньке закон сохранения энергии записывается в виде

$$1 - |R_i^{H(E)}|^2 = |B_i^{H(E)}|^2 N,$$

где N - коэффициент, учитывающий различие площадей поперечных сечений стыкуемых волноводов. В нашем случае $N = \left(\frac{a_2}{a_1}\right)^2$.

2. В первом приближении, когда в каждом волноводе учитывается по одной волне, рекомендуется располагать источники следующим образом:

- по радиальной координате: оба источника на расстоянии $r \approx 0,01\lambda$ от оси структуры;
- по азимутальной координате: $\varphi_1 = 90^\circ$, $\varphi_2 = (270 \pm 15)^\circ$, где φ_1, φ_2 - азимутальные координаты первого и второго источников соответственно;
- по продольной координате $z_{1,2}=0$, $c = 0$.

В третьем приближении, когда в каждом волноводе учитывается по три волны, рекомендуется располагать источники следующим образом:

- по радиальной координате: все источники на расстоянии $r \approx 0,01\lambda$ от оси структуры;
- по азимутальной координате: $\varphi_{1,3} = 90^\circ$, $\varphi_{2,4} = (270 \pm 15)^\circ$, $\varphi_5 = 0^\circ$, $\varphi_6 = 180^\circ$ где $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5, \varphi_6$ - азимутальные координаты источников;
- по продольной координате $z_{1,2,3,4,5,6} = 0$, $c = 0$.

В седьмом приближении, когда в каждом волноводе учитывается по семь волн, рекомендуется располагать источники следующим образом:

- по радиальной координате: все источники на расстоянии $r \approx 0,01 \div 0,015\lambda$ от оси структуры;
- по азимутальной координате: $\varphi_{1,3} = 90^\circ$, $\varphi_{2,4} = (270 \pm 15)^\circ$, $\varphi_5 = 0^\circ$, $\varphi_6 = 180^\circ$, $\varphi_{7,10} = (45 \pm 15)^\circ$, $\varphi_{8,9} = (225 \pm 10)^\circ$, $\varphi_{11} = 290^\circ$, $\varphi_{12} = 299^\circ$, $\varphi_{13} = 131^\circ$, $\varphi_{14} = 139^\circ$, где $\varphi_1, \dots, \varphi_{14}$ - азимутальные координаты источников;
- по продольной координате $z_{1,\dots,14} = 0$, $c = 0$.

3. Тип вспомогательного источника (магнитный или электрический диполь) зависит от волны, распространяющейся в данной направляющей структуре. В исходном уравнении для магнитного диполя, полученном на основе леммы Лоренца, в левой и правой частях фигурирует только H_z компонента, для электрического диполя - только E_z . Из этого следует, что при возбуждении стыка H -волной, в качестве вспомогательных источников необходимо использовать магнитные диполи, E -волной - электрические.

4. Вспомогательные источники независимо от их типа, следует располагать вдоль направляющей структуры.

Таким образом, предложен и продемонстрирован на конкретных задачах метод расчета нерегулярных участков волноведущих структур, в основе которого лежит интегральное соотношение Лоренца. К основным достоинствам метода относится инвариантность задачи относительно выбора месторасположения вспомогательных источников, что позволяет получить достаточно точные результаты уже в невысоких приближениях.

Кроме того, используя представленный метод, возможно рассчитывать продольно нерегулярные направляющие структуры различной конфигурации, которые могут не иметь осевой симметрии.

Установлено, что основная трудность при численной реализации метода заключается в вычислении интегралов, которые, хотя и являются сходящимися, но содержат осциллирующую подынтегральную функцию. Поэтому численное интегрирование требует достаточно больших затрат машинного времени.

Приведены результаты решения дифракционной задачи для симметричных волн на ось-симметричном стыке круглых волноводов, иллюстрирующие предлагаемый метод. Проведено сравнение численных результатов решения указанной задачи с результатами, приведенными в работе [5], показавшее высокую эффективность разработанного алгоритма расчета нерегулярных волноведущих структур.

Библиографический список

1. **Каценеленбаум, Б.З.** Высокочастотная электродинамика / Б.З. Каценеленбаум. – М.: Наука, 1966.
2. **Белов, Ю.Т.** О расчете гофрированных волноводов / Ю.Т. Белов, С.Б. Раевский // Изв. вузов СССР. Сер. Радиофизика. 1975. Т. 8. № 10.
3. **Илларионов, Ю.А.** Расчет гофрированных и частично заполненных волноводов / Ю.А. Илларионов, С.Б. Раевский, В.Я. Сморгонский. – М.: Сов. радио, 1980.
4. **Марков, Г.Т.** Электродинамика и распространение радиоволн / Г.Т. Марков, Б.М. Петров, Г.П. Грудинская. – М.: Сов. радио, 1979.
5. **Шестопапов, В.П.** Резонансное рассеяние волн / В.П. Шестопапов, А.А. Кириленко, Л.А. Рудь. – Киев: Наук. Думка, 1986. Т. 2.

*Дата поступления
в редакцию 02.02.2010*

I.N. Danilov, V.K. Maistrenko, S.E. Piliposyan

THE CALCULATION OF THE JUNCTION OF TWO CIRCULAR WAVEGUIDES OF DIFFERENT CROSS-SECTION BY METHOD OF LORENTZ'S LEMMA

One method of solving complex diffraction problems in electrodynamics is the method based on the application of the Lorentz lemma. In this paper demonstrated the most common approach to solving the problem of hopping irregularities in the transmission line by the example of the calculation of the diffraction of symmetrical waves at the junction of two circular waveguides of different sections. This problem is a test for the study and validation of the method, based on which we plan to further study more complex structures. The result of this work is the solutions of the diffraction problem for symmetric waves on the axis-symmetric junction cross-sectional circular waveguide, illustrating the proposed method. A study of convergence of this method and comparison of numerical results of solving these problems with the results presented in other works on the calculation of similar diffraction patterns.

Key words: waveguide, junction, symmetric waves, diffraction problem, numerical results, axis-symmetric junction, circular waveguide.

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 629.113

В.Н. Кравец, Р.А. Мусарский

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СОЧЛЕНЁННОГО АВТОТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Предлагается пространственная математическая модель сочленённого автотранспортного средства, разработанная на основе использования квазиординат, нашедших широкое применение для исследования неголономных систем.

Ключевые слова: математическая модель, квазиординаты, сочленённое транспортное средство, псевдоскольжение колеса, боковой увод.

Математическая модель предназначена для определения показателей управляемости и устойчивости специализированных автотранспортных средств, создаваемых на базе вне дорожных карьерных самосвалов особо большой грузоподъемности. Были разработаны математические модели для нескольких специализированных автотранспортных средств. Из всех рассмотренных моделей наибольшей общностью обладает модель буксировщика карьерных самосвалов, представляющего сочлененное транспортное средство, которое состоит из тягача-буксировщика и буксируемого им карьерного самосвала или любой другой транспортно-технологической машины, используемой при разработке полезных ископаемых открытым способом.

Пространственная шестиколесная механическая модель системы буксировщик – буксируемый автомобиль представлена на рис. 1 [3, 7]. В основу разработки пространственной модели положен метод квазиординат, развитый Н.А. Фуфаевым [8, 9].

Для описания качения эластичного колеса, нагруженного продольной и боковой силами, использованы обобщенные гипотезы продольного псевдоскольжения (крипа) и бокового увода [4, 12].

Количественной характеристикой продольного псевдоскольжения является величина

$$\varepsilon = (V - r_{к0}\omega) / V, \quad (1)$$

где V – скорость центра колеса; $r_{к0}$ – радиус свободного колеса; ω – угловая скорость вращения колеса.

При малых значениях крипа ε между ним и продольной силой F_x – силой сопротивления крипу имеет место линейная зависимость

$$F_x = -K_x \varepsilon, \quad (2)$$

где K_x – коэффициент сопротивления крипу.

Зависимость (2) справедлива при постоянной нормальной силе F_z , действующей на колесо. Изменение нормальной нагрузки на колесо оказывает влияние на радиус качения колеса, которое учитывают в обобщенной гипотезе крипа [4]:

$$F_x = -K_x(V - r_{k*}\omega)/V + K_x\lambda_z(z - z_*),$$

где r_{k*} – радиус свободного качения колеса при статической нагрузке; λ_z – коэффициент, учитывающий влияние на крив радиальной (нормальной) деформации упругого колеса; $z - z_*$ – нормальная деформация упругого колеса.

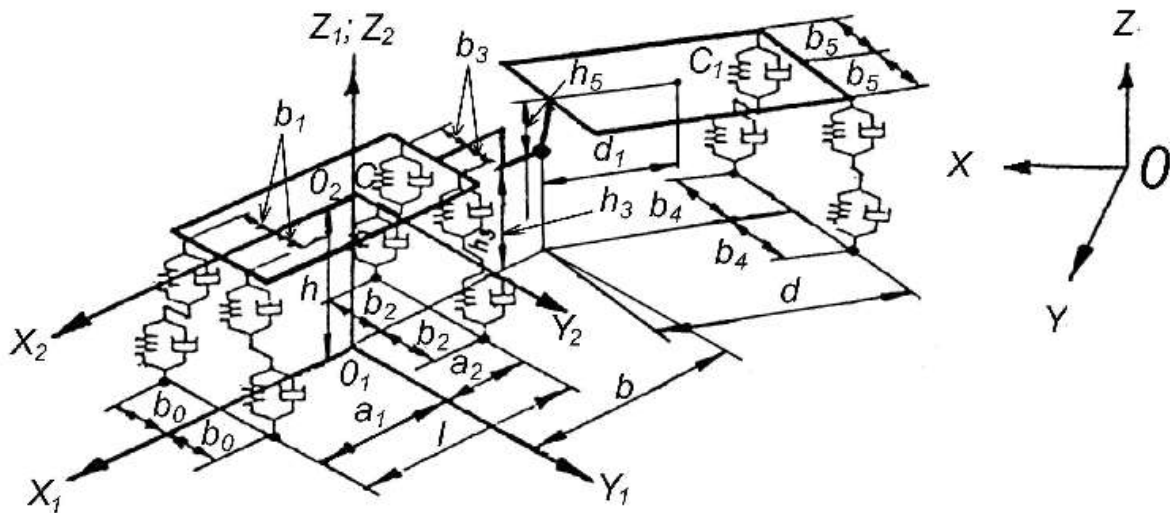


Рис. 1. Математическая модель системы буксировщик – буксируемый автомобиль

В простейшей гипотезе увода взаимосвязь между боковой силой F_y и вызываемым ею углом увода δ выражается линейной зависимостью [4]

$$F_y = -K_y\delta,$$

где K_y – коэффициент сопротивления уводу.

Величину δ определяют из соотношения

$$\operatorname{tg}\delta \approx \delta = V_y / V, \quad (3)$$

где V_y и V – поперечная и продольная составляющие скорости центра колеса соответственно.

Линейная зависимость между F_y и δ справедлива для малых углов увода ($\delta \leq 0,05$ рад). Нелинейная связь может быть аппроксимирована несколькими выражениями [1, 4, 5, 6]. В данной работе использована зависимость

$$F_y = -K_y\delta \frac{\varphi F_z}{\sqrt{(\varphi F_z)^2 + (K_y\delta)^2}},$$

где K_y – коэффициент сопротивления уводу на линейном участке зависимости $F_y = f(\delta)$; δ – угол увода; φ – коэффициент сцепления колеса с опорной поверхностью; F_z – нормальная сила, действующая на колесо.

При составлении математической модели приняты следующие допущения:

- 1) поддресоренные части буксировщика и буксируемого автомобиля представлены в виде двух шарнирно-сочлененных твердых тел, соединенных посредством шести подвесок с колесами;
- 2) неподдресоренные части (колеса) заданы в виде материальных точек;
- 3) ведущие колеса имеют моменты инерции, приложенные в плоскости их качения;
- 4) рулевое управление жесткое, лишено люфтов и инерционности;
- 5) характеристики подвесок и амортизаторов нелинейные;
- 6) крутящие моменты на ведущих колесах равны;

- 7) углы продольного и поперечного кренов подрессоренной массы малы;
- 8) нелинейные упругие характеристики шин аппроксимируются кусочно-линейной функцией;
- 9) углы поворота управляемых колес и крутящие моменты на ведущих колесах – заданные функции времени.

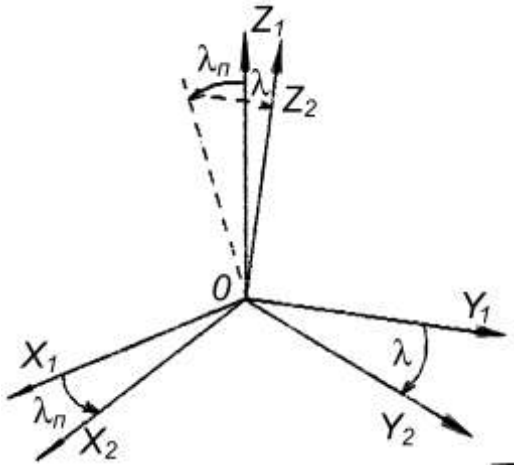


Рис. 2. Системы координат

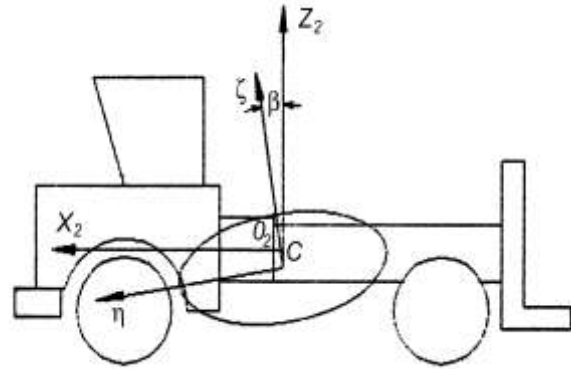


Рис. 3. Эллипсоид инерции буксировщика

Системы координат показаны на рис. 2, эллипсоид инерции буксировщика – на рис. 3. Углы поворота управляемых колес связаны между собой соотношением [11]

$$\text{ctg}\theta_{\eta} - \text{ctg}\theta_{\zeta} = 2b_0 / l .$$

Связь между обобщенными координатами q_1, q_2, \dots, q_n и их производными $\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_n$ и квазикоординатами $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n$ задана уравнениями (3):

$$\begin{aligned} \dot{\pi}_j &= \sum_{s=1}^n a_{js}(q, t) \dot{q}_s + a_j(q, t); \\ \dot{q}_s &= \sum_{i=1}^n b_{is}(q, t) \dot{\pi}_i + b_s(q, t). \end{aligned} \tag{4}$$

Как показано в [9], уравнение Лагранжа второго рода в квазикоординатах имеет вид

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L^*}{\partial \dot{\pi}_k} - \frac{\partial L^*}{\partial \pi_k} + \sum_{j=1}^n (\gamma_{kij} \dot{\pi}_j + \gamma_{kj}) \frac{\partial L^*}{\partial \dot{\pi}_i} = Q_k - \frac{\partial R}{\partial \dot{\pi}_k}, \tag{5}$$

где $L^* = T^* - \Pi$ – функция Лагранжа; T^* – выражение кинетической энергии при переходе к квазискоростям; Π – выражение потенциальной энергии; Q_k – обобщенная сила на виртуальном перемещении $\delta\pi_k$; $R(q, \dot{\pi})$ – диссипативная функция Рэля, учитывающая рассеивание механической энергии из-за наличия сил вязкого трения; $\frac{\partial L^*}{\partial \pi_k} = \frac{\partial T^*}{\partial q_s} b_{sk}$ – оператор,

который для истинных координат совпадает с операцией частного дифференцирования по соответствующей координате; γ_{kij} и γ_{kj} – коэффициенты, зависящие от уравнений связи между обобщенными координатами и квазикоординатами, и не зависящие от движения системы.

Для получения уравнений движения математической модели необходимо составить выражения для кинетической и потенциальной энергий, функции Рэля и обобщенных сил, действующих на систему.

По теореме Кенига [9], кинетическая энергия системы буксировщик – буксируемый автомобиль равна

$$T = T_{\Pi} + T_{\Pi_1} + \sum_{i=1}^6 T_i, \quad (6)$$

где T_{Π} и T_{Π_1} – кинетическая энергия подрессоренных масс буксировщика и буксируемого автомобиля соответственно; T_i – кинетическая энергия i -го приведенного колеса.

После подстановки в уравнение (6) выражений для кинетических энергий T_{Π} , T_{Π_1} и T_i получаем формулу для кинетической энергии модели в развернутом виде:

$$\begin{aligned} T^* = & \frac{1}{2} m V_C^2 + \frac{1}{2} [I_A p^2 + I_B q^2 + I_C r^2] + \frac{1}{2} m_1 V_{C_1}^2 + \\ & + \frac{1}{2} [I_{A_1} p_1^2 + I_{B_1} q_1^2 + I_{C_1} r_1^2] + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^6 m_{\kappa_i} V_{\kappa_i}^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^6 T_{B_i}. \end{aligned} \quad (7)$$

где m и m_1 – подрессоренные массы буксировщика и буксируемого автомобиля соответственно; m_{κ_i} – приведенная (неподрессоренная) масса i -го колеса; V_C и V_{C_1} – скорости движения центров масс подрессоренных частей буксировщика и буксируемого автомобиля соответственно; V_{κ_i} – скорость движения центра i -го колеса; $I_A, I_B, I_C, I_{A_1}, I_{B_1}, I_{C_1}$ – главные центральные моменты инерции подрессоренных частей буксировщика и буксируемого автомобиля; p, q, r, p_1, q_1, r_1 – проекции мгновенных угловых скоростей ω_c и ω_{c_1} подрессоренных частей на главные оси центральных эллипсоидов инерции и буксировщика и буксируемого автомобиля; T_{B_i} – кинетическая энергия вращательного движения i -го колеса.

Для перехода к уравнениям (5) в квазикоординатах в качестве кинематических характеристик выбраны $\dot{\pi}_i$ ($i = \overline{1, 18}$), связанные с обобщенными скоростями следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \dot{\pi}_1 = \dot{z}; \quad \dot{\pi}_2 = \dot{\lambda}_{\Pi}; \quad \dot{\pi}_3 = \dot{\lambda}; \quad \dot{\pi}_4 = \dot{\gamma}; \quad \dot{\pi}_5 = -\dot{x} \sin \gamma + \dot{y} \cos \gamma; \quad \dot{\pi}_6 = -\dot{x} \cos \gamma + \dot{y} \sin \gamma; \\ \dot{\pi}_7 = \dot{\theta}_{\Pi}; \quad \dot{\pi}_8 = \dot{z}_1; \quad \dot{\pi}_9 = \dot{z}_2; \quad \dot{\pi}_{10} = \dot{z}_3; \quad \dot{\pi}_{11} = \dot{z}_4; \quad \dot{\pi}_{12} = \dot{z}_5; \quad \dot{\pi}_{13} = \dot{z}_6; \\ \dot{\pi}_{14} = \dot{\phi}_{\Pi}; \quad \dot{\pi}_{15} = \dot{\phi}_{\Pi}; \quad \dot{\pi}_{16} = \dot{\lambda}_{\Pi_1}; \quad \dot{\pi}_{17} = \dot{\lambda}_1; \quad \dot{\pi}_{18} = \dot{\gamma}_1. \end{aligned} \quad (8)$$

Подставляя выражения (4) в (7) с учетом введенных соотношений (8), получим уравнения кинетической энергии в квазикоординатах:

$$\begin{aligned} T_{\Pi}^* = & \frac{1}{2} m \left[\dot{\pi}_1^2 + (h\dot{\pi}_2 - h\lambda\dot{\pi}_4 + \dot{\pi}_6)^2 + (h\dot{\pi}_3 + h\lambda_{\Pi}\dot{\pi}_4 + \dot{\pi}_5)^2 \right] + \\ & + \frac{1}{2} I_A \left[\dot{\pi}_3 + (\lambda_{\Pi} + \beta)\dot{\pi}_4 \right]^2 + \frac{1}{2} I_B (\dot{\pi}_2 - \lambda\dot{\pi}_4)^2 + \frac{1}{2} I_C \dot{\pi}_4^2; \\ T_{\Pi_1}^* = & \frac{1}{2} m_1 \left\{ \left[\dot{\pi}_6 - h_3\dot{\pi}_2 + h_3\lambda\dot{\pi}_4 + (h_5\dot{\pi}_{16} - h_5\lambda_1\dot{\pi}_{18}) \cos \gamma_0 + \right. \right. \\ & \left. \left. + (h_5\dot{\pi}_{17} - (d_1 - h_5\lambda_{\Pi_1})\dot{\pi}_{18}) \sin \gamma_0 \right]^2 + \left[\dot{\pi}_5 - (b + \lambda_{\Pi}h_3)\dot{\pi}_4 - h_3\dot{\pi}_3 + \right. \right. \\ & \left. \left. + (h_5\lambda_1\dot{\pi}_{18} - h_5\dot{\pi}_{16}) \sin \gamma_0 + (h_5\dot{\pi}_{17} - (d_1 - h_5\lambda_{\Pi_1})\dot{\pi}_{18}) \cos \gamma_0 \right]^2 + \left[\dot{\pi}_1 + b\dot{\pi}_2 + d_1\dot{\pi}_{16} \right]^2 \right\} \\ & + \frac{1}{2} I_{A_1} \left[\dot{\pi}_{17} + (\lambda_{\Pi_1} + \beta_1)\dot{\pi}_{18} \right]^2 + \frac{1}{2} I_{B_1} (\dot{\pi}_{16} - \lambda_1\dot{\pi}_{18})^2 + \frac{1}{2} I_{C_1} \dot{\pi}_{18}^2; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T_1^* &= \frac{1}{2} m_{k_1} \left[(\dot{\pi}_5 + a_1 \dot{\pi}_4)^2 + (\dot{\pi}_6 + b_0 \dot{\pi}_4)^2 + \dot{\pi}_8^2 \right] + \frac{1}{2} I_{k_1} \left[(\dot{\pi}_6 + b_0 \dot{\pi}_4) / r_k \right]^2 ; \\
 T_2^* &= \frac{1}{2} m_{k_2} \left[(\dot{\pi}_5 + a_1 \dot{\pi}_4)^2 + (\dot{\pi}_6 - b_0 \dot{\pi}_4)^2 + \dot{\pi}_9^2 \right] + \frac{1}{2} I_{k_2} \left[(\dot{\pi}_6 - b_0 \dot{\pi}_4) / r_k \right]^2 ; \\
 T_3^* &= \frac{1}{2} m_{k_3} \left[(\dot{\pi}_5 - a_2 \dot{\pi}_4)^2 + (\dot{\pi}_6 + b_2 \dot{\pi}_4)^2 + \dot{\pi}_{10}^2 \right] + \frac{1}{2} I_{k_3} \dot{\pi}_{14}^2 ; \\
 T_4^* &= \frac{1}{2} m_{k_4} \left[(\dot{\pi}_5 - a_2 \dot{\pi}_4)^2 + (\dot{\pi}_6 - b_2 \dot{\pi}_4)^2 + \dot{\pi}_{11}^2 \right] + \frac{1}{2} I_{k_4} \dot{\pi}_{15}^2 ; \\
 T_5^* &= \frac{1}{2} m_{k_5} \left\{ \left[\dot{\pi}_6 - h_3 \dot{\pi}_2 + h_3 \lambda \dot{\pi}_4 + (h_4 \dot{\pi}_{16} - (h_4 \lambda_1 - b_4) \dot{\pi}_{18}) \cos \gamma_0 + \right. \right. \\
 &+ \left. \left. (h_4 \dot{\pi}_{17} - (d_1 - h_4 \lambda_{n_1}) \dot{\pi}_{18}) \sin \gamma_0 \right]^2 + \left[\dot{\pi}_5 - (b + \lambda_n h_3) \dot{\pi}_4 - h_3 \dot{\pi}_3 \right]^2 + \right. \\
 &+ \left. \left[(h_4 \lambda_1 - b_4) \dot{\pi}_{18} - h_4 \dot{\pi}_{16} \right] \sin \gamma_0 + \left[(h_4 \dot{\pi}_{17} - (d - h_4 \lambda_{n_1}) \dot{\pi}_{18}) \cos \gamma_0 \right]^2 + \dot{\pi}_{12}^2 \right\} ; \\
 T_6^* &= \frac{1}{2} m_{k_6} \left\{ \left[\dot{\pi}_6 - h_3 \dot{\pi}_2 + h_3 \lambda \dot{\pi}_4 + (h_4 \dot{\pi}_{16} - (h_4 \lambda_1 + b_4) \dot{\pi}_{18}) \cos \gamma_0 + \right. \right. \\
 &+ \left. \left. (h_4 \dot{\pi}_{17} - (d - h_4 \lambda_{n_1}) \dot{\pi}_{18}) \sin \gamma_0 \right]^2 + \left[\dot{\pi}_5 - (b + \lambda_n h_3) \dot{\pi}_4 - h_3 \dot{\pi}_3 \right]^2 + \right. \\
 &+ \left. \left[(h_4 \lambda_1 + b_4) \dot{\pi}_{18} - h_4 \dot{\pi}_{16} \right] \sin \gamma_0 + \left[(h_4 \dot{\pi}_{17} - (d - h_4 \lambda_{n_1}) \dot{\pi}_{18}) \cos \gamma_0 \right]^2 + \dot{\pi}_{13}^2 \right\} .
 \end{aligned}$$

Потенциальная энергия системы может быть записана как сумма потенциальных энергий ее составных частей:

$$\Pi = \Pi_n + \Pi_{n_1} + \sum_{i=1}^6 \Pi_i + \sum_{i=1}^6 \Pi_{n_i} + \sum_{i=1}^6 \Pi_{ш_i} ,$$

где Π_n и Π_{n_1} – соответственно потенциальная энергия поддрессоренных частей буксировщика и буксируемого автомобиля; Π_i – потенциальная энергия i -го приведенного колеса; Π_{n_i} – потенциальная энергия i -го упругого элемента подвески; $\Pi_{ш_i}$ – потенциальная энергия шины i -го колеса.

$$\begin{aligned}
 \Pi &= mgz + m_1 g \left(z + b \lambda_n + d \lambda_{n_1} \right) + \sum_{i=1}^6 m_{k_i} g z_i + \\
 &+ \sum_{i=1}^6 \left(\int_0^{\Delta_{n_i}} F_{n_i}(\Delta_{n_i}) d\Delta_{n_i} \right) + \sum_{i=1}^6 \left(\int_0^{\Delta_{ш_i}} F_{ш_i}(\Delta_{ш_i}) d\Delta_{ш_i} \right) ,
 \end{aligned}$$

где $F_{n_i}(\Delta_{n_i})$ и $F_{ш_i}(\Delta_{ш_i})$ – нелинейные силы упругости гидропневматического упругого элемента i -й подвески и шины i -го колеса соответственно; Δ_{n_i} и $\Delta_{ш_i}$ – деформация (прогиб) i -го упругого элемента подвески и i -й шины колеса соответственно.

С учетом введенных обозначений деформации упругих элементов подвески и шин рассчитывают по выражениям:

$$\begin{aligned}
 \Delta_{n_1} &= \pi_1 - a_1 \pi_2 + b_1 \pi_3 - l_1 - \pi_8 ; \Delta_{n_2} = \pi_1 - a_1 \pi_2 - b_1 \pi_3 - l_2 - \pi_9 ; \\
 \Delta_{n_3} &= \pi_1 + a_2 \pi_2 + b_3 \pi_3 - l_3 - \pi_{10} ; \Delta_{n_4} = \pi_1 + a_2 \pi_2 - b_3 \pi_3 - l_4 - \pi_{11} ;
 \end{aligned} \tag{9}$$

$$\Delta_{n_5} = \pi_1 + b \pi_2 - h_3 + h_4 + d \pi_{16} + b_5 \pi_{17} - l_5 - \pi_{12} ; \Delta_{n_6} = \pi_1 + b \pi_2 - h_3 + h_4 + d \pi_{16} - b_5 \pi_{17} - l_6 - \pi_{13} ,$$

где l_i ($i = \overline{1, 6}$) – длина свободного i -го упругого элемента;

$$\begin{aligned}\Delta_{ш_1} &= \pi_8 - r_k ; \Delta_{ш_2} = \pi_9 - r_k ; \Delta_{ш_3} = \pi_{10} - r_k ; \\ \Delta_{ш_4} &= \pi_{11} - r_{k_1} ; \Delta_{ш_5} = \pi_{12} - r_{k_1} ; \Delta_{ш_6} = \pi_{13} - r_{k_1} ,\end{aligned}\quad (10)$$

где r_k и r_{k_1} – радиусы качения колес буксировщика и буксируемого автомобиля соответственно.

Зависимость упругой силы гидропневматического упругого элемента подвески от хода поршня имеет вид [2]

$$F_{п_i} = \frac{p_0 l_0^{g_1} A}{(l_0 + \Delta_{п_i})^{g_1}} - \frac{q_0 L_0^{g_2} a}{(L_0 - \Delta_{п_i})^{g_2}} ,$$

где p_0 и q_0 – начальное давление в основном цилиндре и в цилиндре противодействия соответственно; l_0 и L_0 – высота приведенного столба газа в основном цилиндре и в цилиндре противодействия соответственно; g_1 и g_2 – показатели политропы процессов сжатия в основном цилиндре и в цилиндре противодействия (при малых скоростях перемещения поршня $g_1 = g_2 = 1$) соответственно; $\Delta_{п_i}$ – ход поршня.

По данным НИИ КГШ (г. Днепропетровск) [10], нелинейная упругая характеристика шины может быть аппроксимирована кусочно-линейной функцией с двумя линейными участками:

$$F_{ш} = \begin{cases} C'_{ш} \Delta_{ш_k} , & \text{при } \Delta_{ш_k} \leq \Delta'_{ш} \\ C'_{ш} \Delta'_{ш} + C''_{ш} (\Delta_{ш_k} - \Delta'_{ш}) , & \text{при } \Delta_{ш_k} > \Delta'_{ш} . \end{cases}$$

С учетом выражений (9) и (10) потенциальная энергия системы может быть записана в квазикоординатах в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Pi^* &= mg\pi_1 + mg(\pi_1 + b\pi_2 + d_1\pi_{16}) + m_{к_1} g\pi_8 + m_{к_2} g\pi_9 + m_{к_3} g\pi_{10} + m_{к_4} g\pi_{11} \\ &+ m_{к_5} g\pi_{12} + m_{к_6} g\pi_{13} + \sum_{i=1}^6 \left(\int_0^{\Delta_{п_i}} F_{п_i}(\Delta_{п_i}) d\Delta_{п_i} \right) + \sum_{i=1}^6 \left(\int_0^{\Delta_{ш_i}} F_{ш_i}(\Delta_{ш_i}) d\Delta_{ш_i} \right) . \end{aligned}$$

Функция Рэлея имеет вид

$$R = R_{п} + R_{ш} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^6 K_i \dot{\Delta}_{п_i}^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^6 K_{ш_i} \dot{\Delta}_{ш_i}^2 ,$$

где $R_{п}$ и $R_{ш}$ – функции, учитывающие рассеивание энергии в амортизаторах подвески и в шинах колес соответственно; K_i – коэффициент сопротивления (вязкого трения) i -го амортизатора подвески; $\dot{\Delta}_{п_i}$ – скорость деформации i -й подвески; $K_{ш_i}$ – коэффициент демпфирования (вязкого трения) шины i -го колеса; $\dot{\Delta}_{ш_i}$ – скорость деформации шины i -го колеса.

Для определения обобщенных сил записывают выражение для виртуальной работы:

$$\begin{aligned} \partial A &= F_{y_1} [\partial\pi_4 (a_1 \cos \theta_{п} - b_0 \sin \theta_{п}) + \partial\pi_5 \cos \theta_{п} - \partial\pi_6 \sin \theta_{п}] + \\ &+ F_{y_2} [\partial\pi_4 (a_1 \cos \theta_{л} - b_0 \sin \theta_{л}) + \partial\pi_5 \cos \theta_{л} - \partial\pi_6 \sin \theta_{л}] + \\ &+ F_{y_3} (\partial\pi_5 - a_2 \partial\pi_4) + F_{y_4} (\partial\pi_5 - a_2 \partial\pi_4) + F_{x_3} (\partial\pi_6 + b_2 \partial\pi_4 - r_d \partial\pi_{14}) + \\ &+ F_{x_4} (\partial\pi_6 - b_2 \partial\pi_4 - r_d \partial\pi_{15}) + F_{f_1} [-\partial\pi_4 (a_1 \sin \theta_{п} - b_0 \cos \theta_{п}) - \\ &- \partial\pi_5 \sin \theta_{п} - \partial\pi_6 \cos \theta_{п}] + F_{f_2} [-\partial\pi_4 (a_1 \sin \theta_{л} - b_0 \cos \theta_{л}) - \\ &- \partial\pi_5 \sin \theta_{л} - \partial\pi_6 \cos \theta_{л}] + F_{y_5} (\partial\pi_6 \sin \gamma_0 + \partial\pi_5 \cos \gamma_0 - d \partial\pi_{18}) + \\ &+ F_{y_6} (\partial\pi_6 \sin \gamma_0 + \partial\pi_5 \cos \gamma_0 - d \partial\pi_{18}) + F_{f_5} (-\partial\pi_6 \sin \gamma_0 + \partial\pi_5 \cos \gamma_0 - \\ &- b_4 \partial\pi_{18}) + F_{f_6} (-\partial\pi_6 \sin \gamma_0 + \partial\pi_5 \cos \gamma_0 + b_4 \partial\pi_{18}) , \end{aligned}$$

где $F_{y_i} (i = \overline{1, 6})$ – сила сопротивления боковому уводу i -го колеса; $F_{f_i} (i = \overline{1, 6})$ – сила сопротивления качению i -го колеса; F_{x_3} и F_{x_4} – силы сопротивления криву правого и левого ведущих колес; $T_{к_3}$ и $T_{к_4}$ – крутящие моменты на правом и левом ведущем колесах; $\gamma_0 = \gamma - \gamma_1$ – угол складывания буксировщика (системы буксировщик – буксируемый автомобиль); r_d – динамический радиус ведущего колеса.

При расчете сил сопротивления криву величины крива по формуле (1) записывают для ведущих колес в квазикоординатах в следующем виде:

$$\varepsilon_3 = \frac{\dot{\pi}_6 + b_2 \dot{\pi}_4 - r_{ко} \dot{\pi}_{14}}{\dot{\pi}_6 + b_2 \dot{\pi}_4}; \quad \varepsilon_4 = \frac{\dot{\pi}_6 - b_2 \dot{\pi}_4 - r_{ко} \dot{\pi}_{14}}{\dot{\pi}_6 - b_2 \dot{\pi}_4}.$$

Необходимые для расчета сил сопротивления уводу углы колес вычисляют по формуле (3) через скорости V и V_y , записанные в квазикоординатах:

$$\begin{aligned} \delta_1 &= \frac{\dot{\pi}_6 \sin \theta_{\pi} - \dot{\pi}_5 \cos \theta_{\pi} - \dot{\pi}_4 (a_1 \cos \theta_{\pi} - b_0 \sin \theta_{\pi})}{\dot{\pi}_5 \sin \theta_{\pi} + \dot{\pi}_6 \cos \theta_{\pi} + \dot{\pi}_4 (a_1 \cos \theta_{\pi} + b_0 \sin \theta_{\pi})}, \\ \delta_2 &= \frac{\dot{\pi}_6 \sin \theta_{\pi} - \dot{\pi}_5 \cos \theta_{\pi} - \dot{\pi}_4 (a_1 \cos \theta_{\pi} + b_0 \sin \theta_{\pi})}{\dot{\pi}_5 \sin \theta_{\pi} + \dot{\pi}_6 \cos \theta_{\pi} + \dot{\pi}_4 (a_1 \cos \theta_{\pi} - b_0 \sin \theta_{\pi})}, \\ \delta_3 &= \frac{a_2 \dot{\pi}_4 - \dot{\pi}_5}{\dot{\pi}_6 + b_2 \dot{\pi}_4}; \quad \delta_4 = \frac{a_2 \dot{\pi}_4 - \dot{\pi}_5}{\dot{\pi}_6 - b_2 \dot{\pi}_4}; \\ \delta_5 &= \frac{V_1 \sin \gamma_0 + V_2 \cos \gamma_0 + h_4 \dot{\pi}_{17} + (h_4 \lambda_{\pi_1} - d)(\dot{\pi}_{18} - \dot{\pi}_4)}{V_1 \cos \gamma_0 - V_2 \sin \gamma_0 + h_4 \dot{\pi}_{16} - (h_4 \lambda_{\pi_1} - b_4)(\dot{\pi}_{18} - \dot{\pi}_4)}, \\ \delta_6 &= \frac{V_1 \sin \gamma_0 + V_2 \cos \gamma_0 + h_4 \dot{\pi}_{17} + (h_4 \lambda_{\pi_1} - d)(\dot{\pi}_{18} - \dot{\pi}_4)}{V_1 \cos \gamma_0 - V_2 \sin \gamma_0 + h_4 \dot{\pi}_{16} - (h_4 \lambda_{\pi_1} + b_4)(\dot{\pi}_{18} - \dot{\pi}_4)}, \end{aligned}$$

где $V_1 = \dot{\pi}_6 - h_3 \dot{\pi}_2 + h_3 \dot{\pi}_4$; $V_2 = \dot{\pi}_5 - (b + h_3 \lambda_{\pi}) \dot{\pi}_4 - h_3 \dot{\pi}_3$.

Выполнив необходимое дифференцирование выражений кинетической и потенциальной энергий, а также функции Рэля и подставив полученные результаты вместе с выражениями для обобщенных сил в формулу (5), получают систему дифференциальных уравнений для описания движения пространственной модели буксировщика с буксируемым автомобилем:

- для поддресоренных масс:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{18} a_{1j} \ddot{\pi}_j &= -(m + m_1) g + \sum_{i=1}^6 (F_{\pi_i} + R_i); \\ \sum_{j=1}^{18} a_{2j} \ddot{\pi}_j &= -L_2 + T_2 - m g b + a_1 (F_{\pi_1} + F_{\pi_2} + R_1 + R_2) - \\ &- a_2 (F_{\pi_3} + F_{\pi_4} + R_3 + R_4) - b (F_{\pi_5} + F_{\pi_6} + R_5 + R_6); \\ \sum_{j=1}^{18} a_{3j} \ddot{\pi}_j &= -L_3 + T_3 - b_1 (F_{\pi_1} - F_{\pi_2} + R_1 - R_2) - b_3 (F_{\pi_3} - F_{\pi_4} + R_3 - R_4); \\ \sum_{j=1}^{18} a_{4j} \ddot{\pi}_j &= -L_4 + T_4 + Q_4 - \dot{\pi}_6 D_1 + \dot{\pi}_5 D_2; \quad \sum_{j=1}^{18} a_{5j} \ddot{\pi}_j = -L_5 + T_5 + Q_5 - \dot{\pi}_4 D_2; \\ \sum_{j=1}^{18} a_{6j} \ddot{\pi}_j &= -L_6 + T_6 + Q_6 + \dot{\pi}_4 D_1; \quad \sum_{j=1}^{18} a_{16j} \ddot{\pi}_j = -L_{16} + T_{16} - d (F_{\pi_5} + F_{\pi_6} + R_5 + R_6); \\ \sum_{j=1}^{18} a_{17j} \ddot{\pi}_j &= -L_{17} + T_{17} - b_5 (F_{\pi_5} - F_{\pi_6} + R_5 - R_6); \quad \sum_{j=1}^{18} a_{18j} \ddot{\pi}_j = -L_{18} + T_{18} + Q_{18}; \end{aligned}$$

- для неподрессоренных масс:

$$m_{k_1} \ddot{\pi}_8 = -m_{k_1} g + F_{п_1} - F_{ш_1} + R_1 - R_{ш_1}; m_{k_2} \ddot{\pi}_9 = -m_{k_2} g + F_{п_2} - F_{ш_2} + R_2 - R_{ш_2};$$

$$m_{k_3} \ddot{\pi}_{10} = -m_{k_3} g + F_{п_3} - F_{ш_3} + R_3 - R_{ш_3}; m_{k_4} \ddot{\pi}_{11} = -m_{k_4} g + F_{п_4} - F_{ш_4} + R_4 - R_{ш_4};$$

$$m_{k_5} \ddot{\pi}_{12} = -m_{k_5} g + F_{п_5} - F_{ш_5} + R_5 - R_{ш_5}; m_{k_6} \ddot{\pi}_{13} = -m_{k_6} g + F_{п_6} - F_{ш_6} + R_6 - R_{ш_6};$$

$$I_{k_3} \ddot{\pi}_{14} = Q_{14}; I_{k_4} \ddot{\pi}_{15} = Q_{15}.$$

Разработанная пространственная модель системы буксировщик – буксируемый автомобиль может быть использована для исследования специализированных автотранспортных средств с различными конструктивными схемами и различных режимов движения.

В заключение следует отметить, что предлагаемая пространственная математическая модель системы буксировщик – буксируемый автомобиль обладает по сравнению с ранее разработанными математическими моделями автотранспортных средств наибольшей универсальностью, позволяющей учесть все конструктивные особенности, параметры и характеристики составных частей и разнообразные условия эксплуатации.

Библиографический список

1. **Бухин, Б.Л.** Введение в механику пневматических шин / Б.Л. Бухин. – М.: Химия, 1988. – 224 с.
2. **Добрых, Л.И.** Создание и исследование прогрессивных пневмогидравлических подвесок автомобилей БелАЗ большой и особо большой грузоподъемности: автореферат дисс...канд. техн. наук: 05.05.03. – Минск, 1973. – 65 с.
3. **Кудряшов, Е.М.** Исследование устойчивости и управляемости буксировщиков карьерных автомобилей: автореферат дисс...канд. техн. наук: 05.05.03. – Нижний Новгород, 1993.–20 с.
4. **Левин, М.А.** Теория качения деформируемого колеса / М.А. Левин, Н.А. Фуфаев. – М.: Наука, 1989. – 272 с.
5. **Литвинов, А.С.** Автомобиль: Теория эксплуатационных свойств / А.С. Литвинов, Я.Е. Фаробин. – М.: Машиностроение, 1989. – 237 с.
6. **Литвинов, А.С.** Управляемость и устойчивость автомобиля / А.С. Литвинов. – М.: Машиностроение, 1971. – 416 с.
7. **Могутнов, В.П.** Повышение устойчивости и управляемости специализированных автомобилей большой грузоподъемности: автореферат дисс...канд. техн. наук: 05.05.03. – Волгоград, 1987. – 19 с.
8. **Мусарский, Р.А.** Концепция твёрдого тела в теории движения колёсных экипажей / Р.А. Мусарский, Н.А. Фуфаев // АН СССР, Механика твёрдого тела. 1995. №3. С.65–74.
9. **Неймарк, Ю.И.** Динамика неголономных систем / Ю.И. Неймарк, Н.А. Фуфаев. – М.: Наука, 1967. – 519 с.
10. Результаты статических испытаний серийной шины 18.00-25: Отчет о НИР / Науч.-исследоват. ин-т крупногабаритных шин. – Днепропетровск, 1978. – 14 с.
11. **Фалькевич, Б.С.** Теория автомобиля / Б.С. Фалькевич. – М.: Машгиз, 1963. – 239 с.
12. **Фуфаев, Н.А.** Простейшие теории качения колеса / Н.А. Фуфаев. – Горький: ГГУ им. Н.И. Лобачевского, 1984. – 27 с.

Дата поступления
в редакцию 25.01.2010

V.N. Kravetz, R.A. Musarskiy

MATHEMATICAL MODEL OF THE JOINTED VEHICLE

The spatial mathematical model of the jointed vehicle developed on the basis of using of quasi -coordinates, found wide applications for research of nonholonomic systems offered.

Key words: the mathematical model, quasi - coordinates, the jointed vehicle, creep, lateral withdrawal.

УДК 62-768

А.С. Слюсарев, А.С. Яблоков

**ТРЕБОВАНИЯ К ХАРАКТЕРИСТИКАМ И КОНСТРУКЦИИ
ГИДРОТРАНСФОРМАТОРОВ В ПРИВОДАХ МЕХАНИЗМОВ ПОДЪЕМОВ
ПЛАВУЧИХ КРАНОВ, РАБОТАЮЩИХ ПОД ВОДОЙ**

Волжская государственная академия водного транспорта

Рассмотрены последствия явления «присоса» грейфера для плавучих кранов, занимающихся подводной добычей. Приведено решение проблемы – включение в привод механизма подъема гидротрансформатора, а также сформулированы требования к характеристикам и конструкции для такого гидротрансформатора.

Ключевые слова: гидротрансформатор, насосное колесо, турбинное колесо, реакторное колесо, грейфер.

При подводной добыче плавучими кранами в качестве грузозахватного органа используется грейфер. Механизм подъема и зачерпывания грейфера плавучего крана не отличается от механизма подъема порталного крана, на котором при перегрузке сыпучих материалов так же в качестве грузозахватного органа используется грейфер. Однако при работе грейфера в водонасыщенном материале под водой при его зачерпывании и подъеме возникают дополнительные гидростатические силы: «присоса», фильтрации, гидростатики и вязкостного течения материала в грейфере, зависящие от скорости зачерпывания материала и отрыва грейфера, что приводит к нагрузкам в канатах механизма подъема и металлоконструкции крана. Этот эффект, возникающий в краткий промежуток времени, может превышать на 50% допускаемые нагрузки на кран и является «пиковым» [1].

Пиковые нагрузки возникают из-за физических процессов, происходящих при зачерпывании водонасыщенного материала под водой. Фильтрация воды через поры материала при его сжатии, в момент схождения челюстей грейфера, поступление воды под днище грейфера для компенсации «присоса» грейфера из-за гидростатического давления столба жидкости.

Гидротрансформатор позволяет автоматически регулировать скорость подъема и замыкания грейфера путем создания обратной связи между нагрузкой на канатах и скоростями зачерпывания и подъема грейфера. Они позволяют гладко менять передаточное отношение от двигателя к редуктору в 3,5 раза в сторону увеличения, соответственно увеличивая крутящий момент на валу редуктора, что и позволят преодолевать эффект «пиковых» нагрузок. Кроме того, гидротрансформатор является средством, предохраняющим привод от любых перегрузок, так как передача крутящего момента в нем осуществляется через жидкость, а не через жесткую кинематическую связь.

Как показали исследования [2], несмотря на некоторое снижение к.п.д. привода, вследствие возникновения дополнительных потерь в гидротрансформаторе, обеспечивается рост производительности при приемлемой стоимости гидротрансформатора, соизмеримой со стоимостью среднего ремонта механизма подъема. Средняя стоимость гидротрансформатора составляет 30 тыс. руб. – цифра соизмеримая со стоимостью среднего ремонта плавучего крана. Установлено также, что благодаря высоким защитным свойствам надежность электродвигателя повышается в 1,4–1,5 раза, а долговечность редуктора и элементов механической передачи в 2,0 раза.

Анализ свойств и характеристик существующих гидротрансформаторов [2, 3] позволяет сформулировать предъявляемые к ним требования при установке в механизме подъема плавучего крана:

1. Гидротрансформатор, обладая высоким быстродействием, должен иметь соответствующие демпфирующие свойства, позволяющие избежать действие на его работу высоких частотных колебаний в канатах механизма подъема.

2. Гидротрансформатор должен обеспечивать работу электродвигателя привода в оптимальных режимах, не переходя в режимы, когда вся подводимая мощность расходуется на «мятие» жидкости. Таким требования отвечают полностью «непрозрачные» гидротрансформаторы [2, 4, 5], но создание гидротрансформаторов данного типа проблематично [4, 6], поэтому целесообразно применять гидротрансформаторы с малой степенью «прозрачности», в пределах $1,0 \dots 1,1$ в основной рабочей зоне.

Прозрачность - свойство насосного колеса изменять величину крутящего момента при изменении передаточного отношения гидротрансформатора. Если с изменением передаточного отношения крутящий момент на насосном колесе остается постоянным, то гидротрансформатор называется «непрозрачным».

3. Гидротрансформатор должен преобразовывать крутящий момент в приводе в полном диапазоне рабочей нагрузки. Для плавучего крана максимальное значение коэффициента трансформации должно лежать в пределах $1,4 \dots 1,6$ [1]. В пределах указанных значений максимального коэффициента трансформации и принятой степени прозрачности целесообразно применение одноступенчатого гидротрансформатора, обладающего наибольшей простотой конструкции [2, 4, 5].

4. Гидротрансформатор должен иметь устройство для блокировки, с целью обеспечения работы привода с постоянными низкими скоростями, то есть иметь муфту свободного хода.

5. При создании привода механизма подъема с гидротрансформатором необходимо совмещать исходные характеристики асинхронного электродвигателя и гидротрансформатора, что осуществляется совмещением номинального момента электродвигателя с зоной максимального к.п.д. гидротрансформатора. В этом случае преобразующие свойства гидротрансформатора используются при всех режимах работы привода с реализацией положительных качеств применительно к подводной добыче.

На основании сформулированных требований необходимо подобрать следующие параметры гидротрансформатора механизма подъема плавучего крана.

Оптимальным является одноступенчатый гидротрансформатор, отличающийся сравнительно простой конструкцией и наиболее дешевый в производстве.

Характеристики гидротрансформаторов определяются зависимостями $K = f(i)$; $\eta = f(i)$; $\lambda_1 = f(i)$, где K - коэффициент трансформации (силовое передаточное число); η - коэффициент полезного действия; λ_1 - коэффициент момента ведущего вала (характеризует свойства передачи нагружать двигатель); i - передаточное отношение.

Изменение указанных характеристик определяются параметрами круга циркуляции и углами наклона лопаток в колесах (насосное, турбинное, реакторное).

В качестве оценочных параметров, характеризующих нагрузочные свойства, используются величины - $\lambda_{1\max}$, λ_{10} , $\lambda_{1\min}$, Π_1 , Π_2 , а для определения преобразующие свойств гидротрансформаторов используются величины K_0 , η^* , i^* , K^* [7],

где $\lambda_{1\max}$ - максимальное значение коэффициента момента ведущего вала;

λ_{10} - коэффициент момента ведущего вала, соответствующий максимальному значению коэффициента трансформации;

$\lambda_{1\min}$ - минимальное значение коэффициента момента ведущего вала;

Π_1 - величина прозрачности на участке, соответствующем максимальному значению к.п.д.;

Π_2 - величина прозрачности на участке, соответствующем минимальному значению к.п.д. в рабочей зоне;

K_0 - максимальное значение коэффициента трансформации;

η^* - максимальное значение к.п.д. гидротрансформатора;
 i^* - передаточное отношение, соответствующее максимальному значению к.п.д.;
 K^* - величина коэффициента трансформации при передаточном отношении, соответствующем максимальному значению к.п.д.;
 i_p - минимальное значение передаточного отношения в рабочей зоне;
 K_p - значение передаточного отношения, соответствующее минимальному передаточному отношению в рабочей зоне;
 η_p - значение к.п.д., соответствующее минимальному передаточному отношению в рабочей зоне;

На рис. 1 отображены зависимости основных характеристик при изменении передаточного отношения.

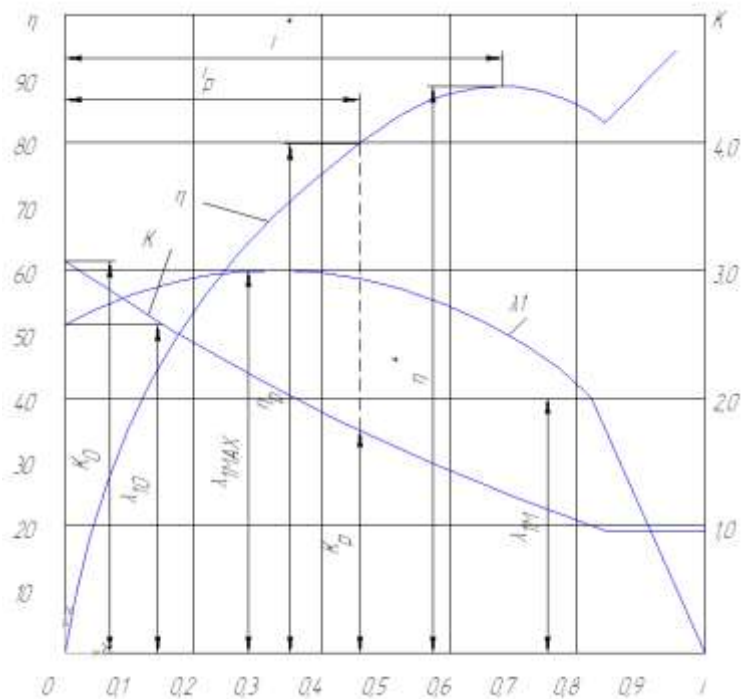


Рис. 1. Характеристика гидротрансформатора и его основные параметры

Указанные свойства зависят от конструкции одноступенчатых гидротрансформаторов. На рис. 2 показаны основные типы одноступенчатых гидротрансформаторов, отличающихся расположением турбинного колеса.

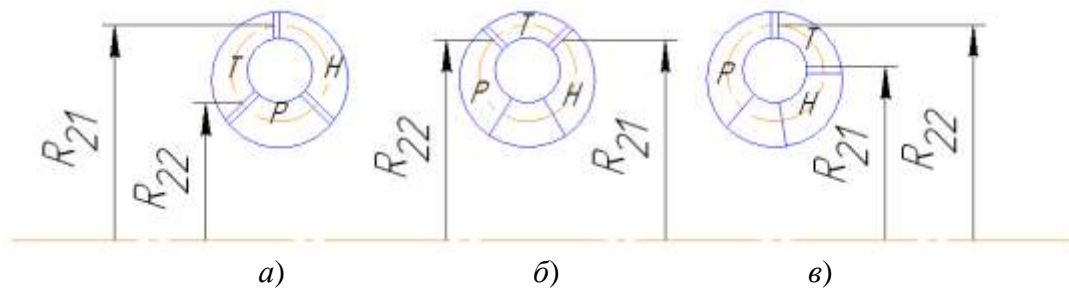


Рис. 2. Типы кругов циркуляции одноступенчатых гидротрансформаторов:

R_{21} - осредненный радиус на входе в турбинное колесо;
 R_{22} - осредненный радиус на выходе из турбинного колеса

В зависимости от расположения турбинного колеса различают гидротрансформаторы: с центростремительной турбиной (рис. 2, а), осевой турбиной (рис. 2, б) и центробежной турбиной (рис. 2, в).

Типичные зависимости, характеризующие преобразующие свойства одноступенчатых гидротрансформаторов с различными типами турбинных колес, показаны на рис. 3.

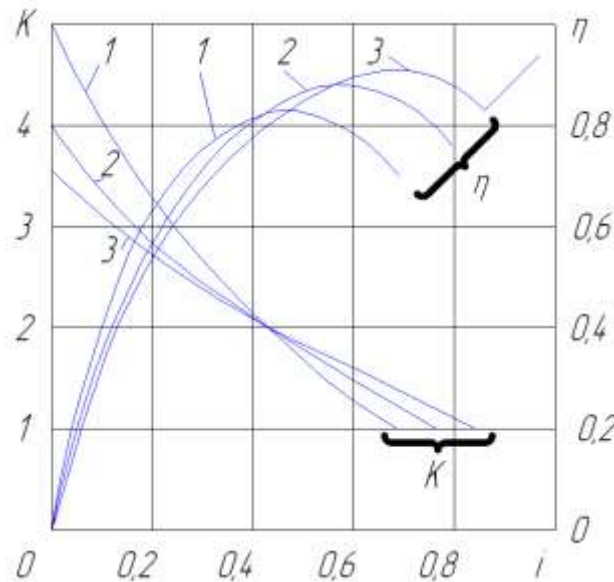


Рис. 3. Преобразующие свойства одноступенчатых гидротрансформаторов:

1 – гидротрансформатор с центробежной турбиной; 2 – с осевой турбиной;
3 – с центростремительной турбиной

Основное требование к гидротрансформатору - высокий к.п.д. в рабочей зоне. Это требование наиболее полно можно реализовать в комплексных гидротрансформаторах (с центростремительной турбиной и симметричным расположением насосного и турбинного колес рис. 2, а). Кроме того, в гидротрансформаторах с центростремительной турбиной при установке в колесах реактора муфт свободного хода реализуется эффективная работа в режиме гидромуфты. Отмеченное свойство обусловлено тем, что в гидротрансформаторах указанного типа выход рабочей жидкости из насосного колеса располагается на большем диаметре круга ее циркуляции.

В гидротрансформаторах этого типа можно получить как прозрачную, так и малопрозрачную нагрузочную характеристику. Для механизма подъема желательно иметь малопрозрачную характеристику, что достигается соответствующим выбором формы круга циркуляции и углов наклона лопаток в рабочих колесах.

Приведенный анализ требований к характеристикам и конструкции гидротрансформаторов для привода механизма подъема плавучих кранов, соответствующих условиям и нагрузкам, позволяет сделать вывод, что им наиболее отвечает гидротрансформатор комплексного типа с центростремительной турбиной.

На данный привод механизма подъема, разработанный авторами на кафедре подъемно-транспортных машин Волжской государственной академии водного транспорта, получен патент на полезную модель, а также ведутся работы по дальнейшей разработке и внедрению данного привода.

Библиографический список

1. **Никитаев, И.В.** Судовые энергетические грейферные установки для добычи рудных материалов на континентальном шельфе / И.В. Никитаев. – Нижний Новгород: ВГАВТ, 2000. – 26 с.

2. **Анохин, В.И.** Применение гидротрансформаторов на скоростных гусеничных тракторах / В.И. Анохин. – М.: Машиностроение, 1972. – 304 с.
3. О выборе основных параметров гидротрансформатора для гидромеханической трансмиссии скоростного гусеничного сельскохозяйственного трактора / В.И. Анохин [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. 1985. №10. С. 11–15.
4. **Кочкарев, А.Я.** Гидродинамические передачи / А.Я. Кочкарев. – Л.: Машиностроение, 1971. – 336 с.
5. **Нарбут, А.Н.** Гидротрансформаторы / А.Н. Нарбут. – М.: Машиностроение, 1966. – 218 с.
6. **Анисимов, В.Б.** Гидротрансформаторы для строительных и дорожных машин / В.Б. Анисимов. – М.: Стройиздат, 1967. – 42 с.
7. **Трусов, С.М.** Автомобильные гидротрансформаторы / С.М. Трусов. – М.: Машиностроение, 1977. – 211 с.

*Дата поступления
редакцию 28.01.2010*

A.S. Slusarev, A.S. Yablokov

THE REQUIREMENTS TO FEATURE AND DESIGNS OF THE TORQUE CONVERTERS IN LIFTING MECHANISM ASCENT FLOATING CRANES, RUNNING ON WATER

The article describes the effects of the phenomenon of "sucker" grapple for floating cranes involved in underwater prey. We solve the problem - the inclusion in the drive mechanism for lifting torque converter, as well as the requirements to specifications and designs for such a torque converter.

Key words: Torque converter, pump, turbine, reactor, grapple.

УДК 625. 768.5

А.П. Куляшов¹, О.И. Онкин², В.П. Самарин²

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СТАТИСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УПЛОТНЕННОЙ СНЕЖНОЙ ПОЛОСЫ ДВИЖЕНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Нижегородское Высшее Военно-инженерное училище²

Одним из способов подготовки путей для пропуска транспортных средств является предварительное уплотнение снежного покрова с помощью специальных снегоуплотняющих машин или оборудования [1].

Показано, что достоверная оценка плотности подготавливаемой полосы может быть получена, как на основе статистического моделирования, так и аналитических вероятностных расчетов.

Ключевые слова: Снег, машина, путь, вибрация, уплотнение, бездорожье.

Уплотнение полосы движения образуется в результате движения снегоуплотняющей машины по снежному бездорожью, которое представляет собой твёрдое основание (мёрзлый грунт) и снежный покров. Формирование снежного покрова и уплотнённой снежной полосы движения зависит от большого количества случайных факторов: метеоусловий; условий, сопровождающих процессы формирования снежного покрова и его уплотнения; характеристик снегоуплотняющего оборудования (массы, скорости движения и т.д.); интенсивности и характера неровностей твёрдого основания и других, поэтому физико-механические свойства уплотнённой полосы движения носят статистический характер.

Для определения интенсивности неровностей подготовленной полосы движения и распределения их вдоль трассы достаточно определить коррекционную функцию и энергетический спектр неровностей. Вероятность обеспечения требуемой плотности можно найти, зная функцию распределения плотности вдоль трассы. Указанные характеристики плотности снежного основания могут быть получены следующим образом.

В процессе работы снегоуплотняющая машина преобразует снежный покров первоначальной плотностью ρ_0 в уплотнённый снег плотностью ρ [2]:

$$\rho = 0,7943 - 4,1925(\rho_0/\varepsilon) + 10,525(\rho_0/\varepsilon)^2 - 6,9069(\rho_0/\varepsilon)^3, \quad (1)$$

где ρ_0 – исходная плотность снега; $\varepsilon = (H - h)/H$ – относительная деформация снега; H – толщина снежного покрова; h – глубина уплотнения.

Выражение (1) целесообразно представить в виде $\rho = \rho(H, \rho_0)$, которое можно получить путём перерасчёта экспериментальных данных [3] и их аппроксимации степенным полиномом (рис. 1)

$$\rho = a_0 + a_1H + a_2H^2 + a_3H^3 = \sum_{n=0}^3 a_n H^n, \quad (2)$$

где a_n – коэффициенты, которые можно определить известными методами или стандартной процедурой пакета Microsoft Excel.

Зависимость $\rho(H)$ является нелинейной, поэтому процесс формирования уплотнённой полосы представляется в виде нелинейного преобразования случайного процесса $H(\ell)$, в качестве которого выступает толщина снежного покрова вдоль трассы (ℓ – координата исследуемой точки трассы). В такой постановке нелинейная система (2), осуществляющая преобразование входного процесса $H(\ell)$, аналогична системе передачи информационных сигналов. Аналогично [4] после ряда преобразований можно получить корреляционные функции про-

цесса $\rho(\ell)$ – плотности снега в подготовленной полосе движения

$$K_\rho(\lambda) = \sqrt{\rho [H(\ell)] \rho [H(\ell + \lambda)]}$$

Введя обозначения $H(\ell) = H$ и $H(\ell + \lambda) = H_\lambda$ и учитывая, что $H(\ell)$ подчиняется нормальному закону распределения вероятностей, получим

$$K_\rho(\lambda) = \frac{1}{2\pi\sigma^2 \sqrt{[1 - R^2(\lambda)]}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \rho(H) \rho(H_\lambda) e^{-\frac{H^2 + H_\lambda^2 - 2R(\lambda)HH_\lambda}{2\sigma^2[1 - R^2(\lambda)]}} dH dH_\lambda.$$

После интегрирования получим, что корреляционная функция плотности подготовленного полотна пути определяется следующим образом:

$$K_\rho(\lambda) = \sum_{n=1}^N n! Z_n^2 K_H^n(\lambda) \tag{3}$$

где $K_H(\lambda)$ – корреляционная функция процесса $H(\ell)$.

Коэффициенты Z_n при $N = 3$ выражаются через коэффициенты аппроксимации a_n функции (2):

$$\begin{aligned} Z_1 &= 1 + 3a_3/a_1^3 K_H(0); \\ Z_2 &= a_2/a_1^2; \\ Z_3 &= a_3/a_1^3. \end{aligned}$$

По корреляционной функции определяется дисперсия плотности снега в подготовленной полосе движения

$$D_\rho = K_\rho(0) = \sum_{n=1}^3 n! Z_n^2 K_H^n(0)$$

Для определения среднего значения M_ρ и вероятности $P(\rho \geq \rho_{зад})$ необходимо знание закона распределения величины $\rho(\ell)$. Существует небольшое число точных решений задачи определения функций распределения на выходе нелинейной системы, полученных при некоторых специальных предположениях о характере нелинейностей и статистических свойствах случайного процесса.

Для упрощения задачи нелинейную зависимость $\rho(H)$ (рис. 1) представим в виде линейно-ломаной (рис. 2). Физический смысл такой зависимости объясняется тем, что плотность уплотнения полотна не может быть меньше исходной плотности $\rho \geq \rho_0$, а $\rho \leq \rho_{max}$, т.е. не может превышать определенного максимального значения ρ_{max} [3].

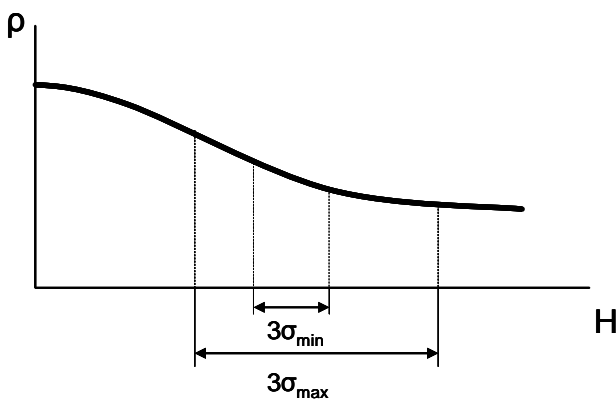


Рис. 1. Аппроксимация зависимости $\rho(H)$

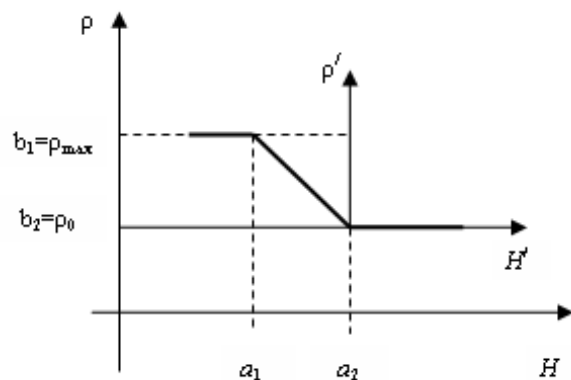


Рис. 2. Линейно-ломаная зависимости $\rho(H)$

Поэтому линейно-ломаная зависимость $\rho(H)$ будет иметь вид

$$\rho = \begin{cases} b_1; & 0 \leq H \leq a_1 \\ \frac{a_2 - a_1}{b_2 - b_1} H - \frac{a_1 b_2 - a_2 b_1}{a_2 - a_1}; & a_1 \leq H \leq a_2 \\ b_2; & H \geq a_2 \end{cases} \quad (4)$$

С учётом однозначности функции $\rho(H)$ и того, что значения плотностей распределения процессов ρ и H – положительные, распределение процесса $\rho(\ell)$ вдоль подготовленной полосы движения можно определить, используя известное преобразование

$$\omega_2(\rho) = \frac{\omega_1(H)}{d\rho/dH}$$

После замены переменных $\rho' = \rho - b_2$ и $H' = H - a_2$ при нормальном распределении $H(\ell)$ и $\omega(H')$ будем иметь

$$\omega_1(H') = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_H}} e^{-\frac{(H' - \bar{H} + a_2)^2}{2\sigma_H^2}}$$

Тогда на линейном участке $a_1 - a_2 < H' < 0$ плотность распределения процесса $\rho'(\ell)$

$$\omega_2(\rho') = \frac{\omega(H' = \rho'/\alpha)}{\alpha} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_H}} e^{-\frac{(-\rho'/\alpha - \bar{H} + a_2)^2}{2(\sigma_H \alpha)^2}}$$

Поскольку на участках $H' < (a_1 - a_2)$ и $H' > 0$ $\omega_2(\rho') = 0$, то с учётом условия полной вероятности

$$\int_{-\infty}^{\infty} \omega_2(\rho') dH = 1$$

общее выражение $\omega_2(\rho')$ будет иметь вид

$$\omega_2(\rho') = \begin{cases} P(H' > 0) \delta(\rho') + \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_H \alpha}} e^{-\frac{(-\rho'/\alpha - \bar{H} + a_2)^2}{2(\sigma_H \alpha)^2}} + \\ + P\{(H' > a_1 - a_2) \delta[\rho' - (b_2 - b_1)]\}; & a_1 - a_2 \leq H' \leq 0; \\ 0; & a_1 - a_2 > H'; \quad H' > 0 \end{cases} \quad (5)$$

Используя выражение (5), можно определить вероятность достижения требуемой плотности

$$P(\rho \geq \rho_{\text{тр}}) = P(\rho' \geq \rho_{\text{тр}} - \rho_0) = \int_{\rho_{\text{тр}} - \rho_0}^{\infty} \omega_2(\rho') d\rho'$$

Другой важной характеристикой подготовленного полотна движения является распределение интенсивности неровностей по их частоте или энергетический спектр $G(\beta)$, который можно определить из соотношения (3)

$$G(\beta) = 4 \int_0^{\infty} K_{\rho}(\lambda) \text{Cos} 2\pi \beta \lambda d\lambda \quad (6)$$

где β – частота неровностей снежного покрова с учётом неровностей основания.

Исходя из формулы (6), можно определить среднюю интенсивность неровностей в ин-

тересуемом диапазоне частот $\Delta\beta = \beta_{\max} - \beta_{\min}$:

$$\bar{G} = \int_{\beta_{\min}}^{\beta} G(\beta) d\beta$$

С помощью последней формулы, в частности, можно оценить степень сглаживания неровностей снежного полотна рабочей поверхностью уплотняющего рабочего органа машины.

Приведенные соотношения получены с учетом линейно-ломаной аппроксимации зависимости $\rho(H)$ (4). Реальная зависимость лишь при большом разбросе H напоминает (4). Оценить применимость полученных выражений можно по результатам натуральных испытаний. Однако ввиду трудоемкости, а главное, практической невозможности получения экспериментальных данных, охватывающих необходимый диапазон изменения H и σ_H , указанную оценку можно получить на основе статистического моделирования [5]. При этом достоверность оценки статистических параметров $\rho(H)$ переносится в область достоверности самой модели $\rho(H)$.

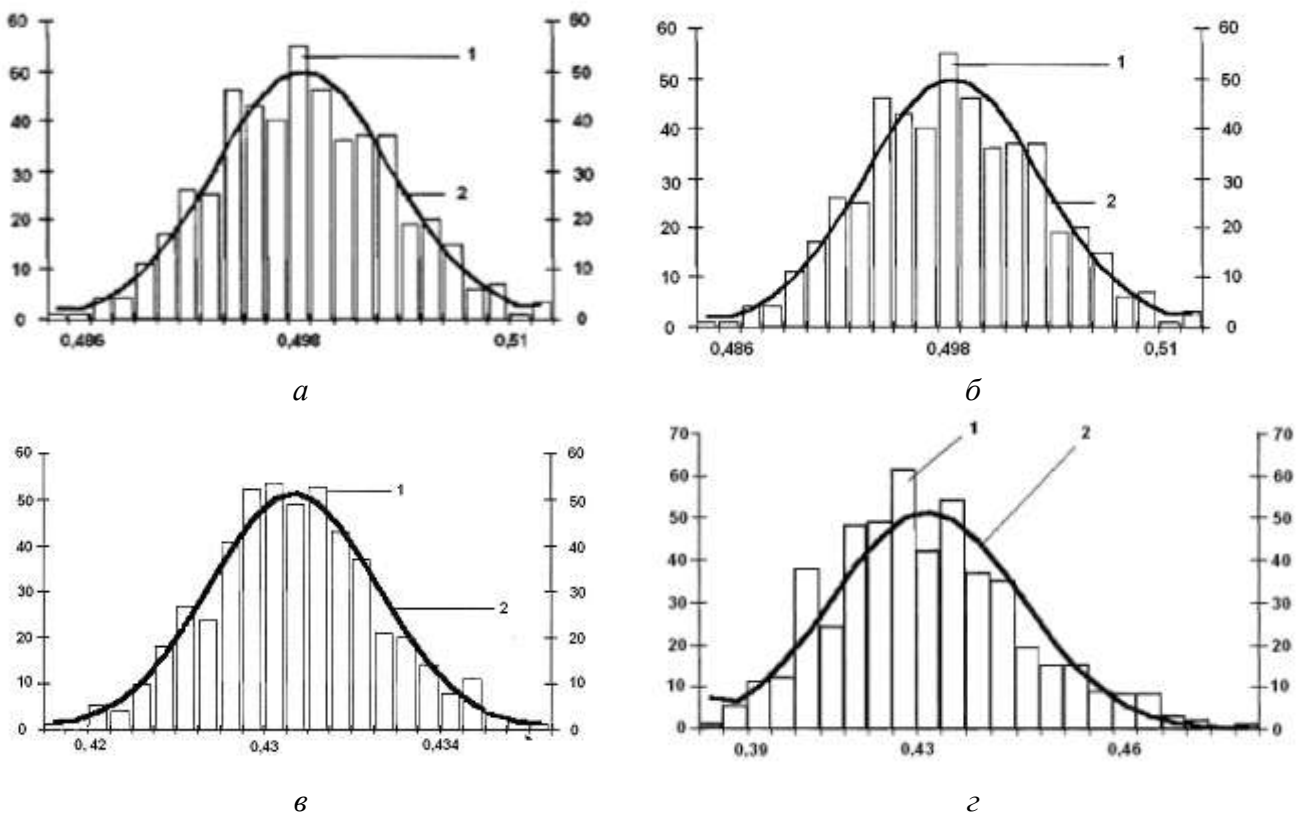


Рис. 3. Гистограмма распределения плотности снега в полосе движения:

1 – эксперимент; 2 – плотность нормального распределения; а – при $H = 0,5$ м; $\sigma_H = 0,01$ м; $\rho_0 = 0,21$ г/см³; $\rho_{y.cp} = 0,498$ г/см³; $\sigma_p = 0,015$ м; $\chi^2 = 0,81$; б – $H = 0,5$ м; $\sigma_H = 0,06$ м; $\rho_0 = 0,21$ г/см³; $\rho_{y.cp} = 0,499$ г/см³; $\sigma_p = 0,0316$ м; $\chi^2 = 0,01$; в – $H = 0,7$ м; $\sigma_H = 0,01$ м; $\rho_0 = 0,21$ г/см³; $\rho_{y.cp} = 0,43$ г/см³; $\sigma_p = 0,0027$ м; $\chi^2 = 0,91$; г – $H = 0,7$ м; $\sigma_H = 0,06$ м; $\rho_0 = 0,21$ г/см³; $\rho_{y.cp} = 0,439$ г/см³; $\sigma_p = 0,0018$ м; $\chi^2 = 0,07$

Приведем результаты оценки статистических характеристик плотности подготавливаемой снежной полосы движения с использованием статистической модели, в основу которой положена кубическая аппроксимация $\rho(H)$ [2, 3].

Вывод о законе распределения ρ в полосе движения осуществляется проверкой справедливости гипотезы по критерию Пирсона χ^2 [5] о нормальном распределении ρ .

В ходе статистического моделирования выборка N случайной величины H составляла пятьсот значений. Генерация случайных чисел нормально распределенной случайной стационарной величины H проведена с применением стандартной программы Microsoft Excel. Результаты распределения плотности снега в полосе движения на моделируемых участках представлены в виде гистограмм (рис. 3).

Обработка результатов статистического моделирования в высокочастотном диапазоне неровностей позволяет сделать следующие выводы: при средней глубине снежного покрова от $H = 0,5$ м до $H = 0,7$ м и среднеквадратичном отклонении от $\sigma_H = 0,01$ м до $\sigma_H = 0,04$ м закон распределения плотности уплотненной полосы снега с достаточной степенью точности соответствует нормальному; при среднеквадратичном отклонении $\sigma_H = 0,04$ м и выше этого частотного диапазона закон распределения не соответствует нормальному, а более близок к нормальному усеченному закону.

Библиографический список

1. **Вайсберг, И.С.** Выбор основных параметров виброплиты снегоуплотняющей машины / И.С. Вайсберг, А.Н. Иванов // Строительные дорожные машины. 1985. № 10. С. 4–7.
2. **Беляков, В.В.** Проходимость автомобиля: учеб. пособие / В.В. Беляков. – Н. Новгород: НГТУ, 1996. – 198 с.
3. **Куляшов, А.П.** Вездеходные транспортно-технологические машины. Основы теории движения / А.П. Куляшов, В.В. Беляков. – Н. Новгород: ТАЛМ, 2004. – 960 с.
4. **Аболиц, И.А.** Дальняя связь / И.А. Аболиц. – М.: Связьиздат, 1962. – 622 с.
5. **Митков, А.Л.** Статистические методы в сельхозмашиностроении / А.Л. Митков, С.В. Кардашевский. – М: Машиностроение, 1978. – 360 с.

*Дата поступления
в редакцию 02.02.2010*

A.P. Kulyayshov, O.I. Onkin, V.P. Samarin

ANALYTICAL ESTIMATION OF STATISTICAL PARAMETERS OF THE THICKENED SNOW ROUTE

The prior thickening of snow is one of the ways of route preparation by means of special vehicles and equipment [1]. It is important to provide the desired thickness of snow bedding along the whole of the route for an estimate of its possible employment.

The authors show that it is possible to estimate the route thickness properly using both statistic modeling and analytic calculus of probability.

Key words: snow, the car, way, vibration, consolidation, impassability.

ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ

УДК 629.12.

Е.М. Апполонов, К.Е. Сазонов, О.Я. Тимофеев

БЕЗОПАСНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ КРУПНОТОННАЖНЫХ СУДОВ В АРКТИЧЕСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЕ

ЦНИИ им. академика А.Н. Крылова

Приведен обзор исследований выполненных специалистами ФГУП «ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова» в рамках развития научных программ отработки новых эффективных форм корпуса крупнотоннажных судов ледового плавания, применения модельного эксперимента для поиска и обоснования новых тактических приемов ледового плавания крупнотоннажных судов, разработки систем мониторинга состояния судна под воздействием ледовой среды, дальнейшего развития нормативной базы с учетом особенностей эксплуатации крупнотоннажных судов в Арктике.

Ключевые слова: безопасность, тактика плавания, форма корпуса, судно, лёд.

Обеспечению безопасности плавания судов во льдах всегда уделялось пристальное внимание. До настоящего времени основой безопасности было обеспечение надлежащей прочности корпуса судна ледового плавания и обязательное следование требованиям тактики плавания судов. Этим составляющие безопасности плавания постоянно совершенствовались.

Работа по созданию правил плавания во льдах (тактики) была начата, когда российские мореходы осваивали моря Северного Ледовитого океана. Плавание среди льдин на деревянных судах требовало от кормчих умения хорошо разбираться в ледовой обстановке, находить трещины и разводья в ледяном покрове, уметь уклоняться от губительных воздействий ледовых сжатий. В дальнейшем опыт мореходов поморов был использован при освоении Северного морского пути. Не случайно большинство известных полярных капитанов являются поморами. Появление ледоколов, способных идти "на пролом" во льдах, потребовало внесения существенных корректив в традиционную тактику ледового плавания. Эти коррективы разрабатывались постепенно по мере увеличения числа ледоколов и расширения географии их плаваний. Можно утверждать, что к последней четверти прошлого века главные положения тактики плавания судов во льдах, основанные на лидирующем положении ледокола, были эмпирически получены и обобщены, а также частично теоретически обоснованы. Появление в полярных морях атомных ледоколов не внесло принципиальных изменений в тактику ледового плавания. Закрепленные в различных руководствах и пособиях тактические приемы обеспечили возможность безаварийного движения судна в типичных ледовых образованиях под проводкой ледокола.

Учеными, специалистами в области строительной механики корабля, также был внесен существенный вклад в обеспечение безопасности полярного мореплавания. С самого начала 30-х годов прошлого века велись интенсивные исследования ледовой прочности судов. В разработке проблем ледовой прочности приняли участия такие ведущие специалисты, как академик Ю.А. Шиманский, член-корр. АН СССР П.Ф. Папкович, профессора В.В. Давыдов,

Л.М. Ногид и многие другие. В результате предпринятых усилий к 1956 г. были разработаны и внедрены Правила Регистра СССР, в которых были установлены требования к прочности судов ледового плавания. В дальнейшем эти нормы неоднократно дорабатывались и уточнялись. Внедрение нормативной базы позволило уже на стадии проектирования новых ледоколов и судов ледового плавания обеспечивать безопасность движения судов во льдах.

Таким образом, к концу XX в. безопасность мореплавания в замерзающих морях обеспечивалась нормативными требованиями к прочности корпуса судна и проверенной практикой тактикой ледового плавания. Следует отметить, что специалисты, занимающиеся изучением ледовой ходкости судов в ледовых бассейнах, практически не участвовали в работе по обеспечению безопасности.

В конце XX в. ситуация начала резко изменяться. Одним из важнейших направлений развития хозяйственной деятельности в полярных регионах становится разработка месторождений нефти и газа, расположенных на шельфе замерзающих морей. Эта деятельность предусматривает создание морских транспортных систем, предназначенных для вывоза добытой продукции, а также обеспечения снабжения добычных ледостойких платформ. Важнейшей особенностью таких транспортных систем является необходимость использования в их составе крупнотоннажных судов активного ледового плавания, т.к. только наличие таких судов обеспечивает экономическую эффективность системы. Крупнотоннажные суда ледового плавания имеют ширину корпуса, которая существенно больше, чем ширина корпуса любого из существующих или проектируемых ледоколов. А это означает, что традиционная тактика, основанная на лидирующем положении ледокола по отношению к проводимому судну, уже не может обеспечить безопасность мореплавания. Кроме этого, для улучшения экономических показателей системы предполагается более частое, чем это происходит в настоящее время, использование самостоятельных одиночных плаваний транспортных судов в ледовых условиях.

Необходимость создания морских транспортных систем, функционирующих в ледовых условиях, требует расширения понятия безопасности мореплавания. С точки зрения надежного функционирования такой системы нарушение графика ее работы является также опасной ситуацией. Из этого следует, что уменьшение скорости движения транспортного судна во льдах ниже некоторого предела или его временная остановка должны рассматриваться как нежелательные события.

Важнейшими технологическими операциями становятся швартовка и загрузка крупнотоннажных судов в ледовых условиях. Эти операции требуют выполнения судном сложных маневров при подходе к загрузочному терминалу, а также позиционирования в непосредственной близости от терминала во время загрузки при изменении гидрометеорологических условий (ветер, изменение направления дрейфа льда). При выполнении этих операций необходимо четкое взаимодействие судна с обслуживающими терминал вспомогательными ледоколами.

Можно констатировать, что на современном этапе возникают серьезные трудности с обеспечением безопасности плавания крупнотоннажных перспективных судов во льдах. Эти трудности связаны с отсутствием научно обоснованной или проверенной морской практикой тактикой плавания таких судов в ледовых условиях. Традиционные приемы использования ледокола как универсального средства для решения всех задач, связанных с навигацией во льдах, в новых условиях перестают быть эффективными. Приведем один пример. Хорошо известно, что для освобождения судна, затертого льдами при сжатиях, используется околка его ледоколом. При этом на последней стадии этой операции ледокол прокладывает перед носом судна канал, по которому начинает двигаться освобожденное от сжимающих усилий льда судно. Очевидно, что такой прием не применим для крупнотоннажных судов, так как ширина проложенного ледоколом канала меньше ширины судна. Поэтому, только начав двигаться, крупнотоннажное судно снова попадает в зону сжатий, с которыми самостоятельно

справиться не может. Применение одного ледокола для освобождения крупнотоннажных судов не эффективно, за исключением некоторых специальных тактических приемов, которые работоспособны при слабых сжатиях [1].

Сами же крупнотоннажные суда ввиду их конструктивных особенностей, а именно наличия развитой цилиндрической вставки с вертикальными бортами, не всегда могут демонстрировать хорошие ледовые качества. Наличие этого конструктивного элемента приводит не только к увеличению ледового сопротивления судна [2], но и существенно снижает его маневренные качества при движении в ледовых условиях [3]. Особенно сильно отрицательное влияние цилиндрической вставки сказывается при попадании крупнотоннажного судна в зону ледовых сжатий.[4]. Выше уже отмечалось, что в этой ситуации ледокол сопровождения практически не сможет оказать помощь проводимому судну.

Специалистами ФГУП «ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова» разрабатываются различные подходы для решения указанных проблем и обеспечения на их основе безопасности функционирования современных транспортных систем в ледовых условиях. В настоящее время проводятся научные исследования в следующих направлениях:

- отработка новых эффективных форм корпуса крупнотоннажных судов ледового плавания;
- применение модельного эксперимента для поиска и обоснования новых тактических приемов ледового плавания крупнотоннажных судов;
- разработка систем мониторинга состояния судна под воздействием ледовой среды;
- дальнейшее развитие нормативной базы с учетом особенностей эксплуатации крупнотоннажных судов в Арктике.

Кратко рассмотрим основные результаты, полученные в ходе уже выполненных исследований.

Хорошо известно, что выбор оптимальной формы корпуса судна, эксплуатирующегося во льдах, позволяет существенно снизить его ледовое сопротивление, а также улучшить другие ледовые качества. Поэтому это направление исследований является перспективным и для крупнотоннажных судов активного ледового плавания. Результатом работ, выполненных в институте, является патент на форму корпуса крупнотоннажного судна ледового плавания [5]. Основная идея этой разработки заключается в предложении устанавливать на крупнотоннажных судах дополнительно к носовым римерам^{*)} (как это было сделано на арктическом танкере «Манхеттен») миделевые. Наличие миделевых римеров позволяет существенно улучшить показатели ледовой управляемости судна, а также снизить отрицательное воздействие ледовых сжатий на цилиндрическую вставку. Принцип работы миделевых римеров показан на рис. 1.

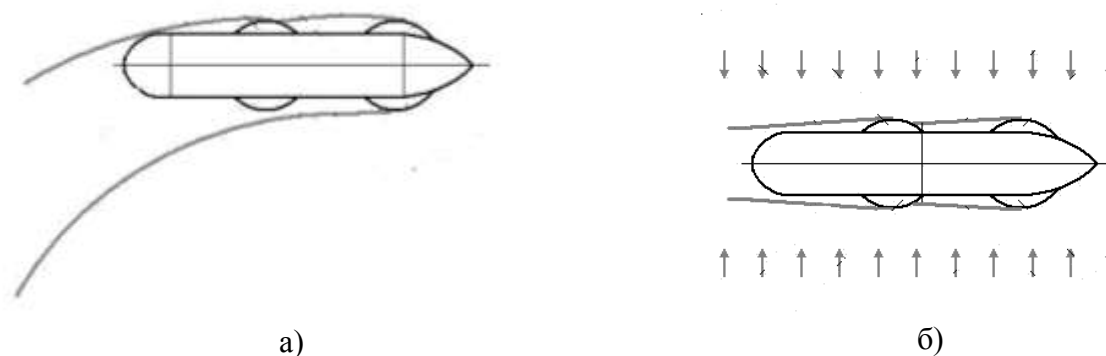


Рис. 1. Схема функционирования миделевых римеров при циркуляции судна во льдах при действии ледовых сжатий

^{*)} Ример – наделка на корпусе судна, увеличивающая его ширину.

Большое внимание в работе ледового бассейна ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова уделяется исследованиям различных тактических приемов взаимодействия крупнотоннажного судна с ледоколом, ширина корпуса которого меньше ширины судна. В экспериментах изучалась возможность движения судна по узкому каналу, проложенному ледоколом с доламыванием его кромок (рис. 2), и движение судна параллельно каналу, проложенному ледоколом (рис.3). Полученные при этом результаты позволяют сделать вывод о том, что и тот и другой тактический прием позволяют снизить ледовое сопротивление крупнотоннажного судна на 40 -50% от его сопротивления в аналогичных ровных льдах. В настоящее время трудно отдать предпочтение тому или иному тактическому приему из-за недостаточного объема проведенных экспериментальных исследований. Теоретические оценки показывают, что оба тактических приема имеют свои достоинства и недостатки. По всей видимости, при реальной эксплуатации будут использоваться оба приема. Одним из основных достоинств тактического приема движения судна параллельно каналу, проложенному ледоколом, является возможность оказания ледоколом помощи судну при его попадании в зону относительно легких сжатий.



Рис. 2. Движение крупнотоннажного судна по каналу, проложенному ледоколом



Рис. 3. Движение крупнотоннажного судна параллельно каналу, проложенному танкером

В российской практике в качестве эффективного способа повышения эксплуатационной надежности судов ледового плавания используются ледовые паспорта, представляющие судоводителю количественную информацию для выбора безопасного режима движения судна в различных ледовых условиях. Теоретический анализ показывает, что чисто расчетная экстраполяция существующей методологии обеспечения безопасности ледового плавания на крупнотоннажные суда, отличающиеся повышенным риском экологических катастроф, не может дать надежного результата. Одним из эффективных путей преодоления складывающейся кризисной ситуации является революционное развитие методологии обеспечения безопасности арктических танкеров и газовозов, ориентированное на органическое сочетание накопленного опыта составления ледовых паспортов с современными возможностями мониторинга ледовых воздействий [6].

На настоящем этапе роль натурных испытаний для арктических танкеров и газовозов должна сыграть новая технология мониторинга внешних силовых воздействий на корпус судна. Под системой мониторинга в общем случае понимается программно-аппаратный комплекс, позволяющий судоводителю оценивать силовые воздействия внешней среды на корпус в реальных физических или относительных величинах, отслеживать тенденции изменения такого воздействия и выдавать рекомендации по управлению судном. Как правило, система мониторинга состоит из следующих компонентов:

- сенсорный блок, или блок получения первичной информации о физических показателях взаимодействия отдельных подсистем и элементов корпуса судна;

- программный блок обработки полученных сигналов, получения абсолютных или относительных обобщенных показателей взаимодействия;
- программный блок обработки обобщенных показателей воздействия и формирование рекомендаций судоводителю.

На начальном этапе внедрения система ледового мониторинга должна органически дополнять ледовый паспорт, фактически выполняя роль мониторинга ледовых нагрузок при движении судна в различных ледовых условиях. Накапливаемая в ней статистическая информация о зафиксированных опасных воздействиях для конкретных ледовых условий и режимов движения судна создаст базу данных для совершенствования методологии определения ледовых нагрузок.

В дальнейшем, после накопления опыта эксплуатации, система ледового мониторинга будет дополняться новыми блоками, позволяющими прогнозировать реализацию опасных ледовых воздействий на основании сформированной базы данных и текущих замеров, а также включающими математическую модель движения арктических танкеров и газозовов во льдах. Взаимодействие блоков прогнозирования с усовершенствованной математической моделью движения судна во льдах позволит формировать для судоводителя обоснованные рекомендации по выбору безопасных режимов ледового плавания. Эта же накопленная информация даст материал для дальнейшего совершенствования нормативных требований РМРС применительно к судам активного ледового плавания, включая крупнотоннажные.

Библиографический список

1. **Сазонов, К.Е.** Проводка крупнотоннажных судов ледоколами в условиях сжатия льда // Морской вестник. 2006. №4(20). С. 83–85.
2. **Сазонов, К.Е.** Оценка вклада вертикальных бортов цилиндрической вставки в ледовое сопротивление судна // Морской вестник. 2008. №4(28). С. 110–111.
3. **Сазонов, К.Е.** Влияние цилиндрической вставки на ледовую ходкость и управляемость крупнотоннажных судов // Судостроение. 2004. №1. С. 18–22.
4. **Сазонов, К.Е.** Танкер и ледокол: сложение сил // Мир транспорта. 2007. №4. С. 50–59.
5. Пат. №2304543 РФ. Судно ледового плавания / Орлов О.П. [и др.]; опубл. 20.08.2007. Бюлл. № 23.
6. **Апполонов, Е.М.** Обеспечение ледовой прочности и безопасной эксплуатации судов в российских и замерзающих морях на основе комплексной системы формирования принципиальных инженерных решений / Е.М. Апполонов, А.Б. Нестеров, О.Я. Тимофеев / Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. – Н. Новгород: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2008. Вып. 39(323). С. 69–89.

*Дата поступления
в редакцию 26.01.2010*

E. Appolonov, K. Sazonov, O. Timofeev

SAFETY OF EXPLOITATION LARGE DEADWEIGHT VESSELS IN ARCTIC TRANSPORT SYSTEM

Contains an overview of researches performed by specialists Federal State Unitary Enterprise «Krylov Shipbuilding Research Institute» in the development of research programs. This programs are concerning new efficient hull shape large vessels for ice navigation, the use of a model experiment to search for and study new tactics for ice navigation of large vessels, the development of systems for monitoring the status of the vessel under the influence of the ice environment, the further development of the regulatory framework taking into account the peculiarities of operation of large vessels in the Arctic.

Key words: safety, tactics navigation, hull shape, vessel, ice.

УДК 531.3+532.542

Г.В. Русецкая, Л.В. Смирнов

**ДИНАМИКА ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСАХ**Волжская государственная академия водного транспорта,
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Исследовано динамическое поведение содержащих насосы гидросистем при нестационарных процессах. Получена математическая модель динамики насоса, предназначенная для использования на ранних стадиях проектирования при выборе геометрических и физических параметров, позволяющих удовлетворить проектным требованиям характеристик насоса и его динамическому поведению в составе создаваемой или заданной гидравлической системы.

Ключевые слова: центробежные насосы, вращение ротора, гидросистема, надежность, безопасность, математическое моделирование.

В центробежных насосах протекают взаимосвязанные процессы различной физической природы: механические, связанные с вращением ротора, и гидродинамические, обусловленные течением жидкости в проточных каналах.

Теоретические и экспериментальные исследования характеристик для содержащих насосы гидросистем представляют значительный интерес при решении задач обеспечения эффективной работы, надежности и безопасности большого числа современных технических систем и объектов.

Практическая необходимость при проектировании центробежных насосов и сложность протекающих в них физических процессов стимулируют разработку различных теоретических и экспериментальных подходов с целью обеспечения оптимальных проектных решений и эксплуатационных требований. Особенно сложным является изучение динамического поведения содержащих насосы гидросистем при нестационарных процессах, когда неизбежен выход за пределы обычно рассматриваемой узкой области работы насосного агрегата. Важную роль при этом играет математическое моделирование.

При изучении динамики гидросистем решаются два типа задач. Наиболее часто рассматриваются относительно медленные процессы, когда оказывается возможным использование модели несжимаемой жидкости. Значительно реже рассматриваются быстрые волновые процессы типа гидравлического удара и акустических колебаний, когда сжимаемость жидкости существенна. Примером постановки и решения обеих типов задач могут служить исследования динамики систем циркуляции теплоносителя ядерных реакторов, так как требования к обеспечению их надежности и безопасности особенно велики [2, 3].

Во всех случаях из-за отсутствия более адекватных подходов и моделей, как это принято в прикладной гидромеханике [6], используются статические характеристики в виде зависимости перепада давления от расхода жидкости через элементы гидросистем, включая насос. При этом используется так называемый гидравлический подход, когда в общем случае трехмерное турбулентное течение заменяется квазиодномерным, осредненным по живому сечению потока и турбулентными пульсациями. В случае напорного течения и медленных процессов в качестве уравнений нестационарного течения жидкости используется уравнение Бернулли [6]. При этом математические модели нестационарных процессов в гидросистеме представляют собой систему обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений для участков и уравнений неразрывности для узлов соединения и разделения потоков. Насос, подобно местному сопротивлению, представляется в виде сосредоточенного элемента с гид-

равлической характеристикой, которая при необходимости должна быть задана не только в узком диапазоне, соответствующем стационарной работе, но иногда и при обратном течении жидкости через насос.

Для получения характеристики гидравлической системы при нестационарных процессах в настоящее время разрабатывается и используется при исследованиях подход, основанный на методах аналитической механики [1]. Этот подход разработан для математического моделирования динамики сложных гидравлических систем и назван прикладной аналитической гидромеханикой [2, 4]. Уравнения для участков между узлами представляются в виде уравнений Лагранжа 2-го рода в обобщенной на случай переменного состава форме, то есть с учетом дополнительных сил, обусловленных потоком массы через границы. Уравнения вращения рабочего колеса каждого из входящих в состав гидросистемы насосов также являются уравнениями Лагранжа, а связи механических и гидродинамических процессов выражаются в гидравлических характеристиках насосов и в зависимости момента сопротивления на валу насоса от расхода перекачиваемой жидкости. При исследованиях предполагается, что характеристика насоса может быть представлена в виде полиномов относительно расхода и угловой скорости рабочего колеса. Такое нетрадиционное представление математической модели гидросистемы позволило получить новые, важные с теоретической и практической точек зрения результаты [2, 3].

Проблема, решению которой посвящена настоящая работа, состоит в разработке упрощенной инженерной методики построения этой характеристики для стационарного режима, то есть для различных, но фиксированных значениях расхода и угловой скорости ротора насоса, а также в исследовании поведения взаимодействующих механических и гидродинамических процессов в центробежных насосах на переходных режимах. С этой целью выполнено обобщение прикладной аналитической гидромеханики.

Центробежный насос рассматривается как связанная с внешней средой система, представляющая собой совокупность взаимосвязанных четырех элементов, динамически взаимодействующих с потоком рабочей жидкости: подводящий канал, рабочее колесо, отводящий канал, диффузор.

В рамках прикладной аналитической гидромеханики (ПАГМ) система этих элементов рассматривается, аналогично гидравлической системе, как совокупность соединенных последовательно четырех участков. При этом поток, протекающий через эти участки, рассматривается как одно неразрывное целое.

Однако, в отличие от гидравлической системы, состоящей из неподвижных участков, в системе «Центробежный насос» имеется вращающийся участок - рабочее колесо. Этот участок представляется в виде K одинаковых, соединенных параллельно каналов, через которые движется жидкость, динамически взаимодействуя со стенками этих каналов.

Наличие участка с вращающимися границами потока обуславливает в центробежных насосах протекание взаимосвязанных процессов различной физической природы: механических и гидродинамических. Необходимость исследования этих процессов требует выделения в рассматриваемой системе двух взаимодействующих подсистем:

- механической подсистемы, связанной с вращением ротора насоса и с учетом динамического взаимодействия рабочего колеса ротора с потоком;
- гидродинамической подсистемы, связанной с движением жидкости в $i = 1, 2, 3, 4$ участках и с учетом динамического взаимодействия потока с рабочим колесом ротора (участок $i = 2$).

Механическая подсистема представлена ротором, включающим рабочее колесо с внутренним потоком жидкости в K проточных каналах колеса, вал и вращающиеся элементы привода. Геометрическими характеристиками механической подсистемы является J – суммарный момент инерции элементов ротора насоса. Состояние механической подсистемы описывается переменной $\dot{\phi}$ – угловой скоростью ротора.

Гидродинамическая подсистема состоит из проточной части насоса, включающей подводящий канал, проточные каналы рабочего колеса, отводящий канал, диффузор, $i = 1, 2, 3, 4$

соответственно. Состояние гидродинамической подсистемы описывается переменной Q - расходом жидкости. Геометрическими характеристиками гидродинамической подсистемы являются: $R_i = R_i(l_i)$ - радиус-вектор точек оси потока l_i ; площадь поперечного сечения потока $S_i = S_i(l_i)$. Эти параметры на входе в канал и на выходе из него: $(R_i)_1, (R_i)_2; (l_i)_1, (l_i)_2; (S_i)_1, (S_i)_2$.

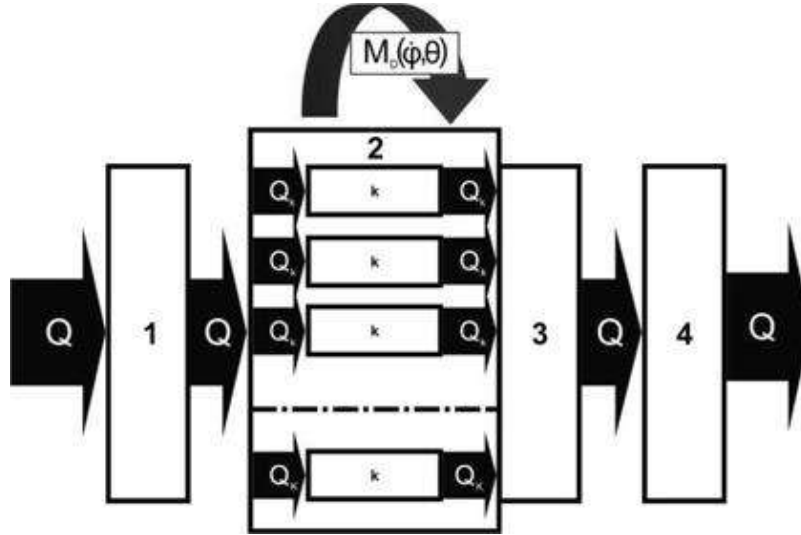


Рис. 1. Структурная схема системы «Центробежный насос»:

1 – подводящий канал; 2 – рабочее колесо; k – проточные каналы рабочего колеса;
3 – отводящий канал; 4 – диффузор

При описании движения механической подсистемы движение ротора рассматривается как вращение твердого тела вокруг неподвижной оси.

Описание движения гидродинамической подсистемы, согласно ПАГМ, выполняется в гидравлическом приближении: поток считается одномерным; сжимаемость жидкости и упругость стенок проточных каналов пренебрегаются; гидравлические потери на участках определяются с использованием обобщенных экспериментальных данных, эмпирических и полупэмпирических зависимостей, обычно получаемых для стационарных режимов течения [6]. Участки $i = 1, 2, 3, 4$ подсистемы рассматриваются как тела переменного состава, поскольку имеется поток массы через границы этих участков.

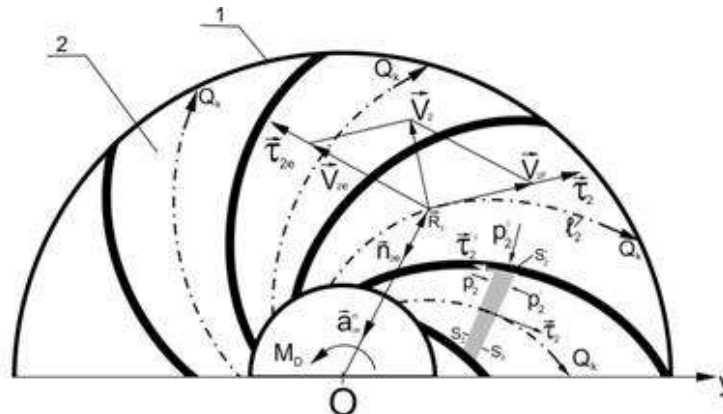


Рис. 2. Схема течения в проточных каналах рабочего колеса:

1 – рабочее колесо; 2 – проточные каналы рабочего колеса

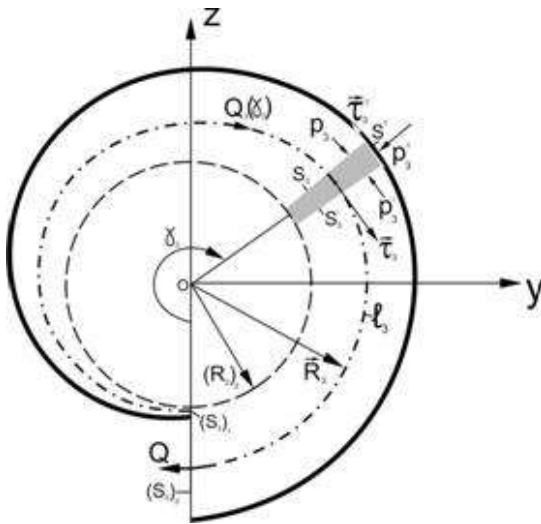


Рис. 3. Схема течения жидкости в отводящем канале

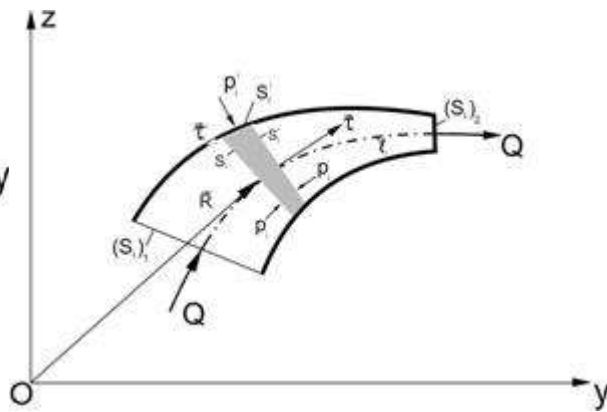


Рис. 4. Общая схема течения жидкости в подводящем канале и диффузоре

Движение жидкости на участке отводящего канала ($i = 3$) гидродинамической подсистемы происходит при переменном вдоль потока расходе (рис. 3). Изменение расхода вдоль канала определяется в соответствии с принятой в практике расчета насосов зависимостью [5]:

$$Q_3 = \frac{Q_{Y3}(l_3)}{2\pi}. \quad (1)$$

Движение жидкости в подводящем канале, рабочем колесе и диффузоре происходит при постоянном вдоль потока расходе.

Для описания с позиции ПАГМ движения системы «Центробежный насос» используется уравнение Лагранжа:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_y} - \frac{\partial T}{\partial q_y} = \Phi_y, \quad y = 1, \dots, V. \quad (2)$$

где q_y - обобщенная координата системы; T - полная кинетическая энергия системы, обусловленная вращением канала и движением жидкости в канале; Φ_y - обобщенные силы, соответствующие обобщенной координате q_y , включающие, кроме обобщенных внешних сил, и обобщенные дополнительные силы, обусловленные переменным составом; \dot{q}_y - обобщенные скорости системы.

Кинетическая энергия системы T определяется суммой кинетических энергий механической подсистемы $T_M = \frac{J\dot{\varphi}^2}{2}$ и гидродинамической подсистемы $T_{гд} = \sum_{i=1}^4 T_i$:

$$T = \frac{J\dot{\varphi}^2}{2} + \sum_{i=1}^4 T_i, \quad (3)$$

где J - момент инерции ротора насоса, включающего рабочее колесо, приводной вал и вращающиеся элементы передаточного механизма; где T_i - кинетическая энергия жидкости в участках гидродинамической подсистемы:

$$T_i = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\rho Q^2}{2} \int_{(l_i)_1}^{(l_i)_2} \frac{dl_i}{S_i}, i = 1, 4; \\ \frac{K\rho}{2} \int_{(l_2)_1}^{(l_2)_2} \left[\dot{\phi}^2 R_2^2 + \frac{Q^2}{K^2 S_2^2} - 2\dot{\phi}R \frac{Q}{KS_2} \cos(\bar{\tau}_{1,e} \bar{\epsilon} \bar{\tau}_2) \right] S_2 dl_2, i = 2; \\ \frac{\rho Q^2}{8\pi^2} \int_{(l_2)_1}^{(l_2)_2} \frac{\gamma_3^2}{S_3} dl_3, i = 3 \end{array} \right. , \quad (4)$$

$\frac{\rho}{2} \int_{(l_i)_1}^{(l_i)_2} S_i dl_i = m_i$ - масса жидкости в участке; Q - расход жидкости в гидродинамической под-

системе; $V = [V_{2,e}^2 + V_{2,r}^2 - 2V_{2,e}V_{2,r} \cos(\bar{\tau}_{2,e} \bar{\epsilon} \bar{\tau}_2)]^{0,5}$; $V_{2,e} = \dot{\phi}R_2$, $V_{2,r} = \frac{Q}{KS_2}$ - абсолютная, пере-

носная и относительная скорость жидкости в каждом канале рабочего колеса, соответственно; K - количество каналов рабочего колеса; $\bar{\tau}_{2,e}, \bar{\tau}_2$ - единичные векторы направлений переносной и относительной скоростей соответственно.

Интегрирование ведется по длине каналов от входного до выходного сечения. Выражение для кинетической энергии (4) позволяет выбрать вид обобщенных координат системы. Входящие в выражение (4) физические величины: угловая скорость ротора насоса $\dot{\phi}$ и расход жидкости в каналах насоса Q могут рассматриваться как обобщенные скорости, равные угловой скорости ротора для механической подсистемы, $\dot{\phi} = \dot{q}_1$, и расходу жидкости для гидродинамической подсистемы $Q = \dot{q}_2$.

Обобщенные координаты имеют простой физический смысл и являются скрытыми.

При вариации обобщенной координаты $q_y = q_1 = \int_0^t \dot{\phi} dt + q_{1(0)}$, где $q_{1(0)}$ - значение обобщенной координаты в начальный момент времени $t = 0$, система получает виртуальное перемещение $\delta\phi$.

Левая часть соответствующего уравнения Лагранжа (2) запишется в виде

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_1} - \frac{\partial T}{\partial q_1} = \ddot{\phi} \left(J + \rho K \int_{(l_2)_1}^{(l_2)_2} R_2^2 S_2 dl_2 \right) - \rho \dot{Q} \int_{(l_2)_1}^{(l_2)_2} R_2 \cos(-\bar{\tau}_{2,e} \bar{\epsilon} \bar{\tau}_2) dl_2. \quad (5)$$

Входящая в правую часть уравнения Лагранжа обобщенная сила Φ_1 определяется из выражения:

$$\delta A_1 = \Phi_1 \delta q_1, \quad (6)$$

где δA_1 - виртуальная работа обобщенной силы Φ_1 на виртуальном перемещении $\delta\phi$.

Работу δA_1 на виртуальном перемещении $\delta\phi$ выполняют: движущий момент на валу насоса M_D ; момент сопротивления вращению ротора насоса M_C , связанный с трением в подшипниках, уплотнениях вала и дисковым трением (трением жидкости с дисками на внешней стороне колеса); момент M_P , обусловленный гидродинамическим давлением в поперечных сечениях потока S_1 и на поверхности контакта жидкости с ограничивающими по-

ток стенками канала S_i''

$$\delta A_1 = M_D \delta \varphi - M_C \delta \varphi + M_P \delta \varphi, \quad (7)$$

где M_D является заданной функцией времени $M_D = M_D(t)$, M_C определяется на основании специальной уточненной методики определения внутренних механических потерь [9], M_P определяется как результирующий момент относительно оси вращения сил гидродинамического давления в сечениях S_i и S_i'' :

$$M_P = K \left[(p_2)_2 (S_2)_2 (R_2)_2 \cos(-\bar{\tau}_{2,e} \bar{\epsilon} \bar{\tau}_2)_2 - (p_2)_1 (S_2)_1 (R_2)_1 \cos(-\bar{\tau}_{2,e} \bar{\epsilon} \bar{\tau}_2)_1 \right]. \quad (8)$$

Используя (6) и (7), получим

$$\Phi_1 = M_D - M_C + M_P. \quad (9)$$

С учетом (5), (6) и (7) получим уравнение Лагранжа, описывающее движение механической подсистемы,

$$\ddot{\varphi} \left(J + \rho K \int_{(l_2)_1}^{(l_2)_2} R_2^2 S_2 dl_2 \right) - \rho \dot{Q} \int_{(l_2)_1}^{(l_2)_2} R_2 \cos(-\bar{\tau}_{2,e} \bar{\epsilon} \bar{\tau}_2) dl_2 = M_D - M_C + M_P. \quad (10)$$

При вариации обобщенной координаты $q_y = q_2 = \int_0^t Q dt + q_{i(0)}$, виртуальным перемещением системы является перемещение жидкой среды в $i = 1, \dots, A$ элементах гидродинамической подсистемы $\bar{\tau}_i \delta l_i$.

В этом случае левая часть уравнения Лагранжа (2) для гидродинамической подсистемы примет вид

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_2} - \frac{\partial T}{\partial q_2} = & \rho \dot{Q} \int_{(l_n)_1}^{(l_n)_2} \frac{dl_n}{S_n} + \frac{\rho \dot{Q}}{K} \int_{(l_2)_1}^{(l_2)_2} \frac{dl_2}{S_2} + \frac{\rho \dot{Q}}{4\pi^2} \int_{(l_3)_1}^{(l_3)_2} \frac{\gamma_3^2}{S_3} dl_3 - \\ & - \rho \int_{(l_2)_1}^{(l_2)_2} R_2 S_2 \ddot{\varphi} \cos(-\bar{\tau}_{2,e} \bar{\epsilon} \bar{\tau}_2) dl_2, n = \overline{1;4} \end{aligned} \quad (11)$$

Для обобщенной силы Φ_2 имеем выражение

$$\delta A_2 = \Phi_2 \delta q_2, \quad (12)$$

где δA_2 - виртуальная работа обобщенной силы Φ_2 на виртуальном перемещении $\delta \varphi$.

Виртуальную работу δA_2 на вариации обобщенной координаты q_2 выполняют: обобщенная сила Φ_2 , обусловленная ускорением свободного падения g во всех элементах гидродинамической подсистемы, центробежным ускорением $a_{2e}'' = \dot{\varphi}^2 R_2$ в каждом сечении каналов рабочего колеса, гидродинамическим давлением p_i и касательным напряжением τ_i'' на поверхности S_i'' . Считая расположение оси вращения ротора вертикальным, имеем работу составляющей обобщенной силы, связанной с ускорением g , равную нулю.

Обобщенная сила Φ_2 определяется с учетом дополнительной обобщенной силы P_2 , связанной с изменением материального состава участков гидродинамической подсистемы, и функции $\Delta p'''(Q; \Lambda)$, описывающей гидравлические потери при движении жидкости в гидродинамической подсистеме.

Дополнительная обобщенная сила $P_2 = \sum_{i=1}^4 P_i$ определяется в соответствии с [4] из выражений:

$$P_i = \begin{cases} \frac{\rho Q^2}{2} \left(\frac{1}{(S_i)_1^2} - \frac{1}{(S_i)_2^2} \right), i = 1, 4; \\ \frac{\rho Q^2}{2K} \left(\frac{1}{(S_2)_1^2} - \frac{1}{(S_2)_2^2} \right), i = 2; \\ \frac{\rho Q^2}{4\pi^2} \left(\frac{(\gamma_3)_1^2}{(S_3)_1^2} - \frac{(\gamma_3)_2^2}{(S_3)_2^2} \right), i = 3 \end{cases}. \quad (13)$$

Гидравлические потери на участках гидродинамической подсистемы описываются функцией вида

$$\Delta p'''(Q; \Lambda) = \Delta p_m''(Q) + \Delta p_2''(\Lambda), m = \overline{1, 3, 4}, \quad (14)$$

где $\Delta p_m''(Q)$ - функции, описывающие гидравлические потери в неподвижных каналах [6]; $\Delta p_2''(\Lambda)$ - функция, описывающая потери во вращающихся каналах рабочего колеса; Λ - безразмерный комплекс, учитывающий результирующее влияние режима движения жидкости, вращения и кривизны канала. Вид функции $\Delta p_2''(\Lambda)$ устанавливается в соответствии с методиками, разработанными на основе экспериментальных и теоретических исследований течения жидкости во вращающихся каналах произвольной геометрии [9].

С учетом (12) получим

$$\Phi_2 = (p_i)_1 - (p_i)_2 + \rho K \dot{\varphi}^2 \int_{(l_2)_1}^{(l_2)_2} R_2 \sin(-\bar{\tau}_{2e} \epsilon \bar{\tau}_2) dl_2 + \sum_{i=1}^4 P_i - \Delta p'''(Q; \Lambda), \quad i = \overline{1, 4}, \quad (15)$$

где $(p_i)_1, (p_i)_2$ - давление на входе и выходе i -го канала гидродинамической подсистемы соответственно; $(S_i)_1, (S_i)_2$ - площадь поперечного сечения потока на входе и выходе участков $i = 1, \dots, 4$ соответственно.

Используя выражения (11), (15), получим уравнения движения гидродинамической подсистемы, представленные в форме уравнения Лагранжа,

$$\begin{aligned} & \rho \dot{Q} \left(\int_{(l_n)_1}^{(l_n)_2} \frac{dl_n}{S_n} + \frac{1}{K} \int_{(l_2)_1}^{(l_2)_2} \frac{dl_2}{S_2} + \frac{1}{4\pi^2} \int_{(l_3)_1}^{(l_3)_2} \frac{\gamma_3^2}{S_3} dl_3 \right) - \rho \dot{\varphi} \int_{(l_2)_1}^{(l_2)_2} R_2 \cos(-\bar{\tau}_{2e} \epsilon \bar{\tau}_2) dl_2 = \\ & = (p_i)_1 - (p_i)_2 + \rho \dot{\varphi}^2 \int_{(l_2)_1}^{(l_2)_2} R_2 \sin(-\bar{\tau}_{2e} \epsilon \bar{\tau}_2) dl_2 + \sum_{i=1}^4 P_i - \Delta p'''(Q; \Lambda), \quad n = \overline{1, 4}, \quad i = \overline{1, 4}. \end{aligned} \quad (16)$$

Уравнения Лагранжа (16) представляют собой систему двух обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка относительно обобщенных скоростей $\dot{\varphi}$ и \dot{Q} . Уравнения не содержат обобщенных координат. Эти координаты не представляют практического интереса и являются скрытыми. Состояние системы «Центробежный насос» описывается переменными $\dot{\varphi}$ и \dot{Q} .

Уравнения (10), (16) взаимосвязаны. Гидродинамические параметры: расход Q и перепад давления на участках гидродинамической подсистемы $\Delta p = (p_i)_2 - (p_i)_1, i = 1, \dots, 4$, зави-

сят от угловой скорости $\dot{\phi}$ ротора механической подсистемы. Эти параметры, в свою очередь, определяют нагрузку на приводящий двигатель M_D .

Уравнение (10) является известным уравнением вращения твердого тела относительно закрепленной оси. Входящие в уравнение гидродинамические параметры Q, p позволяют учесть динамическое воздействие на механическую подсистему со стороны гидродинамической подсистемы.

Уравнения (16) являются известными уравнениями Бернулли для нестационарного течения вязкой несжимаемой жидкости в $i = 1, 3, 4$ неподвижных и в $i = 2$ вращающемся элементах гидродинамической подсистемы. Входящий в уравнение параметр $\dot{\phi}$, позволяет учесть динамическое воздействие на гидродинамическую подсистему со стороны механической подсистемы.

Уравнения Лагранжа (10), (16) совместно с заданными начальными условиями, уравнениями неразрывности и условиями в концевых сечениях, через которые происходит обмен жидкостью между участками гидродинамической подсистемы и с внешними по отношению к рассматриваемой системе объектами, образует математическую модель динамики центробежного насоса.

Начальные условия определяют значения параметров механических и гидродинамических процессов в момент времени, соответствующий началу процесса $t = t_0$:

$$\dot{\phi}(t_0) = \dot{\phi}_0; M_D(t_0) = (M_D)_0; p_{вх}(t_0) = (p_{вх})_0, p_{вых}(t_0) = (p_{вых})_0. \quad (17)$$

Условия неразрывности в узлах соединения участков гидродинамической подсистемы с позиции ПАГМ представляют собой интегрируемые связи обобщенных скоростей, которыми являются расходы жидкости в участках гидродинамической подсистемы:

$$Q_1 = Kq_k = Q_3 = Q_4 = Q. \quad (18)$$

Эти связи были учтены при составлении уравнений движения гидродинамической подсистемы в соответствии с расчетной схемой системы (рис. 1), поэтому в явном виде в состав уравнений, замыкающих математическую модель, не входят.

Условия в концевых сечениях, через которые происходит обмен жидкостью между участками гидродинамической подсистемы, описываются уравнениями

$$(p_{i-1})_2 = (p_i)_1, \quad i = 2, 3, 4, \quad (19)$$

Условия в концевых сечениях системы, через которые происходит обмен жидкостью между гидродинамической подсистемой и внешней по отношению к ней средой (гидравлической системой), определяются условиями работы гидравлической системы, включающей рассматриваемый насос:

$$(p_1)_1 = p_{вх}, \quad (p_4)_2 = p_{вых}, \quad (20)$$

где $p_{вх}, p_{вых}$ - давление в узле соединения входного сечения насоса с всасывающим трубопроводом и выходного сечения насоса с нагнетательным трубопроводом гидравлической сети соответственно.

На основе представленной математической модели с помощью разработанного программного комплекса выполнен расчет установившихся значений расхода Q и перепада давления на насосе Δp (напора насоса H) специальной конструкции, предназначенного для высоковязких сред, после его включения при различных сопротивлениях сети [7, 8]. Для расчета были заданы: необходимые геометрические параметры проточной части насоса, плотность и вязкость жидкой среды, момент инерции ротора насоса.

Для оценки степени достоверности математической модели проведено сравнение полученных результатов с данными эксперимента [8]. На рис. 5 представлен вид расчетной и экспериментальной гидравлической характеристики рассматриваемого насоса.

Совпадение можно считать удовлетворительным. Для более убедительного свидетельства справедливости представленного подхода и получения на его основе математической модели необходим более обширный экспериментальный результат.

Разрабатываемый инженерный, упрощенный подход необходим для получения математической модели динамики насоса и предназначен для использования на ранних стадиях проектирования при выборе геометрических и физических параметров, позволяющих удовлетворить проектным требованиям характеристики насоса и его динамическому поведению в составе создаваемой или заданной гидравлической системы.

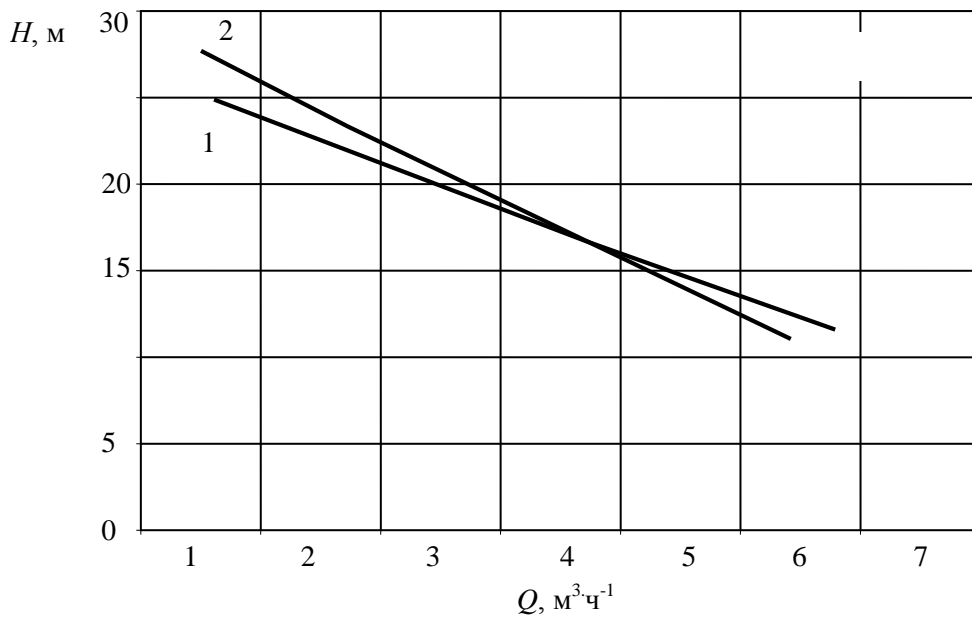


Рис.5. Гидравлическая характеристика $H = H(Q)$ насоса специальной конструкции:

1 – экспериментальная зависимость $H_{\text{э}}(Q)$; 2 – расчетная зависимость $H_{\text{р}}(Q)$

Такая модель необходима для более адекватного подхода при расчете динамики гидравлических систем с насосами.

Имеющиеся в настоящее время и разрабатываемые расчетные модели течения жидкости в насосе при учете пространственных эффектов и, в частности, детерминированного вихреобразования и турбулентности могут служить источником корректировки упрощенной модели и необходимых дополнений. Представленный метод получения математической модели динамики насоса аналогичен гидравлическому подходу, когда расчеты проводятся с использованием эмпирических и экспериментально обоснованных формул Дарси – Вейсбаха для гидравлических сопротивлений [6].

Работа выполнена в рамках ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект 2.1.2 / 3863).

Библиографический список

1. **Айзерман, М.А.** Классическая механика: учеб. пособие / М.А. Айзерман. – М.: Наука, 1980. – 367 с.
2. **Смирнов, Л.В.** Математические модели динамики и устойчивости систем принудительной циркуляции теплоносителя / Л.В. Смирнов. – М.: Энергоиздат, 1992. – 127с.
3. **Смирнов, Л.В.** Динамика гидромеханических процессов в гидросистемах. Основы прикладной аналитической гидромеханики / Л.В. Смирнов // ICOVP - 2001: докл. 5 Междунар. конф. / ИМАШ. М., 2001. – С. 416–420.

4. **Смирнов, Л.В.** Основы прикладной аналитической гидромеханики напорного течения несжимаемой жидкости: учеб. пособие / Л.В. Смирнов. – Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2009. – 64 с.
5. **Ломакин, А.А.** Центробежные и осевые насосы / А.А. Ломакин. М.-Л.: Машиностроение, 1966. – 364 с.
6. **Чугаев, Р.Р.** Гидравлика / Р.Р. Чугаев. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 672 с.
7. **Лукин, Н.В.** Новый насос для вязких жидкостей / Н.В. Лукин, Г.В. Русецкая // Материалы науч.-практ. конф., посв. 150-летию Волжского пароходства / ВГАВТ. – Н. Новгород. 1993. С. 71.
8. **Русецкая, Г.В.** Исследование и основы проектирования радиального насоса трения: дисс... канд. техн. наук. – Н. Новгород, 1996. – 155 с.
9. **Шкарбуль, С.Н.** Гидродинамика потока в рабочих колесах центробежных турбомашин / С.Н. Шкарбуль, А.А. Жарковский. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1996. – 356 с.

*Дата поступления
в редакцию 26.01.2010*

G. Rusetskaya, L. Smirnov

DYNAMICS HYDRO-MECHANICAL PROCESSES IN CENTRIFUGAL PUMPS

Research the dynamic behavior of pumps hydraulic systems with non-stationary processes. A mathematical model of the dynamics of pumps them are found. This mathematical model are purpose for use in the early stages of design when selecting the geometrical and physical parameters that meet the design requirements of the pump characteristics and its dynamic behavior in the created or specified hydraulic system.

Key words: centrifugal pumps, rotor, hydraulic systems, reliability, safety, mathematical modeling.

УДК 539.4

В.М. Волков, А.Е. Жуков

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ СУДОВЫХ ПЛАСТИН С ЦЕНТРАЛЬНЫМИ СКВОЗНЫМИ ТРЕЩИНАМИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Методами теоретического и экспериментального исследования рассмотрены проблемы продольного изгиба тонких прямоугольных пластин с различным расположением трещин. Установлены зависимости критических нагрузок на пластины в зависимости от протяженности трещин.

Ключевые слова: продольный изгиб, тонкие прямоугольные пластины, критические нагрузки, протяженность трещин.

Введение

Дефекты типа трещин, возникающие в пластинах в процессе эксплуатации конструкции, оказывают значительное влияние на их способность сопротивляться выпучиванию при сжатии.

Причиной появления трещин служат различные физические, механические, технологические и эксплуатационные факторы. Таким образом, при расчетах конструкций необходимо учитывать возможность зарождения трещин, их последующее развитие и оценивать влияние развивающихся трещин на поведение конструкции. Учитывая актуальность проблемы устойчивости пластин с дефектами, аналитическим и экспериментальным её исследования внимание уделялось неоднократно [1–3]. Тем не менее, вопрос этот исследован недостаточно полно.

В данной работе рассмотрено влияние относительного размера центральной трещины на устойчивость в малой прямоугольной пластине при одноосном сжатии. Трещина располагается вдоль или поперек сжимающих напряжений. Теоретическое решение проводилось методом конечных элементов. Экспериментальные исследования выполнены на специальной установке.

Расчет устойчивости пластин методом КЭ в линейной постановке

В силу симметрии нагрузки и граничных условий при решении рассматривалась четверть пластины, то есть трещина фактически выносилась на внешний контур модели, что делало возможным моделирование трещины путем изменения условий опирания части, содержащей её кромки. Последовательно снимая ограничения соответствующих перемещений в узлах, можно варьировать относительную длину трещины от 0 до 1 с шагом, кратным шагу конечно-элементной сетки. Граничные условия на наружных кромках — свободное опирание или жесткая заделка. Граничные условия на «внутренних» кромках задавались в соответствии с рассматриваемой формой потери устойчивости пластины в целом. На первом этапе влияние толщины пластины не учитывается: при симметричных формах потери устойчивости имел место излом вдоль трещины (имитация шарниром), при антисимметричных формах берега трещины могли смещаться друг относительно друга. Использовались двумерные изгибные конечные элементы.

Результатами расчетов явились графики зависимости коэффициента устойчивости K , входящего в хорошо известную формулу для эйлерова напряжения $\sigma_{\text{э}} = K \frac{\pi^2 D}{b^2 h}$ (где b –

длина нагруженной стороны, h – толщина пластины, D – цилиндрическая жесткость), от отношения l/a (l – длина трещины, a – длина стороны, параллельной трещине). Рассматривались пластины с различными комбинациями опорных закреплений и разными отношениями сторон. Пример таких графиков показан на рис. 1.

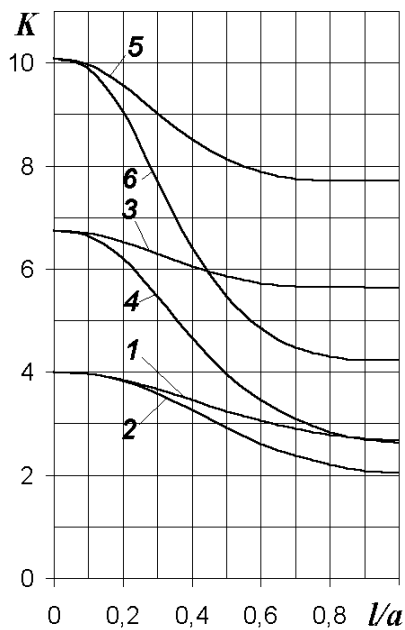


Рис. 1. График зависимости K от l/a :
1, 2 – свободно опертая по контуру квадратная пластина с трещиной вдоль и поперек сжимающих; 3, 4 – нагруженные кромки жестко заделаны, ненагруженные – свободно опорты; 5, 6 – жесткая заделка по контуру

На втором этапе исследований учитывалась толщина пластины. Расчет проводился с использованием объемных твердотельных элементов. Трещина имитировалась прямоугольным отверстием. Для имитации взаимодействия берегов использовались контактные элементы.

Эксперимент

Для экспериментальной проверки полученных численных результатов была сконструирована установка, позволяющая в лабораторных условиях проводить исследования устойчивости плоской формы пластин из оргстекла с прямоугольным внешним контуром при статическом одноосном сжатии (рис. 2). При создании установки учитывались рекомендации из работы [4]. Характеристики установки приведены в табл. 1.

Испытываемая пластина занимает в установке вертикальное положение. Нагрузка прикладывается к верхней горизонтальной кромке.

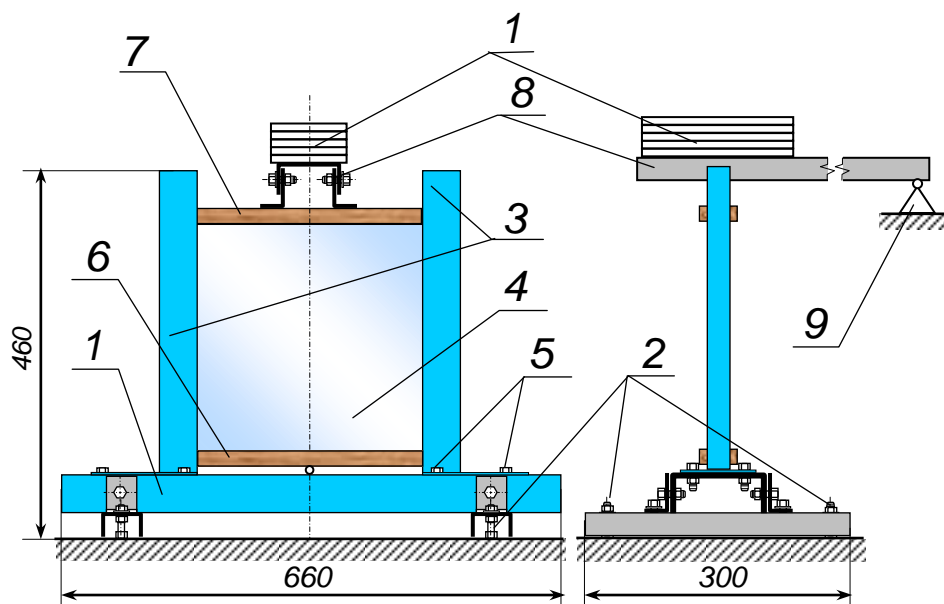


Рис. 2. Экспериментальная установка

Основание установки 1 представляет собой систему швеллеров, соединенных между собой болтами. Регулировочные болты 2 позволяют выставить основание в строго горизонтальное положение. На основании располагаются стойки 3, являющиеся вертикальными опорами испытываемого образца 4. Стойка представляет собой металлический брус прямоугольного сечения с приваренной с одного конца бруса пластиной, позволяющей крепить

стойку к основанию с помощью болтов. Брус имеет продольный паз для установки образца. Способ крепления стоек к основанию дает возможность регулировать расстояние между ними в зависимости от размера образца. Регулировочные винты 5 позволяют добиться строго вертикального положения стоек. Неподвижная 6 и подвижная 7 горизонтальные опоры представляют собой металлические или деревянные бруски с пазами для установки образца. Нагружающее устройство 8 представляет собой размеченную горизонтальную балку (швеллер) длиной 2 м, одним концом жестко скрепленную с подвижной опорой 7 установки, другим – опирается на ножевую опору 9. Швеллер служит площадкой для размещения грузов 10. Подбирая плечо, можно обеспечить нагружение с любым необходимым шагом.

Таблица 1

Характеристики установки

Габариты установки без нагружающего устройства (длина×ширина×высота), мм	660×300×460
Максимальная длина кромки испытываемой пластины, мм	300
Максимальная толщина испытываемой пластины, мм	5
Соотношение сторон испытываемой пластины	от 0,3 до 3
Максимальный груз, прикладываемый к испытываемой пластине, кг	100

Испытаниям подвергались пластины, изготовленные из органического стекла номинальной толщиной 2, 2,5 и 3 мм. Кромкам образца придавалась закругленная форма. При испытаниях для устранения трения между пластиной и опорами применялась смазка. Трещина имитировалась двумя способами. При первом в пластине создавались V-образные пропилы, расположенные симметрично относительно срединной поверхности, при этом толщина оставшегося материала – «шейки» – строго контролировалась и не превышала 10% толщины пластины. При втором способе создавалась собственно трещина посредством удара зубилом по предварительно начерченному на образце направляющим. Первый способ использовался для проверки расчетов по двумерной модели.

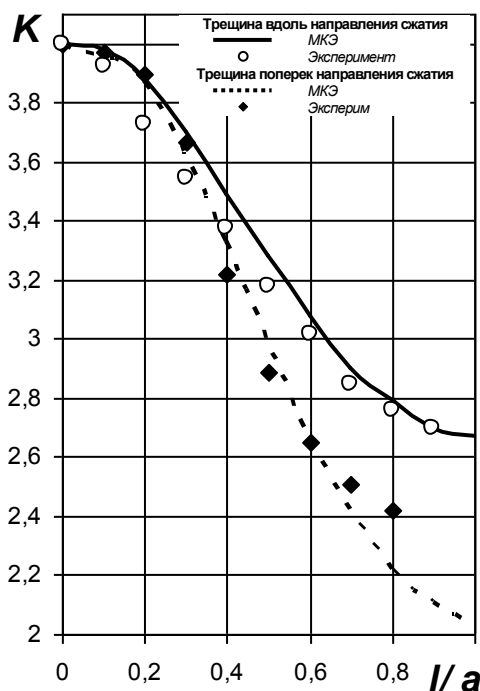


Рис. 3. Результаты, полученные МКЭ расчетом, и экспериментальные данные

Непосредственным результатом проведенного эксперимента были таблицы значений прогибов в центре пластины в зависимости от веса прикладываемых грузов. По данным таблиц для каждого испытания строились экспериментальные диаграммы «нагрузка-прогиб», после чего на этих диаграммах графически по методу Саусвелла-Доннелла [5] определялись критические значения прикладываемой нагрузки. В дальнейшем строилась зависимость критической нагрузки от длины трещины (пропила).

Испытания показали хорошую сходимость полученных результатов с теоретическими значениями для сплошной пластины, а также с результатами численных расчетов методом конечных элементов, проведенных для пластин с трещиной по двумерной и трехмерной моделям. Расхождение эксперимента с расчетом при имитации трещины двухсторонним V-образным пропилом не превысило 10%. На рис. 3 приведено сопоставление кривых, полученных с помощью расчета МКЭ, и экспериментальных точек для квадратной свободно опертой пластины с трещиной вдоль и поперек сжимающих усилий.

Расчет с учетом толщины показал, что соответствующие зависимости при расположении трещины вдоль сжимающих напряжений практически идентичны найденным по двумерной модели, что подтверждено экспериментально.

Теоретические расчеты для случая расположения трещины поперек сжимающих усилий показали, на первый взгляд, парадоксальные результаты: с увеличением длины трещины критическая нагрузка пластины возрастает. Но эксперимент показал схожую зависимость. На рис. 4 видно, что экспериментальные точки, хотя и не ложатся строго на теоретическую кривую, зависимость имеет явно возрастающий характер. Это явление может быть объяснено наличием момента, возникающего при контакте берегов трещины и распределенного по длине зоны контакта. При условии малых прогибов (в пределах половины толщины пластины) этот момент препятствует раскрытию трещины и, следовательно, выпучиванию пластины. С ростом трещины момент увеличивается, как следствие, растет и критическая нагрузка пластины.

Исследование закритического изгиба судовых пластин с трещинами

На следующем этапе некоторые из задач, рассмотренных выше, были решены в нелинейной постановке. Другими словами, исследовался изгиб прямоугольных пластин, содержащих центральные сквозные трещины, расположенные вдоль и поперек сжимающих напряжений при одноосном сжатии при нагрузках, превышающих эйлерову, и прогибах, превышающих толщину пластины. Материал пластин в расчетах принимался изотропный и линейно упругий. Какие-либо элементы, подкрепляющие пластину (кроме опирания по кромкам) отсутствовали. Сжимающие усилия предполагались равномерно распределенными вдоль внешних нагруженных кромок. Контуры пластины при сжатии не искривлялись и оставались параллельными самим себе (сжатие со стеснением) – такое ограничение моделирует воздействие на пластину балок и других пластин в реальной конструкции (например, в обшивке судна). В качестве граничных условий принято свободное опирание. Учитывалось влияние толщины пластины. Задача также решалась методом конечных элементов. Критерием критической нагрузки являлось достижение заведомо назначенного прогиба в определенной точке пластины.

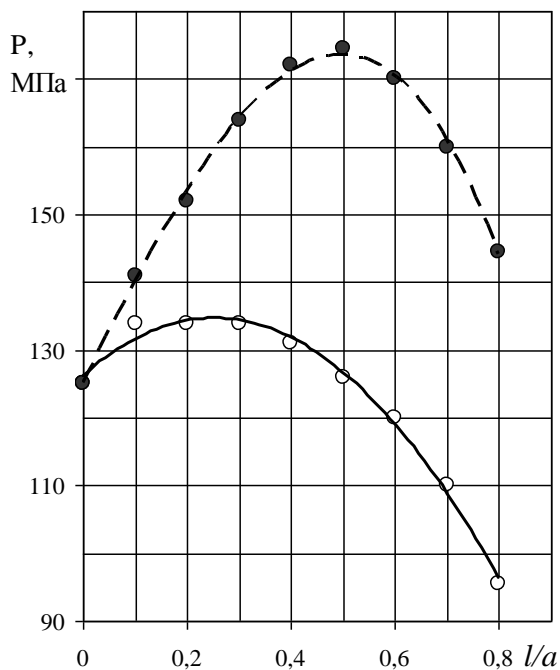


Рис. 4. Аппроксимация зависимости критической нагрузки квадратной свободно опертой пластины от относительной длины трещины

казана аппроксимация зависимости критической нагрузки квадратной свободно опертой пластины от относительной длины трещины, расположенной поперек сжимающих усилий (чёрные маркеры), а сплошной линией — для трещины, расположенной вдоль сжимающих усилий (белые маркеры). Как видно из представленных графиков, увеличение несущей способности пластины с ростом трещины, в случае учета контакта берегов, имеет место и при закритическом нагружении. Условия и степень проявления данного эффекта требуют дальнейшего изучения.

В результате расчетов на ЭВМ получены зависимости критической нагрузки прямоугольных свободно опертых пластин от относительной длины трещины, и от отношения длин сторон. На рис. 4 пунктирной линией показана аппроксимация зависимости критической нагрузки квадратной свободно опертой пластины от относительной длины трещины, расположенной поперек сжимающих усилий (чёрные маркеры), а сплошной линией — для трещины, расположенной вдоль сжимающих усилий (белые маркеры).

Список литературы

1. **Михайлов, Б. К.** Исследование устойчивости прямоугольных пластин с прямоугольными отверстиями при продольном сжатии / Б. К. Михайлов, В. Г. Москалева // Металлические конструкции: межвуз. темат. сб. тр. / Ленингр. инж.-строит. ин-т. – Л., 1983. С. 14–21.
2. **Грачева, Е. А.** Устойчивость судовых пластин с трещинами / Грачева Е. А. // Механика разрушения и надежности судовых конструкций. – Горький, 1987. С. 23–29.
3. **Shakerley, T. M.** Elastic buckling of plates with eccentrically positioned rectangular perforations / Shakerley T. M., Brown C. J. // Int. J. Mech. Sci. 1996. 38 N8–9. С. 825 – 838.
4. **Налоев, В.Г.** Некоторые вопросы устойчивости судовых пластин с вырезами. дисс... канд. техн. наук / В.Г. Налоев. – Горький, 1972.
5. **Саусвелл, Р.В.** Введение в теорию упругости для инженеров и физиков / Р. В. Саусвелл. – М., 1948.
6. **Жуков, А. Е.** Исследование устойчивости квадратных изотропных пластин, содержащих прямолинейные центральные трещины / А. Е. Жуков, В. Г. Налоев // Современные проблемы прикладной механики: труды НГТУ/ НГТУ. – Н. Новгород. 2004. Т. 43. С. 85–89.
7. **Жуков, А. Е.** Анализ устойчивости пластин с трещинами / А. Е. Жуков, В.Г. Налоев // Современные технологии в кораблестроительном и энергетическом образовании, науке и производстве: материалы Всероссийской науч.-техн. Конференции / НГТУ. – Нижний Новгород. 2006. С. 425–428.
8. **Волков, В.М.** Предельная прочность, надежность и остаточный ресурс тонкостенных конструкций с повреждениями / В. М. Волков, А. А. Миронов, А. Е. Жуков // Надежность и ресурс в машиностроении: Вестник ВГАВТ. – Н. Новгород: Изд-во ВГАВТ. 2006. Вып. 16. С. 36–52.

*Дата поступления
в редакцию 09.02.2010*

V. Volkov, A. Zhukov

THE RESEARCHES OF BEHAVIOUR OF PLATES WITH CENTRAL CRACKS

The problems of theoretical and experimental research of buckling of thin elastic rectangular plates with various orientation cracks are considered. Dependences of a critical load of plates on length of cracks containing in them are found.

Key words: buckling, thin elastic rectangular plates, critical load, length of cracks.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311.22

А.Б. Лоскутов, Г.Я. Вагин, Е.Б. Солнцев, А.Г. Воеводин,
Е.Н. Соснина, А.М. Мамонов, А.А. Петров

КОНЦЕПЦИЯ ПРИМЕНЕНИЯ И ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ СОЗДАНИЯ МИНИ-ТЭЦ НА БАЗЕ ГАЗОПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ*

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В статье сформулирована концепция применения мини-ТЭЦ в различных секторах экономики России. Показаны основные технические решения при разработке типовых проектов газопоршневых мини-ТЭЦ мощностью от 0,5 до 4 МВт на базе отечественных энергоагрегатов.

Ключевые слова: мини-ТЭЦ, концепция применения, разработка типового ряда, пилотные проекты.

В России в 2007 г. на тепловых электростанциях было выработано 674 млрд кВт·ч электроэнергии, в том числе: на газовых – 490 млрд кВт·ч со средним КПД 38%; на каменном угле – 172 млрд кВт·ч со средним КПД 37%; на мазутных – 5 млрд кВт·ч со средним КПД 37% и на дизельных – 7 млрд кВт·ч со средним КПД 22% [1]. Такие низкие КПД являются результатом большой доли устаревшего оборудования (до 40%) на тепловых электростанциях России. Только 1,5% электроэнергии было выработано на станциях, соответствующих верхним границам КПД, установленным Международным энергетическим агентством (МЭА): для станций на угле 48%, на газе 60%, на жидком топливе 50%.

Из приведенных данных видно, что коэффициент использования топлива на российских электростанциях очень низок. Более высокий КПД имеют ТЭЦ. Однако крен на строительство только крупных ТЭЦ, который был взят в 70-х годах XX в., привел к тому, что их КПД составляет только 60-65%. Это связано с их необеспеченностью тепловой нагрузкой и большими расстояниями от потребителей тепла, приводящими к значительным его потерям (до 30%).

В последние годы во многих странах резко возрос интерес к мини-ТЭЦ мощностью от 1 до 20 МВт. Это объясняется тем, что их КПД удалось довести до 80-90%, малые сроки монтажа (1-2 года стационарных и 1-2 месяца на платформах), более низкие капиталовложения (срок окупаемости от 2 до 5 лет), возможность максимального приближения к потребителям электроэнергии и тепла, меньшие затраты на эксплуатацию, широкая гамма использования различных видов топлив и ряд других положительных качеств.

Большую роль малая энергетика играет в обеспечении надежности энергоснабжения и энергетической безопасности потребителей электрической и тепловой энергии, которая является важной компонентой национальной безопасности страны и трактуется как состояние защищенности граждан, общества, государства, экономики от обусловленных внутренними и внешними факторами угроз дефицита всех видов энергии и энергетических ресурсов.

По ситуационному признаку при анализе энергетической безопасности выделяют три основных варианта, соответствующих нормальным условиям функционирования, критическим и чрезвычайным ситуациям. Энергетическая безопасность в условиях нормального функциони-

* Исследования выполнены по государственному контракту с Федеральным агентством по науке и инновациям © Лоскутов А.Б., Вагин Г.Я., Солнцев Е.Б., Воеводин А.Г., Соснина Е. Н., Мамонов А.М., Петров А.А., 2010.

рования связывается с необходимостью обеспечения в полном объеме обоснованных потребностей в энергетических ресурсах. В критических и чрезвычайных ситуациях энергетическая безопасность требует гарантированного обеспечения жизненно важных объектов.

В связи со значительной выработкой технического ресурса объектов большой энергетики возрастает влияние на энергетическую безопасность аварий, взрывов, пожаров техногенного происхождения, а также стихийных бедствий.

События последних лет (авария на подстанции «Чагино», авария на Саяно-Шушенской ГЭС и др.) показали существенную неустойчивость в обеспечении электрической энергией потребителей от централизованных энергосистем.

В последние годы увеличивается число аварий от природных катаклизмов.

Весьма уязвимыми являются централизованные энергосистемы и с военной точки зрения. Например, с помощью сравнительно недорогих боевых блоков, разбрасывающих проводящие нити или графитовую пыль, НАТО удалось за двое суток вывести из строя до 70% электроэнергетических систем Югославии.

Уязвимыми они и для террористических актов. Поэтому опасность потери энергоснабжения ответственных объектов весьма значительна.

Повысить энергетическую безопасность потребителей можно за счет более широкого применения мини-ТЭЦ. Рынок применения мини-ТЭЦ в России охватывает следующие направления:

1. *Все добывающие отрасли ТЭК*, особенно в отдаленных районах (Север, Дальний Восток и др.). Стоимость передачи 1 кВт электрической энергии в Северные районы по линиям 110 кВ и выше в 3-10 раз дороже стоимости 1 кВт мощности мини-ТЭЦ. Кроме того, ЛЭП 110 кВ и выше в этих районах имеют большую повреждаемость. Наличие в добывающих отраслях собственного топлива (газ, попутный газ, метан, и др.) делают мини-ТЭЦ в этих районах безальтернативными.

2. *Промышленность*. Значительный потенциал для сооружения мини-ТЭЦ имеется в следующих отраслях промышленности: металлургическая, химическая, нефтехимическая, нефтеперерабатывающая, строительная, целлюлозно-бумажная, текстильная, пищевая.

Основные назначения мини-ТЭЦ:

- максимальное использование на предприятиях вторичных энергоресурсов, особенно низкопотенциальных;
- повышение надежности электроснабжения технологий, перерыв в электроснабжении которых может привести к взрывам, пожарам, опасности для жизни людей, большому ущербу от повреждения оборудования и браку продукции;
- снижение стоимости покупаемых энергоносителей и соответственно снижение себестоимости выпускаемой продукции;
- возможность расширения предприятий при недостатке мощностей в энергосистемах.

3. *Предприятия и объекты оборонного комплекса*. Основные назначения – повышение надежности энергоснабжения и энергоснабжение удаленных от энергосистем объектов.

4. *Коммунальное хозяйство*. Снабжение теплом и электричеством поселков, домов отдыха и санаториев, а также районов новой застройки больших городов.

В настоящее время электрическую энергию городские объекты получают от ЕЭС или от ТЭЦ, а тепловую – от ТЭЦ или котельных. В ряде городов тепловые трассы от ТЭЦ до потребителей исчисляются десятками километров, а потери тепловой энергии в таких сетях достигают до 20-30% от передаваемой теплоэнергии.

В последнее время бурное строительство новых домов и офисов привело в ряде городов к нехватке мощностей существующих систем электро- и теплоснабжения. Стоимость подключения 1 кВт новых мощностей электроэнергии в г. Москва достигла 31 тыс. рублей. Коэффициент полезного использования теплоты на существующих ТЭЦ составляет 60-65%. Срок службы многих котельных превышает 20 лет, и нужна их модернизация. Количество аварий в системах теплоснабжения в зимнее время с каждым годом возрастает. Большое

число аварий в системах электро- и теплоснабжения возникает и от климатических факторов (бури, ураганы, сильные снегопады, обледенение проводов ЛЭП и т.д.).

Таким образом, надежность электро- и теплоснабжения городов с каждым годом падает, поэтому основным критерием необходимости сооружения мини-ТЭЦ в городах является обеспечение надежности и энергетической безопасности потребителей тепловой и электрической энергии.

Для городских объектов возможны следующие направления внедрения мини-ТЭЦ:

- снабжение электрической и тепловой энергией вновь строящихся городских объектов при отсутствии резервов электрической мощности в районах новой застройки. В качестве агрегатов мини-ТЭЦ необходимо применять газопоршневые, так как газотурбинные агрегаты требуют сооружения газокompрессорных дожимных станций, минимально допустимое расстояние которых от жилых домов должно быть не менее 500 м;
- замена котельных, срок эксплуатации которых составляет 20 и более лет (таких котельных в России около 20 тыс);
- повышение надежности электро- и теплоснабжения центров крупных городов. Мини-ТЭЦ позволяют разгрузить электрические и тепловые сети центра города, обеспечить стабильное качество тепловой и электрической энергии и делают возможными подключение новых потребителей.

Децентрализация источников энергоснабжения позволит снизить пиковый расход топлива примерно в четыре раза по сравнению с вариантом использования возможностей энергосистем, а с вариантом крышных котельных – в два раза. Принцип энергообеспечения жилых микрорайонов от мини-ТЭЦ сочетает два важнейших элемента – экономическую эффективность и экологическую безопасность, он относится к энергосберегающим технологиям.

Экономия бюджетных средств при децентрализованном электро- и теплоснабжении городов обеспечивается за счет:

- отказа от строительства относительно дорогостоящих линий электропередач, пониженных подстанций, тепловых пунктов и крышных котельных;
- резкого снижения стоимости инженерных коммуникаций за счет значительного уменьшения их протяженности и исключения теплотрасс с следовательно снижением эксплуатационных и ремонтных издержек;
- уменьшения удельного расхода природного газа для получения электрической и тепловой энергии за счет более высокого КПД агрегатов и коэффициента полезного использования топлива и, соответственно, экономии этого вида топлива.

5. *Сельское хозяйство.* Использование биогаза и снабжение теплом и электричеством удаленных сельскохозяйственных объектов деревень.

По прогнозам [2], в 2012 г. потребление электроэнергии в России достигнет уровня 1990 г. – 1073 млрд кВт·ч. Учитывая, что за период с 1990 по 2009 гг. ввод новых мощностей электростанций был минимальным, а износ оборудования на многих действующих достигает 60%, может возникнуть угроза энергетической безопасности России и снижение темпов роста ВВП, так как потребителям не будет хватать электрической энергии.

Чтобы избежать этого, в «Прогнозе развития электроэнергетики России на период до 2020 – 2030 годов» предусмотрено ввести до 2015 г. 101 млн кВт новых мощностей электростанций. Упор сделан на крупные электростанции. Для ввода такой мощности потребуется 12 трлн рублей. Учитывая, что сроки строительства крупных электростанций составляют 4–5 лет и влияния мирового экономического кризиса, можно сказать, что эти планы не будут выполнены, и угроза энергетического кризиса к 2012 г. вполне реальна.

Уйти от энергетического кризиса можно путем строительства мини-ТЭЦ. Малые сроки их сооружения и минимальные капитальные затраты делают их привлекательными для инвесторов и крупных промышленных предприятий. Затраты на ввод в эксплуатацию мини-ТЭЦ мощностью 100 млн кВт будут в 3-4 раза меньше, чем на крупные электростанции.

В соответствии с теорией техноценозов, которая широко применяется в Японии, США и других странах, любая техническая система в условиях рынка эффективно функционирует, если производительность или мощность входящих в нее элементов (предприятий, электростанций и т.д.) изменяется по экспоненте. Применительно к электроэнергетике это означает, что должно быть разумное сочетание мощностей электростанций (крупные, средние, мелкие). В бывшем СССР этот принцип никогда не выполнялся: содержались лишь крупные электростанции, так как считалось, что они более экономичны. Доведение КПД мини-ТЭЦ до 80–90% полностью опровергают этот довод.

Возможными вариантами мини-ТЭЦ являются:

- на базе газотурбинных установок;
- на базе паротурбинных установок;
- на базе парогазовых установок;
- на базе газопоршневых двигателей;
- на базе дизельных двигателей;
- на базе возобновляемых ТЭР (опилки, биотопливо, этанол и т.д.).

Большую работу по разработке и применению газотурбинных и газопоршневых энергоагрегатов ведет ОАО «Газпром». В настоящее время на объектах работает более 1200 таких энергоустановок.

Как показывают исследования, в диапазоне мощностей от 3 до 6000 кВт газопоршневые энергетические установки обладают лучшими экономическими, надежностными и экологическими характеристиками [3].

Учитывая большую актуальность применения мини-ТЭЦ в России, Нижегородским государственным техническим университетом им. Р.Е. Алексеева при участии авторов данной статьи по контракту с Федеральным агентством по науке и инновациям была выполнена НИОКР на тему «Разработка проектно-конструкторской и технологической документации на типовые проекты газопоршневых мини-ТЭЦ мощностью 0,5; 1,0; 2,0; и 4,0 МВт на базе отечественных энергоагрегатов».

В выполнении данной НИОКР также принимали участие:

- Институт высоких температур РАН (г. Москва);
- ООО НПО «Термэк» (г. Москва);
- ОАО «РУМО» (г. Н. Новгород).

В процессе проведения НИОКР были проведены следующие исследования:

1. Разработаны технические требования и критерии для создания типового ряда отечественных мини-ТЭЦ мощностью 0,5; 1,0; 2,0 и 4,0 МВт.

Основными требованиями контракта являются:

- срок службы оборудования – не менее 200 000 ч;
- удельная стоимость оборудования не должна превышать 19 000 руб. за 1 кВт мощности;
- электрический КПД должен быть не менее 37%;
- коэффициент использования топлива должен быть не менее 86%;
- срок окупаемости строительства мини-ТЭЦ должен быть не более 3 лет;
- все оборудование должно быть российского производства.

Основными критериями являются: требования надежности, компактности, быстроты пуска и приема нагрузки, простоты эксплуатации и длительности работы без обслуживания, высокая степень автоматизации, малый срок окупаемости, экологичность.

2. Разработана конструкторская документация на тепловой ряд мини-ТЭЦ мощностью 0,5 и 1,0 МВт с газопоршневыми агрегатами электрической мощностью 0,2 и 0,3 МВт производства ОАО «ЯМЗ» (г. Ярославль).

3. Проведены стендовые испытания и отработаны оптимальные режимы работы мини-ТЭЦ мощностью 0,5 и 1,0 МВт с газопоршневыми агрегатами производства ОАО «ЯМЗ» в соответствии с разработанной программой и методикой. Испытания показали высокую эф-

фективность, надежность и экологическую безопасность продукции и соответствие предъявляемым требованиям технического задания. По результатам испытаний оформлены соответствующие протокол и акт, а также внесены корректировки в проектную документацию с целью повышения эффективности и надежности эксплуатации энергоустановки.

4. Разработана конструкторская документация на типовой ряд мини-ТЭЦ мощностью 2,0 и 4,0 МВт с газопоршневыми агрегатами единичной мощностью 1,0 МВт производства ОАО «РУМО» (г. Н. Новгород). По данной конструкторской документации планируется строительство опытных образцов энергоустановок с целью их дальнейшего тиражирования.

5. Проведены стендовые испытания газопоршневого агрегата мощностью 1 МВт производства ОАО «РУМО» с улучшенными техническими характеристиками. Испытания показали высокую эффективность, надежность и соответствие требованиям, предъявляемым техническим заданием.

6. Выполнено обобщение экспериментальных данных и доработка схемных решений для тепломеханических блоков мини-ТЭЦ. Используемые схемы позволяют безопасно эксплуатировать энергоустановку при различных режимах эксплуатации (номинальном или долевом режимах, при отсутствии потребности в тепловой энергии и т.д.), оповещать обслуживающий персонал о неполадках в работе и отключать агрегаты при возникновении критических ситуаций. По результатам исследований разработан альбом схемных решений.

7. Разработана проектная документация на тепломеханические блоки мини-ТЭЦ единичной мощностью 0,3 МВт и 1,0 МВт в контейнерном исполнении, включающая ведомости комплектующих изделий, гидравлические и электромеханические схемы, а также альбом чертежей, в котором приводятся чертежи общего вида, сборочные, узловые и детальные. На основании приведенной документации планируется изготовление серийных образцов.

8. Выполнена сертификация тепломеханического оборудования мини-ТЭЦ (газопоршневых агрегатов и теплогенераторов) в соответствии с действующим законодательством. Получено шесть сертификатов соответствия Госстандарта России.

9. Выполнена разработка технологического проекта для постановки мини-ТЭЦ на серийное производство и технологической документации по серийному изготовлению модульных теплогенераторов и газопоршневых агрегатов для мини-ТЭЦ. За основу были приняты опытно отработанные технологические процессы серийного изготовления мини-ТЭЦ ООО «Электро-ЛТ» (совместно с ОИВТ РАН, г. Москва), теплогенераторов ООО «Термэк» (г. Москва) и газопоршневых агрегатов завода «РУМО» (г. Н. Новгород), продукция которых в течение многолетней эксплуатации доказала высокую надежность и простоту изготовления и ремонта.

10. Разработан проект типовой региональной программы развития малой энергетики на базе мини-ТЭЦ с учетом энергетического баланса региона (на примере Нижегородской области), предусматривающий внедрение энергоустановок различных электрических и тепловых мощностей для замены (или при отсутствии) централизованных источников снабжения с целью повышения экономичности и надежности энергообеспечения.

11. Разработана проектная документация пилотных проектов мини-ТЭЦ нового поколения электрической мощностью 0,5; 1,0; 2,0 и 4,0 МВт на базе газопоршневых агрегатов ОАО «ЯМЗ» и «РУМО», теплогенераторов и интенсифицированных теплообменных аппаратов ООО «Термэк». Строительство данных энергоустановок позволит существенно повысить эффективность и надежность их эксплуатации.

12. Проведены маркетинговые исследования по использованию отечественных мини-ТЭЦ в различных регионах России, которые показали экономическую целесообразность строительства энергоустановок с газопоршневыми агрегатами при возможности использования топливного природного или попутного газа. Разработаны рекомендации по строительству и эксплуатации когенерационных установок, предусматривающие различные схемы подключения к тепловым и электрическим сетям с учетом сложившейся инфраструктуры потребления и существующих источников энергии.

Внедрение результатов данной НИОКР

Смонтирована мини-ТЭЦ в поселке Нижний Архыз в Карачаево-Черкессии мощностью 0,5 МВт на базе газопоршневых агрегатов фирмы ОАО «ЯМЗ».

Смонтированы и выполнена отладка режимов работы мини-ТЭЦ мощностью по 4,0 МВт в г. Павлово Нижегородской области и в г. Белгород на базе газопоршневых агрегатов фирмы ОАО «РУМО» (рис. 1 и рис. 2).



Рис. 1. Опытно-промышленная установка на Павловском автобусном заводе

(г. Павлово, Нижегородская область, Россия):
 мини-ТЭЦ 4 МВт; двигатель ДГ98М; $N_{эл} = 1000$ кВт;
 $N_T = 1300$ кВт; электрический КПД – 34%;
 коэффициент использования топлива – 80%



Рис. 2. Опытно-промышленная установка на Белгородском комбинате ЖБК

(г. Белгород, Россия):
 мини-ТЭЦ 4 МВт; двигатель 8ДГ22Г1;
 $N_{эл} = 1000$ кВт; $N_T = 1400$ кВт; электрический КПД –
 37 %; коэффициент использования топлива – 86 %

Библиографический список

1. Государственная программа энергосбережения в Российской Федерации на 2020–2020 гг. – М.: Минэнерго РФ, 2009. – 340 с.
2. Основные параметры прогноза социально-экономического развития РФ на период до 2020–2030 гг. – М.: Минэкономразвития РФ, 2008. – 210 с.
3. Технические и экономические критерии выбора мощности мини-ТЭЦ на промышленных предприятиях / Г. Я. Вагин [и др.] // Промышленная энергетика. 2006. №4. С. 38 – 43.

*Дата поступления
в редакцию 15.01.2010*

A. Loskutov, G. Vagin, E. Solntsev, A. Voevodin, E. Sosnina, A. Mamonov, A. Petrov

**CONCEPTION OF APPLICATION AND MAIN TECHNOLOGICAL SOLUTIONS OF
CREATION OF MINI HEAT-ELECTRIC GENERATION STATIONS AT THE BASIS OF
GAS RECIPROCATING ENGINES**

The article formulates conception of application of mini heat-electric generation stations in different economy sectors in Russia. The article demonstrates basic technical solutions at development of typical projects of gas reciprocating mini heat-electric generation stations with the capacity from 0.5 up to 4MW at the basis of home-produced power plants.

Key words: heat-electric generation stations, conception of application, development of a typical range, pilot projects

УДК 621.316.3

Б.В. Папков¹, М.В. Шарыгин¹, С.П. Крайнов²**АСПЕКТЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
В УСЛОВИЯХ РЫНКА**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
ООО «Энерго Инжиниринг»² (Н. Новгород)

Исследованы некоторые проблемы надежности электроснабжения в условиях рынка при решении задач проектирования и эксплуатации. Проанализированы возможные пути повышения надежности и сделаны предложения по их реализации.

Ключевые слова: электроэнергетика, надежность, норматив, тариф, рынок, проектирование, эксплуатация.

Надежность в электроэнергетике – это комплексное свойство, определяющееся как способность энергосистемы выполнять функции по производству, передаче, распределению и снабжению потребителей электрической энергией в требуемом количестве и нормированного качества путем взаимодействия генерирующих установок, электрических сетей и электроустановок потребителей. При этом должен выполняться ряд дополнительных условий, среди которых:

- обеспечение договорных условий спроса на электроэнергию в любой (текущий или перспективный) момент времени;
- противостояние возмущениям, вызванным отказами элементов энергосистемы, включая каскадное развитие аварий и наступление форс-мажорных обстоятельств;
- по возможности быстрое и полное восстановление своих основных функций после их нарушения.

Вопреки мнению, что в рыночных условиях нормативы надежности не нужны, так как надежность становится покупаемой услугой (надежность на любую сумму), практика стран, перешедших к развитому рынку, показала, что надежность нуждается в защите от рынка. Все крупнейшие системные аварии последнего времени, произошедшие в США, Канаде, Италии, (2003 г.); в России, на подстанции Чагино (2005 г.) и Саяно-Шушенской ГЭС (2009 г.) вызваны несоответствием действующей системы поддержания надежности жизнеобеспечивающих энергообъектов и энергообъединений новым рыночным условиям.

До последнего времени задача обеспечения надежности электроснабжения потребителей рассматривалась в основном применительно к верхним уровням иерархии ЕЭС и включала в себя оценку надежности параллельной работы электростанций и энергообъединений. На уровне вертикально-интегрированных энергокомпаний (региональных АО-энерго) эта задача ставилась и решалась комплексно, включая надежность топливообеспечения, производства, транспорта и отпуска потребителям тепла и электроэнергии. В рыночных условиях надежность электроснабжения потребителей должна рассматриваться как товар с соответствующей ценой. Этот товар реализуется через услуги энергетического рынка и является предметом договорных отношений между его субъектами. Разделение ответственности за надежность не только по вертикали «система или поставщик – потребитель электроэнергии», но и внутри отрасли, на этапах текущего функционирования и перспективного планирования и развития, приводит к необходимости решения новых задач управления надежностью и ущербом. Для их решения требуется введение системы мониторинга количественных оценок надежности, управления надежностью, страхования ответственности, санкций и др.

Однако до сих пор отсутствует четкие и понятные концепции управления надежностью

электроснабжения, которые необходимы для создания рычагов влияния на надежность со стороны потребителей и решения вопросов, связанных с заинтересованностью энергокомпаний в повышении надежности. Федеральный Закон «Об электроэнергетике» требует установления между всеми субъектами электроэнергетического рынка экономически сбалансированных отношений на основе платы за надежность и полного восстановления убытков из-за ненадежного электроснабжения. Он устанавливает ответственность Системного оператора и энергосбытовой компании перед потребителем за надежность его электроснабжения. Однако для выполнения этих требований необходим глубокий анализ технологических особенностей и технико-экономических последствий внезапных и преднамеренных, полных и частичных ограничений в величине потребляемой мощности и (или) отключений потребителей электрической энергии в связи с нарушениями режима их электроснабжения. Фактически проблема обеспечения надежности электроснабжения лишь заявлена, но не решена до сих пор ни с теоретической, ни с практической стороны.

Вместе с тем, в странах с развитой системой рыночных отношений и осуществивших либерализацию электроэнергетики в направлении введения конкурентных рынков электроэнергии, в том числе США, энергообъединениях USTE и Nordel, создается нормативно-правовая база, соответствующая новым условиям конкурентной среды. Это касается критериев и правил обеспечения надежности работы энергосистем и энергообъединений. Данная работа проводится с привлечением к обсуждению широкого круга заинтересованных сторон и еще не закончена, что указывает на сложность проблем обеспечения надежности, возникающих при либерализации и введении конкурентных рынков электроэнергии. Критерии надежности дифференцируются применительно к двум ее составляющим: балансовой и режимной.

Под балансовой надежностью энергосистемы понимается ее способность обеспечивать совокупную потребность в электрической мощности и энергии потребителей с учетом ограничений, плановых и неплановых отключений элементов энергосистемы, ограничений на поставку энергоресурсов.

Под режимной надежностью понимается ее способность противостоять внезапным возмущениям, таким как короткие замыкания, непредвиденные потери крупных элементов энергосистемы, каскадные отказы работоспособности и др.

В энергообъединениях западных стран критерий балансовой надежности обычно основывается на вычислении показателя LOLP (Loss of Load Probability), характеризующего вероятность потери нагрузки. Нормированное значение этого показателя принимается обычно равным одному дню в 10 лет, что определяет более высокую вероятность бездефицитной работы энергосистемы, чем это принято в России. Применяются и более простые показатели надежности в виде величины полного резерва мощности и требований к пропускной способности электрической сети, основанных на критерии $N-1$.

Критерии режимной надежности в энергообъединениях США и европейских стран (USTE, Nordel) основываются на критерии $N-1$, а в ряде случаев и $N-k$. Так, в США к зонам управления, в рамках которых осуществляется непрерывный контроль за обеспечением баланса генерации и потребления, предъявляется условие, согласно которому все зоны управления должны работать так, чтобы в результате наиболее серьезных одиночных возмущений не было нарушений устойчивости, неконтролируемого деления или каскадного развития аварии. При авариях с потерей двух и более элементов должны быть также обеспечены устойчивость системы, термическая устойчивость элементов при возможных перегрузках по току, недопустимость выхода напряжения за допустимые пределы, каскадное развитие аварий. Вместе с тем, допускаются контролируемые ограничения нагрузки или ограничение поставки мощности.

В этих энергообъединениях каждый оператор передающей сети (TSO) несет ответственность за свою сеть. Оцениваются резервы активной и реактивной мощности, приемлемый уровень напряжения, предельная загрузка ЛЭП, границы устойчивости; осуществляется выбор систем РЗиПА и координация выбора устройств для обеспечения допустимых токов короткого замыкания; определяется политика в отношении обеспечения устойчивости и координируются меры по

ее обеспечению с другими TSO; происходит обмен информацией с соседними TSO о планируемом выводе оборудования электростанций и сетей.

Подкомитеты по устойчивости энергосистем международного института IEEE создали ряд рекомендаций по снижению опасности каскадного развития системных аварий, среди которых:

- стандарты надежности должны быть обязательными и проводимыми в жизнь путем значительных и действенных штрафов за их нарушение;
- стандарты надежности должны периодически пересматриваться с учетом опыта больших системных аварий и развития новых технологий;
- на уровне регулирующих органов должна быть ясно понята необходимость расходов и инвестиций для обеспечения системной надежности, включая инвестиции в новые технологии, а также определены пути возврата этих инвестиций через плату за пользование электрическими сетями;
- на уровне регулирующих органов должно быть продолжено продвижение исследований в области надежности из фондов правительств и промышленности для того, чтобы решить проблемы все более расширяющихся и усложняющихся энергообъединений.

В США в качестве меры нормативного и правового характера принят «Акт по электрической надежности 2004 года», устанавливающий обязательный характер стандартов надежности в объединенной энергосистеме. В Европе принят проект «Директивы в отношении мер по обеспечению надежности электроснабжения и инвестиций в инфраструктуру» (2003). Понимание того, что в электроэнергетике не все ладно с надежностью, существует и в среде российских энергетиков. В [1] констатируется: «При рыночных отношениях на первое место выдвигается получение энергокомпаниями прибыли. Нередко прибыль теперь получается в ущерб надежности».

В настоящей статье сделана попытка анализа двух аспектов обеспечения надежности электроснабжения в условиях рынка.

Аспект первый: проблема схемной надежности на стадии проектирования.

Известно, что основы надежной работы энергосистем закладываются на стадии их проектирования. В этой части в России накоплен огромный опыт. В процессе формирования ЕЭС СССР была отработана иерархическая система проектирования ее развития. Но, несмотря на прогрессивные идеи, содержащиеся в Законе «Об электроэнергетике», направленные на увеличение эффективности электроснабжения потребителей, имеется целый ряд действующих нормативных документов, содержащих устаревшие нормы построения (проектирования) схем электроснабжения конечных потребителей. Поэтому заказчик, который в зависимости от особенностей технологического процесса сам устанавливает (заявляет) необходимый уровень надежности (категорию надежности электроснабжения по ПУЭ), при проектировании схемы электроснабжения может получить совершенно разный уровень надежности при формальном соблюдении требований существующих нормативных документов.

При построении схем электрических сетей, предназначенных для питания конечных потребителей электроэнергии (как правило, сети напряжением 110 кВ и ниже) проектные организации руководствуются требованиями следующих документов: инструкцией по проектированию городских электрических сетей (РД 34.20.185-94); методическими рекомендациями по проектированию развития энергосистем, 2003 г.; нормами технологического проектирования электроснабжения промышленных предприятий (НТП-94, «Тяжпромэлектропроект»). Правила, которые можно непосредственно считать относящимися к надежности, как правило, размещены в разных разделах нормативных документов вместе с правилами рационального построения электрических сетей, а те или иные нормативы надежности представлены как в явном, так и в неявном виде. Сегодня таких рекомендаций недостаточно.

Известно, что к числу независимых источников питания относятся две секции или системы шин одной или двух электростанций и подстанций при одновременном соблюдении двух условий: 1) каждая из секций или систем шин получает питание от независимого ис-

точника; 2) секции (системы) шин не связаны между собой или имеют связь, автоматически отключающуюся при нарушении нормальной работы одной из секций (систем) шин. Для этих случаев подходит как схема питания ГПП предприятия по двухцепной ВЛ протяженностью 60 км присоединенной к разным системам (секциям) шин узловой подстанции, так и схема с питанием этого ГПП по двум одноцепным ВЛ протяженностью 5 км с присоединением их к системам (секциям) шин разных подстанций. Очевидно, что реальный уровень надежности (например, ожидаемое число часов простоя ГПП в год) будет различным.

В отношении электроприемников второй категории, в отличие от первой и третьей, длительность нарушения электроснабжения строго не оговаривается, хотя питание их также должно предусматриваться от двух независимых источников. Очевидно, что надежность схемы, отвечающей требованиям низшей категории, реально может оказаться выше надежности схемы, отвечающей требованиям более высокой категории, и наоборот.

Рекомендации по проектированию электрической сети также носят качественный характер и не имеют конкретных указаний по построению структуры сети в зависимости от уровня надежности электроснабжения. Таким образом, при проектировании схемы электроснабжения потребителя с учетом надежности приходится полагаться больше на здравый смысл проектировщика, чем на требования нормативных документов. Представляется, что и само разделение на категории с появлением понятия «плата за надежность» становится неактуальным.

Для повышения роли фактора надежности электроснабжения необходимо в действующих методических рекомендациях по проектированию развития энергосистем (МР) выделить нормативы надежности в виде самостоятельного раздела. Предложения по структуре и примерному содержанию таких нормативов приведены в [2]. Одним из основных критериев при проектировании является обеспечение возможности для потребителей получения электроэнергии с требуемой надежностью. Требуемый заказчиком (потребителем) уровень надежности может быть достигнут при соблюдении следующих условий:

- схемы присоединения электростанций и подстанций к основной сети должны обеспечивать надежность питания энергоузлов и транзит мощности с учетом критерия $N-1$;
- пропускная способность в сечениях основной электрической сети ОЭС обеспечивает покрытие максимума нагрузки после аварийного отключения любого ее элемента: линии (цепи двухцепной линии), трансформатора в нормальной схеме сети (критерий $N-1$);

Однако эти условия достаточно расплывчаты, неопределенны и порождают много вопросов, поскольку у большинства проектировщиков, эксплуатационников и исследователей нет однозначного понимания, что такое N и что означает «минус 1».

Исходно предполагалось, что аварийное отключение любого элемента энергосистемы не требует применения средств противоаварийного управления. Трактовка, используемая в МР характеризует только установившиеся режимы. В соответствии с ней обсуждаемый критерий означает, что в послеаварийных режимах, сформировавшихся после отключения указанных выше элементов, за счет реализации внутрисистемных резервов мощности покрытие максимума нагрузки обеспечивается. Но в этой формулировке не говорится о допустимости автоматических и диспетчерских действий для сохранения послеаварийного режима.

Известно предложение [3] о понимании под критерием $N-1$ такого положения дел, при котором качественное снабжение электроэнергией потребителей (за исключением потребителей с управляемой нагрузкой), а также нормальная работа электростанций (за исключением электростанций, предоставляющих системные услуги по изменению своей нагрузки) должно обеспечиваться при внезапном отключении одного из элементов системы. В качестве выпадающих элементов рассматриваются крупные генерирующие блоки и любые элементы единой национальной электрической сети, имеющие наибольшее влияние на надежность системы в целом. При этом не должно возникать ограничения энергопотребления, не предусмотренного договорами на предоставление системных услуг, недопустимых перегрузок оборудования электростанций, подстанций и ЛЭП, отклонений напряжения и частоты, опасных для работы генерирующего оборудования и потребителей электроэнергии, оборудования электрических сетей, нарушения устойчивости. При

условии оплаты участия субъектов электроэнергетики в регулировании нагрузки средствами ПА, рассматриваемом как системная услуга, подобные отключения не считаются нарушениями электроснабжения или режимов выработки энергии на электростанциях.

На основании изложенного представляется целесообразным:

- не отходя от общепринятого понимания критерия $N-1$ принять иные обозначения, например, для варианта МР – « $N-1,У$ », что означает выполнение критерия по условиям установившихся режимов, а для варианта [3] – « $N-1,А$ », что учитывает возможность использования ПА;
- переходить к выбору схемных решений при проектировании на основе расчета минимума затрат, связанных с увеличением надежности и снижением ущерба как от недоотпуска электроэнергии, так и в связи с нарушением или срывом основного технологического процесса конечных потребителей электроэнергии.

Естественно, что реализация этих предложений возможна только при радикальном пересмотре перечисленных выше нормативных документов, введении новых норм, регламентирующих принципы оценки количественных показателей надежности для построения на их основе оптимальных схем электроснабжения.

Аспект второй: разработка принципиальной схемы управления уровнем надежности электроснабжения.

Существующая система оценки надежности электроснабжения, используемая энергокомпаниями, не мотивирует их разрабатывать и внедрять мероприятия и оборудование, способствующие повышению надежности электроснабжения потребителей [4]. Известно, что большинство отказов основного оборудования энергосистемы (субъектов рынка электроэнергии) демпфируется внутри самой системы, не доходя до потребителей. Однако даже такие отказы оказывают существенное влияние на надежность выполнения субъектами рынка своих функций. Поэтому все они должны обладать ресурсами для компенсации как собственных ущербов, так и ущербов, нанесенных другим. Из-за отсутствия экономически выгодных мотивов энергокомпания вынуждены обосновывать затраты, связанные с повышением надежности электроснабжения потребителей, что часто приводит к снижению их собственной прибыли. Поэтому наиболее эффективным путем решения проблемы надежности на сегодняшний день является экономическое стимулирование энергокомпаний в виде штрафов или дополнительных тарифов за обеспечение нормативной или договорной надежности электроснабжения потребителей. При этом очевидно, что любое увеличение уровня надежности может производиться только за счет средств потребителей электроэнергии.

Для того, чтобы уровень надежности электроснабжения соответствовал требованиям потребителей и перестал снижаться, требуется выполнение ряда условий:

- 1) простота и ясность оценки показателей надежности электроснабжения;
- 2) безусловная и неминуемая ответственность энергокомпаний за снижение уровня надежности потребителей;
- 3) соответствие платы за надежность ее фактическому уровню;
- 4) возможность влияния как потребителей, так и энергоснабжающей организации на надежность электроснабжения посредством платы за соответствующий ее уровень.

Реализовать первое условие можно путем разработки, утверждения и введения прогрессивных нормативов надежности для объектов электроэнергетики и потребителей. Эти нормативы могут быть представлены не в привычном виде частных и интегральных статистических показателей надежности, а в виде перечня мероприятий, реализуемых энергокомпаниями (рис. 1). Контроль за уровнем надежности в этом случае существенно упрощается. Отметим, что поскольку нормативные документы практически лишь на уровне деклараций и рекомендаций заявляют о надежности электроснабжения, предлагаемая система нормативов, на наш взгляд, может оказаться неплохим инструментом, позволяющим регулировать вопрос надежного электроснабжения потребителей [4, 5]. Если норматив надежности в натуральном выражении частично или полностью не отражает реальную структуру и (или) режим системы, то норматив надежности должен быть установлен в денежном выражении (рис. 1).

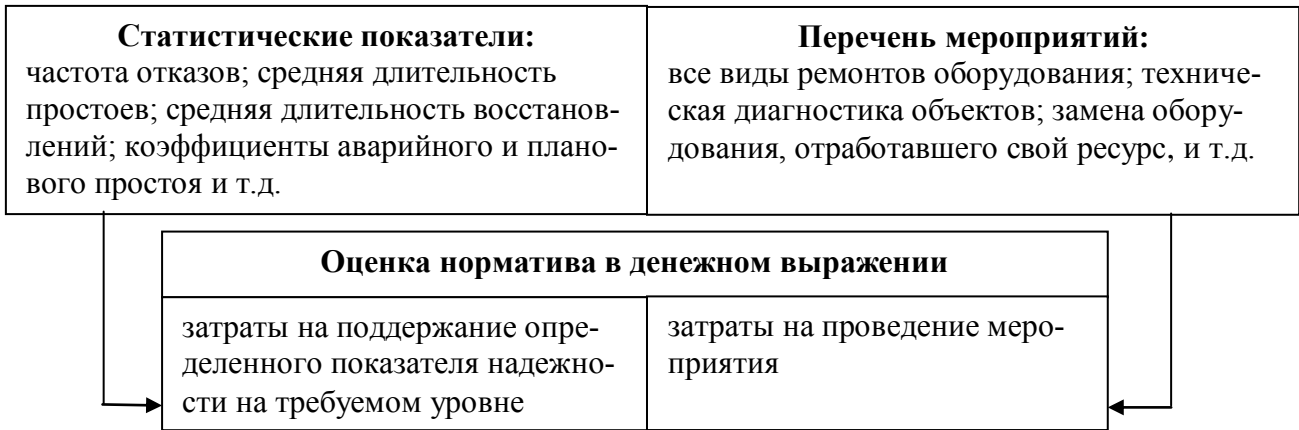


Рис. 1. Варианты нормативов надежности электроснабжения

Решение этой задачи связано с необходимостью оценки базового норматива надежности, который будет отражать тариф за надежность. Базовый норматив это усредненный наименьший уровень надежности электроснабжения, который удовлетворяет требования большинства потребителей. В этом случае появляется возможность оценки ее качественного уровня: низкий, средний, высокий и т.д.

Для выполнения второго условия необходимо законодательно установить четкую ответственность энергокомпаний за снижение уровня надежности. Невыполнение договорных или нормативных требований к надежности электроснабжения должно повлечь значительные штрафы. При этом возникает достаточно сложная задача контроля уровня надежности, что подразумевает огромную работу по непрерывному мониторингу уровней надежности узлов нагрузки (рис. 2).

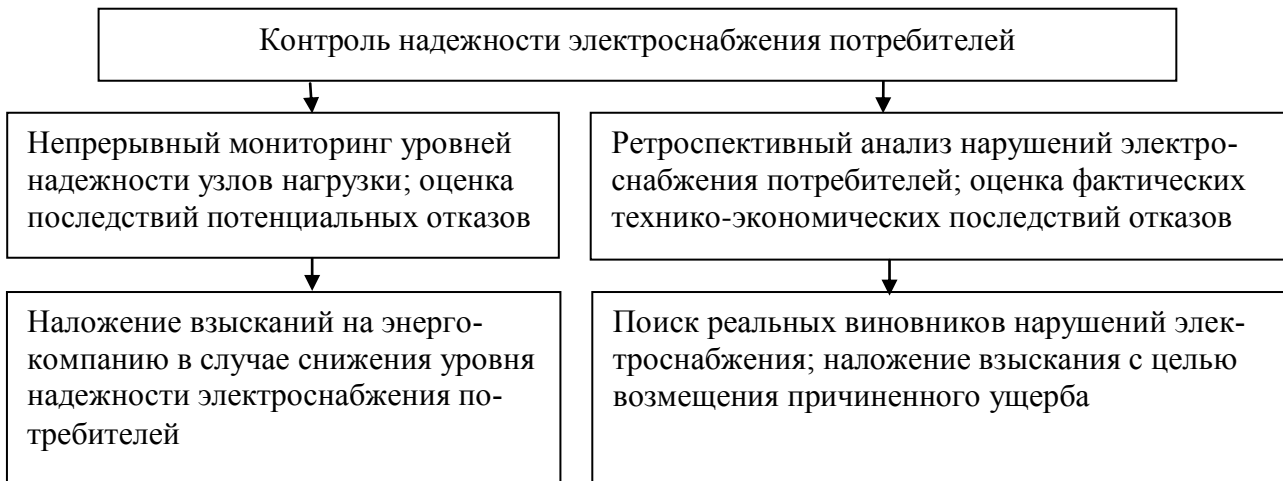


Рис. 2. Варианты обеспечения ответственности энергокомпаний за надежность электроснабжения потребителей

Мониторинг может осуществляться с помощью действенных инструментов теории вероятностей при управлении надежностью и рисками, уже хорошо зарекомендовавшими себя в наиболее технологически развитых отраслях (атомная энергетика). С их помощью становится возможным проводить объективную оценку надежности систем передачи электроэнергии и поиска количественных значений вкладов элементов и подсистем в повышение надежности реальной системы производства, передачи и распределения электроэнергии. Вероятно методы анализа позволяют учитывать влияние таких показателей, как:

- частота отказов и длительность восстановления всех типов оборудования;

- эффективность работы систем релейной защиты и автоматики;
- режим работы элементов электрических станций и подстанций;
- параметры послеаварийных режимов;
- вероятность полного/частичного нарушения процесса производства у потребителя; экономические последствия внезапного или преднамеренного, полного или частичного погашения потребителя.

Такой анализ должен проводиться для различных режимов работы питающей потребителя электрической сети (при максимальной, средней или минимальной нагрузке) и разных режимов производительности технологических агрегатов потребителя. По его итогам выявляется и ранжируется относительная важность влияния различных элементов генерации, сети и оборудования подстанций на возможный дефицит мощности или пропускной способности сети. Далее разрабатываются рекомендации по повышению надежности с точки зрения оптимизации и планированию технического обслуживания, финансирования, внесения изменений в порядок и (или) логику проводимых после возмущающего события диспетчерских переключений, а также изменений в порядок оперативного взаимодействия между персоналом различных структур, обеспечивающих работоспособность системы.

Потребитель, по данным этого анализа, получает возможность повышения показателей надежности электроснабжения за счет эффективного управления электропотреблением и ходом технологического процесса производства. На основе предлагаемого подхода становится возможным сравнение показателей надежности объектов генерации, питающей и распределительной сети до и после возможной реконструкции (модернизации) сети и выбор наиболее рационального варианта договорных условий электроснабжения. Хотя задача оптимизации расходов на повышение надежности решается в условиях определенности исходной информации, возникают сложности, связанные с ее многокритериальностью и относительно большой размерностью.

Другой, менее трудоемкий путь заключается в установлении ответственности энергокомпаний за конкретные, уже произошедшие нарушения электроснабжения потребителей (рис. 2). В этом случае виновник оплачивает фактический ущерб потребителей от нарушения электроснабжения. Однако при таком подходе должны быть установлены [6] и утверждены размеры штрафов в пользу пострадавших от нарушений электроснабжения потребителей и сроки их выплаты.

Для выполнения третьего и четвертого условий необходимо:

- разработать нормативно закреплённый базовый тариф за надежность, при котором потребитель получает минимальный уровень надежности, а энергокомпания обоснованное возмещение своих затрат на поддержание этого уровня;
- разработать механизм учета влияния потребителей на уровень надежности электроснабжения; сделать потребителя активным субъектом, управляющим надежностью [6, 7].

В зависимости от варианта обеспечения ответственности энергокомпаний за надежность возможны различные способы оплаты затрат энергокомпаний на поддержание надежности электроснабжения потребителей (рис. 3).

Потребитель получает надежность выше первоначального, минимального уровня при дополнительной ставке тарифа за ее повышенный уровень. При страховой системе оплаты страховщиком выступает энергокомпания. Влияя на риски [8], она может значительно сократить сумму выплат по страховым случаям. Таким образом, потребитель получает требуемый, индивидуальный уровень надежности.

Можно утверждать, что проблема надежности электроснабжения с течением времени будет все более и более обостряться, а ее оптимальное решение будет более сложным. Старение электроэнергетического оборудования и рост нагрузок не оставляют шансов найти простой и дешевый выход из сложившейся ситуации. Наиболее целесообразным в настоящий момент было бы создание Центра ответственности за надежность (рис. 4), например, на базе Системного оператора, который занимался бы решением этой проблемы.

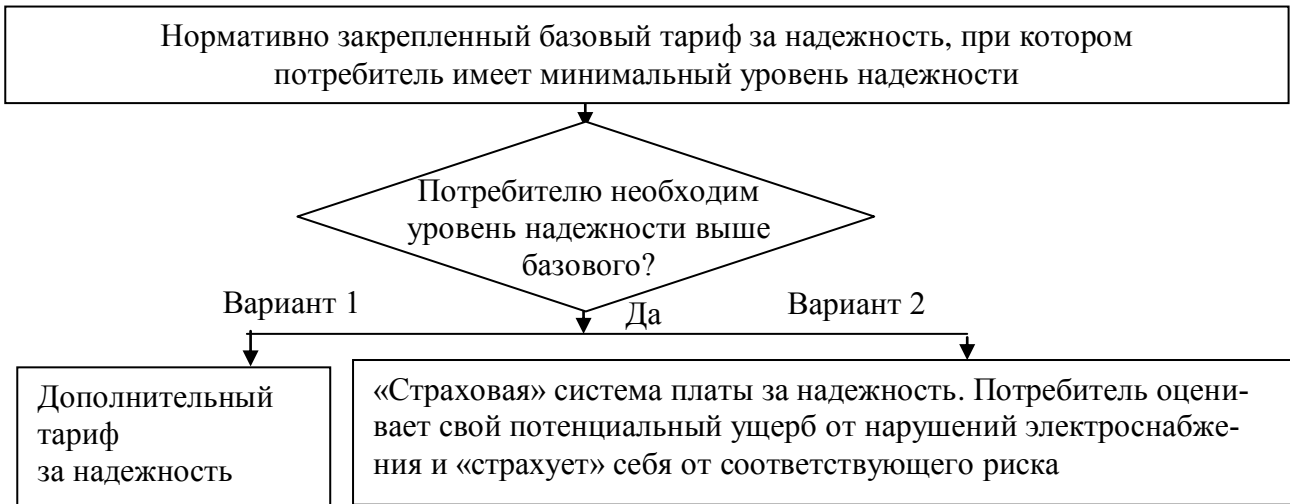


Рис. 3. Варианты возмещения затрат энергокомпаний на поддержание повышенной надежности электроснабжения



Рис. 4. Модель обеспечения и управления системной надежностью и надежностью электроснабжения

Выводы

1. Необходим пересмотр устаревших принципов и инструментария, регулирующих надежность электроснабжения потребителей; существующих нормативных документов; введение новых норм, регламентирующих принципы оценки количественных показателей надежности для построения на их основе оптимальных систем электроснабжения.

2. Предложенная схема управления надежностью вносит ясность в вопросы ответственности субъектов электроэнергетики за надежность, установления виновника возникновения ущерба у потребителей; размеров компенсации ущерба; повысит ответственность энергокомпаний в вопросы обеспечения надежности; позволит сделать «прозрачными» затраты энергокомпаний, упростит контроль за составляющими тарифа за электроэнергию, существенно повысит общеэкономическую эффективность систем электроэнергетики; потребители смогут влиять на уровень надежности; произойдет естественное деление ответственных и неответственных потребителей.

Библиографический список

1. **Дьяков, А.Ф.** Проблемы надежности и безопасности электроснабжения потребителей // Энергетик. 2006. № 2.
2. **Малкин, П.А.** Нормативы надежности при перспективном проектировании развития энергосистем // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып. 57. Задачи надежности систем энергетики для субъектов отношений в энергетических рынках. – Киев: Знания Украины, 2007. С. 10–11.
3. **Бондаренко, А.Ф.** О трактовке критерия надежности *N-1* / А.Ф. Бондаренко, В.П. Герих // Электрические станции. 2005. № 6.
4. Концепция обеспечения надежности в электроэнергетике. – М.: РАО «ЕЭС России», 2004.
5. Надежность систем энергетики. Сборник рекомендуемых терминов. – М.: ИАЦ Энергия., 2007. – 192 с.
6. **Папков, Б.В.** Надежность и эффективность электроснабжения / Б.В. Папков; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 1996. – 212 с.
7. **Папков, Б.В.** Вопросы рыночной электроэнергетики / Б.В. Папков, А.Л. Куликов. – Н. Новгород: Изд-во ВВАГС, 2005. – 282 с.
8. **Папкина, М.Д.** Риски субъектов электроэнергетического рынка / М.Д. Папкина, Б.В. Папков. – Н. Новгород: НГАСУ, 2007. – 65 с.

*Дата поступления
в редакцию 19.01.2010*

B.V. Papkov, M.V. Sharygin, S.P. Kraynov

THE ASPECTS OF RELIABILITY OF ELECTRICITY SUPPLY ON THE MARKET

The article touches upon some problems of reliability of electricity supply in solving the project tasks and testing on the market. It is analyzed the possible ways of increasing the reliability and made offers reaching its.

Key words: electric power systems, reliability, normative, rates, market, engineering, working.

УДК 62-83:621.313

А.Ю. Смирнов

ПРИМЕНЕНИЕ СЕТОЧНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РАСЧЁТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

ОКБ им. Африкантова

Рассматривается задача расчёта электромагнитного момента асинхронных двигателей методом конечных элементов (МКЭ), в том числе этапы создания модели, особенности её применения и исследования посредством гармонического анализа. Получено совпадение расчётного и экспериментального значений пускового момента герметичного асинхронного двигателя, применение МКЭ рекомендовано для расчёта электромагнитного момента нестандартных конструкций асинхронных двигателей.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, метод конечных элементов (МКЭ), электромагнитный момент, скольжение, механическая характеристика.

Повсеместное внедрение вычислительной техники в практику инженеров и исследователей требует применения расчётных методов, отражающих современный уровень развития вычислительных возможностей.

Наиболее глубокую картину электромагнитных процессов в любой электрической машине, в том числе и в асинхронной, обеспечивает метод конечных элементов (МКЭ) [1]. В настоящее время он реализован в ряде пакетов прикладных программ, позволяющих рассчитать векторный или скалярный магнитный потенциал узлов сетки, представляющей сеточную (конечно-элементную) модель машины. Постпроцессорная обработка этих результатов позволяет определить все необходимые характеристики объекта.

Метод и реализующее его программное обеспечение получили широкое применение в зарубежной и отечественной практике расчётов синхронных машин, в том числе с постоянными магнитами [2, 3], электромагнитных подшипников, электромагнитных механизмов.

Вместе с тем, в отечественных разработках асинхронных двигателей МКЭ и реализующие его сеточные модели машин используются недостаточно, что связано с наличием отработанных десятилетиями методик проектирования, имеющих достаточно простое математическое описание. Кроме того, сеточные модели машин с индуктированными токами несколько сложнее, требуют расчёта нестационарных (гармонических) полей и представлены, полностью или частично, конечными элементами с дополнительными степенями свободы по напряжению или току для проводящих областей машины.

Несмотря на это, МКЭ может стать незаменимым инструментом при выполнении поверочных расчётов нестандартных, многообмоточных и совмещённых электрических машин там, где использование классики проектирования вызывает затруднения или может привести к неверным результатам.

Плоская (планарная) задача решается относительно векторного магнитного потенциала узлов, связанного с магнитной индукцией B в данной точке через известное соотношение векторного поля

$$B = \text{rot } A = \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y},$$

где A – векторный магнитный потенциал и его частные производные вдоль соответствующих координат на плоскости. Его вектор направлен перпендикулярно плоскости рисунка и используется для расчёта областей с током и без него.

Объёмная задача решается относительно скалярного магнитного потенциала узлов V_m :

$$H = \text{grad } V_m = \frac{\partial V_m}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial V_m}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial V_m}{\partial z} \mathbf{k},$$

где $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ – координатные векторы единичной длины – орты.

Геометрия областей с током (проводов и катушек) в объёмной модели строго не воспроизводится, а заменяется комбинацией стандартных фигур – примитивов, внутри которых поле не вычисляется. Для моделирования поля вне этих областей используются уравнения Био-Саварра.

Независимо от используемого пакета прикладных программ, процесс создания планарной сеточной модели асинхронного двигателя можно разбить на следующие стадии:

1) выделение в расчётной модели одного полупериода периодической структуры магнитопровода статора и одного полупериода магнитопровода ротора. В машинах с симметричными обмотками полупериодом является половина зубцового деления соответствующего магнитопровода;

2) нанесение на рабочую область построения модели ключевых точек полупериода одной из выделенных структур, например статора. Под ключевыми точками понимаются точки пересечения линий полупериода выделенной структуры, в том числе и с линиями их ограничивающими;

3) построение линий и областей модели выделенной структуры по нанесённым ключевым точкам;

4) присвоение областям свойств материала и типа элементов, на которые они будут разбиты при нанесении сетки. Под типом элемента понимается его имя в используемом пакете прикладных программ, число степеней свободы (физических величин, количественно определяющих состояние фрагмента модели, представленного этим элементом) и набор констант, обусловленных характеристиками замещаемой области. Для областей, занятых катушечными сторонами обмотки, в этот набор входят: площадь поперечного сечения, число витков, протяжённость в осевом направлении, направление тока (положительное или отрицательное) и коэффициент заполнения;

5) генерация сетки и её отражение вместе с областями, ею занятыми, на вторую половину периода выделенной структуры;

6) построение областей и сетки всего магнитопровода статора путём копирования периода структуры статора в полярной системе координат, объединение общих узлов и ключевых точек после копирования;

7) нанесение ключевых точек, построение областей и генерация сетки полупериода выделенной структуры ротора и примыкающего к ней фрагмента воздушного зазора, аналогично построениям перечислений 2 ÷ 6, выполненным для статора;

8) выделение нескольких компонентов (частей) модели:

- из узлов на линии поверхности расточки статора;
- из элементов воздушного зазора, примыкающих к линии расточки статора. Оба перечисленных компонента связываются между собой как смежные (примыкающие) регионы;
- из элементов ротора;
- из областей ротора и воздушного зазора;

9) приложение нагрузок и граничных условий. Под нагрузками понимаются электрические – плотность и напряжение, и механические – момент сил или силы, приложенные к ротору. Под граничными условиями можно понимать направление линий магнитной индукции на границе расчётной области. Оно может быть параллельным этой границе или перпендикулярным (нормальным). При нормальном направлении проводимость границ бесконечно велика (однородные граничные условия Дирихле [4]) и силовые линии беспрепятственно пересекают границу расчётной области, пересекаясь во внешнем пространстве. При параллель-

ных границе силовых линиях (условие Неймана [4]) поток во внешнее пространство не выходит и замыкается внутри расчётной области.

Расчёт созданной планарной модели выполняется относительно векторных магнитных потенциалов узлов сетки. Различают статический, гармонический и переходный (TRANSIENT) анализ.

В статической задаче приложенные нагрузки (напряжения и токи) не зависят от времени. Они не вызывают токов в замкнутых контурах, образованных катушками обмоток, и не наводят вихревых токов в массивных проводящих частях машины.

В гармоническом анализе электрические нагрузки изменяются по синусоидальному закону. Они вызывают токи в замкнутых контурах и наводят вихревые токи в массивных проводящих частях.

В переходном анализе нагрузки изменяются по времени по некоторому известному закону. При этом в модели также присутствуют обмотки (катушечные стороны), образующие замкнутые электрические контура и/или массивные проводящие части из материала, обладающего конечным электрическим сопротивлением.

Наиболее известным программным продуктом, позволяющим выполнять расчёты электрических машин методом конечных элементов, является ANSYS/Emag (разработки американской фирмы ANSYS).

Гармонический анализ сеточных моделей предполагает допущение о синусоидальности магнитного потока. Под влиянием насыщения кривая индукции в области зубцовых зон и в воздушном зазоре, естественно, принимает форму, отличную от синусоидальной, несмотря на синусоидальный ток. Однако, если принять во внимание, что в данном анализе фигурируют усреднённые по времени значения момента и потерь мощности, то можно прийти к заключению о корректности данного допущения, обычного при исследовании установившихся режимов работы машин переменного тока.

Краевыми эффектами, обусловленными изменением направления индуцированных токов на противоположное, целесообразно пренебречь, что позволит использовать двухмерные модели вместо трёхмерных. Сопротивлением короткозамыкающих колец желательнее (но не обязательно) пренебречь.

Последние два допущения позволяют строить компактные и высокопроизводительные сеточные модели асинхронных двигателей, состоящие только из планарных элементов, не привлекая при этом цепные элементы, воспроизводящие электрические цепи замыкания стержней короткозамкнутой обмотки между собой.

Сеточная модель глубокопазного асинхронного двигателя, генерированная с учётом принятых допущений в программной среде ANSYS/Emag, представлена на рис. 1 (для большей чёткости изображения сетка в пазах ротора не показана).

Модель представлена восьмиузловыми планарными элементами трёх типов, отличающихся степенями свободы. Непроводящие части магнитной цепи представлены элементами, степенью свободы которых является только векторный магнитный потенциал. Стержни обмотки ротора и катушечные стороны обмотки статора представлены элементами, которые дополнительно характеризуются напряжением и током соответственно. В случае пренебрежения активным сопротивлением короткозамыкающих колец узлы элементов всех стержней связываются единым приложенным к ним напряжением.

Узлы элементов каждой из катушечных сторон обмотки статора связываются условием протекания по ним одинакового тока и цепными элементами, замещающими катушечные стороны обмотки статора, соединёнными между собой последовательно согласно, в соответствии с электрической схемой обмотки. Ветви с цепными элементами катушечных сторон разных фаз обмотки сопрягаются между собой параллельно (рис. 2). Они воспроизводят звезду, замкнутую накоротко нулевым сопротивлением трёхфазного источника напряжения.

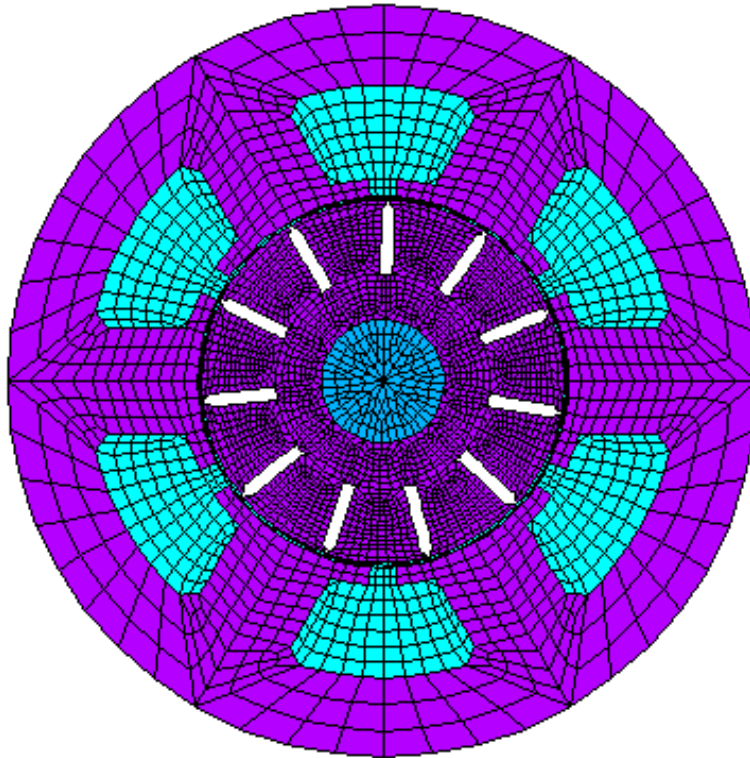


Рис. 1. Сеточная модель глубокопазного асинхронного двигателя

Направление тока катушечных сторон, прямое или обратное, учитывается одной из констант набора, приписываемого элементам обмотки статора. В этот набор констант также входят длина машины в осевом направлении, площадь сечения катушечной стороны, число её витков и коэффициент заполнения.

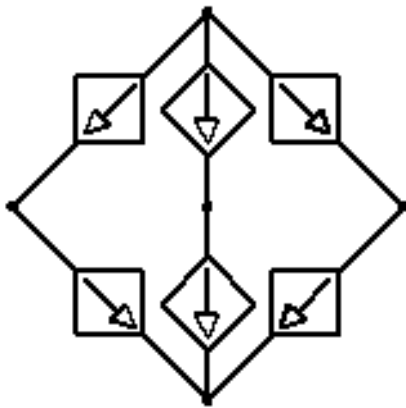


Рис. 2. Цепные элементы, замещающие обмотку статора

Элементы ротора с магнитопроводом, стержнями короткозамкнутой обмотки и валом объединяются в единый компонент, который является объектом приложения электромагнитных сил, создающих вращающий момент.

В большинстве задач полем за пределами внешней поверхности корпуса статора следует пренебречь и исходить из условия параллельности силовых линий наружной поверхности расчётного пространства (условие Неймана). В этом случае задаётся нормальная к границе составляющая градиента потенциала. В планарных моделях вращающихся электрических машин она совпадает с внешним диаметром окружности статора.

Модель составлена для взаимно неподвижных ротора и статора, и в непосредственном виде может быть использована для расчёта пускового момента асинхронного двигателя. Распределение линий магнитной индукции для этого случая представлено на рис. 3, а.

Для расчёта других точек механической характеристики, при вращающемся роторе, необходимо корректировать сопротивление материала магнитопровода и стержней ротора при каждом значении скольжения, увеличивая его расчётное значение в соответствии с функцией скольжения:

$$R_p = R_\Phi \frac{1-s}{s},$$

где s – скольжение; R_p , R_Φ – расчётное и фактическое сопротивления короткозамкнутой обмотки ротора, определённые исходя из удельного сопротивления применённого материала.

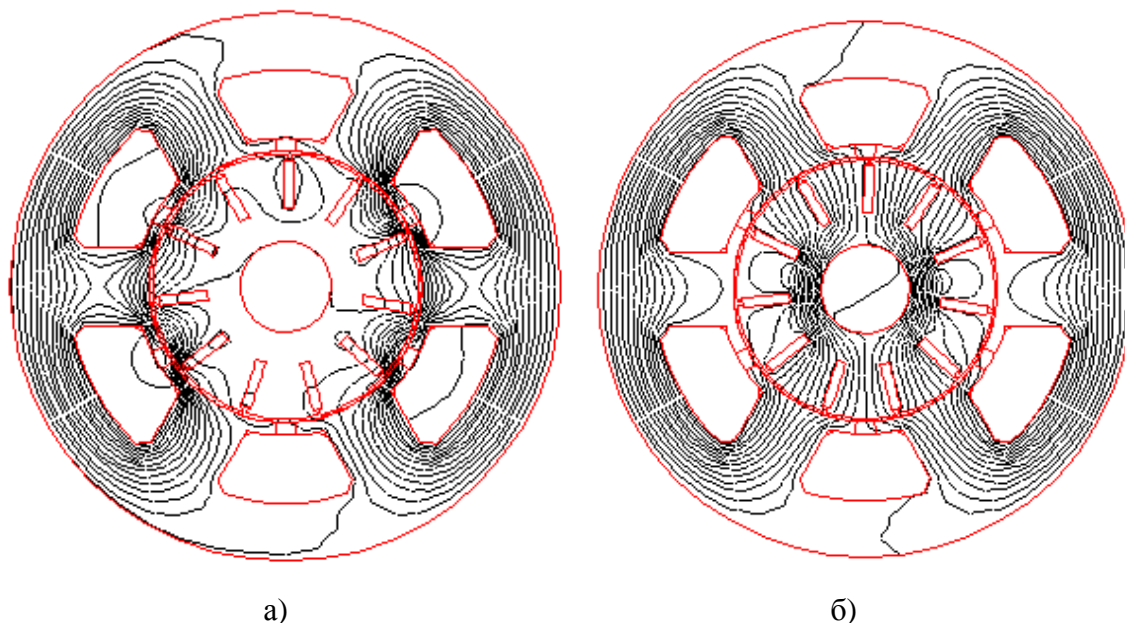


Рис. 3. Распределение силовых линий магнитной индукции при пуске (а) асинхронного двигателя и на холостом ходу (б)

Для этих точек имеет место различие расчётных и фактических потерь холостого хода в роторе. В расчётной модели оно будет несколько выше, вследствие большей частоты перемагничивания. Однако добавочными вихревыми моментами в асинхронных двигателях с шихтованным ротором, как правило, пренебрегают вследствие их малости. Распределение линий магнитной индукции при работе под нагрузкой, близкой к номинальной, показано на рис. 3, б. Нетрудно видеть, что после разгона замыкание линий магнитного потока обмотки статора преимущественно по путям потока рассеяния сменяет замыкание его через ротор по путям потока взаимной индукции.

Значительно в большей степени на электромагнитный момент и форму механических характеристик могут влиять добавочные асинхронные моменты от действия зубцовых и других высших гармоник. Их можно вычислить, традиционно применяя принцип наложения. Добавочные моменты от каждой из них необходимо сложить с моментом от первой гармоники. При этом расчётное сопротивление материала стержней короткозамкнутого ротора следует корректировать в соответствии с номером ν гармоники:

$$R_{p\nu} = R_\Phi \frac{1 - s\nu}{s\nu}.$$

Полное совпадение расчётных и фактических потерь в роторе сеточная модель обеспечивает в двух режимах работы асинхронной машины: короткого замыкания и холостого хода. В первом так же, как и в модели, ротор неподвижен, а во втором потери отсутствуют, что легко учитывается введением очень большого сопротивления для материала стержней. Поэтому возможен ещё один способ определения электромагнитного момента асинхронной машины: по расчётным данным опытов холостого хода и короткого замыкания.

Из результатов расчёта этих режимов посредством сеточной модели определяются мощности потерь холостого хода (P_0) и короткого замыкания (P_k). Используя параметрические данные и схему соединения катушек, можно вычислить активное сопротивление фазы. Для двигателя с единственной катушкой в каждой фазе по рис. 1 оно составит

$$R_1 = 2\rho \frac{lw^2}{SK_3},$$

где ρ – удельное сопротивление материала проводов, увеличенное с учётом длины лобовых частей и фактической температуры обмотки; l , w , S и K_3 – параметры обмотки, содержащиеся в константах модели (соответственно длина пазовой части катушек, число витков, площадь паза и коэффициент его заполнения).

Затем вычисляется ток статора при холостом ходе и коротком замыкании:

$$I_{1o} = \sqrt{\frac{P_o}{mR_1}} \text{ и } I_{1к} = \sqrt{\frac{P_к}{mR_1}}$$

соответственно (m – число фаз обмотки статора).

Коэффициент мощности в этих режимах

$$\cos \varphi_o = \frac{P_o}{mUI_{1o}} \text{ и } \cos \varphi_к = \frac{P_к}{mUI_{1к}}$$

соответственно, где U – напряжение сети.

Далее по известным соотношениям определяются параметры схемы замещения: активное, полное и индуктивное сопротивления холостого хода и короткого замыкания:

$$Z_o = \frac{U}{I_{1o}}, \quad R_o = Z_o \cos \varphi_o, \quad X_o = \sqrt{Z_o^2 - R_o^2};$$

$$Z_к = \frac{U}{I_{1к}}, \quad R_к = Z_к \cos \varphi_к, \quad X_к = \sqrt{Z_к^2 - R_к^2}.$$

Электромагнитный момент в функции скольжения определяется из круговой диаграммы или по одной из известных зависимостей [5].

Для приближённых вычислений можно использовать формулу Клосса:

$$\frac{M}{M_{\max}} \approx \frac{2}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}},$$

где максимальный момент M_{\max} и критическое скольжение $s_{\text{кр}}$ соответственно определяются отношениями

$$M_{\max} = \frac{pmU}{2\omega X_к};$$

$$s_{\text{кр}} \approx \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_к^2}} \approx \frac{R_2'}{X_к},$$

где p – число пар полюсов обмотки статора; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота сети; R_2' – приведённое сопротивление вторичной цепи, вычисляемое из потерь в роторе $P_{2к}$ при коротком замыкании:

$$R_2' = \frac{P_{2к}}{mI_{1к}^2}.$$

В этом случае расчёт сеточ-

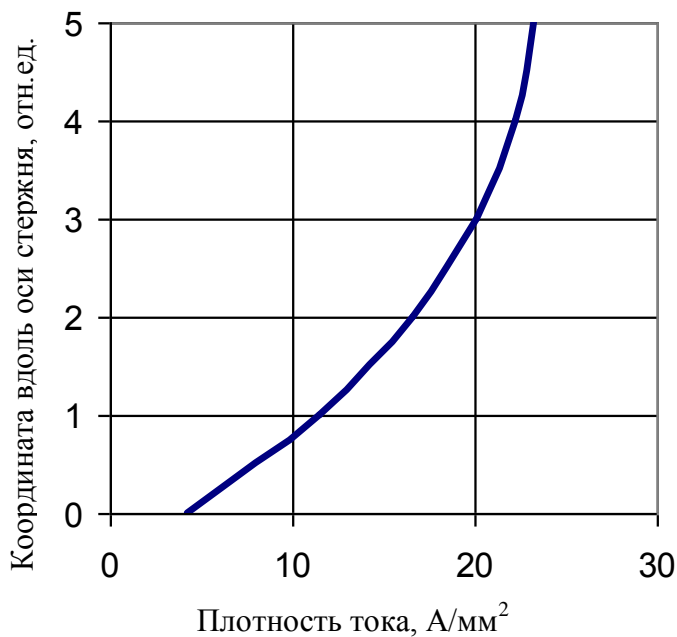


Рис. 4. Распределение плотности тока по высоте стержня при пуске асинхронного двигателя

ной модели достаточно выполнить только один раз – для режима пуска (короткого замыкания), данные режима холостого хода не используются.

Расчёты асинхронного двигателя с герметизирующей гильзой, вставленной в расточку статора, выявили практически полное совпадение расчётных и экспериментальных результатов при расчёте пускового момента, поскольку при этом учитывается реальное распределение тока по высоте и эффект его вытеснения к поверхности (рис. 4).

По мере разгона ротора и снижением скольжения, распределение тока по высоте стержней выравнивается.

Выводы

Сеточные модели наиболее эффективны при расчёте электромагнитного момента нестандартных конструкций электродвигателей, таких как герметичные и встраиваемые двигатели, двигатели с массивным ротором, с наличием проводящих конструктивных частей, внедрённых в магнитную цепь статора или ротора.

Независимо от этих отличий расчёт выполняется по единому алгоритму, а учёт конкретных конструктивных особенностей той или иной машины обеспечивается включением в модель дополнительных областей со своим набором электрических и магнитных характеристик применяемого материала.

Библиографический список

1. **Брынский, Е.А.** Электромагнитные поля в электрических машинах / Е.А. Брынский, Я.Б. Данилевич, В.И. Яковлев. – Л.: Энергия, 1979. – 176 с.
2. **Смирнов, А.Ю.** Исследование момента герметичной индукторной машины // Электротехника. 2007. №1. С. 51–55.
3. **Смирнов, А.Ю.** Применение сеточных моделей для исследования электропривода на базе индукторной машины // Электротехника. 2009. № 2. С. 28–32.
4. **Домбровский, В.В.** Справочное пособие по расчёту электромагнитного поля в электрических машинах / В.В. Домбровский. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.
5. **Иванов-Смоленский, А.В.** Электрические машины: учеб. для вузов / А.В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.

*Дата поступления
в редакцию 19.01.2010*

A.Yu. Smirnov

APPLICATION OF NET MODELS FOR CALCULATION OF THE ELECTROMAGNETIC TORQUE OF INDUCTION MOTORS

The task of calculation of the electromagnetic moment of induction motors by the finite elements method (FEM), including stages of creation of model, feature of its application and research by means of the harmonious analysis is considered. Concurrence of settlement and experimental values of the starting torque of the hermetically sealed induction motor is received, application FEM is recommended for calculation of the electromagnetic torque of non-standard designs of induction motors.

Key words: induction motor, finite elements method (FEM), electromagnetic torque, sliding, mechanical characteristic.

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 669.021:621.762

И.М. Мальцев, В.А. Скуднов

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ МЕТАЛЛУРГИИ ОБРАБОТКИ ТОКОМ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Определено влияние параметров технологии, электрофизических свойств на характеристики, параметры и результаты электрофизических технологий, основанных на обработке металлических материалов током высокой плотности 10^8 - 10^9 А/м².

Ключевые слова: металлургия, электрофизические технологии, ток высокой плотности

Введение

В настоящее время широкое распространение получают технологии машиностроения и металлургии, основанные на обработке проводящих металлических материалов током высокой плотности 10^8 - 10^9 А/м² при деформировании, нагреве и формовании [1, 2].

К таким видам технологий принадлежат: скоростная электротермическая обработка (ЭО) сталей и сплавов; электропластическая деформация металлов и сплавов; электроспекание при формовании металлических порошковых и композиционных материалов.

Физические основы технологий состоят в воздействии тока высокой плотности (10^8 - 10^9) А/м² «электронного ветра» на дефекты кристаллической решетки при нагреве и деформации материалов и использовании следующих эффектов: Джоуля – Ленца, пинч-эффекта, электрокристаллизации, электропластического и др. при электрофизической обработке, повышающих свойства проводящих материалов.

Процессы ЭО различаются по видам электрофизических эффектов, реализуемым в каждом способе, но общими для них являются эффекты измельчения структуры, связанные с высокими скоростями нагрева (перегревом) и электрокристаллизацией, скин- и пинч-эффекты, действие «электронного ветра» в кристаллической решетке металла или сплава (электропластический эффект), дислокационные эффекты, воздействие электромагнитного поля на зерна и субструктуру металла, эффект Томпсона – Пельтье, магнитострикционный и магниторезистивный эффекты, эффекты Джоуля – Ленца и Герберта [3].

Особенностью процессов ЭО является то, что сам проводящий материал определяет параметры технологии и результаты такой обработки.

Целью настоящей работы является определение влияния параметров технологии, электрофизических свойств на характеристики, параметры и результаты электрофизических технологий, основанных на обработке металлических материалов током высокой плотности 10^8 - 10^9 А/м².

Решение задачи

В начале были исследованы свойства компактных металлических металлов технической чистоты (меди, алюминия и титана) после электропластического деформирования прокаткой [4-5]. Было установлено, что с увеличением степени деформации происходит приращение пластичности и предельной удельной энергии деформации металлов за счет действия «электронного ветра» в условиях, когда температура процесса электропрокатки ниже $0,1 T_{пл}$ (ниже температуры начала электрокристаллизации). Временное сопротивление при растяжении при этом также увеличивается, а твердость металлов снижается.

Для оценки влияния электрофизических свойств на процесс и результат ЭО применили показатель Джоулевой составляющей электрического тока F :

$$F = \frac{\rho}{C_m G}, \quad (1)$$

где ρ , C_m , G - удельные электрическое сопротивление, теплоемкость и плотность металлов. Показатель F отражает способность металла-проводника к нагреву при прохождении электрического тока.

Оказалось (табл. 1), что с его увеличением происходит приращение пластичности металла ($\Delta\delta$), определяемой по относительному показателю

$$\Delta\delta = \frac{\delta_y - \delta_x}{\delta_y}, \quad (2)$$

где δ_y и δ_x – относительное удлинение электро- и холоднодеформированных металлов [4, 5].

Таблица 1

Значения показателя Джоулевой составляющей тока F и $\Delta\delta$ меди, алюминия и титана и коэффициент корреляции между ними

Металл	F , Ом м ³ град/Н	$\Delta\delta$, %	Коэффициент корреляции
Медь М1	$0,0408 \cdot 10^{-14}$	0	0,712482
Алюминий А6	$0,108 \cdot 10^{-14}$	60	
Титан ВТ1-0	$2,240 \cdot 10^{-14}$	80	

Использование электропластического эффекта при деформации металлов позволяет в разы снизить температуру деформирования, повысить пластичность металла.

Затем исследовалось влияние электрофизических свойств порошковых композиционных металлических материалов с диэлектрическим наполнителем на стационарность процесса формования прокаткой и механические свойства на примере нихромо - стеклянных композиций [6, 7] (табл. 2).

Таблица 2

Влияние содержания диэлектрической фазы на физико-механические свойства нихромо-стеклянной композиции

Состав или марка порошка	Толщина ленты, мм $\pm 3,5\%$	Плотность, кг/м ³ $\pm 2,5\%$	Временное сопротивление при растяжении, МПа $\pm 5,6\%$	Удельное электро-сопротивление, Ом * мм ² /м	F , Ом м ³ град Н
Стекло 10% + X20H80-2M 90%	<u>0,68</u> 0,63	<u>4200</u> 5380	<u>менее 1</u> 3,8	<u>596</u> 26	$1,46 \cdot 10^{-6}$
стекло 15% + X20H80-2M 85%	<u>0,61</u> 0,60	<u>4290</u> 4370	<u>менее 1</u> 22,0	<u>1000</u> 52	$7,76 \cdot 10^{-6}$
стекло 20% + X20H80-2M 80%	<u>0,60</u> 0,65	<u>3420</u> 4080	<u>менее 1</u> 8,0	<u>1000</u> 16	$4,51 \cdot 10^{-6}$

Примечание. В числителе – прокатка, в знаменателе – электроспекание порошка при прокатке.

Используя относительные показатели, аналогичные формуле (2), для плотности, твердости, удельного электрического сопротивления и временного сопротивления при растяжении определяли связь показателя Джоулевой составляющей электрического тока с содержанием диэлектрической неформующейся фазой [6-7]. Коэффициент корреляции равен 0,9602. Оказалось, что увеличение значения показателя F приводит к повышению твердости и временному сопротивлению при растяжении (табл. 2), в условиях, когда повышается доля неформующейся фазы. Для порошковых композиционных материалов можно создавать такую рецептуру материала, где регулируя значения F , можно достигать высоких показателей свойств материалов при электровоздействии на очаг формования порошка. Так, используя результаты исследований, разработали технологию и получили уплотнительный ленточный порошковый материал триботехнического назначения для авиационной техники [8].

Практика электроспекания порошков [9] показывает, что параметрами процесса ЭО являются напряжение и сила тока. Напряжение на валках-электродах определяется диэлектрическими свойствами порошковой системы [10-11].

Таблица 3

Влияние разности потенциалов на физико-механические свойства ленты X18H10T и процесс электроимпульсного спекания

Напряжение, В		Сила тока в первичной обмотке трансформатора, А	Свойства ленты			Процесс
На выходе трансформатора	На валках-электродах		Плотность, кг/м ³	Прочность, МПа	Удельное электрическое сопротивление, Ом м 10 ⁻⁶	
Без тока			6310	4,2	63,0	Стационарный
3,15	0,5	40	6350	11	9,4	
7,8	1,5	90	6400	17	5,6	
20	6,2	100	Процесс прокатки и электроспекания вырожден – локальное проплавление			

В работах [12-13] было получено уравнение, которое позволяет рассчитывать напряжение на валках электродах по диэлектрическим свойствам порошковой системы:

$$V_m = [V_{\min} (2R (1 - \cos a_p + h_1))] / [\sum(P_i / r_i) / 100], \quad (3)$$

где V_m – разность потенциалов на валках-электродах, В; V_{\min} – напряжение разряда между соседними частицами, В; R – радиус валков-электродов, м; a_p – угол захвата порошка при прокатке, рад; h_1 – величина зазора между валками-электродами, м; P_i – процентное содержание i -й фракции порошка; r_i – средний размер частиц i -й фракции порошка. Напряжение разряда между соседними частицами рассчитывается по экспериментальной методике определения электрической прочности порошка, находящегося без уплотнения [12].

Выражение (3) подтверждено экспериментально. В табл. 3 показаны результаты эксперимента [13].

Экспериментальные результаты табл. 3 показывают, что превышение напряжения V_m (3) приводит к вырождению процесса прокатки и электроспекания из-за образования локального проплавления – электрического пробоя порошковой ленты.

Сила электрического тока при электропрокатке и электроспекании определяет процессы на межчастичных контактах, при ЭО порошковых материалов создаются межчастичные контакты, свойственные только этим видам технологии [14]. Очаг формования порошка при электроспекании при прокатке имеет сложное строение [15]. Существуют две области между валками-электродами, где порошок находится в уплотненном состоянии (с плотностью, равной плотности сформованной ленты – сечение h_1) и в свободно насыпанном состоянии – сечение $a_{пр}$. Образуются две зоны, имеющие разную электрическую проводимость. Эта раз-

ность определяет перепад температур между двумя зонами электроспекания при прокатке. Данная разность температур позволяет определить механизм электроспекания [16] – твердо- или жидкофазный, по которому происходит образование материала при электроспекании при прокатке. В [16] получено выражение для расчета разности температур ($T_{hl-анп}$), которое подтверждено экспериментально:

$$T_{hl-анп} = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} K^{-1} = \frac{R_1}{R_2} K^{-1} = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} Q, \quad (4)$$

где σ_1, R_1 и σ_2, R_2 – удельные электропроводность, электросопротивление в сечениях h_1 и $a_{пр}$ (угла захвата порошка) соответственно, K – коэффициент обжатия; Q – относительная плотность ленты.

Анализ уравнения (4) показывает, что с ростом относительной плотности, уменьшением коэффициента обжатия, степени падения электросопротивления в порошковом проводящим ток столбе увеличивается перепад температур в очаге деформации при прокатке с током.

Результаты исследования были применены при электропрокатке порошка Нибон-20, а методом электроспекания при прессовании был получен особо плотный материал из этого порошка [17].

Обширную область исследований процессов ЭО составляет электротермическая обработка металлов и сплавов. Здесь основным эффектом, используемым при электротермической обработке, является эффект Джоуля – Ленца. Практический и теоретический интерес представляет использование при ЭО скин- и пинч-эффектов [18], проведение обработки с высокими скоростями нагрева (до 200 К/с) [19].

Высокие скорости нагрева, применение токов высокой плотности при электротермической обработке позволяют получать за короткое технологическое время металлические материалы с дисперсной субструктурой, проводить технологические операции закалки и отпуска [20-21]. Основным эффектом измельчения структуры является эффект электрокристаллизации, проявляющийся в расщеплении границ зерен ферромагнетиков при нагреве в сильных электромагнитных полях.

При электротермической обработке сталей электрофизические свойства материалов определяют результат технологии. Исследования [22-24] показали, что стабильность свойств, в частности твердости, определяется относительной магнитной проницаемостью. В табл. 4 показаны результаты электротермической обработки сталей 25, 50ХФА и 65Г, полученные в работах [20,22].

Таблица 4

Коэффициент корреляции относительной ошибки эксперимента твердости в зависимости от содержания углерода, коэрцитивной силы и относительной магнитной проницаемости

Твердость и относительная ошибка эксперимента			Содержание углерода в стали, % (массовое)	Коэрцитивная сила, Э	Относительная магнитная проницаемость	
Время электрообработки сталей до температуры закалки стали					справочные данные	для тока 10^8-10^9 А/м ²
3 с	4 с	5 с		3 с	3 с	3 с
31(4,92)	48(13,68)	47(2,12)	0,25 (сталь 25)	30	100	3000
59(4,01)	61(1,54)	70(1,74)	0,5 (сталь 50ХФА)	34	98	2870
42(1,79)	64(0,49)	64(0,36)	0,65 (сталь 65Г)	42	95	2750
Коэффициент корреляции						
-0,926	-0,953	-0,896		-0,972	0,899	0,966

Известно, что изменение (возрастание или уменьшение) относительной ошибки эксперимента указывает на действие стороннего фактора. В первых двух случаях (табл. 4) коэффициент корреляции отрицательный, то есть на изменение относительной ошибки не дейст-

вует карбидная фаза и факторы намагничивания образцов (эффект Герберта), так как измерение твердости провели после СЭТО и без охлаждения в магнитном поле. В случае относительной магнитной проницаемости коэффициент корреляции положителен и приближается к единице. Вычислили коэффициент Джоулевой составляющей электрического тока F для сталей 25, 50ХФА, 65 Г. Получили значения $0,287 \cdot 10^{-14}$, $0,610 \cdot 10^{-14}$, $0,775 \cdot 10^{-14}$ (Ом · м³ · град/Н) соответственно. Определили его корреляцию с изменением относительной ошибки эксперимента (табл. 4) для сталей 25, 50ХФА, 65Г. Коэффициент корреляции равен $-0,97769$. Установили, что коэффициент F влияет на стабильность значений твердости при СЭТО. Все это указывает на то, что электрическое поле при электротермической обработке оказывает влияние на поведение твердости после закалки. Единственным сейчас известным эффектом влияния электрического поля на нагретый ферромагнетик является эффект электрокристаллизации. Очевидно, что в настоящем эксперименте наблюдается его проявление. Это также подтверждается тем, что уменьшается размер блоков субструктуры сталей, в сравнении с печной закалкой [24]. Изменение относительной ошибки эксперимента связано с разбросом значений твердости или стабильностью значений твердости. Изменением относительной магнитной проницаемостью сталей (химическим составом) возможно управлять стабильностью твердости. Так, в инструментальных сталях, содержащих большую долю карбидной фазы, стабильность твердости высокая, в сравнении с нелегированными сталями [23].

Вывод

Таблица 5

Связь электрофизических свойств металлических материалов с процессами и результатами обработки током высокой плотности

Характеристики материала или электрофизической технологии после обработки электрическим током	Показатель материала или электрофизической технологии	Вид электрофизической технологии
Пластичность, прочность (приращение временного сопротивления при растяжении и относительного удлинения), предельная удельная энергия деформации металлов	Показатель Джоулевой составляющей электрического тока (удельное электросопротивление, теплоемкость и плотность), магнитная восприимчивость	Электропластическая деформация компактных металлов
Механизм электроспекания порошков (твёрдо- или жидкофазный)	Электропроводность порошковых материалов	Электропрокатка металлических порошков в валках-электродах
Стационарность процесса формирования порошка с током	Диэлектрическая проницаемость порошковой системы	
Прочность, твердость, содержание не формирующейся фазы в порошковых композиционных материалах	Показатель Джоулевой составляющей электрического тока (удельное электросопротивление, теплоемкость и плотность)	Электропрокатка и электроспекание металлических порошковых композиционных материалов
Стабильность значений твердости и временного сопротивления при растяжении	Относительная магнитная проницаемость, коэрцитивная сила. Показатель Джоулевой составляющей электрического тока (удельное электросопротивление, теплоемкость и плотность)	Электротермическая обработка сталей

Теоретическое и экспериментальное исследование влияния тока высокой плотности, электрофизических параметров электрофизических технологий показало, что электрофизические параметры материала определяют структуру и свойства металлических материалов

разных классов и механизмы реализации электрофизических способов. Результаты настоящего исследования обобщены в табл. 5.

Используя результаты работ [1-25], разработаны электрофизические технологии и установлены закономерности изменения структуры и свойств металлических материалов разных классов при воздействии температуры, давления, электромагнитного поля и тока высокой плотности:

1. Основные параметры технологии получения электропрокаткой металлических порошковых и композиционных материалов для изготовления сварочных, резистивных и уплотнительных лент современных машин и аппаратов, позволяющих осуществлять процессы формования прокаткой высокотекучих, неформующихся металлических порошков, а также проводить прокатку материалов с высокой долей наполнителей до 80%_{об}.

2. Основные параметры скоростной электротермической обработки током высокой плотности компактных сталей разных классов, алюминиевых и титановых сплавов. Время аустенизации при скоростной электротермической обработке сталей может составлять всего 3–5 с. Стабильность свойств (твердости) в технологии термической обработки, включающей обработку током высокой плотности, связана с электрофизическими эффектами в металлическом материале. Увеличение содержания углерода, карбидной фазы в сталях увеличивает стабильность свойств (твердости) сталей. Применение электрического тока высокой плотности при термической обработке сталей вызывает появление в изделии напряжений сжатия, препятствующих распространению трещин.

3. Установлено, что изменение прочностных и пластических свойств металлических материалов разных классов зависит от величины показателя Джоулевой составляющей электрического тока, его увеличение вызывает рост временного сопротивления при растяжении, относительного удлинения и величины предельной удельной энергии деформации. Показатель Джоулевой составляющей электрического тока является критерием при выборе эффективных режимов электрофизической технологии, химического состава обрабатываемых материалов.

4. Получены основные уравнения расчета процесса электропрокатки металлических порошковых и композиционных материалов, позволяющие осуществлять процесс в стационарном режиме без проявления макродефектов материалов, а также определять механизм электропрокатки металлического порошка жидко- или твердофазный.

5. Установлено, что при протекании тока высокой плотности через металлический материал, на его структуру и свойства оказывает влияние пинч- эффект, который определяет макростроение ферромагнитных порошковых и композиционных материалов при электропрокатке, а его применение в технологии вызывает благоприятное воздействие на повышение плотности формуемых прокатанных металлических порошковых и композиционных материалов и определяет их макростроение.

6. Установлено, что протекание тока высокой плотности через межчастичные контакты в порошковых металлических материалах при формовании электропрокаткой создает специфические контактные участки, отличающиеся по электропроводности от контактов, созданных прокаткой порошков без тока. Возникновение этих контактов ускоряет диффузионные процессы сплавообразования в порошковых ленточных материалах.

7. Установлено, что в диамагнитных материалах (алюминиевых сплавах) стабильность свойств (твердости) после электротермической обработки током высокой плотности определяется процессами старения сплава, и что эта стабильность возрастает со временем, достигая значений твердости исходного материала.

8. Разработаны основные элементы установок технологии электрофизических процессов электротермической обработки сталей разных классов, алюминиевых и титановых сплавов, электропрокатки порошковых и композиционных материалов для изготовления и обработки листовых, проволочных и ленточных изделий.

Библиографический список

1. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы / Ю.В. Баранов [и др.]. – М.: МГИУ, 2001. – 844 с.
2. Электрофизические процессы металлургии: учеб. пособие / И.М. Мальцев; Нижегород. гос. техн. ун-т. Нижний Новгород, 2003. – 59 с.
3. **Мальцев, И.М.** Эффекты в металлических материалах во время электрофизической обработки // Материаловедение и металлургия: межвуз. сб. ст. / НГТУ. – Н. Новгород, 2005. Т. 50. С. 148-151.
4. **Мальцев, И. М.** Механические свойства металлов после электроимпульсной прокатки // Вопросы материаловедения. 2005. № 4(44). С. 5–11.
5. **Мальцев, И. М.** Изменение свойств металлов технической чистоты после электроимпульсного деформирования при прокатке // Материаловедение. 2000. № 5. С. 45–49.
6. **Мальцев, И.М.** Влияние содержания диэлектрической фазы на свойства порошковых материалов электроспеченных при прокатке // Материаловедение. 2001. № 9. С 39–43.
7. **Мальцев, И.М.** Электропрокатка порошковых материалов с диэлектрической фазой // Порошковая металлургия. 2003. № 5/6. С. 10–15.
8. **Мальцев, И.М.** Электроимпульсноспеченный при прокатке порошковой композиции антифрикционный уплотнительный материал // Материаловедение. 2005. № 6. С. 53–55
9. **Райченко, А.И.** Основы процесса спекания порошков пропусканием электрического тока / А.И. Райченко. – М.: Металлургия, 1987. – 128 с.
10. А. с. 1748943 СССР МКИЗ В 22 F 3/14. Способ электроимпульсного спекания металлического порошка и установка для его осуществления / В.Г. Петриков, И.М. Мальцев, Л.А. Пырялов. № 142263 – 76; заявл.28.02.90; опубл. 23.7.92. Бюл. № 27.
11. **Мальцев, И. М.** Установка для электроимпульсного спекания порошка при прокатке / И.М. Мальцев, В.Г. Петриков // Порошковая металлургия 1993. № 3. С. 113–116.
12. **Мальцев, И.М.** Влияние электрического напряжения на валках-электродах на процесс электропрокатки металлических порошков // Материаловедение и металлургия: сб. научн. тр. / НГТУ. – Н. Новгород, 2004. Т. 42. С. 251–256.
13. **Мальцев, И.М.** Электропрокатка металлического порошка в валках-электродах // Порошковая металлургия. 2005. № 5/6. С. 21–27.
14. **Мальцев, И.М.** Влияние изотермического отжига на свойства порошкового проката сплавов системы Fe - Cr - Ni. / И.М. Мальцев, В.Г. Петриков // Порошковая металлургия. 1994. № 1. С. 79–84.
15. **Мальцев, И.М.** Электроимпульсный нагрев порошка в очаге деформации при прокатке/ И.М. Мальцев, В.Г. Петриков // Порошковая металлургия. 1993. № 6. С. 38–41.
16. **Мальцев, И.М.** Моделирование температурного поля в контакте двух металлических частиц при прокатке с электрокондуктивным нагревом // Порошковая металлургия. 2000. № 5/6. С. 5–17.
17. **Мальцев, И.М.** Установка электроимпульсного спекания порошка под давлением / И.М. Мальцев, В.А. Баранов // Порошковая металлургия. 2000. № 1/2. С. 125–128.
18. **Мальцев, И.М.** Исследование скоростной электротермической обработки металлов током высокой плотности // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2005. № 11. Т. 71. С. 35–38.
19. **Мальцев, И.М.** Изменение стабильности и свойств алюминиевых сплавов после скоростной электротермической обработки током высокой плотности // Материаловедение, 2004. №9. С. 34–36.
20. **Мальцев, И. М.** Изменение стабильности свойств доэвтектидных конструкционных сталей скоростной электротермической обработкой // Материаловедение. 2003. №2. С. 49–52.
21. **Мальцев, И.М.** Нагрев импульсными токами пружинной стали / И.М. Мальцев, Л.А. Ошурина, Н.В. Суворов // Вопросы материаловедения. 2004. № 1 (37). С. 18–23.
22. **Мальцев, И.М.** Скоростная электротермическая обработка током высокой плотности доэвтектидных конструкционных сталей // Вопросы материаловедения. 2004. № 4 (40). С. 24-31.
23. **Мальцев, И.М.** Обработка инструментальных сталей токами высокой плотности при нагреве под термическую обработку / И.М. Мальцев [и др.] // Вопросы материаловедения, 2006. № 3 (47). С. 6–15.

24. **Мальцев, И. М.** Скоростная электрозакалка стали 30ХГСА / И.М. Мальцев, С.В. Кондратьев, Л. А. Ошурина // Технология металлов. 2007. №. 3. С. 9–13.
25. **Мальцев, И.М.** Влияние электромагнитного поля скин- и пинч-эффектов при электропрокатке с импульсными токами высокой плотности порошковых металлических материалов // Изв. вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2008. № 3. С. 5–9.
26. **Мальцев, И.М.** Электропрокатка металлического порошка в валках-электродах с током высокой плотности // Изв. вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2009. № 4. – С. 15–19.

*Дата поступления
в редакцию 21.01.2010*

I.M. Malsev, V.A. Skudnov

ELECTROPHYSICAL TECHNOLOGIES BASED ON TREATMENT OF METAL MATERIALS BY CURRENT OF HIGH DENSITY

Influence of technology parameters, electrophysical features has been defined on characteristics, parameters and results of electrophysical technologies based on treatment of metal materials by current of high density 10^8 - 10^9 A/m².

Key words: electrophysical features, treatment of metal materials, current of high density

УДК 620.179.16

А.А. Хлыбов, В.А. Скуднов

ОЦЕНКА СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В КОНСТРУКЦИОННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ АКУСТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Акустическими методами исследуется влияние внешних воздействий (циклических, термических и радиационных) на структуру конструкционных металлических материалов. Рассматриваются примеры практического использования полученных результатов в задачах обеспечения безопасной эксплуатации ответственных элементов конструкций.

Ключевые слова: безопасная эксплуатация, структурные изменения, усталость, радиация, ультразвуковой контроль.

Введение

Одной из основных задач развития современного машиностроения является обеспечение безопасной эксплуатации конструкций, как в целом, так и отдельных ее элементов. По причине выработки ранее назначенного ресурса актуальной является задача продления срока службы конструкций. Предельные состояния материала машин и сооружений становятся зависимыми от искажения структуры, накопления повреждений в процессе эксплуатации. Длительный срок службы приводит к проявлению в разные периоды эксплуатации различных механизмов деградации материала, инкубационные периоды которых протекают скрытно. Постепенно развивающиеся неконтролируемые процессы деградации приводят к зарождению и развитию микроскопических трещин, к внезапным отказам и разрушению конструкции. Поэтому, для обеспечения безопасной и безаварийной эксплуатации, необходима надежная оценка текущего состояния материала конструкций, как на этапе проектирования и изготовления, так и в процессе ее эксплуатации.

Особую роль в задачах оценки степени поврежденности структуры, обеспечения безопасной эксплуатации конструкций играет диагностика, ключевым элементом которой являются методы неразрушающего контроля, в основе которых лежит использование физических полей различной природы: электромагнитные, упругие. Методы неразрушающего контроля позволяют получить информацию о состоянии контролируемой конструкции без разрушения и нарушения ее работоспособности.

Решение задачи безопасной эксплуатации возможно в том случае, если ее рассмотрение осуществлять с точки зрения синтеза различных научных подходов, применяемых в металловедении, механике деформируемого твердого тела, механике разрушения и методов неразрушающего контроля. Надежная оценка технического состояния возможна только при наличии хорошей корреляционной связи между оцениваемыми параметрами материала конструкции и измеряемыми характеристиками используемого физического поля. Одним из перспективных методов неразрушающего контроля следует признать акустический метод. Это вполне естественно, так как параметры упругих волн зависят от характеристик исследуемой среды: плотности, модулей упругости, размера и геометрии структурных неоднородностей и т.д.

Целью настоящей работы является исследование накопления повреждений в конструкционных металлических материалах акустическими методами, а также разработка и внедрение методик оценки состояния материала для обеспечения безопасной эксплуатации ответственных элементов конструкций.

Объекты контроля (материалы) и условия их эксплуатации

Исследования проводились на материалах, используемых при строительстве: корпусов экранопланов, корпусов реактора ВВЭР-440, 1000, элементов трубопроводов (ДУ-300) атомных электростанций, корпуса колонны синтеза пентакарбонила железа. Материалы указанных объектов подвергаются воздействию статических, переменных (мало- и многоцикловая усталость), термомеханических нагрузок и радиационному облучению. Исследовались также изделия ножевой продукции и гребных валов, технологический процесс которых включает термическую обработку. Для изготовления указанных объектов используются стали: коррозионно-стойкие хромоникелевые аустенитного класса (12X18H10T, 08X18H10T), свариваемые теплоустойчивые феррито-перлитного класса: (15X2МФА, 15X2МФА-А, 15X2НМФА, 15X2НМФА-А), конструкционные легированные 6ХС, 15ХСНД, 09Г2С, 5ХНВС, 30ХГС, Ст35, а также титановые ВТ3-1 и алюминиевые АМГ61 сплавы.

Материалы и методика эксперимента

Исследования проводились на образцах и элементах конструкций из материалов, используемых при строительстве рассмотренных ранее объектов с различной исходной структурой (в состоянии поставки), характерной для реальных конструкций, а также после различных видов воздействия. Режимы нагружения образцов соответствуют реальным условиям эксплуатации.

Для экспериментальных исследований использовались приборы и средства: оптической микроскопии (макро- и микроанализ), рентгеноструктурного анализа, контроля твердости, измерения плотности, прецизионных акустических измерений. Акустические исследования проводились с использованием измерительно-вычислительного комплекса «АСТРОН», который предназначен для прецизионных измерений амплитудных, временных и частотных характеристик упругих волн. В основу работы аппаратной части ИВК «АСТРОН» положен способ подробной регистрации всей серии отраженных акустических импульсов для ее последующей обработки средствами программной части системы. «АСТРОН» позволяет проводить измерения задержек (времени распространения продольных, сдвиговых, поверхностных и головных волн) с точностью 10^{-9} с, затухания (погрешность измерения 5%) в диапазоне частот 1-50 МГц.

Нагружение образцов осуществлялось на серийных испытательных машинах, специально изготовленных стендах. При оценке деградации материала конструкции использовались экспериментальные данные, полученные на натурных объектах и крупномасштабных моделях в условиях нормальной эксплуатации.

При обработке экспериментальных данных использовался регрессионный анализ и стандартные пакеты вычислительных программ (MathCAD, MatLAB). Для анализа результатов акустических измерений использовалось специально разработанное программное обеспечение, входящее в состав «АСТРОНА».

Обсуждение результатов

Хромоникелевая коррозионно-стойкая сталь аустенитного класса типа 18-10 после охлаждения (1050 - 1100°C) имеет структуру аустенит (γ), феррит (α) [1]. Ферритная фаза располагается по границам зерен аустенита. При быстром охлаждении аустенит фиксируется в пересыщенном и неустойчивом состоянии. Эта неустойчивость может проявиться, когда сталь подвергается пластической деформации, усталостному нагружению, нагреву при температурах 550 - 850°C. Часть аустенита может превращаться в мартенсит $\gamma > \alpha$. Кроме мартенсита охлаждения, различают мартенсит напряжения и деформации, для каждого из которых существует своя точка начала превращения соответственно M_n , M_d и M_σ . Положение мартенситных точек зависит от химического состава, степени и скорости деформации. Например, для стали 1X18H9T, точка M_n находится около -190°C, а точка M_d порядка 600°C

(при деформации кручением). При распаде твердого раствора образуются карбиды, нитриды титана. Вследствие изоморфности кристаллических решеток и близости их параметров карбиды и нитриды способны взаимно растворяться. Соединения подобного рода принято называть карбонитридами титана $Ti(C,N)$. При механическом воздействии они не испытывают пластической деформации (по минералогической шкале их твердость около 9, а твердость нитрида титана соответствует 8). Места, где наблюдается скопление нитридов, часто служат очагами хрупкого разрушения.

Корпуса атомных энергетических установок работают при температурах 270-325°C в условиях радиационного облучения. Для их изготовления используются теплоустойчивые стали типа 12X1МФ, 15X2МФА, 15X2НМФА. Основной составляющей фазой является α -фаза, которая представляет собой твердый раствор на основе железа, имеющего ОЦК решетку: внедрения (углерода, азота и др.) и замещения (хрома, молибдена, ванадия). Основной карбидной фазой является легированный цементит M_3C сложного карбида $M_{23}C_6$ и следы M_3C_7 , VC . Крупные карбиды $M_{23}C_6$ формируются в основном в виде цепочек или отдельных карбидов по границам зёрен, при этом средний размер этих карбидов составляет 0,6 - 1,5 мкм, размеры мелкодисперсных карбидов ванадия, расположенных в ферритных зёрнах, – 0,06 - 0,08 мкм. Для создания такой структуры стали подвергаются нормализации и высокому отпуску при температурах 650 - 750°C. Для ответственных элементов энергетического оборудования допустимым является размер зерна от 5-го до 3-го балла. После двойной закалки и высокого отпуска в центре образца (15X2МФА-А с 0,6-0,8% Ni), толщиной 420 мм, мелкозернистая бейнитно-мартенситная структура обеспечивает высокие значения прочности и вязкости.

Для защиты материала корпуса реактора от коррозионных повреждений используется антикоррозионная наплавка, выполненная аустенитными хромоникелевыми сварочными материалами (сварочная лента марки (Св-07X25Н13)). Толщина плакирующего антикоррозионного покрытия корпусов реакторов ВВЭР-210 равна 16-22 мм, ВВЭР-440, ВВЭР-1000 выполняется в два слоя суммарной толщиной 9 ± 2 мм.

Из литературных данных следует, что поврежденность, возникающая при силовом воздействии (усталость), физически интерпретируется как непрерывный процесс образования, роста и взаимодействия микродефектов различного уровня от атомного до структурного, определяемого размером зерна. Существуют критическая концентрация микродефектов и критический уровень пластической деформации, приводящие к разуплотнению материала. Перед разрушением разуплотнение может достигать несколько процентов. Длительность периода до появления видимой макротрещины оценивается величиной, равной 80-90% от долговечности образца. При этом в поверхностном слое металла, глубиной порядка размера зерна, процесс накопления повреждений протекает более ускоренно по сравнению с объемом.

Анализ данных по влиянию радиационного облучения показывает, что при температуре ниже $0,5 T_{пл}$, энергии нейтронов $> 0,5$ МэВ и флюенсе нейтронов более 10^{23} нейтронов/м² для углеродистых и нержавеющей сталей наблюдается радиационное охрупчивание – повышение температуры вязкохрупкого перехода и снижение относительного удлинения, поперечного сужения, ударной вязкости, снижение пластичности, повышение предела текучести, предела прочности. За 40 лет эксплуатации реактора суммарный флюенс может достигать величины $5,7 \cdot 10^{23}$ нейтронов/м² (для внутренней стенки корпуса реактора ВВЭР-1000). Радиационное охрупчивание связано с образованием радиационных дефектов, мелкодисперсных фосфидов и карбидов, сегрегаций фосфора на межфазных границах, а также перераспределением исходной дислокационной структуры. С увеличением дозы нейтронного облучения феррито-перлитные стали становятся весьма пересыщенными фосфором, происходит его миграция к поверхностям раздела и границам зерен. Легирование стали никелем усиливает влияние фосфора на радиационное охрупчивание, соответственно его содержания в стали не превышает 2%. Наблюдаются также выделения карбидов ванадия, распухание металла (увеличение объема). Эти эффекты приводят к изменению химического состава матрицы и, как следствие, к изменению механи-

ческих свойств материала. Опасность низкотемпературного радиационного охрупчивания заключается в том, что повышается вероятность разрушения.

Для описания поликристаллических материалов, среды с повреждениями разработаны различные модели. Среди моделей значительный интерес представляют структурные модели, в которых, с одной стороны, явным образом описывают явления, происходящие в структуре материала, а с другой - используют достаточно удобный и простой формальный математический аппарат. Основополагающими являются работы Л.М. Качанова и Ю.Н. Работнова, в которых используется понятие функции повреждений (поврежденность) Ψ . Физический смысл Ψ зависит от используемой модели. Например, в качестве Ψ может быть использована критическая плотность дислокаций, концентрация микродефектов и уровень пластической деформации. В качестве поврежденности рассматриваются поры, микротрещины, включения. Названные повреждения приводят, например, к изменению модулей упругости, анизотропии физико-механических свойств первоначально изотропных материалов. Эффективные модули упругости (Юнга, сдвига) описываются [4, 5]:

$$E = E_0(1 - \Psi), \quad G = G_0(1 - \Psi), \quad (1)$$

где индексу 0 соответствует неповрежденный материал, функция поврежденности Ψ определяется в виде:

$$\Psi \approx -\frac{\Delta\rho}{\rho_0} = v_\omega N_\omega / \rho_0. \quad (2)$$

Здесь N_ω , v_ω , $\Delta\rho$, ρ_0 - концентрация микропор (микротрещин), средний объем поры, изменение плотности, плотность материала в отсутствие повреждений соответственно.

Известно, что скорость упругих волн и модули упругости связаны следующими соотношениями:

$$G = \rho C_t^2, \quad E = \frac{\rho C_t^2 (3C_l^2 - 4C_t^2)}{C_l^2 - C_t^2}; \quad (3)$$

$$v = \frac{C_l^2 - 2C_t^2}{2C_l^2 - 3C_t^2}$$

где C_t - скорость сдвиговой волны; C_l - скорость продольной волны; ρ - плотность.

Упругие волны реагируют на все происходящие в контролируемой среде процессы, выполняют функции универсального датчика, поставляющего сведения о данной среде. Следует подчеркнуть, для оценки механических характеристик среды с повреждениями и моделирования распространения упругих волн в этой среде используется один и тот же математический аппарат. Выводы работ, посвященных распространению упругих волн в среде с повреждениями, могут служить основой для построения комплексного акустического метода определения физико-механических характеристик реальных, поврежденных конструкционных материалов. В задачах практического использования упругих волн наибольшую стабильность, наименьшую погрешность измерения обеспечивает измерение скорости упругих волн.

Учитывая зависимость скорости упругих волн от модулей упругости и плотности, можем также определить скорость упругих волн с учетом поврежденности среды:

$$C_i = C_{i0}(1 - k\Psi). \quad (4)$$

Аналогичное выражение можно получить, если рассматривать распространение упругих волн в среде с повреждениями. Соотношение (4) показывает, что с точностью до некоторой функции k , определяемой экспериментально, может быть определена величина Ψ , если известно изменение скоростей. Скорость C_i , $i = 1, 2, 3$ упругой волны при распространении через исследуемый образец определяли по формуле (прием и излучение упругих волн осуществляется одним датчиком):

$$C_i = 2L/t_i, \quad (5)$$

где L – толщина образца, м.

Так как работы производились в режиме излучения и приема, то в формуле (1) путь принимался равным $2L$.

В работе приняты следующие обозначения: индексы 1, 2 – сдвиговая волна, вектор поляризации которой направлен во взаимно перпендикулярных направлениях. Индекс 3 обозначает продольную волну. Согласно этим обозначениям:

$t_{1,2}$ – задержка (время распространения) сдвиговых волн, с.

t_3 – задержка продольных волн, с.

Для реального объекта контроля измерить толщину с высокой точностью не представляется возможным. Это связано с отсутствием доступа к конструкции, низкой точностью применяемого измерительного инструмента (штангенциркуля, микрометра и т.д.). Изменения скорости упругих в материале, связанные с процессами накопления повреждений, не превышают единиц процентов. Кроме того, измерительная техника позволяет проводить измерения времени распространения упругих волн. Скорость можно получить после соответствующего пересчета по формуле (5). Учитывая также тот факт, что среда с повреждениями оказывает различное влияние на разные типы упругих волн. Поэтому при анализе результатов экспериментов трудно определяемая толщина материала была исключена введением следующих безразмерных параметров $A, D1, D2$:

$$A = \left(\frac{t_1}{t_2} - 1 \right), \quad D1 = \left(\frac{t_1}{t_3} - 1 \right), \quad D2 = \left(\frac{t_2}{t_3} - 1 \right). \quad (6)$$

Параметр A принято называть *акустической анизотропией материала*.

При использовании поверхностных волн в качестве характеристики поврежденности Ψ можно использовать задержки (время распространения) рэлеевских импульсов соответственно вдоль и перпендикулярно линии действия нагрузки.

Для оценки напряженного состояния элементов конструкций используются уравнения акустоупругости, связывающие главные напряжения с акустическими задержками импульсов упругих объемных волн [2]:

$$\sigma_1 = k_1 \left(\frac{d_1^0}{d_1} - 1 \right) - k_2 \left(\frac{d_2^0}{d_2} - 1 \right) \quad (7)$$

$$\sigma_2 = k_3 \left(\frac{d_2^0}{d_2} - 1 \right) - k_4 \left(\frac{d_1^0}{d_1} - 1 \right) \quad (8)$$

где $d_1 = \frac{t_1}{t_3}$, $d_2 = \frac{t_2}{t_3}$, $d_1^0 = \frac{t_1^0}{t_3^0}$, $d_2^0 = \frac{t_2^0}{t_3^0}$,

здесь t_1^0, t_2^0, t_3^0 – соответствующие значения задержек для ненапряженного материала трубопровода

Величины k_1, k_2, k_3, k_4 определяются в ходе тарировочных экспериментов на образцах из контролируемого материала.

Результаты экспериментов

На образцах из стали 08X18H10T диаметром рабочей части 12 мм исследованы закономерности накопления поврежденностей при малоциклового усталости на стадии накопления рассеянных микроповреждений (до появления трещины менее 1 мм.). *Условия проведения испытаний*: симметричный цикл, жесткое изотермическое нагружение с постоянной амплитудой пластической деформации, база испытаний (количество циклов) $5 \cdot 10^2 - 10^5$, амплитуды пластических деформаций: 0,3%; 0,2%; 0,1% .

В процессе испытаний наблюдается образование мартенсита, а также было обнаружено появление магнитных свойств, образуются нитриды, концентрация которых в поверхностном слое выше, в нем же имеются микротрещины (рис. 1). Результаты гидростатического взвешивания: плотность стали в неповрежденном состоянии 7920 кг/м^3 , в зоне разрушения уменьшается до 7730 кг/м^3 , что составляет 2,4%. Наблюдается упрочнение материала. Амплитуда напряжения увеличивается от 200 до 770 МПа для ($\Delta\varepsilon = 0,3$).

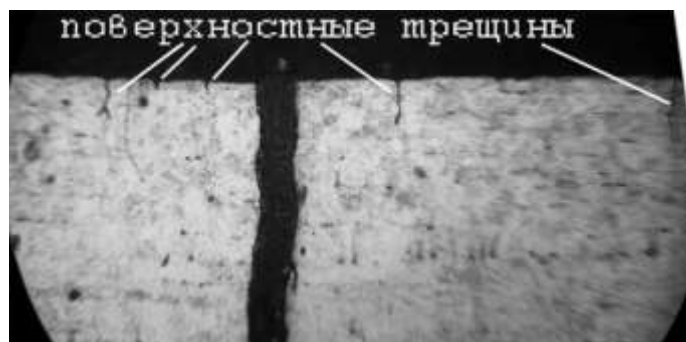


Рис. 1. Сталь 08X18H10T $\Delta\varepsilon = 0,3$, $N^* = 845$ циклов, $\times 135$ (поверхность образца)

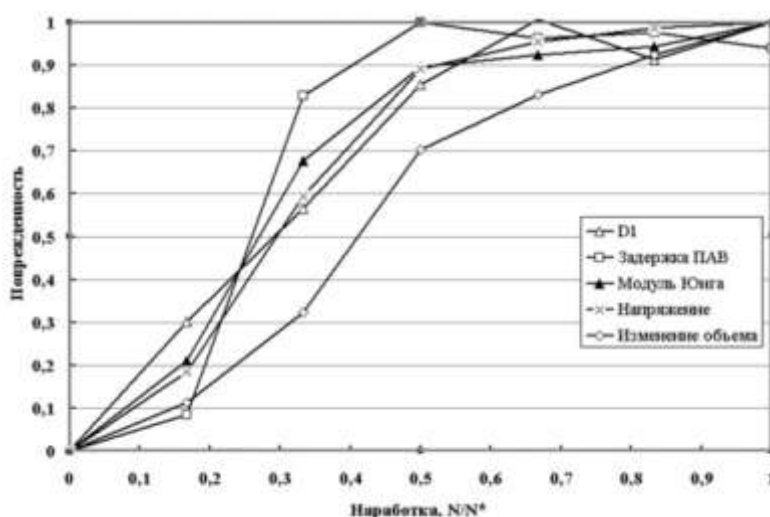


Рис. 2. Накопление поврежденности в образце от наработки: $\Delta\varepsilon = 0,3$

На рис. 2 показан характер изменения регистрируемых характеристик в зависимости от наработки N/N^* . Результаты экспериментов показали:

- что параметр поврежденности на основе задержки поверхностной волны (поведение кривой «задержка ПАВ» на рис. 2) меняется быстрее, достигает максимального значения, равного 1 при наработке N/N^* , равной 0,5. Это позволяет выбрать в качестве диагностического параметра поверхностную волну для ранней диагностики исследуемого образца;
- параметр поврежденности на основе объемных волн (кривая $D1$) достигает своего максимального значения при наработке N/N^* около 80% до разрушения образца и тем самым позволяет уточнить ресурс контролируемого узла.

Акустический параметр $D1$ (так же, как $D2$) линейно зависит от значения предела текучести, изменяющегося в процессе усталостных испытаний:

$$\sigma_{02} = 1,188 \cdot D1 - 10398. \quad (9)$$

Величина достоверной аппроксимации $R^2 = 0,9892$.

Уравнение Коффина-Мэнсона для стали 08X18H10T имеет вид:

$$N^* = 5365 \cdot (\Delta W_{\text{ц}})^{-1,913} \quad (10)$$

где $\Delta W_{\text{ц}}$ – работа напряжений за цикл нагружения, площадь петли гистерезиса МДж/м³. Расхождение данных определения числа циклов до разрушения, полученных по результатам акустических измерений и числом циклов до разрушения, не превышает 20%.

Введенная функция повреждений через акустические параметры (параметры $D1, D2, A$, а также задержка поверхностных волн) является структурно чувствительной характеристикой. По величине изменения акустических параметров можно оценить структурную поврежденность металла. За величину измеряемого критерия поврежденности материала принято:

$$\Psi_A = \alpha_D \frac{D_t - D_0}{D^* - D_0} + \alpha_R \frac{t_R^t - t_R^0}{t_R^* - t_R^0} + \alpha_A \frac{A_t - A_0}{A^* - A_0}, \quad (11)$$

где индекс $t, 0, *$ – соответствует текущему (в момент измерения), начальному и критическому (предельному) состоянию соответственно; коэффициент D_t принимает следующие значения: $D_t = D1_t + D2_t$, определенные в выражении (6); $\alpha_D, \alpha_R, \alpha_A$ – некоторые весовые коэффициенты, зависящие от вида, количества используемых упругих волн, материала контролируемого элемента. Физический смысл критерия заключается в соотношении текущих акустических параметров с абсолютным диапазоном изменения этих параметров.

Максимальное значение накопленных повреждений $\Psi=1$, что соответствует выработке ресурса. В результате анализа проведенных экспериментов, а также с учетом коэффициентов безопасности, разброса экспериментальных данных максимальное значение Ψ следует принимать равным 0.8 ($\Psi=0,8$). При таком значении металл достигает предельного состояния. Для реальной конструкции при достижении максимального значения накопленных повреждений необходимо ставить вопрос о проведении дополнительных исследований, проведении расчетов, прекращении эксплуатации контролируемого узла и его дальнейшей замене.

Проведены [2, 6] исследования влияния радиационного облучения на структуру и физико-механические свойства корпусной стали, сварных соединений и коррозионно-стойкой наплавки. Исследования выполнялись на образцах – темплетях (образцы мини Шарпи размерами $5 \times 5 \times 27,5$ мм), вырезанных с внутренней поверхности корпуса реактора ВВЭР-440 (сталь 15X2МФА): из сварного шва, основного металла и зоны термического влияния. Образцы вырезались из разных атомных станций, имеющих различное значение флюенса. Влияние флюенса и температуры вязкохрупкого перехода на акустические характеристики показано на рис. 3.

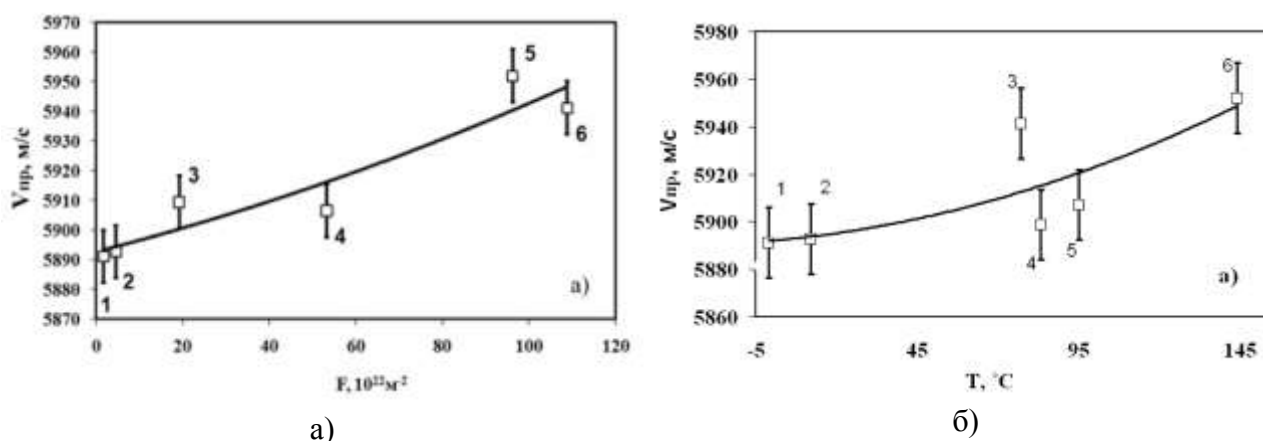


Рис. 3. Зависимость скорости продольной волны:
 а – от флюенса; б – критической температуры хрупкости (сталь 15X2МФА)

На рис. 3 точки 1, 2 соответствуют образцам-темплетам, вырезанным с Хмельницкой АЭС (выгрузка 3), точка 3 - Кольской АЭС первый блок, точка 4 - второй блок, точка 5 - Нововоронежской АЭС третий блок, точка 6 - четвертый блок.

Влияние радиационного облучения на механические свойства стали 08X18H10T проводились на образцах (типа Шарпи) из основного металла (ОМ) и сварного шва (МСШ) в горячей камере ФГУП «Прометей», Санкт-Петербург. Повреждающие дозы облучения и механические свойства, результаты акустических измерений для образцов приведены в табл. 1 (основной металл и металл сварного шва). В табл. 2 приводятся уравнения, связывающие пределы прочности, текучести с акустическими. В качестве функции накопленных повреждений может быть использовано выражение (11). Предельное значение Ψ определяется исходя из поврежденности при максимально полученном значении флюенса.

Таблица 1

Повреждающая доза, сна	ОМ	МСШ	ОМ	МСШ	ОМ	МСШ
	0		5-7		40	
σ_{02} , МПа	295	460	890	970	1030	1025
σ_{ϵ} , МПа	570	615	955	1050	1110	1095
J_C , кН/м	305 - 463	450	93 - 141	115-120	30 - 50	35-40
t_R , нс	5273	5240	5341	5374	5387	5408

Таблица 2

Уравнения линейной аппроксимации	
Основной металл	Металл сварного шва
$\sigma_{02} = 6,99t_R - 36559$, $R^2 = 0,947$	$\sigma_{02} = 3,53t_R - 18013$, $R^2 = 0,9892$
$\sigma_{\epsilon} = 4,89t_R - 25203$, $R^2 = 0,9832$	$\sigma_{\epsilon} = 3,00t_R - 15113$, $R^2 = 0,9885$
$J_C = 17303 - 3,21t_R$, $R^2 = 0,9614$	$J_C = 13310 - 2,46t_R$, $R^2 = 0,9999$

Результаты практического применения

1. Был исследован корпус разрушенной колонны деформированного стакана синтеза пентакарбонила железа. Колонна построена из стали 12X18H10T [3]. На заводе (г. Дзержинск) была проведена замена поврежденной колонны. Необходимо было оценить техническое состояние оставшихся колонн. Результаты испытаний разрушенной колонны показали, что произошло охрупчивание материала, наблюдается анизотропия свойств. На основании полученных данных был сформулирован акустический критерий предельного состояния K_{δ} :

$$K_{\delta} = \frac{E_{\delta} - E_0}{E_p - E_0}, \quad (12)$$

где E_{δ} , E_0 , E_p - значение модуля Юнга в момент диагностики, в состоянии поставки и в момент хрупкого разрушения соответственно.

При $K_{\delta} > 0,7$ металл находится в состоянии, близком к хрупкому разрушению, и достигает предельного состояния.

2. На Нижегородском металлургическом заводе [7] проведены исследования ножевой продукции (сталь 6ХС). Структура стали после изотермической закалки – мартенсит и остаточный аустенит. При изготовлении ножей (размером 2150×130×25 мм, 2150×140×45) после термической обработки наблюдается коробление и значительные пластические деформации. При механической правке на гидравлическом прессе возможно разрушение.

На основании данных, полученных на образцах, изделиях ножевой продукции, предложен критерий качества (наличие остаточных напряжений) гильотинных ножей:

$$\sigma_i + \sigma_p < \sigma_B, \quad (13)$$

где σ_i – значение остаточных напряжений в ноже, определяется при акустических измерениях, МПа; σ_p – напряжения, создаваемые при правке на гидропрессе, МПа; σ_B – предел прочности, МПа.

Измерения напряжений осуществлялись акустическим методом по алгоритму, приведенному в формулах (7), (8).

3. Проведены измерения остаточных напряжений [8] на трубопроводах типа ДУ-300 (сталь 08X18H10T, $\varnothing 325 \times 16$ мм) в районе сварных швов на атомных станциях: Калининской (блок 3), Смоленской и Курской (блок 3). Измерения проводились в момент остановки энергоблоков. В уравнениях акустоупругости необходима информация об акустических характеристиках в металле трубопровода, в котором отсутствуют напряжения. Для этого использовалось предположение, что на большом расстоянии от шва (более 200 мм) поле механических напряжений равно нулю. При проведении измерений была исключена зона термического влияния (на расстоянии 5 мм от сварного шва температура не превышает 500°C). Распределение напряжений имеет сложный вид. Максимальное значение экспериментальных данных 210 МПа, расчетные данные: 300 МПа.

Выводы

1. В статье рассмотрена актуальная научно-техническая проблема оценки фактической поврежденности конструкционных металлических материалов акустическим методом для различных внешних механических (усталостное и статическое нагружение), термических и радиационных воздействий.

2. Показано, что в структуре конструкционных металлических материалов происходят необратимые процессы, приводящие к изменению физико-механических характеристик.

3. Показано, что параметры упругих волн зависят от характеристик исследуемой среды. Результаты исследований влияния среды на параметры упругих волн служат основой для построения комплексного акустического метода определения физико-механических характеристик конструкционных материалов.

4. Предложена структурная модель, описывающая процесс накопления рассеянных микроповреждений в материале, параметры которой могут быть измерены акустическим методом.

5. Показано, что состояние поверхностного слоя может быть использовано в задачах более ранней оценки выработанного ресурса материала конструкций. Предложена модель, учитывающая влияние процессов деградации поверхностного слоя на параметры поверхностных волн. Приведены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие предложенную модель.

6. Предложены методики для определения механических характеристик материала: модуля упругости, предела текучести, вязкости разрушения, внутренних напряжений, размера зерна, и др. на элементах конструкций, без нарушения их прочностных параметров.

Библиографический список

1. **Паршин, А.М.** Структура, прочность и радиационная повреждаемость коррозионно-стойких сталей и сплавов / А.М. Паршин. – Челябинск: Металлургия, 1988. – 656 с.
2. Неразрушающий контроль: справочник / под ред. В.В. Клюева. Т. 4. – М.: Машиностроение, 2004. – 736 с.
3. **Хлыбов, А.А.** Поведение структуры и повреждаемость тонколистовой стали 12X18H10T в конструкции колонн при производстве пентакарбонила железа / А.А. Хлыбов, В.А. Скуднов, М.К. Чегуров // Контроль. Диагностика. 2007. № 12. С. 49–53.

4. **Хлыбов, А.А.** Использование упругих волн для определения физико-механических характеристик образцов, подвергаемых радиационному облучению / А.А. Хлыбов, В.Г. Васильев, А.Л. Углов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. №12. С. 46–49.
5. **Хлыбов, А.А.** Акустический метод оценки технического состояния крюков из сплава ВТЗ-1. // Деформация и разрушение материалов. 2008. №8. С. 31–36.
6. **Хлыбов, А.А.** Исследование состояния материала корпусов реакторов ВВЭР подвергаемого нейтронному облучению по параметрам упругих волн / А.А. Хлыбов, В.Г. Васильев, А.Л. Углов // Атомная энергия. 2009. Т. 106. Вып. 1. С. 31–35.
7. **Хлыбов, А.А.** Оценка состояния изделий ножевой продукции, подвергаемых термической обработке // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2009. Т. 75. № 4. С. 54–57.
8. **Хлыбов, А.А.** Оценка остаточных напряжений в трубопроводах из стали 08Х18Н10Т / А.А. Хлыбов, А.Л. Углов // Контроль. Диагностика. 2009. № 6. С. 32–35.

*Дата поступления
в редакцию 25.01.2010*

A.A. Khlybov, V.A. Skudnov

**ESTIMATION OF STRUCTURAL CHANGES IN CONSTRUCTIONAL
METAL MATERIALS BY ACOUSTIC METHODS TO MAINTENANCE OF SAFE
OPERATION OF TECHNICAL OBJECTS**

The influence of external exposure (cyclic, thermal, radiation) onto structure of constructional metallic materials has been researched by acoustics method in this paper. The Examples practical use of obtained results into problems of maintenance of safe operation of main structural components.

Key words: safe operation, structural changes, fatigue, radiation, ultrasonic check.

УДК 669

В.А. Братухин¹, В.А. Васильев²**РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО ПРОГРЕССИВНЫХ КРЕПЕЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ
ДЛЯ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ**ОАО «Нормаль»¹,Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

Создание новых крепежных систем и совершенствование существующих обусловлено стремлением соответствовать инновационным тенденциям развития конструкций летательных аппаратов. Рассмотрены примеры изготовления новых крепежных систем для авиационной техники. Анализируется информационное обеспечение конструкторско-технологических решений для обеспечения качества высокоресурсных крепежных изделий.

Ключевые слова: высокоресурсный крепеж, авиастроение, информационная поддержка, метод холодной высадки, качество продукции.

Высокоресурсные крепежные изделия широко применяются в конструкциях летательных аппаратов с применением как металлов, так и полимерных композиционных материалов. Указанные изделия применяют в конструкциях крыла, фюзеляжа, вертикального и горизонтального оперения, элементов управления и агрегатов механизации крыла дозвуковых и сверхзвуковых самолетов пассажирской, грузовой, военно-транспортной, военной авиации.

Производство летательных аппаратов – одно из наиболее сложных, дорогостоящих и трудоемких производств. Количество деталей из различных материалов, выполняющихся с использованием различных технологических процессов, которые необходимо соединять различными способами, в конструкциях планера магистральных самолетов составляет сотни тысяч единиц. Так, в конструкции планера широкофюзеляжного самолета ИЛ-68 потребовалось более 1 млн 480 тыс. заклепок различного типа и более 150 тыс. болтов для выполнения соединений, обеспечивающих формирование внутренней структуры и поверхности летательного аппарата, включающих технологически законченные изделия – элементы, узлы, секции, отсеки, агрегаты.

Выполнение высоконагруженных соединений является одним из наиболее ответственных и трудоемких этапов агрегатной сборки планера, трудоемкость которой составляет до 30% общей трудоемкости производства самолета. Поэтому степень конструктивно-технологического совершенства соединений в значительной степени определяет уровень технологичности конструкции планера и соответственно влияет на его себестоимость как интегральный показатель производственной эффективности и на весовые характеристики, формирующие эксплуатационную эффективность самолета.

Проблема повышения качества, надежности, ресурса авиационной техники, авиационных конструкций всегда была и будет актуальной. Это требует разработки новых и совершенствования существующих типов крепежных систем, а также прогрессивных методов его постановки. Кроме этого, создание новых крепежных систем и совершенствование существующих систем обусловлено стремлением соответствовать инновационным тенденциям развития конструкции и технологии производства летательных аппаратов. К таким тенденциям в первую очередь следует отнести:

- увеличение доли полимерных композиционных материалов (ПКМ) и титановых сплавов в массе планера самолета;
- повышение уровня автоматизации агрегато-сборочного производства в целом и операций выполнения соединений, в частности;
- увеличение заявленного ресурса планера самолета и соответственно его конструктивных элементов, в том числе, соединений.

В настоящее время нижегородское ОАО «Нормаль» является единственным в России предприятием по разработке и производству основных видов авиационно-космических крепежных изделий. ОАО «Нормаль» изготавливает крепежные детали диаметром от 4 из углеродистых, легированных, нержавеющей сталей, алюминиевых и титановых сплавов, а также крепежные изделия для выполнения неразъемных соединений в конструкциях из металлических и композиционных материалов безударным методом, в том числе при одностороннем доступе к соединяемым деталям. Технология изготовления обеспечивает получение деталей от 8 до 12 квалитета по ГОСТ 25346-89 на линейные размеры и размеры диаметров, от 4-й до 6-й степени точности на диаметры резьбы и эффективную защиту от коррозии металлическими покрытиями (цинкование и кадмирование) и неметаллическими покрытиями (анодное оксидирование для алюминиевых и титановых сплавов, химическое пассивирование для нержавеющей сталей).

Качество поставляемой заказчику продукции гарантируется действующей системой управления качеством (СМК), которая разработана и документально оформлена в соответствии с требованиями ГОСТ Р ИСО 9001-2001 и базируется на принципах менеджмента качества:

1. Ориентация на потребителя – организации зависят от своих потребителей, поэтому должны понимать их настоящие и будущие потребности, выполнять требования и стремиться превзойти ожидания.

2. Лидерство руководителя – руководители обеспечивают единство цели и направление деятельности предприятия. Они создают и поддерживают внутреннюю среду, в которой работники могут быть полностью вовлечены в решение задач предприятия.

3. Вовлечение работников – работники всех уровней составляют основу предприятия, и их полное вовлечение дает возможность предприятию с выгодой использовать их способности;

4. Процессный подход – желаемый результат достигается эффективнее, когда деятельностью и соответствующими ресурсами управляют как процессом.

5. Системный подход к менеджменту: выявление, понимание и управление взаимосвязанными процессами как системой вносят вклад в результативность и эффективность работы предприятия при достижении ее целей

6. Принятие решений, основанных на фактах – эффективные решения принимаются на основе анализа данных и информации.

7. Взаимовыгодные отношения с поставщиками – предприятие и его поставщики взаимозависимы, отношения взаимной выгоды повышают способность обеих сторон создавать ценности.

Новым направлением в развитии предприятия является освоение и серийное изготовление крепежных изделий из коррозионно-стойких и жаропрочных сталей для двигателестроительных и агрегатных заводов авиационной отрасли. Производство высокоресурсного крепежа методом холодной высадки из таких сталей является весьма актуальной задачей, при решении которой возможно расширить номенклатуру изделий, изготавливаемых высокопроизводительным и малоотходным способом.

Для осуществления пластической деформации при холодной высадке материал должен обладать определенным комплексом пластических и прочностных характеристик. В первую очередь при производстве крепежа материал должен выдерживать при испытаниях на осадку степень деформации не менее 75%, а удельные нагрузки не должны превышать предела текучести на сжатие инструментальных материалов. Этим требованиям в наибольшей степени отвечают аустенитная сталь 10X11H23T3MP (ЭИ696М, ЭП33ВД), из которой изготавливаются крепежные детали, эксплуатирующиеся при температурах до 650°C; сталь мартенситного класса 13X11H2B2MФ-Ш (ЭИ961-Ш), из которой изготавливают крепежные изделия, эксплуатирующиеся при температурах до 500°C; мартенситно-стареющая сталь 03X11H10M2T-ИД,ИЛ (ВНС17-ИД,ИЛ), для деталей, длительно работающих при температурах до 500°C, а также после проведенных на ОАО «Нормаль» исследовательских работ по

оценке штампуемости сталь мартенситно-ферритного класса 14X17H2-Ш (ЭИ268-Ш), из которой изготавливаются крепежные изделия, эксплуатируемые при температурах до 280°C.

Холодная высадка крепежных изделий обеспечивает при высокой производительности процесса максимальное использование исходного металла, а также сохраняет в изделии целостность внутренней структуры металла (отсутствие перерезания волокон), что неизбежно при изготовлении крепежа механической обработкой, что, в конечном итоге, повышает эксплуатационные свойства изделий.

Кроме деформационного упрочнения, в итоге механические свойства крепежа достигаются соответствующей термоупрочняющей обработкой. Благодаря ей, изделия приобретают необходимые прочность и пластичность, в зависимости от марки стали и режимов обработки. Для термоупрочняющей обработки широкой гаммы жаропрочных и коррозионно-стойких сталей ОАО «Нормаль» приобрело современную вакуумную печь, создающую температуры до 1350°C и степень вакуума до 10^{-5} МБар. Технологической особенностью данной печи является закалка в вакууме в потоке аргона, позволяющая получить чистую и светлую поверхность изделий без последующей пескоструйной обработки или травления.

Другим новым направлением в развитии ОАО «Нормаль» является освоение производства крепежных систем с тарированной затяжкой (аналог применяемого крепежа типа Hi-Lock). Внедрением указанной крепежной системы в летательных аппаратах обеспечивают создание прочных неразъемных соединений, где затруднена возможность применения болтов и болт-заклепок. Тарированное усилие сжатия собираемого пакета обеспечивается этими крепежными системами за счет достижения стабильной точности величины крутящего момента при завершении процесса свинчивания болта и гайки. Реализация этого условия является одной из основных предпосылок высокой усталостной прочности конструкции в зоне соединения.

Данные крепежные системы отвечают следующим требованиям:

1. Обеспечению высокого качества и эксплуатационной надежности соединения за счет:
 - стабильности стяжки пакета деталей, не зависящей от квалификации сборщика;
 - высокого качества аэродинамических поверхностей, обеспечиваемого отсутствием шлица на головках болтов;
 - снижения веса крепежа, обеспечиваемого применением титанового и алюминиевых сплавов.
2. Снижению трудоемкости выполнения соединения за счет высокой степени механизации процесса установки крепежа.

На указанный крепеж разработаны и утверждены следующие отраслевые стандарты:

1. ОСТ 1 00750-76 «Болты, гайки и шайбы для соединений с тарированной затяжкой. Технические условия».
2. ОСТ 1 31024-77 «Болты с плоско-скругленной головкой из титанового сплава (для соединений с тарированной затяжкой). Конструкция и размеры».
3. ОСТ 1 31025-77 «Болты с потайной головкой $\angle 90^\circ$ из титанового сплава (для соединений с тарированной затяжкой). Конструкция и размеры».
4. ОСТ 1 31026-77 «Болты с потайной головкой $\angle 120^\circ$ из титанового сплава (для соединений с тарированной затяжкой). Конструкция и размеры».
5. ОСТ 1 37005-77 «Гайки из алюминиевого сплава Д16Т. Конструкция и размеры».

В условиях рыночной экономики разработка и изготовление конкурентоспособных высокоресурсных крепежных изделий, ничем не уступающих лучшим мировым аналогам, приобретает особую важность и актуальность. Специфической особенностью производства ОАО «Нормаль» является крупносерийное и массовое производство крепежных изделий большой номенклатуры, которые используются в конструкциях современных летательных аппаратов для силового крепления деталей обшивки, внутреннего набора и каркаса планера, крыльев и оперения, для декоративного оформления салона.

Основной целью при разработке новых высокоресурсных крепежных изделий является

расширение возможностей отраслевых КБ при проектировании летательных аппаратов нового поколения, отличающихся улучшенными весовыми характеристиками, экономичностью по расходу топлива и летно-техническими характеристиками. Отличительной особенностью разработанных крепежных изделий для односторонней и безударной клепки является простота в обращении, не требующая высокой квалификации рабочих, эффективность и качество образования соединения за счет специального пневмо- или гидроинструмента, возможность его установки практически во всю гамму существующих материалов (металлов, стеклопластиков, углепластиков и композиционных материалов).

С целью повышения качества проектируемых изделий, сокращения сроков разработки конструкторско-технологической документации и снижения затрат в производстве на предприятии внедрена автоматизированная производственная конструкторско-технологическая система, позволяющая прогнозировать оптимальные конструкторские решения, а также с помощью математических методов, моделей и вычислительной техники реализовывать научно обоснованные методы прогнозирования качества материалов и изделий на всех стадиях его изготовления, учитывающие влияние химического состава, состояние материала, конструкцию изделия, технологию его изготовления и условия эксплуатации.

Весь цикл работ по разработке и изготовлению продукции производится в соответствии с требованиями отраслевых нормативных документов и стандартов предприятия по системе менеджмента качества.

Разработка конструкторской документации и конструкторское сопровождение производства предназначены для обеспечения производства документацией, определяющей состав и устройство изделий и содержащей необходимую информацию для их изготовления, контроля и приемки.

Процесс разработки конструкторской документации и конструкторского сопровождения производства изделий включает выполнение следующих работ:

- проектирование и разработку чертежей и отраслевых авиационных стандартов: «Конструкция и размеры» и «Технические условия»;
- метрологическую экспертизу разработанной конструкторской документации;
- представление разработанной конструкторской документации на согласование главным специалистам предприятия;
- - верификацию и валидацию конструкторских разработок после анализа результатов проектирования и испытаний опытных образцов;
- предоставление разработанных отраслевых авиационных стандартов на согласование предприятием, применяющим стандарты в своих разработках и производстве;
- внесение изменений в конструкторскую документацию и отраслевые авиационные стандарты;
- введение в действие конструкторских документов, тиражирование и рассылку подразделениям предприятия и предприятиям-потребителям;
- регистрацию, учет, хранение и актуализацию конструкторской документации.

Разработка конструкторской документации осуществляется в соответствии с требованиями следующих стандартов: ГОСТ 2.101-68; ГОСТ 2.102-68; ГОСТ 2.103-68; ГОСТ 2.104-68; ГОСТ 2.105-68; ГОСТ 2.106-68; ГОСТ 2.109-68; ОСТ1 00001-2003.

Предпочтительным является использование ранее разработанных технических решений и унифицированных решений элементов конструкции, показавших высокий уровень надежности в процессе эксплуатации.

Конструкторско-технологическая обработка спроектированных изделий, их испытания по утвержденной программе проводятся в соответствии с утвержденной нормативной документацией на конкретную разработку. По их результатам проводится верификация и валидация разработки с оформлением соответствующего отчета (протокола) с рекомендациями по корректировке конструкторской документации.

Традиционные методы проектирования технологических процессов подразделяются на проектирование единичных и групповых процессов. Описание технологического процесса по степени детализации может быть маршрутное и маршрутно-операционное. При проектировании технологического процесса должно обеспечиваться требуемое качество деталей, максимальная производительность труда, сокращение трудовых и материальных затрат на реализацию процесса, соблюдение правил по охране труда.

Метрологическая экспертиза технологической документации производится в следующем объеме:

- оценка возможностей контроля заложенных в документации норм точности;
- оценка правильности выбора средств измерения и средств контроля, обеспечивающих получение заданной точности;
- установление правильности метрологических терминов и определений, наименований и обозначений физических величин и их единиц.

Применяемая на ОАО «Нормаль» система проектирования включает в себя взаимосвязанные подсистемы:

- базу данных «Крепежные изделия»;
- пакет прикладных программ статистического анализа «Прогноз»;
- пакет прикладных задач «Расчет элементов конструкции» для конструкторских расчетов и методик оценки характеристик предельных состояний материала в конструкции;
- пакет чертежной графики «Компас»;
- пакет планирования и анализа «Пасек»;
- базу данных оформления конструкторско-технологической документации в виде протоколов, графиков и чертежей «Архив».

Управление системой осуществляется последовательными иерархическими операциями с обозначенными подсистемами и задачами, окнами пояснения, помощи и исполнения. Для организации работы в диалоговом режиме создана интегрированная база данных «Крепежные изделия», в которой хранится информация о материале, технологии обработки материала, конструкции деталей крепления, технологических процессов изготовления изделий, элементов технологического оснащения производства, которая позволяет осуществлять быстрый целенаправленный поиск необходимой информации. База данных имеет программные средства хранения и обновления информации.

Возможности компьютерного проектирования позволяют технологической службе предприятия осуществлять автоматизированное решение следующих основных задач:

- 1) получение полного комплекта технологической документации – операционных карт холодной высадки, механической обработки, технического контроля, карт технологического процесса термической обработки и нанесения покрытий;
- 2) проектирование конструкторской документации на технологическую оснастку и приспособления для конкретных видов оборудования.

Использование данной системы особенно эффективно в условиях массового производства, когда растет сложность изготовления деталей, повышаются требования по качеству, так как используется новый путь обеспечения новизны и конкурентоспособности – путь конструкторско-технологической гибкости, при котором обеспечиваются: высокая оперативность внесения изменений, возможность внедрения самых последних технологических достижений, способность быстро перестраиваться в соответствии с изменениями условий планирования, требований заказчика и конъюнктуры рынка.

Библиографический список

1. Современные технологии авиастроения / под ред. А.Г. Братухина, Ю.Л. Иванова. – М.: Машиностроение, 1999. – 832 с.

2. **Егер, С.М.** Основы авиационной техники / С.М. Егер, А.М. Матвеенок, И.А. Шаталов. – М.: Изд-во МАИ, 1999. – 576 с.
3. **Володин, В.А.** Информационное обеспечение конструкторско-технологических решений высокоресурсных крепежных изделий авиационно-космической техники / В.А. Володин, В.А. Братухин // Российская энциклопедия CALS. Авиационно-космическое машиностроение. – М., 2008. С. 416–418.
4. **Братухин, В.А.** Управление качеством продукции при производстве крепежных изделий авиационно-космической техники / В.А. Братухин, Ю.В. Давыдов // Авиационная промышленность. 2007. №4. С. 49–52.

*Дата поступления
в редакцию 25.01.2010*

V.A. Bratuhin, V.A. Vasilyev

DEVELOPMENT AND PRODUCTION OF PROGRESSIVE FASTENERS FOR AIRCRAFT INDUSTRY

Innovative tendencies in aircraft design have resulted in the development and modification of existing fasteners systems. The article provides examples of new fasteners for aircraft. The article also analyzes software for quality control in produced high-resource fasteners.

Key words: high-resource fasteners, aircraft industry, information support, method of cold landing, quality of product.

УДК 620.18 : 669.14 + 621.77 / 78 : 53.08

В.Г. Кутяйкин

МЕТАЛЛОВЕДЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ФОРМИРОВАНИЯ ОЧАГА ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ СТАЛЕЙ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ОАО «ГАЗ»

Исследовано влияние различных термопластических воздействий на изменения макро-, микро-, субмикроструктуры и механические свойства сталей перлитного и ледебуритного классов. Разработаны методы количественной оценки параметров структуры, механических свойств сталей и процессов термопластического воздействия. Детально исследовано формирование структуры при вдавливании в заготовку пуансонов различной формы и разработана математическая модель очага деформации на основе структурных изменений.

Ключевые слова: стали, структура, метрология.

Современное машиностроение неразрывно связано с использованием металлических материалов, среди которых наиболее распространены стали перлитного и ледебуритного классов. Поднять эффективность использования сталей и обеспечить качество производимых деталей возможно внедрением оптимальных процессов термопластического воздействия. Проектирование и освоение таких технологий требует, с одной стороны, объективной оценки параметров сталей, а с другой – понимания физической природы и возможности управления их свойствами за счет воздействия на структурные элементы от макроскопического до субмикроскопического уровня. Одним из перспективных направлений в этой сфере является изучение и количественная оценка изменений структуры в очаге пластической деформации.

Целью работы являлось решение важной проблемы развития металлургических аспектов технологических процессов термопластической обработки сталей перлитного и ледебуритного классов на основе выявленных закономерностей изменения макро-, микро- и субмикроструктуры в очаге деформации применительно к обеспечению качества деталей машиностроительного назначения и совершенствованию метрологического обеспечения прикладных исследований структуры и механических свойств металлов.

На основе анализа законодательных и нормативных актов определена роль измерений и испытаний как одного из важнейших элементов систем управления качеством продукции. Отмечена необходимость объективного определения входных данных, влияющих на разработку процессов, а также недостаточность методов для прикладных исследований и количественной оценки изменений структуры и свойств металлических материалов. В работе использованы термины и определения. *Термопластическая обработка* – совместные (нагрев при деформировании) и самостоятельные термические и пластические воздействия. *Совершенствование метрологического обеспечения:* разработка методов количественной оценки параметров структуры, пластических и прочностных характеристик сталей; определение способов и расчет погрешностей измерений применяемых методов; оценка корректности выявленных закономерностей с помощью статистических методов и критериев математического анализа; количественная оценка измеряемых параметров макро-, микро-, субмикроструктуры и механических свойств сталей; систематизация и идентификация данных в соответствии с поставленными задачами, разработка математических моделей; повышение достоверности расчетных данных о параметрах (пластических, силовых, тепловых) процессов термопластического воздействия на основе использования закономерностей изменения структуры и механических свойств сталей.

Исследованы свыше 50 машиностроительных марок сталей. По назначению: конструкционные углеродистые (10...45) и легированные (15Х...40Х, 12ХН, 20Г2Р, 30Г1Р, 30ХМА, 35ГС, 40ХН, 16ХСН, 18ХГТ, 19ХГН, 30ХГСА, 40ХН2МА, 38ХГНМ); инструментальные нетеплостойкие (У8А, У10А, 9ХС, 9ХФ, ХВГ), полутеплостойкие (Х12Ф1, Х12МФ, 5ХНМ, 6Х4М2ФС, 65Х6М3Ф3БС) и теплостойкие (Р18, Р12Ф3, Р6М5, 10Р6М5, Р6М5К5, 4Х2В5ФМ, 4Х5МФС, 3Х3М3Ф); с особыми свойствами пружинные, теплоустойчивые (70, 65Г, 51ХФА, 15ХМ) и другие. По равновесной структуре исследуемые стали относятся к перлитному (доэвтектоидные, эвтектоидные, заэвтектоидные) и ледебуритному классам. Содержание углерода в сталях находилось в диапазоне 0,1...1,9%, а суммарное содержание легирующих элементов 0...24%. Это позволило выявить влияние химического состава на стандартизированные и специальные механические характеристики сталей при разных условиях термопластического воздействия. На начальных этапах исследований использовались стандартизированные методы определения параметров свойств и структуры сталей, что позволяло получить и систематизировать общепринятые и, как следствие, конвертируемые данные. Однако в отдельных случаях этих показателей недостаточно для объективной оценки поведения материалов в технологии и эксплуатации. По причине устранения отмеченных недостатков осуществлена разработка и совершенствование методов анализа структуры и свойств сталей [1]. Кроме того, использовался ряд ранее предложенных специальных механических характеристик. Наиболее распространенной технологической характеристикой прочностных свойств сталей служит истинное напряжение пластического течения σ_i , рассчитываемое с помощью коэффициентов уравнения деформационного упрочнения σ_0 и n . Физический смысл истинного напряжения пластического течения заключается в исключении влияния напряженного состояния, т.е. соблюдении условия схемы одноосного напряжения до момента разрушения. Для соблюдения указанного условия при растяжении с определением σ_0 и n на основе результатов исследований предложены формулы расчета корректирующих коэффициентов прочности n_σ и пластичности n_ϵ , а также представлены экспериментальные значения коэффициентов n_σ и n_ϵ для разных сталей, структурных состояний и условий термопластического воздействия.

Важнейшей характеристикой при оценке качества машиностроительных сталей применительно к процессам объемного пластического воздействия является предельная деформация до разрушения, которая зависит от структурного и напряженного состояний образца (заготовки). Для решения этого вопроса разработан метод определения технологической пластичности при наличии концентраторов напряжений на поверхности заготовки. Сущность метода заключается в определении запаса пластичности сталей с учетом марки и структурного состояния через диаграммы, на которых механические свойства представлены в функции показателя напряженного состояния, и расчет напряженного состояния в вершине концентратора (поверхностного дефекта).

Особое место в работе уделено разработке способов и расчету погрешностей измерений. Для проверки выдвинутых гипотез и подтверждения выявленных закономерностей использованы критерии К. Пирсона, В.И. Романовского, метод выпрямленных кривых и коэффициенты корреляции.

Представлены результаты экспериментальных исследований изменений макро-, микро- и субмикроструктуры сталей при различных термических и пластических воздействиях в условиях эффективных технологий производства и обеспечения качества деталей машиностроительного назначения. Зерно является одним из основных параметров, характеризующих микроструктуру металлов и сплавов. На плоскости шлифа зерно целесообразно описать двумя показателями: **а** – размер вдоль деформации растяжения и **в** – размер зерна в перпендикулярном направлении. Следовательно, отношение **а/в** может служить объективным и доступным параметром оценки микроструктур при термопластических воздействиях [2]. Для выявления закономерности формирования неравноосных структур при различных пластических и термических воздействиях строилась гистограмма распределения: количе-

ство зерен на шлифе в зависимости от отношения продольного к поперечному размеру a/v . Из результатов измерений соотношений параметров зерен a/v в виде эмпирических частот распределений следует, что в общем виде при всех степенях пластической деформации и после отжига подтверждается выдвинутая гипотеза нормального распределения. Для подтверждения соответствия экспериментально полученного распределения закону нормального распределения использован метод выпрямления кривых частот, т.е. построение распределения в таких координатах, в которых плотность нормального распределения будет выражена прямой линией. Проверая выдвинутую гипотезу, строилась зависимость нарастающей суммы чисел зерен, отношение продольного к поперечному размеру, a/v которых не превышала заданную величину, деленную на общее количество обследованных в каждом структурном состоянии зерен, от указанного значения a/v . Затем каждая из полученных величин суммы, отнесенная к общему числу обследованных зерен, последовательно приравнивалась к нормированной плотности нормального распределения, являющейся функцией Лапласа. Для структурных состояний, созданных пластическим воздействием волочением, а также отжигами коэффициенты корреляции выпрямленных кривых частот в сравнении с прямолинейными зависимостями составили 0,87–0,99. Это в свою очередь свидетельствует о том, что выдвинутая гипотеза полностью подтверждается. Аналогичные закономерности выявлены при исследовании микроструктуры сталей в других технологических процессах объемного пластического воздействия (прямое и обратное выдавливание, редуцирование, осадка и т.д.). Выявлено, что последующее термическое воздействие сопровождается полным восстановлением соотношения размеров зерен микроструктуры a/v деформированных углеродистых и легированных сталей при температурах первичной рекристаллизации и выше [2].

Выявленная закономерность положена в основу микроструктурного метода определения локальных деформаций, использующего изменение статистических соотношений продольного к поперечному размеру зерна при пластических воздействиях. Метод позволяет рассчитать величины деформаций в трех взаимно перпендикулярных направлениях на основании замеров среднестатистических соотношений параметров зерен на металлографическом шлифе. Для расчета деформаций проводились детальные исследования изменений геометрии зерен микроструктуры сталей при разных термопластических воздействиях. Микроструктурные исследования проводились на сталях 10...45, 15X...40X, 20Г2Р, 16ХСН, 40ХН2МА, 6Х4М2ФС, У10А и др. Значительное внимание уделено выявлению закономерностей изменения микроструктуры сталей при вдавливании пуансонов разной конфигурации, являющихся основной технологией производства деталей машиностроительного назначения с внутренними полостями [1]. При анализе пластического воздействия на стальную заготовку пуансона с плоским торцом наглядно видно, что в объеме металла, примыкающего к торцу пуансона на оси вдавливания, практически не происходит изменений формы зерен микроструктуры. Это свидетельствует о том, что на микроструктурном уровне перед торцом отсутствует пластическое течение. Логарифмическая степень деформации сжатия зерен резко возрастает при переходе по оси вдавливания к участку, который расположен на расстоянии $\sim 0,3d$ от торцевой поверхности пуансона. На этом участке ее величина приближается к величине 1,0 или в относительных показателях превышает 60%. Максимальное сжатие зерен в осевом направлении при вдавливании пуансонов с плоским торцом выявлено на расстоянии от торца $\sim 0,4$ размера поперечного сечения пуансона d . Величина логарифмической деформации здесь составляет около 1,5 или превышает 75% сжатия. На расстоянии от торца пуансона $1,0d$ микроструктура равноосная, что свидетельствует об отсутствии на этом расстоянии пластической деформации. Пожалуй, наиболее значимым является место перехода торцевой поверхности в боковую. На нем просматриваются две принципиально отличающиеся области: интенсивного пластического течения металла и застоя. Область интенсивного течения охватывает боковую поверхность и часть металла, находящегося под торцевой поверхностью пуансона. Границей раздела между пластическим течением и застоем служит виртуальная линия, проложенная под углом $\sim 45^\circ$ от точки перехода тор-

цевой поверхности в боковую. Зерна вытягиваются вдоль этой линии. Пластическое течение металла с наружной стороны настолько велико, что не представляется возможным определить конечные параметры зерен микроструктуры, а следовательно, рассчитать степень деформации. Очевидно, что она превышает 80%. Наиболее прогнозируемая закономерность изменения параметров зерен микроструктуры при вдавливании пуансонов выявлена в радиальном направлении. При удалении в радиальном направлении от боковой поверхности пуансона к периферийным объемам заготовки величина пластической деформации монотонно снижается, сходя до нулевых значений на расстоянии $0,5d$.

Микроструктура полости, выдавленной сферическим торцем, в месте перехода торцевой поверхности в боковую свидетельствует о совершенно иной закономерности распределения деформаций. Максимальная деформация зерен соответствует конфигурации пуансона, примыкая к его поверхности. Признаки застойных зон отсутствуют, как и у пуансонов с коническим торцем. Другие формы торцев, а следовательно, и характер формирования микроструктуры при вдавливании пуансонов, можно представить в виде комбинации перечисленных ранее форм и закономерностей. Всего исследовано более семи тысяч шлифов и участков.

Из представленных результатов следует, что при описании очага наиболее показательной является величина деформации сжатия зерен микроструктуры в направлении, перпендикулярном к поверхности пуансона. Детально исследованы размеры и характер изменения микроструктуры в очаге деформации в зависимости от марки стали, температурного режима в диапазоне от 20°C до полугорячей деформации ($620\dots 810^{\circ}\text{C}$), конфигурации торца, формы поперечного сечения пуансона, глубины вдавливания, соотношения поперечных размеров пуансона и заготовки и вида разгружающих камер. Установлено, что решающее влияние на изменение структуры, а следовательно, на формирование очага деформации, оказывает форма торца пуансона.

Анализ литературных данных показал отсутствие четкого определения очага пластической деформации. На основе проведенных экспериментальных исследований изменений структуры сталей предложено в качестве очага деформации считать совокупность поверхностей (в плоскостях сечения линий), соединяющих активированные пластическим течением объемы заготовки с равной величиной степени деформации. Внешний контур очага пластической деформации перед торцем пуансона с поперечным сечением d представляет собой полусферическую поверхность с размерами в основании полусферы на уровне торца A/d и на оси вдавливания от торца B/d . Определяя размеры очага деформации, необходимо дополнительно указывать, к какой интенсивности пластического течения они в каждом конкретном случае относятся. Сложности с количественным описанием конфигурации торца были обусловлены необходимостью выбора объективного показателя формы, отражающего активизацию или торможение пластического течения сталей перед вдавливаемым пуансоном. В качестве такого показателя на основании результатов исследований выбран коэффициент формы торца S_T , представляющий собой отношение суммы (разности) площади поперечного сечения пуансона и площадей проекций элементов, затрудняющих (облегчающих) пластическое течение металла, к площади поперечного сечения пуансона. Результаты исследований подтвердили ранее полученные данные о том, что даже сравнительно небольшой угол наклона или элемент сферы на торце пуансона обеспечивают активизацию пластического течения металла. Следовательно, наличие «конусности» или выступающих элементов сферы практически исключает возможность образования застойной зоны, которая возникает при вдавливании пуансона с плоским торцем. Исходя из изложенного, для плоского торца $S_T=1$, для конического и сферического $S_T=0$. Для конфигураций торца, имеющих частично плоскую поверхность и частично элементы, облегчающие пластическое течение перед пуансоном, коэффициент S_T принимает значения в диапазоне от 0 до 1 в зависимости от соотношения проекций площадей к поперечному сечению пуансона. Однако имеются элементы, которые дополнительно затрудняют пластическое течение сталей вблизи поверхности пуансо-

на, например, выступы на периферийной части торца или вогнутые поверхности, увеличивая значения коэффициента S_T . На практике S_T принимает значения от 0 до 1,5. Основываясь на представленных данных количественной оценки изменений структуры, размеры очага деформации перед пуансоном на оси вдавливания B/d и в поперечном сечении A/d в зависимости от формы торца S_T и величины пластической деформации сжатия зерен микроструктуры ε во внешнем контуре можно описать уравнениями [1]:

$$B/d = 0,65 - 0,48 \cdot \varepsilon^{0,56} + 0,32 S_T, \quad (1)$$

$$A/d = 1,90 - 0,83 \cdot \varepsilon^{0,77} + (0,22 - 0,18 \cdot \varepsilon^{0,48}) \cdot S_T. \quad (2)$$

Изменения структуры на микроуровне соответственно проявляются и на макроуровне. Ярким подтверждением того служит конфигурация волокон макроструктуры. Микроструктурный метод применен в качестве методической основы совершенствования макроструктурного метода определения деформаций, основанного на измерениях распределения волокон макроструктуры в изделиях до и после пластического воздействия. Представлены изменения расположения волокон в очаге деформации при вдавливании пуансонов с различной формой торцев. Основные макроструктурные исследования проводились на перлитных и ледебуритных сталях 10, 20, 30, 40X, 15XM, 30Г1Р, 51ХФА, 40ХН2МА, 6Х4М2ФС, У10А, ХВГ, Р6М5, Р18, Х12МФ, Х12Ф1 в интервале температур от 20°C до полугорячей деформации (620...810°C), а также радиальных пластических деформаций при изготовлении стержневых крепежных деталей. Данные показывают, что возникающие при формовке шестигранной головки болта пластические деформации в логарифмических показателях степени находятся в диапазоне от 0,4 сжатия до 2,5 растяжения.

Увеличение температуры от 20°C до условий полугорячего деформирования обуславливает: снижение предела текучести условного $\sigma_{0,2}$ и предела прочности σ_b в 6–8 раз у перлитных сталей и в 4–6,5 раза у ледебуритных; увеличение относительного сужения ψ в 1,3–1,8 раза у перлитных и в 1,6–4,5 раза у ледебуритных сталей; при одновременном снижении показателя σ_0 в 5,1–8,2 раза, коэффициента деформационного упрочения n в 1,2–1,9 раза, величины удельной работы разрушения W_c в 1,8–2,8 раза и чувствительности пластичности к напряженному состоянию π_ψ в 1,2–1,8 раза, но увеличение значений критерия зарождения трещин K_{3T} в 1,7–2,3 раза.

До настоящего времени отсутствует формула расчета локальной степени деформации при вдавливании пуансона и образования неглубоких полостей. Традиционно используется формула для обратного выдавливания деталей типа «стакан», не отражающая физическую природу течения металла в объеме, активированном пластической деформацией. Результаты детальных исследований изменений структуры и разработка математической модели очага деформации создали условия для определения степени деформации, соответствующей усредненной величине пластических структурных изменений в локальном объеме, прилегающем к пуансону, по формуле

$$\varepsilon = \ln [(B_T + h_n) / B_n] = \ln [(B_T + h_n) / 0,65], \quad (3)$$

где B_n, B_T – максимальная осевая протяженность очага пластической деформации истинная ($S_T=0$) и соответствующая конфигурации торца пуансона ($S_T \geq 0$); h_n – глубина вдавливания пуансона.

Величины степеней пластической деформации, рассчитанные по различным формулам, представлены в табл. 1, из которых следует, что существующая формула дает значительно заниженные результаты, особенно в наиболее используемом диапазоне глубин вдавливания $h_n/d = 0,2...1,5$. Показано, что возникновение застойной зоны перед вдавливаемым пуансоном ($S_T > 0$) увеличивает степень локальной пластической деформации, а следовательно, требуемый запас пластичности сталей.

Таблица 1

Степени пластической деформации ε при вдавливании пуансона по разработанной на основе изменений структуры и существующей формуле

№ п/п	Глубина вдавливания пуансона, h_n/d	Относительная длина активированного объема, $(B+h_n)/d$, при форме торца		Степень деформации при форме торца					
				конусный $S = 0$		плоский $S = 1,0$		существующая формула	
		конус. $S_T=0$	плоский $S_T=1$	относительная, %	логарифмическая	относительная, %	логарифмическая	относительная, %	логарифмическая
1	0,2	0,85	1,17	23,5	0,27	44,6	0,59	3,3	0,03
2	0,5	1,15	1,47	35,0	0,43	56,0	0,82	8,3	0,09
3	1,0	1,65	1,97	60,6	0,93	67,0	1,11	16,7	0,18
4	1,5	2,15	2,47	69,8	1,20	73,8	1,34	25,0	0,29
5	2,0	2,65	2,97	75,4	1,41	78,1	1,52	33,3	0,41
6	2,5	3,15	3,47	79,4	1,58	81,2	1,67	41,7	0,54
7	3,0	3,65	3,97	82,2	1,73	83,6	1,81	50,0	0,69

Выявлена корреляция силовых параметров пластического воздействия с конфигурацией торца S_T и изменениями структуры, определяющими максимальный осевой размер очага деформации B/d при вдавливании пуансона:

$$K_1 = 0,700 + 0,334 \cdot S_T^{0,642} = 0,700 + 0,334(3,125B/d - 2)^{0,642}. \quad (4)$$

С использованием различных методик проведен расчет тепловых эффектов при пластическом воздействии пуансоном на заготовки из перлитных и ледебуритных сталей в разных структурных состояниях и температурах нагрева. Показано, что повышение температуры в локальных объемах при холодном пластическом воздействии может превышать 300°C , а в условиях полугорячего деформирования 70°C . Особое значение тепловые эффекты имеют при выборе температуры нагрева сталей для полугорячего деформирования, так как оптимальный температурный интервал наряду с изменением механических свойств определяется с учетом структурных превращений. На основании проведенных исследований определена целесообразность выбора температурного интервала полугорячего деформирования сталей в диапазоне $A_{C1} - (10 \dots 100)^\circ\text{C}$. Интервал полугорячего термопластического воздействия для перлитных доэвтектоидных сталей составляет $620 \dots 700^\circ\text{C}$, для эвтектоидных и близких к ним $640 \dots 710^\circ\text{C}$, для заэвтектоидных $660 \dots 740^\circ\text{C}$, для ледебуритных $720 \dots 810^\circ\text{C}$.

Проведенные систематические исследования показали большие потенциальные возможности технологии полугорячего деформирования, в том числе низкопластичных ледебуритных и перлитных инструментальных сталей: P18, P6M5, P6M5K5, 10P6M5, P12Ф3, X12MФ, X12Ф1, ХВГ, 9ХС, У10А, 6Х4М2ФС, 5ХНМ и др. Результаты исследования закономерностей изменения структуры и механических свойств обеспечили возможность изготовления сложнопрофильных внутренних полостей высокого качества с отношением глубины к поперечному сечению более 2,5. Кроме того, результаты работы применены при освоении процессов объемного пластического формообразования способами: холодной штамповки на многопозиционных автоматах из углеродистых и легированных сталей (10, 20, 30, 35Х, 20Г2Р, 30Г1Р, 16ХСН), деформирования с нагревом легированных конструкционных сталей (15Х...40Х, 15ХМ, 38ХМА, 50ХФА, 18ХГТ, 30ХГСА, 40ХН2МА), сферодвижной штамповки, а также при выборе режимов термического воздействия. Внедрение технологий сопровождалось сокращением металлоемкости, повышением ресурса деталей, их выпуском

в условиях действующего производства, организацией новых специализированных участков, передачей технологической документации. Технические решения защищены авторскими свидетельствами и патентом.

Библиографический список

1. **Кутяйкин, В.Г.** Метрологические и структурно-физические аспекты деформирования сталей / В.Г. Кутяйкин. – М.: АСМС, 2007. – 484 с.
2. **Кутяйкин, В.Г.** Измерение параметров структуры и дефектности металлических материалов в технологических процессах пластической и термической обработки / В.Г. Кутяйкин. – Нижний Новгород: ВГИПА, 2005. – 231 с.

*Дата поступления
в редакцию 25.01.2010*

W.G. Kutayaykin

PHYSICAL METALLURGY ASPECTS OF CENTRE STRAIN FORMING THERMOPLASTIC PROCESSING OF STEELS AND METROLOGICAL SUPPORT OF APPLIED RESEARCH

The influence of different thermoplastic effects on the change of macro-, micro-, submicrostructures mechanical characteristics of steels of perlite and ledeburite classes have been researched. Methods of quantitative of structural parameters, mechanical properties of steels and processes of thermoplastic effects have been worked out. Formation of the structure while the indentation of point-tools of different forms into the billets has been researched in details and the model of centre strain based on structural changes has been worked out.

Key words: steels, structures, metrological

ХИМИЯ, ХИМИЧЕСКИЕ И БИОТЕХНОЛОГИИ

УДК 542.8

А.Н. Москвичев¹, А.А. Москвичев²

МЕТОД ИМПЕДАНСНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ И КИНЕТИКИ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ ОЛИГОМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (Нижегородский филиал)¹,
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского²

Показана применимость метода импедансных измерений для исследования диэлектрических свойств полимера и процессов полимеризации олигомерных композиций на примере термоотверждаемой эпоксидной смолы ЭД-20 (инициатор: 1, 2, 3, 6 – тетрагидро – 3 – метилфталиевый ангидрид) и анаэробного отверждения диметакрилового эфира триэтиленгликоля (инициатор: гидроперекись кумила). Предложена новая эквивалентная электрическая схема, описывающая диэлектрические свойства смолы без использования эмпирических уравнений. На ее основе предложено рассматривать исходный олигомер и образующийся полимер как две динамические системы, в которых протекают сложные химические и физические процессы конформационного перехода макромолекул из стационарной изомерической структуры в топологическую структуру с повышенной энергетикой, определяющую их основные физико-механические и электрические свойства.

Ключевые слова: методы исследования, диэлектрическая спектроскопия, импеданс, кинетика полимеризации.

Термоотверждаемые клеевые и анаэробные герметизирующие композиции на основе эпоксидных смол и диметакрилового эфира триэтиленгликоля применяются для склеивания и герметизации узких (до 0,5 мм) зазоров между двумя металлическими поверхностями. Напрямую исследовать свойства смолы и образующегося полимера, а также кинетику его формирования в заданных условиях классическими – оптическими и калориметрическими – методами невозможно. Представляло интерес на примере систем: а) эпоксидная смола ЭД-20 + инициатор термopolyмеризации (1, 2, 3, 6 – тетрагидро – 3 – метилфталиевый ангидрид) и б) диметакриловый эфир триэтиленгликоля (ТГМ-3) + инициатор анаэробной полимеризации (гидроперекись кумила), – апробировать модифицированный нами метод диэлектрической спектроскопии.

Исходная эпоксидная смола ЭД-20, олигомер ТГМ-3 и полимеры, формируемые в ходе их отверждения, содержат в своей структуре гидроксильные, карбоксильные, карбонильные, эпоксидные, диметакрилатные функциональные группы, обладающие собственным дипольным моментом. При такой структуре наблюдается зависимость дипольно-групповой, сегментарной и общей подвижности молекул в жидкой олигомерной композиции и в конечном полимере от температуры и интенсивности внешнего электрического поля [1, 2].

Это позволяет использовать методы дипольной релаксационной спектроскопии (диэлектрической спектроскопии) для изучения их свойств и кинетики отверждения [3, 4]. Количественно подвижность дипольных групп во внешнем переменном электрическом поле характеризуется величиной комплексной диэлектрической проницаемости и тангенсом угла диэлектрических потерь [1–4]:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - i \varepsilon'' \quad (1)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \varepsilon'' / \varepsilon' \quad (2)$$

Зависимость величины ε^* от частоты описывается эмпирическим уравнением [2]:

$$\frac{\varepsilon^*(\omega) - \varepsilon_\infty}{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty} = [1 + (i\omega\tau_0)^{1-\alpha}]^{-\beta}, \quad (3)$$

где ε_0 – статическая диэлектрическая проницаемость; ε_∞ – высокочастотная диэлектрическая проницаемость; τ – время релаксации; ω – круговая частота; α – характеризует ширину области дисперсии; β – характеризует асимметрию дисперсионной кривой.

Таким образом, анализ зависимостей составляющих комплексной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$ от частоты переменного тока позволит изучить свойства полимера, а анализ изменения этих же величин (при фиксированной частоте) во времени – изучить кинетику полимеризации (кинетику фазового перехода олигомера из жидкого в твердое состояние).

Для реализации такого метода исследований нами была разработана установка, принципиальная конструкция которой описана в [5], включающая управляющую ЭВМ с аналого-цифровым преобразователем, генератор переменного тока и согласующий усилительно-измерительный блок. В ходе измерений при каждой задаваемой частоте переменного тока фиксировались величины активной (Re) и реактивной (Im) составляющих импеданса цепи, состоящей из двух металлических пластин площадью 4 см^2 каждая, разделенных слоем (1 мм) исходной жидкой композиции или, после отверждения, полимером (плоский конденсатор, заполненный смолой или полимером). Для исключения влияния переменного тока на изучаемый объект, амплитуда сигнала, подаваемого на исследуемую цепь, не превышала 5 мВ. Измерения проводились в диапазоне частот от 1 Гц до 20 кГц. Величины активной ε' и реактивной ε'' составляющих комплексной диэлектрической проницаемости рассчитывались для случая плоского конденсатора по формулам:

$$\varepsilon' = 1/\omega \cdot C_0 \cdot \operatorname{Re} \cdot (1 + \operatorname{tg}^2 \delta), \quad (4)$$

$$\varepsilon'' = \operatorname{tg}^2 \delta / \omega \cdot C_0 \cdot \operatorname{Im} \cdot (1 + \operatorname{tg}^2 \delta), \quad (5)$$

где $C_0 = \varepsilon_0 \cdot S/d$; $\operatorname{tg}\delta = \operatorname{Im}/\operatorname{Re}$; $\omega = 2\pi \cdot f$, $\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ (Ф/м); d – толщина слоя композиции или полимера (м); Re – величина активной составляющей импеданса (Ом); Im – величина реактивной составляющей импеданса (Ом), f – частота переменного тока (Гц), S – площадь слоя композиции или полимера (м^2).

Если исходить из формулы $\operatorname{tg}\delta = \varepsilon''/\varepsilon' = \operatorname{Im}/\operatorname{Re}$, т.е. $\varepsilon'' = \operatorname{Im} \cdot \operatorname{const}$ и $\varepsilon' = \operatorname{Re} \cdot \operatorname{const}$, то можно было ожидать одинаковый внешний вид зависимостей ε'' и Im , а также ε' и Re от частоты. Однако поскольку импеданс геометрического вакуумного конденсатора, относительно которого рассчитывается диэлектрическая проницаемость, зависит от частоты (т.е. $\operatorname{const} = f(\omega)$), качественный вид этих зависимостей различен.

На зависимостях $\varepsilon'' = f(\lg \omega)$ (или $\varepsilon'' = f(\omega^{-1/2})$) (рис. 1 и рис. 2), при переходе от высоких частот к низким, можно выделить плато, соответствующее процессу α – релаксации, экстремум, связанный с нормальной релаксационной модой, и область роста диэлектрической проницаемости, связанной с проводимостью полимера. Активная составляющая диэлектрической проницаемости нелинейно растет с уменьшением частоты переменного тока. Такой характер изменения ε'' и ε' от частоты наблюдается и для других мономеров и полимеров.

На зависимостях Re , $\operatorname{Im} = f(\lg \omega)$ (или Re , $\operatorname{Im} = f(\omega^{-1/2})$) (рис. 3 и рис. 4) эти процессы выглядят иначе. С уменьшением частоты наблюдается два экстремума, соответствующие процессам α – релаксации и нормальной релаксационной моде, а области проводимости полимера соответствует плато. Активная составляющая импеданса сначала возрастает с уменьшением частоты переменного тока, а затем выходит на некоторое предельное значение.

Анализ хода зависимостей активной и реактивной составляющих импеданса в координатах $\operatorname{Im} = f(\operatorname{Re})$ и $Y_{\operatorname{Im}} = f(Y_{\operatorname{Re}})$ (по методике [6]) показал, что эквивалентная электрическая цепь исследуемой системы не может быть адекватно описана электрической схемой, состоящей из ограниченного числа соединенных между собой сопротивлений и конденсаторов.

Однако она хорошо описывается схемой: $-G_1 - G_2-$, где G_1 – частотно зависимый элемент Геришера [7], связанный с α – релаксацией, а G_2 – частотно зависимый элемент Геришера, связанный с нормальной релаксационной модой.

Эти частотно зависимые элементы эквивалентной электрической схемы, по-видимому, связаны с переходами макромолекул полимера из одного состояния в другое и, очевидно, могут быть описаны соответствующими химическими реакциями:



где A – исходный конформер; $B^{\delta\pm}$ – промежуточный конформер или комплекс, обладающий повышенным зарядом (определяет проводимость вещества в целом); C – новый конформер.

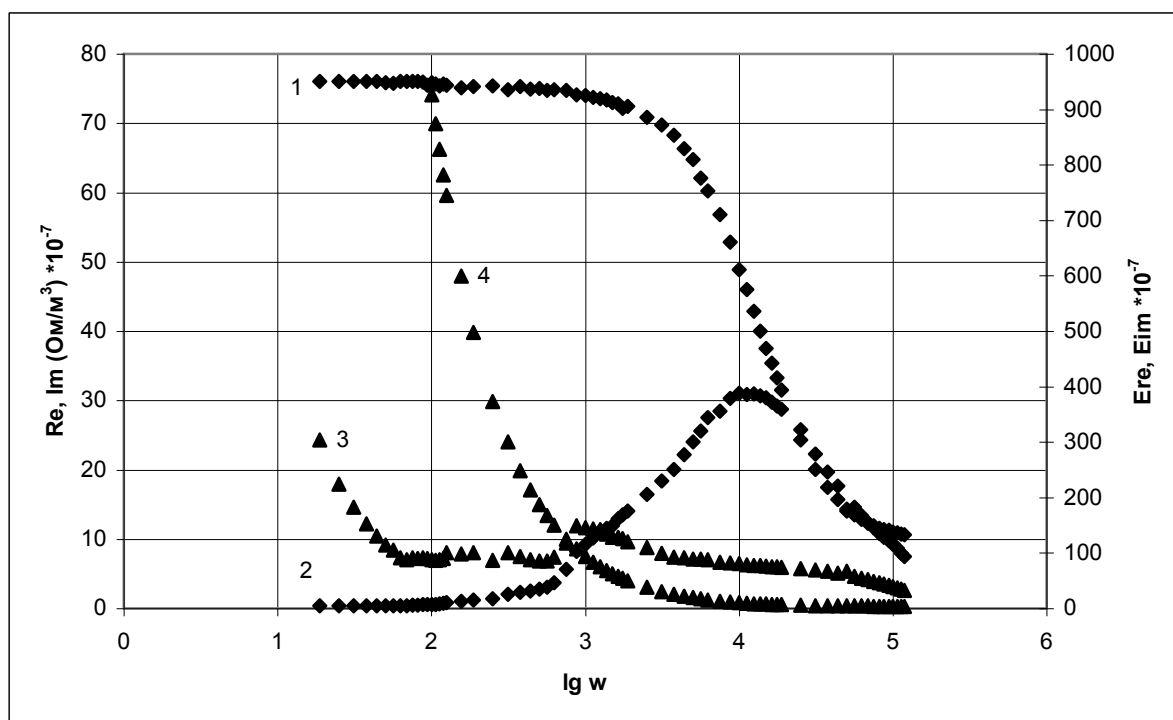


Рис. 1. Зависимость составляющих комплексной диэлектрической проницаемости (ϵ' , ϵ'') и импеданса (Re , Im) смолы ЭД-20 от $\lg \omega$:
1(♦) – Re ; 2(♦) – Im ; 3(▲) – $E_{im}(\epsilon'')$; 4(▲) – $E_{re}(\epsilon')$

Величина равновесной объемной концентрации промежуточного конформера, участвующего в α – релаксационном процессе, рассчитанная из зависимости Re , $Im = f(\omega^{-1/2})$ по методике, описанной в [7] (для степени ионизации 1 и при коэффициенте диффузии $1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$), зависит от температуры (рис. 5) и увеличивается с её ростом.

Величина произведения $C \cdot D^{-1/2}$ для метакрилатного полимера, также рассчитанная из зависимости Re , $Im = f(\omega^{-1/2})$ по методике, описанной в [7], равная $1,44 \cdot 10^{-21} \text{ моль}/\text{м}^3$, тоже показывает, что эти химические реакции связаны с процессами в твердой фазе.

Анализ изменения величин $|Z|$, $|\epsilon^*|$ и $\text{tg} \delta$ изучаемых композиций в зазоре между металлическими пластинами во время отверждения при разных температурах в случае эпоксидной системы и при комнатной температуре для анаэробной композиции показал, что они изменяются синхронно-фазовым превращением и описывают кинетику процесса отверждения. При этом величина диапазона изменений этих параметров существенно зависит от частоты переменного тока и максимальна при измерении импеданса и $\text{tg} \delta$ на частоте 1 кГц, а при измерении диэлектрической проницаемости на частоте 50 Гц (в области соответствующих экстремумов на этих зависимостях). Следует отметить, что в процессе отверждения величина импеданса изменилась более чем в сто раз, а величины $\text{tg} \delta$ и ϵ^* в десять раз при переходе систем из жидкого состояния в твердое (рис. 6 и рис. 7).

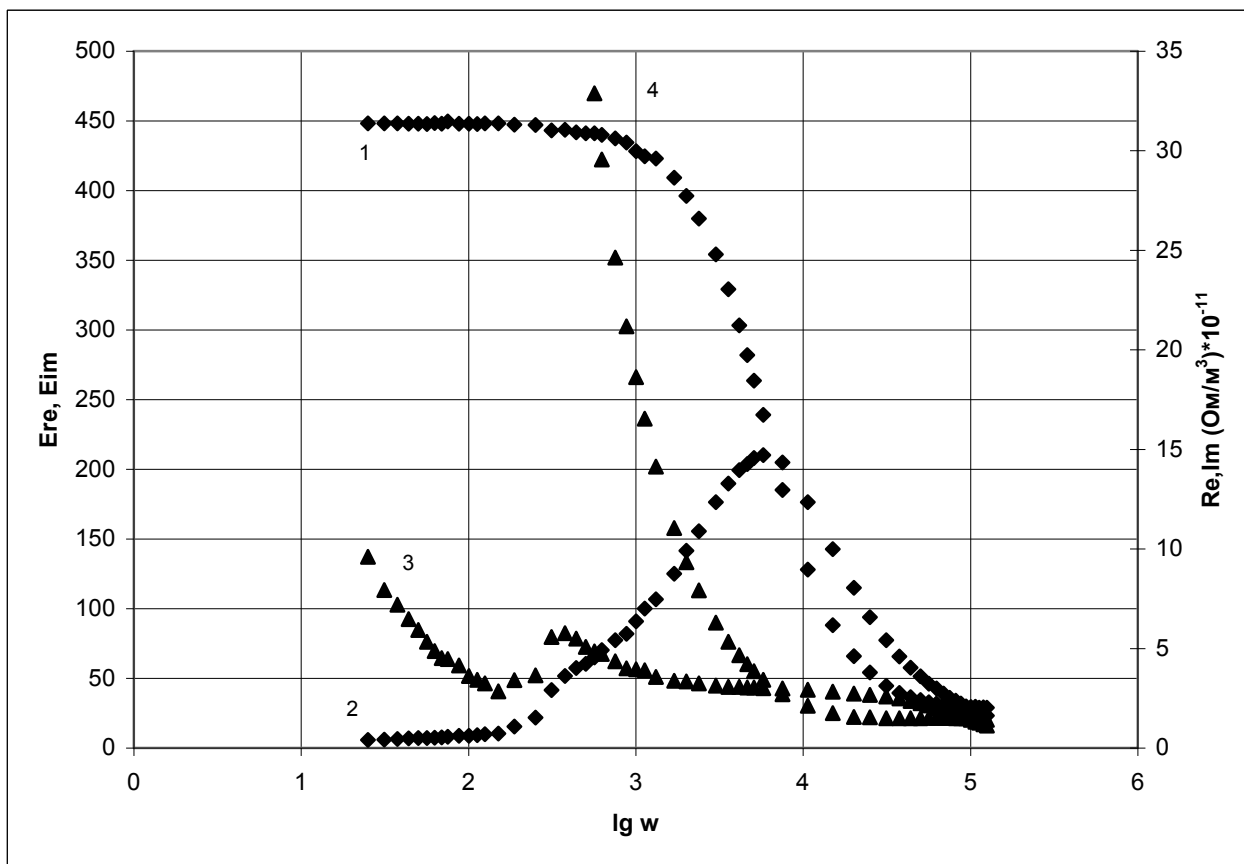


Рис. 2. Зависимость составляющих комплексной диэлектрической проницаемости (ϵ' , ϵ'') и составляющих импеданса (Re , Im) полимера на основе ТГМ-3 от $lg \omega$:
 1(♦) – Re ; 2(♦) – Im ; 3(▲) – $E_{im}(\epsilon'')$; 4(▲) – $E_{re}(\epsilon')$

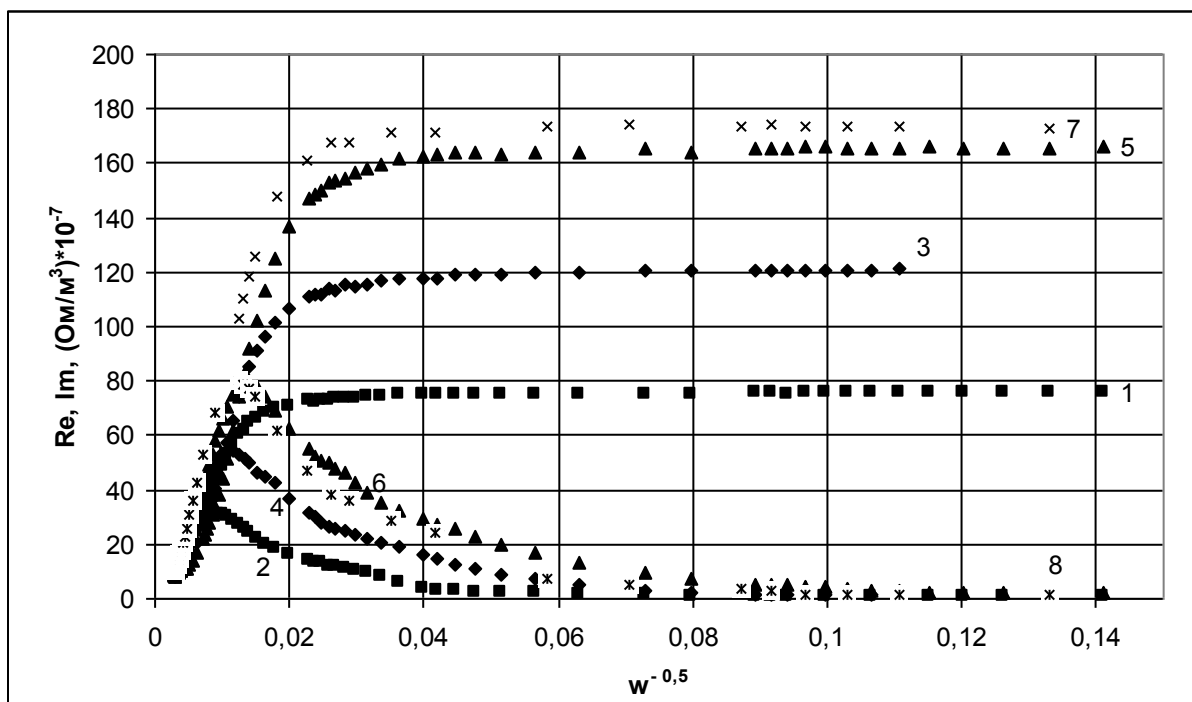


Рис. 3. Зависимость составляющих импеданса (Re , Im) смолы ЭД-20 и полимера от $\omega^{-0,5}$:
 1(■) – Re 120°C; 2(■) – Im 120°C; 3(♦) – Re 80°C; 4(♦) – Im 80°C; 5(▲) – Re 40°C;
 6(▲) – Im 40°C; 7(×) – Re полимер; 8(×) – Im полимер

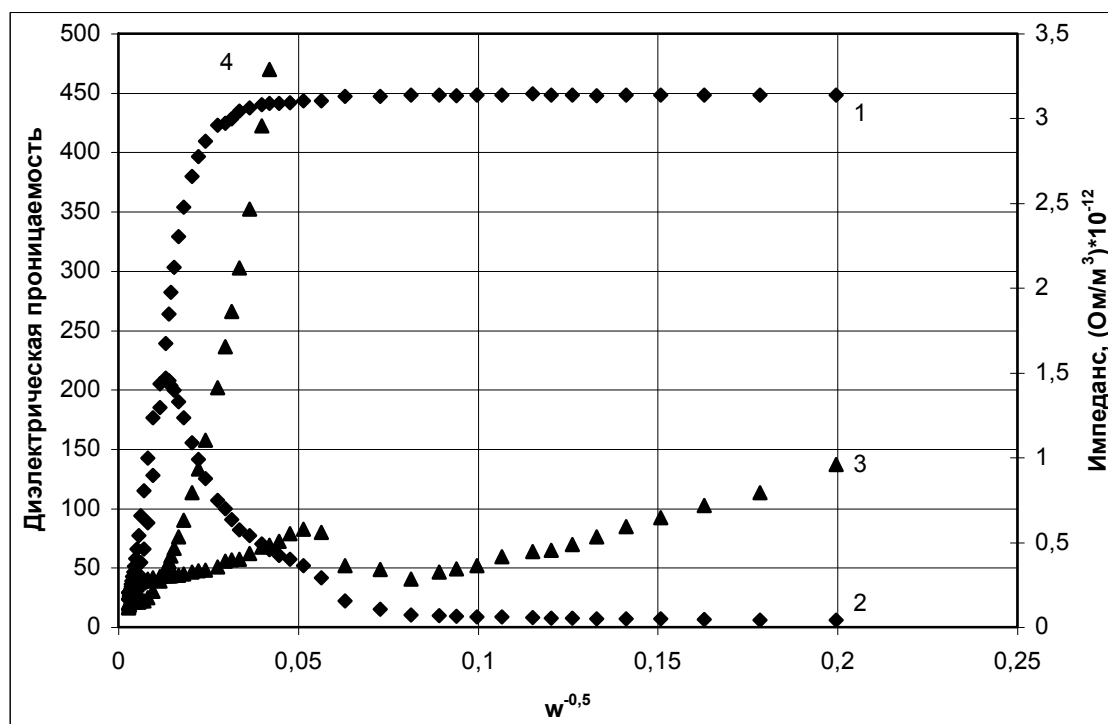


Рис. 4. Зависимость составляющих комплексной диэлектрической проницаемости (ϵ' , ϵ'') и составляющих импеданса (Re , Im) полимера на основе ТГМ-3 от $\omega^{-0,5}$:
 1(\diamond) – Re ; 2(\diamond) – Im ; 3(\blacktriangle) – $E_{im}(\epsilon'')$; 4(\blacktriangle) – $E_{re}(\epsilon')$

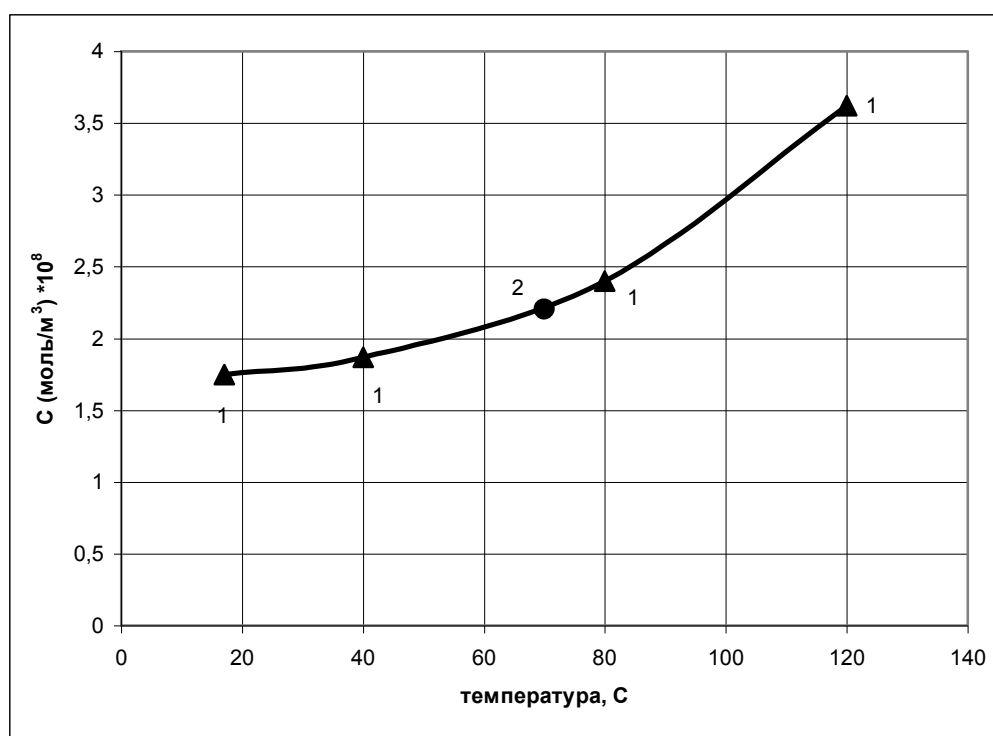


Рис. 5. Равновесная концентрация промежуточного конформера в смоле ЭД-20 (1(\blacktriangle)) и в полимере (2(\bullet))

При построении графика зависимости степени конверсии (α) жидкой олигомерной фракции от времени полимеризации (t) мы исходили из предположения, что в начальный момент времени исследуемая композиция – жидкость ($\alpha = 0\%$), а по окончании – твердый полимер ($\alpha = 100\%$).

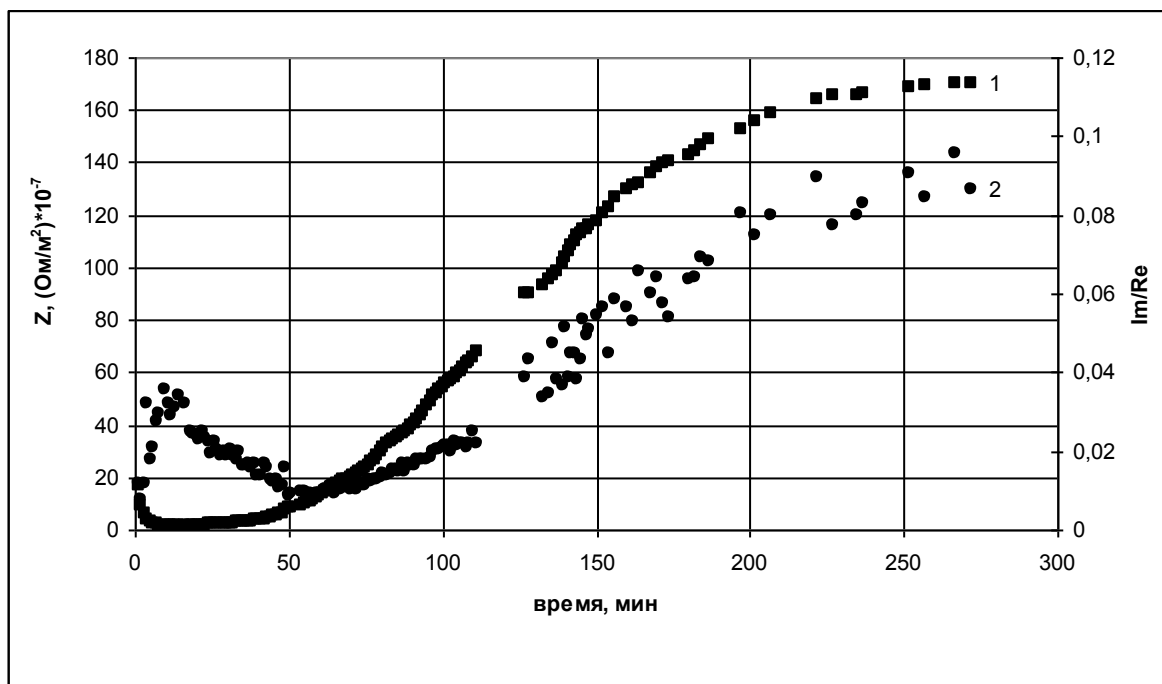


Рис. 6. Зависимость импеданса (Z) и тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta = \text{Im}/\text{Re}$) от времени полимеризации эпоксидной композиции на частоте 50 Гц при температуре 80°C :
1(■) – Z ; 2(●) – Im/Re

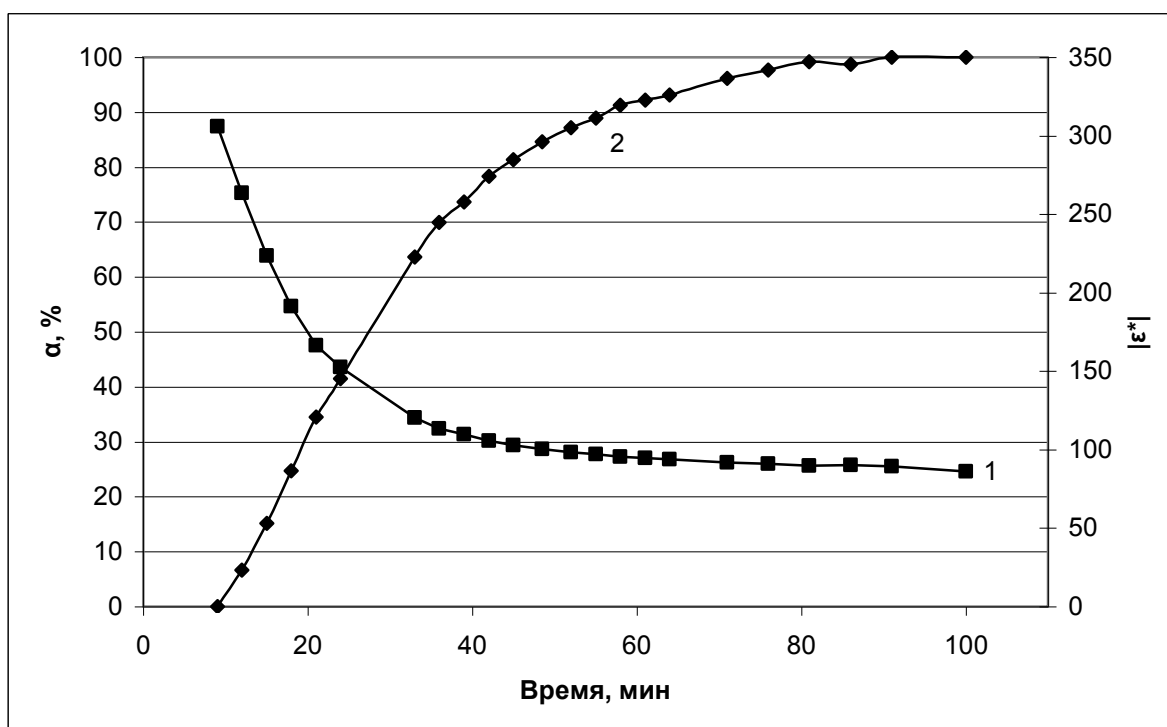
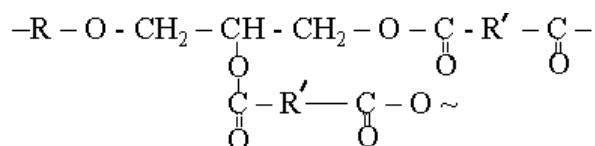


Рис. 7. Зависимость диэлектрической проницаемости ($I - |\epsilon^*|$) и степени конверсии ($2 - \alpha$) анаэробной композиции от времени полимеризации на частоте 1кГц

После помещения эпоксидной композиции в термостат сначала наблюдается рост $\text{tg}\delta$ (первые 10 минут), по-видимому, связанный с разогревом и связанными с ним конформационными процессами, приводящими к изменению вязкости. Далее величина $\text{tg}\delta$ начинает уменьшаться в течение 50 минут, в результате образования фрагментов химических узлов пространственной сетки по конденсационному механизму до гелеобразования:



На следующем этапе наблюдается рост $\text{tg}\delta$ до предельной величины, обусловленный формированием сетчатой структуры эпоксидного полимера на молекулярном и топологическом уровнях.

В эпоксидных полимерах, как известно, есть все предпосылки для образования сильного межмолекулярного взаимодействия (ММВ). Во многих работах показана определяющая роль ММВ в формировании свойств стеклообразных полимеров. В первую очередь это относится к деформационно-прочностным свойствам, изменение которых (ниже температуры стеклования) определяется в основном топологической структурой. По всей вероятности разброс измерений величины $\text{tg}\delta$ на третьем этапе связан с этим явлением.

Для сравнения с этим методом исследовали кинетику отверждения эпоксидной композиции методом ДСК на калориметре ДСК-111 фирмы SETERAM (Франция). Скорость нагрева составляла пять градусов в минуту от комнатной до 500°C . Величина навески 55 ± 5 мг. Установлен процесс отверждения – начальная температура 70°C , конечная – 144°C , энергия активации процесса отверждения $E_{\text{эф}} = 91,1$ кДж/моль, скорость реакции $V = 815,3 \cdot 10^8 \text{ c}^{-1}$.

Таким образом, данный метод может использоваться для изучения свойств и кинетики формирования эпоксидных полимеров в тонком слое.

Библиографический список

1. **Фрелих, Г.** Теория диэлектриков / Г. Фрелих. – М.: Иностранная литература, 1960. – 196 с.
2. **Бойер, Р.** Переходы и релаксационные явления в полимерах / Р. Бойер. – М.: Мир, 1968. – 384 с.
3. **Лушейкин, Г.А.** Методы исследования электрических свойств полимеров / Г.А. Лушейкин. – М.: Химия, 1988. – 160 с.
4. **Стецовский, А.П.** Релаксационная спектроскопия полимерных материалов / А.П.Стецовский, Ю.В. Зеленев. – М.: ВНИЦ МВ, 1991. – 128 с.
5. Низкочастотный комплекс импедансных измерений характеристик проводящих сред / А.В. Афанасьев [и др.] // Вестник Нижегородского университета им. Н.И.Лобачевского. 2008. №3. С. 60–64.
6. **Соловьева, Л.М.** Электродные процессы в галогенидных и окисных электролитах / Л.М. Соловьева. 1981. С. 68–82.
7. **Дамаскин, Б.Б.** Введение в электрохимическую кинетику / Б.Б. Дамаскин, О.А. Петрий. – М.: Высш. шк. 1983. – 400 с.

Дата поступления
в редакцию 04.02.2010

A.N. Moskvichev, A.A. Moskvichev

THE IMPEDANCE MEASUREMENT METHOD FOR THE INVESTIGATION OF PROPERTIES AND KINETICS OF POLYMERIZATION OLIGOMER COMPOSITIONS

The adaptability of impedance measurement method for the investigation of polymer dielectric properties and processes of oligomer's composition polymerization by the example of thermally consolidated epoxy resin ЭД-20 (initiator: 1,2,3,6-Tetrahydro-3-methylphthalic anhydride) and anaerobic consolidation of triethylene glycol dimethacrylate (initiator: cumyl hydroperoxide) is shown. The new equivalent electrical scheme describing dielectric properties of resin without empiric equations is developed. Basing on that it is suggested to consider the initial and resulting polymers as two dynamic systems with complex chemical and physical processes of conformational junction of macromolecules from the stationary isomeric structure to the topological structure with higher energy which determine their main physical-mechanical and electrical properties.

Key words: research methods, dielectric spectroscopy, impedance, polymerization kinetics.

УДК 621.355

А.А. Москвичев¹, Ю.Л. Гунько¹, М.Г. Михаленко², А.Н. Москвичев³

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ И ПАРАМЕТРОВ ОКИСЛЕНИЯ КАДМИЯ В ОГРАНИЧЕННОМ ОБЪЕМЕ ЩЕЛОЧНОГО ЭЛЕКТРОЛИТА

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского¹,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²,
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (Нижегородский филиал)³

Методами хроновольтамперометрических, хронопотенциометрических и переменноточковых измерений на специальной ячейке исследовано анодное окисление кадмия в условиях ограниченного объема электролита. На их основе предложен механизм окисления кадмия в таких условиях и выявлены его лимитирующие стадии. Определены коэффициенты диффузии, концентрации гидроксокомплексов кадмия, константы равновесия, скорости прямой и обратной химических реакций, проводимости барьерных пленок на поверхности кадмия при варьировании количественного состава электролита.

Ключевые слова: тонкослойная ячейка, анодное окисление кадмия, хроновольтамперометрия, хронопотенциометрия, переменноточковые исследования

Кадмиевые электроды широко используются в щелочных Ni – Cd аккумуляторах, которые при достаточно высоких удельных характеристиках являются наиболее надежными в условиях жесткой эксплуатации. В случае длительного хранения, форсированного режима заряда или при пониженных температурах эксплуатационные характеристики аккумуляторов могут определяться процессами, происходящими на кадмиевом электроде.

Работоспособность кадмиевого электрода, особенно на интенсивных режимах разряда, в значительной степени определяется процессами, происходящими в порах электрода [1, 2]. Окисление активного вещества сопровождается структурными превращениями активной массы, постоянным изменением реакционной поверхности, неравномерным распределением тока и т.д. Поэтому для выявления и устранения причин неудовлетворительной работы кадмиевого электрода щелочных аккумуляторов необходимо изучение процессов его разряда.

Окисление кадмия в пористом электроде происходит в условиях ограниченного объема электролита. При этом происходят существенные концентрационные изменения, значительное экранирование реакционной поверхности продуктами электродных реакций, изменение проводимости и удельной поверхности активной массы. Все это может значительно изменить кинетику процессов на пористом кадмиевом электроде. Для создания условий, максимально приближенных к реальной работе пористого кадмиевого электрода, была разработана специальная тонкослойная ячейка.

Начальным этапом исследований было проведение хроновольтамперометрических измерений. Анализ полученных данных показал, что при малых скоростях развертки потенциал пика остается постоянным, что свидетельствует об обратимости процесса. В этом случае замедленной стадией может быть диффузия гидроксокомплексов кадмия или гомогенная химическая реакция. При больших скоростях развертки наблюдается сдвиг потенциала пика в положительном направлении, что может быть связано с замедленной стадией переноса заряда или образованием оксидных или гидроксидных пленок на поверхности металла.

На основе полученных данных с применением методик, описанных в [3], был сделан вывод о возможности наличия в механизме анодного окисления кадмия в условиях ограниченного объема электролита двух стадий: диффузия гидроксокомплексов кадмия и гомогенная химическая реакция. Диффузия гидроксокомплексов кадмия была подтверждена расчетами величины стехиометрического коэффициента ν , для диффундирующего иона в области

малых скоростей развертки по методике [4], которая составила: $v=1\div 1,2$. В области необратимого протекания процесса окисления кадмия было найдено количество электронов, участвующих в замедленной электрохимической стадии, которое составило: $n_{\alpha}=0,8\sim 1$.

Для уточнения параметров процесса окисления кадмия в условиях ограниченного объема электролита были проведены хронопотенциометрические исследования.

В области плотностей тока от $0,8\cdot 10^{-2}$ до $1,7\cdot 10^{-2}$ А/см² наблюдается линейная зависимость $\tau_{пер}$ от обратной величины плотности тока, справедливая для тонкослойной ячейки (рис. 1).

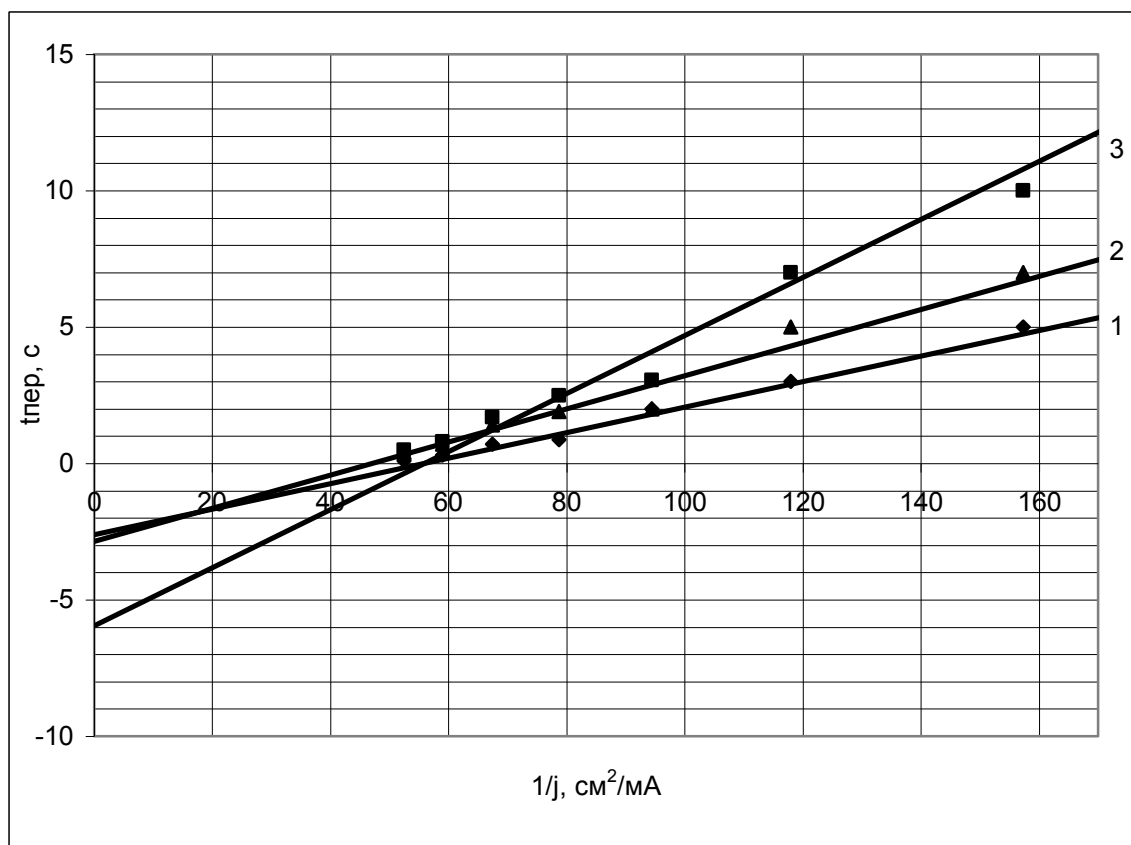


Рис. 1. Зависимость переходного времени от обратной плотности тока при различных концентрациях щелочи: 1 – 5М КОН; 2 – 7М КОН; 3 – 9М КОН

На основании хронопотенциометрических зависимостей окисления кадмия при различных концентрациях щелочи с помощью следующего уравнения:

$$\tau_{пер} = \frac{nFAI C_{ox}^0}{i} - \frac{l^2}{2D_{ox}}, \quad (1)$$

где A – площадь исследуемого электрода, см²; l – толщина слоя электролита у поверхности электрода, в нашем случае она принималась равной эффективной толщине капронового сепаратора, были рассчитаны значения концентрации и коэффициентов диффузии ионов гидроксокомплекса кадмия. Полученные данные представлены в табл. 1.

Таблица 1

Изменение концентрации и коэффициента диффузии гидроксокомплексов кадмия в растворах КОН

$C_{кон}$, моль/л	5	7	9
$C \cdot 10^3$, моль/л	2,26	2,78	4,65
$D \cdot 10^6$, см ² /с	20	18,4	8

Коэффициенты диффузии гидроксокомплексов кадмия в 3÷ 4 выше значений, приводимых в литературе [5]. Это связано с различиями в условиях проведения опыта. Значения коэффициентов диффузии падают с ростом концентрации щелочи, это может быть обусловлено увеличением вязкости электролита. Полученные значения концентрации оказались в 1,5 ÷ 2 раза больше приводимых в литературе равновесных концентраций. Это может свидетельствовать об образовании пересыщенного кадматного раствора по аналогии с образованием подобного рода растворов при окислении цинка. Образование метастабильных растворов гидроксокомплексов кадмия и их последующий распад приводит к появлению механизма по дополнительному изъятию продуктов анодного окисления кадмия из зоны реакции, который присутствует наряду с процессом диффузии. Исходя из полученных данных, можно говорить о двух замедленных стадиях в механизме анодного окисления кадмия: диффузии гидроксокомплекса кадмия и химической реакции разложения пересыщенных кадматных растворов, что также подтверждается данными работы [3].

Наличие последующей химической реакции подтверждается постоянством зависимости $j\tau^{0,5}$ от j во второй области при различных плотностях тока.

Используя методику расчета, представленную в [7], был произведен расчет величин константы равновесия, константы скорости прямой и обратной реакций табл. 2.

Таблица 2

Значение константы равновесия химической реакции, констант скорости прямой и обратной химической реакции в зависимости от концентрации щелочи

$C_{\text{кон}}, \text{ моль/л}$	5	7	9
K_F	0,227	0,397	0,446
k_b	0,03	0,052	0,0648
k_t	0,132	0,132	0,145

Сравнение данных по концентрациям и коэффициентам диффузии, полученным в закрытом объеме электролита, с данными, приводимыми исследователями в [6], позволяет сделать вывод, что только часть тока тратится на жидкофазное превращение. Наряду с этим возможно еще твердофазное превращение кадмия в оксид или гидроксид, с образованием плохопроводящих продуктов реакции.

Для уточнения полученных результатов были проведены исследования с использованием метода фарадеевского импеданса, как в равновесных условиях, так и при анодной поляризации исследуемого электрода. Обработка данных проводилась с использованием годографов.

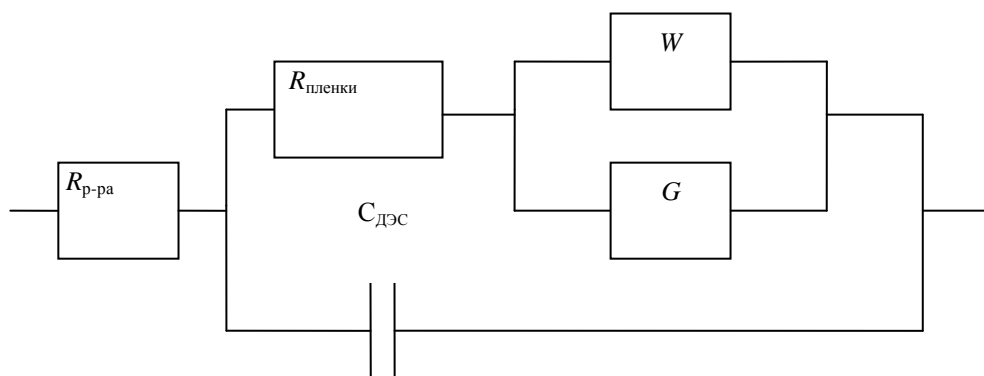


Рис. 2. Эквивалентная схема процесса анодного окисления кадмия:

$R_{\text{р-ра}}$ – сопротивление электролита между рабочим и вспомогательным электродами;
 $C_{\text{дэс}}$ – емкость двойного электрического слоя; $R_{\text{пленки}}$ – сопротивление слоя продуктов окисления кадмиевого рабочего электрода; W – импеданс Варбурга (сопротивление диффузионного процесса);
 G – импеданс Гершера (сопротивление гомогенной химической реакции)

Анализ качественного хода зависимостей активной и реактивной составляющих импеданса в координатах $Im = f(Re)$ и $Y_{Im} = f(Y_{Re})$ по [8] для открытого и ограниченного объема электролита показал, что эквивалентная электрическая цепь исследуемой системы в принятом диапазоне частот может быть адекватно описана электрической схемой, представленной на рис. 2.

Как видно из схемы, в механизме анодного окисления кадмия присутствуют два параллельных процесса: диффузия и гомогенная химическая реакция, т.е. после прохождения стадии ионизации кадмия, образующиеся ионы гидроксокомплекса кадмия диффундируют в объем раствора при параллельно протекающей химической реакции их разложения.

Как в равновесных условиях, так и при анодной поляризации при увеличении концентрации щелочи наблюдается небольшой рост емкости ДЭС (табл. 3). Повышение щелочности раствора также приводит к росту сопротивления химической реакции, что свидетельствует о затруднении ее протекания. Это может быть связано с увеличением равновесной концентрации гидроксокомплексов кадмия, что затрудняет распад комплекса.

Таблица 3

Сводные данные обработки импедансных измерений в ограниченном объеме электролита при различных поляризациях и концентрациях щелочного электролита

	Поляризация								
	0 мВ (равновесие)			30 мВ			50 мВ		
$C_{\text{кон}}, \text{моль/л}$	5	7	9	5	7	9	5	7	9
$R_{\text{пленки}}, \text{Ом}\cdot\text{см}^2$	0,115	0,14	0,16	0,25	0,255	0,23	0,55	0,7	0,94
$C_{\text{ДЭС}}\cdot 10^6, \text{Ф}/\text{см}^2$	5	7	10	4	7	9	4	6	8
$W, \text{Ом}\cdot\text{см}^2\cdot\text{с}^{0,5}$	70	65	75	145	175	190	250	260	290
G	1523	3834	5300	1138	1532	3689	346	232	386
$C_{\text{Cd(OH)}_4^{2-}}\cdot 10^4, \text{моль/л}$	1,1	1,38	1,41	1,9	2,13	2,2	2,28	2,29	2,4

При росте поляризации сопротивление диффузии возрастает. Это может говорить о возможности непосредственного окисления кадмия (без перехода продуктов реакции в раствор) с образованием поверхностных оксидных и гидроксидных слоев с довольно низкой проводимостью. Низкое значение полученной емкости ДЭС также может свидетельствовать о наличии на поверхности оксидных пленок. Затруднения, связанные с химической реакцией при повышении поляризации, уменьшаются в 6 ÷ 10 раз. Это может быть обусловлено тем, что при повышении поляризации облегчается распад пересыщенного кадматного раствора и процесс начинает лимитироваться в большей степени стадией отвода комплекса от поверхности электрода, а не скоростью гомогенной химической реакции их разложения.

Увеличение концентрации гидроксокомплексов кадмия при повышении анодной поляризации было подтверждено восстановлением на сетчатом катоде гидроксокомплекса кадмия, образующегося в ходе окисления исследуемого электрода (табл. 4). Расстояние от сетчатого катода до анодной поверхности составляло ≈ 200 мкм.

Таблица 4

Сводные данные обработки хронопотенциометрических измерений в ограниченном объеме электролита при различных поляризациях $C_{\text{кон}} = 5$ моль/л

Поляризация, мВ	0	10	20	30	40	50	100	150
Переходное время, с	0,17	0,175	0,18	0,185	0,19	0,195	0,25	0,295
$C_{\text{Cd(OH)}_4^{2-}}\cdot 10^4, \text{моль/л}$	0,64	0,66	0,68	0,7	0,72	0,73	0,94	1,11

Как видно из представленных данных, при увеличении поляризации происходит повышение концентрации гидроксокомплексов кадмия и соответственно степени пересыщения раствора в прианодном пространстве в условиях ограниченного объема электролита. Однако

следует отметить, что величины концентраций ионов гидроксиокомплекса кадмия, полученные по методу фарадеевского импеданса, превышают значения концентраций, определенных методом катодной хронопотенциометрии. Это может быть связано с тем, что при переменноточковом методе исследования определяется концентрация ионов гидроксиокомплекса кадмия непосредственно у поверхности рабочего электрода. В случае проведения исследований с помощью метода катодной хронопотенциометрии сетчатый электрод удален от поверхности рабочего электрода на расстояние ≈ 200 мкм, это приводит к уменьшению получаемых значений концентрации гидроксиокомплексов кадмия за счет протекания гомогенной химической реакции их разложения. Разложение пересыщенного раствора гидроксиокомплексов кадмия приводит к образованию рыхлого слоя продуктов распада $\text{Cd}(\text{OH})_4^{2-}$, что создает условия для формирования на поверхности металла плотной барьерной пленки. Наличие такого слоя фиксируется переменноточковыми измерениями в виде $R_{\text{пленки}}$. Проводимость таких слоев может быть определена методом хроноамперометрии.

Величины рассчитанных значений ионной проводимости образующихся поверхностных оксидных слоев зависят как от концентрации щелочи, так и от поляризации кадмиевого электрода (рис. 3).

Возрастание проводимости пленок при росте поляризации свидетельствует о миграционном переносе ионов в оксидной пленке. При повышении значений концентрации щелочи до 7 моль/л снижается толщина оксидной пленки и увеличивается доля жидкофазной реакции. Дальнейшее повышение концентрации электролита приводит к снижению ионной проводимости из-за образования менее гидратированных оксидных соединений.

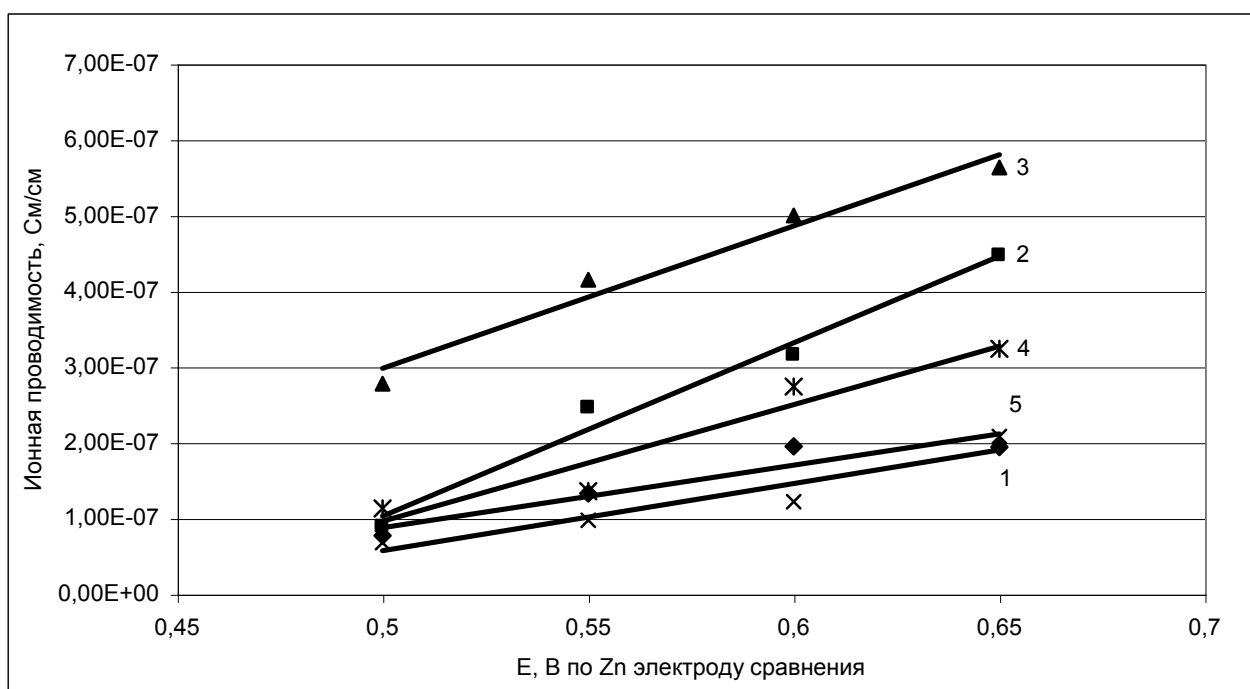
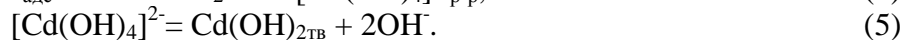
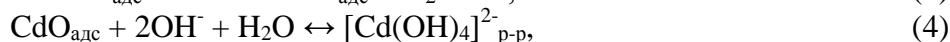
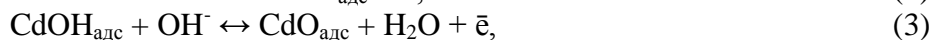


Рис. 3. Зависимость ионной проводимости пленки CdO от потенциала: 1 – 3М KOH; 2 – 5М KOH; 3 – 7М KOH; 4 – 8,5М KOH; 5 – 10М KOH

Сравнение величин сопротивлений, полученных из переменноточковых исследований, с проводимостями пленок, определенными по методу Крофта, дает возможность определения толщины плохопроводящих поверхностных пленок, которая составляет $\sim 20 \div 50 \text{ \AA}$.

Таким образом, с помощью проведенных исследований был определен механизм окисления кадмия в щелочном растворе и найдены некоторые параметры протекания гомогенной

химической реакции их разложения. Жидкофазный механизм процесса анодного окисления кадмия имеет следующий вид:



Также наблюдается и твердофазный механизм анодного окисления кадмия по реакции:



Библиографический список

1. **Harivel, J.P.** Electrodes fer et cadmium dans les accumulateurs alcalins / J.P. Harivel, J.F. Laurent // *Electrochem. Acta*. 1968. V. 13. № 12. P. 2229–236.
2. **Lifshin, E.** X-ray absorption and emission / E. Lifshin, J.Z. Weininger // *Electrochem Tehnology*. 1967. V. 5. № 1–2. P. 5–8.
3. **Галюс, З.** Теоретические основы электрохимического анализа / З. Галюс. – М.: Мир, 1974. С. 552.
4. **Феттер, К.** Электрохимическая кинетика / К. Феттер. – М. Химия, 1967. С. 856.
5. **Объедков Ю.И.** Изучение катодного процесса в системе Cd/Cd(OH)₂/KOH: дисс... канд. хим. наук / Объедков Ю.И. – Саратов, 1976. – 166 с.
6. **Дмитриенко Т.Г.** Роль гидроксокомплексов кадмия в механизме шунтообразования Ni-Cd аккумуляторов: дисс... канд. хим. наук / Дмитриенко Т.Г. – Саратов, 1997.
7. **Devanathan, M.A.** Mechanism and of kinetic of Passivation of Cadmium and Zinc in alkaline Solutions / M.A. Devanathan, S. Jakshmanan // *Electrochem. Acta*. 1968. V. 13. P. 667–677.
8. **Groft, J.T.** Self-discharge of the alkaline iron electrode / J.T. Groft, D.Tuomi // *Electrochem. Soc.* 1961. V. 108. № 10. P. 915–922.

Дата поступления
в редакцию 04.02.2010

A.A. Moskvichev, Y.L. Gunko, M.G. Michalenko, A.N. Moskvichev

THE INVESTIGATION OF KINETIC REGULARITIES AND CADMIUM OXIDATION PARAMETERS IN THE LIMITED VOLUME OF ALKALINE ELECTROLYTE

The anode oxidation of cadmium in the conditions of limited volume of electrolyte is investigated using chrono-voltamperometry, chronopotentiometry and variable electric current measurements on the especial cell. Basing on that the mechanism of cadmium oxidation (in described conditions) is suggested and its limitation stages are discovered. The diffusion coefficients, concentrations of cadmium hydrosystems, constants of equilibrium, velocities of strait and reverse chemical reactions, conductivity of barrier films on a surface of cadmium during quality electrolyte content variation.

Key words: thin-layer cell, anode oxidation of cadmium, chronopotentiometry, chronopotentiometry, variable electric current measurements.

УДК 54.03:539.2:667.622:542.61

А.А. Перетрутов, Н.В. Ксандров, М.Н. Чубенко, П.П. Ким

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПИРИТНОГО ОГАРКА КАК СЫРЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КРАСНОГО ЖЕЛЕЗО-ОКИСНОГО ПИГМЕНТА И ОТМЫВКА ЕГО ОТ СОЕДИНЕНИЙ ЦИНКА И МЕДИ

Определены механические и физико-химические структурные свойства пиритного огарка из отвалов: фракционный состав, механическая прочность, угол естественного откоса, насыпная масса, пористость, удельная внутренняя поверхность, радиус пор и гидравлический радиус. Установлено, что огарок является дисперсным веществом глобулярной макропористой структуры с пористостью $0,48 \text{ см}^3/\text{см}^3$, размером первичных частиц от 130 до 270 нм, с радиусом пор от 45 до 95 нм. Полнота извлечения тяжелых цветных металлов в шаровой мельнице выше, чем в реакторе с перемешивающим устройством и является функцией концентрации аммиака, отношения твердого к жидкому (Т:Ж) и времени обработки. Показано, что лучшие выщелачивающие свойства проявляют 3-5 % аммиачные растворы, тонина помола удовлетворяет требованиям ТУ на пигмент красный железо-окисный, остаток на сите № 0063 менее 3 %.

Ключевые слова: огарок, свойства, седиментация, пористость, выщелачивание, пигмент.

Все большее применение в строительстве находят дешевые пигменты. Область применения пигмента – окраска стройматериалов (кирпич, блоки, брусчатка, черепица, бетонные изделия, тротуарные плиты), а также может быть использован для получения грунтовочных красок, шпатлевок, окраски полимерных материалов и в качестве компонента различных специальных композиций и пленок. Пигмент красный железо-окисный изготавливают из пиритного огарка. Качество пигмента зависит от метода обработки огарка. Наилучшее вскрытие зерна, укрупненность, разбел и отмывка водорастворимых продуктов достигаются при измельчении огарка в шаровой мельнице мокрого помола. Для цементной и строительной промышленности в настоящее время используется пиритный огарок сернокислотных заводов, полученный ранее и находящийся в отвалах. Сфера утилизации огарка расширилась в связи с применением его в качестве красного железо-окисного пигмента.

Для испытаний был взят огарок производства серной кислоты из флотационного колчедана Ревдинского месторождения Свердловской области [1], известными методами [2] определены физико-механические свойства: фракционный состав, насыпная плотность, угол естественного откоса, механическая прочность (табл. 1).

Для определения размеров мелких частиц, входящих во фракцию менее 0,25 мм, был проведен седиментационный анализ дисперсности огарка [3]. Его проводили в спокойной жидкости: дистиллированной и 5 % (2,87 моль/л) аммиачной воде. Радиус частиц огарка вычисляли, используя формулу

$$r = \sqrt{\frac{9\mu \cdot u}{2(\rho - \rho_0)g}}, \quad (1)$$

где μ – вязкость дисперсионной среды, $1,005 \cdot 10^{-3}$ и $1,04 \cdot 10^{-3}$ для дистиллированной и аммиачной воды, Па·с; u – скорость движения частицы, м/с, определенная как отношение пути к времени осаждения; ρ и ρ_0 – плотность дисперсной 4810 и дисперсионной фазы 998 и 977,02 кг/м³; g – ускорение свободного падения 9,81 м/с².

Результаты седиментационного анализа в 2,87 моль/л аммиака ($\rho_0 = 977,02 \text{ кг/м}^3$) приведены в табл. 2.

Приведенные результаты свидетельствуют об отсутствии образования коллоидов и полном осаждении частиц, а повышение температуры в изученных интервалах незначительно сказывается на полноте осаждения.

Таблица 1

Физико-механические свойства и пористая структура пиритного огарка

Фракционный состав, мм	Массовая доля фракции, %	Угол естественного откоса, град.	Насыпная масса, кг/м ³	Механическая прочность гранул, МПа	Удельная внутренняя поверхность, м ² /см ³	Радиус глобул, нм	Радиус пор, нм	Гидравлический радиус, нм
1,5	0,06	31,0	730	0,37	5,69	270	95	83
1,0	0,35	32,5	790	0,48	9,16	170	60	52
0,5	0,18	35,0	860	0,75	9,98	160	57	49
0,25	0,47	36,5	1030	1,35	11,95	130	46	40
Менее 0,25	98,94	37,0	1045	-	12,12	130	45,6	40

Таблица 2

Седиментационный анализ огарка в 2,87 моль/л аммиачной воде

Время, с	Скорость осаждения частиц, м/с·10 ³	Степень осаждения частиц, % при температуре, °С			Радиус осажденных частиц, $r \cdot 10^5$, м, при температуре, °С		
		20	50	65	20	50	65
15	16,3	12,6	30,0	31,5	2,37	2,50	2,50
45	5,4	29,9	71,7	76,4	1,36	1,44	1,50
90	2,7	62,8	85,1	84,0	0,97	1,02	1,06
150	1,6	81,4	89,6	88,4	0,74	0,78	0,81
210	1,2	91,3	93,7	90,4	0,63	0,67	0,69
300	0,8	95,7	96,3	92,8	0,53	0,55	0,58
420	0,6	98,3	97,8	95,2	0,45	0,47	0,49
540	0,5	99,1	98,9	96,4	0,39	0,42	0,43
840	0,3	100	100	99,2	0,31	0,33	0,35
1080	0,2	100	100	100	0,27	0,29	0,30

Выполненный седиментационный анализ огарка в дистиллированной воде при температуре 20 °С показал, что изменение плотности и вязкости среды при переходе от аммиачной воды к дистиллированной воде не приводит к изменению структуры суспензии и ее свойств. Скорость осаждения частиц в воде для тех же промежутков времени соответственно составляет в м/с·10³: 16,0; 5,27; 2,68; 1,56; 1,13; 0,8; 0,58; 0,43; 0,28; 0,21. В течение 840 секунд достигается полное осаждение частиц.

Рефрактометрическим, весовым и хроматографическим (с помощью хроматографа «Цвет 211») методами [4] были определены характеристики огарка как пористого тела: объем пор, удельная внутренняя поверхность, размер пор. Соотношение между удельной внутренней поверхностью, пористостью и радиусом глобул для моноглобулярной структуры приводится в [5]:

$$S'_{уд} = \frac{3(1 - \varphi_{св})}{r_{гл}}, \quad (2)$$

где $S'_{уд}$ – удельная внутренняя поверхность, м²/см³; $\varphi_{св}$ – пористость, см³/см³; $r_{гл}$ – радиус глобул, м.

В огарке, пористая структура которого может быть описана мультидисперсной моделью, имеется набор глобул радиусов от $r_{\text{гл min}}$ до $r_{\text{гл max}}$. В предположении, что минимально-дисперсные частицы, осаждаемые при седиментационном анализе, являются максимально великими при образовании зерна огарка, определили, исходя из известной удельной поверхности, пористость частиц огарка. Для 1 см^3 число частиц в нем составляет $6,35 \cdot 10^9$ штук при радиусе $2,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, тогда объем частиц в кубе составит $0,52 \text{ см}^3$, а $\varphi_{\text{св}} = 0,48$. Для удельной поверхности огарка $12,12 \text{ м}^2/\text{см}^3$ с размером зерна $0,25 \text{ мм}$ размер глобул, образующих зерно, составляет $0,13 \cdot 10^{-6} \text{ м}$. Известно [5], что $\varphi_{\text{св}}$, а следовательно, и удельный объем $v_{\text{уд}}$, $\text{см}^3/\text{г}$ для данного конкретного материала постоянен, не зависит от размера сферических глобул, а зависит только от истинной плотности ($\rho_{\text{ог}}=4810 \text{ кг}/\text{м}^3$) для структуры, формируемой таким образом:

$$v_{\text{уд}} = \frac{6 - \pi}{\pi \rho}. \quad (3)$$

Исходя из постоянства пористости $\varphi_{\text{св}} = 1 - v'_{\text{уд}}$, $\text{см}^3/\text{см}^3$, рассчитаем размер глобул для остальных частиц, определенных седиментацией, и гидравлический радиус пор по формуле для моноглобулярной структуры:

$$r_{\text{гидр}} = \frac{\varphi_{\text{св}}}{S'_{\text{уд}}} = \frac{r_{\text{гл}} \cdot \varphi_{\text{св}}}{3(1 - \varphi_{\text{св}})}, \quad (4)$$

где $r_{\text{гидр}}$ – гидравлический радиус, нм.

Радиус пор частиц огарка мультидисперсной структуры определим по формуле

$$r_{\text{пор}} = \frac{a\sqrt{2}}{4g_{\text{г}}}, \quad (5)$$

где a – геометрический размер куба, $1 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; $g_{\text{г}}$ – число глобул, укладываемых вдоль стороны куба. Результаты определения объема пор, удельной внутренней поверхности, радиуса пор и гидравлического радиуса представлены в табл. 1. Несходимость результатов определения радиуса пор, определенного для мультидисперсной структуры и гидравлического радиуса для моноглобулярной структуры не превышает 15%.

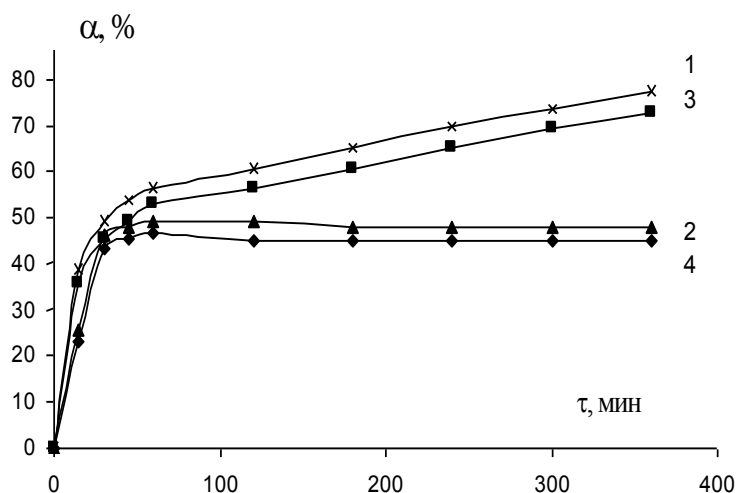


Рис. 1. Зависимость степени извлечения меди и цинка от концентрации аммиака в экстрагенте при 20 С и Т:Ж=1:10:

1 и 5, 2 и 6 – изменение степени извлечения меди за 1 час и 4 часа соответственно;
3 и 7, 4 и 8 – изменение степени извлечения цинка за 4 часа и 1 час соответственно.

Аппарат: 1 - 4 – реактор; 5 - 8 – шаровая мельница

По принятой классификации пористой структуры [5] пиритный огарок можно считать дисперсным веществом глобулярной структуры с пористостью $0,48 \text{ см}^3/\text{см}^3$, размером первичных частиц от 130 до 270 нм, с радиусом пор от 45 до 95 нм, что позволяет по эффективному радиусу кривизны поры отнести к переходным, а огарок к макропористым структурам. Это важно, так как в макропористых структурах меньше рост капиллярной вязкости экстрагента и соответственно меньше диффузионные сопротивления при извлечении (экстракции) цинка и меди водно-аммиачными растворами.

Выполнен химический анализ огарка из отвала: среднее содержание компонентов в огарке соответствует пределам, указываемым в литературе [1]. В пересчете на металлы содержание оксида меди составляет 0,39 %, оксида цинка 1,07 %, оксида кремния 17 %, железа 56,74 %. В результате длительного хранения огарка в отвалах содержание водорастворимых соединений повысилось до 10 – 18 %. Результаты опытов по экстракции цветных металлов из пиритного огарка водно-аммиачными растворами, характеризующие экстрагирующую способность водных растворов аммиака по отношению к пиритному огарку названного состава, приведены на рис. 1.

Экстракцию осуществляли в реакторе с мешалкой и в шаровой мельнице раствором аммиака при Т:Ж=1:10. Из рис. 1 следует, что часть соединений цинка и меди извлекается водой. С ростом исходной концентрации аммиака в экстрагенте возрастает степень извлечения меди. Для цинка выявлена оптимальная концентрация аммиака, близкая к 3-5 % (1,61-2,87 моль/л). С увеличением длительности экстракции наблюдается прирост степени извлечения цинка. Для экстракции меди отмечено незначительное (не более 3,5 %) снижение степени извлечения при увеличении продолжительности опыта.

В табл. 3 представлены результаты опытов, проведенных для определения влияния отношения Т:Ж на процесс водно-аммиачной экстракции цветных металлов при концентрациях аммиака 1,61, 2,87 и 5,62 моль/л, из которых видно, что с уменьшением Т:Ж закономерно снижается концентрация извлекаемых компонентов в растворе, и одновременно увеличивается степень извлечения. При Т:Ж = 1:20 достигается извлечение в среднем более 85% цветных металлов, содержащихся в огарке.

Таблица 3

Влияние отношения Т:Ж на извлечение меди и цинка из пиритного огарка аммиачной водой при времени 4 часа

Концентрация аммиака		Отношение Т:Ж	Массовая концентрация, г/л				Степень извлечения, %			
			меди		цинка		меди		цинка	
%	моль/л		реактор	мель-ца	реактор	мель-ца	реактор	мель-ца	реактор	мель-ца
3	1,61	1:5	0,202	0,231	0,765	0,853	23,5	26,9	37,5	41,8
3	1,61	1:10	0,135	0,147	0,636	0,686	31,5	34,3	62,4	67,3
3	1,61	1:20	0,153	0,161	0,462	0,482	71,3	74,7	90,6	94,5
5	2,87	1:5	0,230	0,259	0,804	0,909	26,8	30,1	39,4	44,5
5	2,87	1:10	0,193	0,206	0,662	0,712	45,0	48,0	65,0	69,8
5	2,87	1:20	0,170	0,178	0,483	0,496	79,0	82,6	94,9	97,3
10	5,62	1:5	0,258	0,274	0,630	0,718	30,0	31,9	30,8	35,2
10	5,62	1:10	0,210	0,220	0,523	0,579	49,3	51,1	52,0	56,8
10	5,62	1:20	0,187	0,192	0,469	0,487	87,0	89,1	92,0	95,4

Поскольку увеличение степени извлечения путем уменьшения отношения Т:Ж сопровождается образованием растворов тетрааммиаатов низкой концентрации, с точки зрения полноты отмывки огарка от оксидов цинка и меди приемлемым отношением является Т : Ж, равное 1 : 20 – 1 : 10, а низкое процентное содержание оксидов цинка и меди в пиритном огарке позволяет использовать в качестве экстрагента аммиачную воду 1,61-2,87 моль/л (3–5%) концентрации. Метод выщелачивания может быть реализован при использовании шаровой

мельницы мокрого помола, обеспечивающей высокую степень извлечения цветных металлов, дополнительное измельчение частиц огарка и вскрытие зерна оксида железа.

Процесс измельчения в шаровой мельнице мокрого помола, сопровождающийся выщелачиванием, описывается известными закономерностями и укрупненными показателями, полученными в ходе эксплуатации подобного рода аппаратов [6].

В частности, критическую частоту вращения барабана, $n_{кр}$, (об/мин) определяли в соответствии с рекомендациями по формуле [6]:

$$n_{кр} = \frac{42,4}{\sqrt{D}}, \quad (6)$$

где D – диаметр барабана, для использованной мельницы составлял 0,14 м. Расчетная критическая частота вращения барабана составила соответственно 114 об/мин. Оптимальную частоту вращения барабана, n , (об/мин) для шаровой мельницы мокрого помола при $D < 1,25$ м определили по формуле:

$$n = \frac{35}{\sqrt{D}}. \quad (7)$$

Она составила 94 об/мин. Рекомендуемую массу загрузки мельницы, G , (т) определили из формулы:

$$G = \pi R^2 L \phi K_p \rho, \quad (8)$$

$$G = 3,14 \cdot 0,07^2 \cdot 0,126 \cdot 0,5 \cdot 0,03 \cdot 4,81 = 20,98 \cdot 10^{-6} \text{ т},$$

где R – внутренний радиус мельницы, м; L – длина мельницы, м; ϕ – коэффициент заполнения мельницы; K_p – коэффициент разрыхления мелющих тел; ρ – плотность загрузки 4,810 т/м³. В соответствии с расчетом загрузку мельницы принимали равной 20 г, диаметр мелющих тел, 20 мм:

$$D_{ш} = 6(\lg d_k) \sqrt{d_n} = 6(\lg 63) \cdot 3,0^{0,5} = 18,7 \text{ мм}, \quad (9)$$

где d_k – размер конечного продукта 63 мкм; d_n – наибольший диаметр поступающих кусков 3,0 мм.

Производительность мельницы, т/ч проверили по уравнению

$$Q = \frac{q K_p K_s}{1000} 6,75 \cdot V \sqrt{D} \sqrt{\frac{G}{V}} \eta_э, \quad (10)$$

где K_p – коэффициент размолоспособности, рекомендуемые значения от 0,8 до 2,2, принятое значение 0,8; q – удельная производительность (при мокром помоле равна 50 – 250 кг/ч на 1 кВт мощности, принятое для расчета значение 50 кг/ч/кВт); K_s – поправочный коэффициент на тонкость помола, $K_s=1$; V – внутренний объем мельницы, м³, ($V=0,8 \cdot 10^{-3}$ м³); D – внутренний диаметр мельницы, м ($D = 0,14$ м); G – масса мелющих тел, ($G=276 \cdot 10^{-6}$ т); $\eta_э$ – коэффициент относительной эффективности помола, зависящий от конструкции мельницы и схемы ее работы, $\eta_э = 0,9 - 1,3$, ($\eta_э = 1,0$). Расчетная (прогнозируемая) производительность мельницы составила $7,0 \cdot 10^{-5}$ т/ч. Следовательно, производительность мельницы выбрана с запасом по загрузке.

Определение влияния времени выщелачивания на полноту извлечения цинка и меди проводили при комнатной температуре, скорости вращения барабана $n = 93,5$ об/мин, соотношении Т:Ж=1:10, концентрации аммиака – 5 %, массе загружаемых шаров 276 г; массе загружаемого огарка 20 г, то есть при соотношении $M_{ш}:M_{огарка} = 14:1$.

Результаты отмывки огарка от соединений цинка и меди в мельнице мокрого помола 5% аммиачной водой внесены в рис. 1, 2 и табл. 3. Приведенные результаты свидетельствуют об эффективности использования шаровой мельницы для выщелачивания: степень извлечения цветных металлов и концентрация растворов выше на 3 – 4,7 % и на 0,01 – 0,05 г/л соответственно.

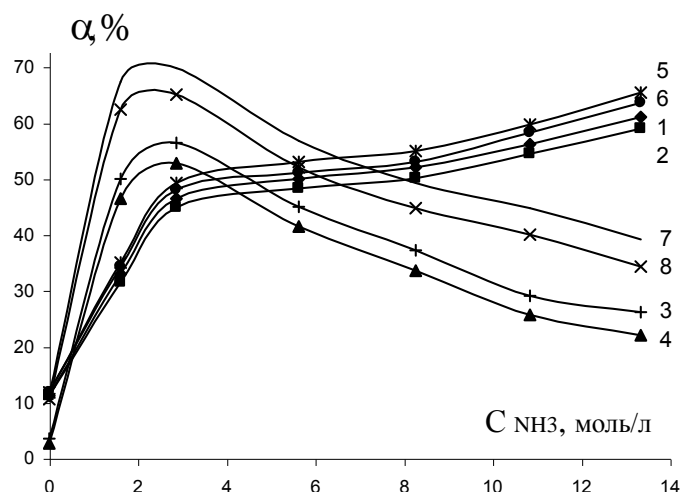


Рис. 2. Извлечение цинка и меди из пиритного огарка в процессе помола в среде 5%-ного аммиака:

1, 3 – для цинка; 2, 4 – для меди; 1, 2 – в шаровой мельнице мокрого помола; 3, 4 – в реакторе

На основании исследования теоретической растворимости оксидов цветных металлов в водно-аммиачных растворах известно [7], что движущая сила процесса выщелачивания, равная разности концентраций насыщенного и рабочего растворов, уменьшается с увеличением температуры. Указанный факт и исследование выщелачивания в условиях работы аппарата с мешалкой при различных концентрациях аммиака свидетельствуют, что процесс выщелачивания находится во внутренне диффузионной области. Подтверждением тому является то, что степень выщелачивания за одно и то же время зависит от степени измельчения (96,3% за 6 часов) и определяется оптимальной концентрацией реагента: массовая доля аммиака 3–5 %. Тонина помола удовлетворяет требованиям ТУ 301-10-0-386-92 на пигмент красный железо-окисный, остаток на сите № 0063 менее 3%.

На рис. 3 представлена принципиальная технологическая схема переработки пиритного огарка с выпуском в качестве продукции пигмента красного железистого.

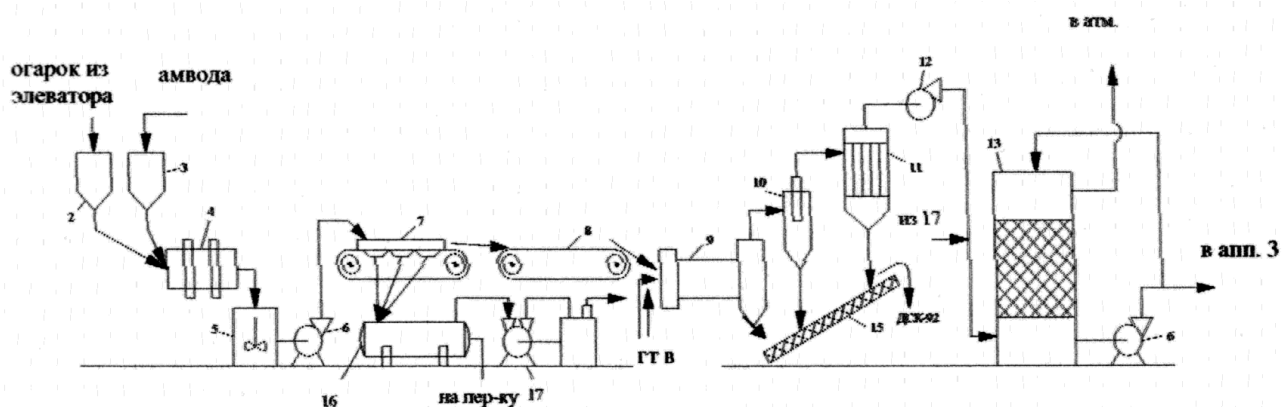


Рис. 3. Принципиальная технологическая схема переработки пиритного огарка:

1 – элеватор; 2 – бункер-дозатор; 3 – напорный бак аммиачной воды; 4 – шаровая мельница; 5 – сборник слива; 6 – насос; 7 – ленточный вакуумный фильтр; 8 – питатель; 9 – сушильный барабан; 10 – циклон-пылеуловитель; 11 – рукавный фильтр; 12 – дымосос; 13 – скруббер; 14 – дезинтегратор; 15 – шнековый питатель и затарочное устройство; 16 – вакуум-сборник фильтрата; 17 – вакуум-насос

После отмывки огарка от водорастворимых и размола в шаровой мельнице происходит вскрытие зерна: при разбеле 0,3 граммов пигмента 1 граммом титановых белил цвет мазка становится приятно розовым с достаточной интенсивностью, окрас приобретает благородный оттенок. Для сравнения испытан размол огарка в вибрмельнице и ультразвуковым измельчением – качество мазков уступает варианту с отмывкой и размолом в шаровой мельнице.

Библиографический список

1. **Васильев, Б.Т.** Проблемы использования пиритных огарков в СССР и за рубежом / Б.Т. Васильев, Л.А. Филонова / Обз. инф. Сер. 3 «Минеральные удобрения и серная кислота». – М.: НИИТЭХИМ, 1983. – 30 с.
2. **Щукин, Е.Д.** Механические испытания катализаторов и сорбентов / Е.Д. Щукин, А.Н. Бессонов, С.А. Паранский. – М.: Наука, 1971. – 54 с.
3. **Коузов, П.А.** Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов / П.А. Коузов. – 2-е изд., испр. – Л.: Химия, 1974. – 280 с.
4. **Буянова, Н.Е.** Определение удельной поверхности твердых тел хроматографическим методом тепловой десорбции аргона / Н.Е. Буянова, А.П. Карнаухов. – Новосибирск: Наука, 1965. – 60 с.
5. Технология катализаторов / И.П. Мухленов [и др.]; под ред. И.П. Мухленова. – 2-е изд., перераб. – Л.: Химия, 1979. – 328 с.
6. Оборудование, сооружения, основы проектирования химико-технологических процессов защиты биосферы от промышленных выбросов / А.И. Родионов [и др.]. – М.: Химия, 1985. – 352 с.
7. **Перетрутов, А.А.** Физико-химические основы растворения тяжелых цветных металлов аммиачно-аммонийными растворами / А.А. Перетрутов, М.Н. Чубенко, С.И. Горюнов. – Дзержинск, 2000. – 9 с. Деп. в ВИНТИ № 1857-В00 от 04.07.00. Д/ф Нижегород. гос. тех. университета.

*Дата поступления
в редакцию 04.02.2010*

A.A. Peretrutov, N.V. Ksandrov, M.N. Chubenko, P.P. Kim

PHYSICOCHEMICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF PYRILE CINDER AS RAW MATERIAL FOR THE PRODUCTION OF RED IRON-OXIDE COLORING AGENT AND ITS CLEANING FROM ZINC AND COPPER COMPOUNDS

The research has determined physical-mechanical and physicochemical structural properties of pyrile cinder from dumps: breakup, mechanical strength, angle of friction, bulk weight, porosity, specific inside surface, pores radius and hydraulic mean depth; it has been stated that the cinder is disperse material of globular macroporous structure having porosity of $0,48 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, primary particles magnitude from 130 to 270 nm, pores radius from 45 to 95 nm. It has been established that completeness of heavy nonferrous metals extraction in a ball crusher is higher than in a reactor with a stirring device and it is a function of ammonia concentration, solid-to-liquid ratio (S:L) and processing time. It has been shown that the best lixiviating properties are revealed by 3–5 % ammonia solutions, grinding fineness meets the requirements TC for red iron-oxide coloring agent, sieve residue № 0063 is less than 3%.

Key words: cinder, properties, sedimentation, porosity, lixiviation, coloring agent.

ЭКОНОМИКА, ИННОВАЦИИ И МЕНЕДЖМЕНТ

УДК 336.714

Ф.Ф. Юрлов¹, Т.В. Болоничева¹, А.В. Разина²**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИННОВАЦИОННОЙ
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПУТЕМ ФОРМИРОВАНИЯ
ГРУППОВЫХ ПРЕДПОЧТЕНИЙ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Управление ФНС России по Нижегородской области²

Проблема выбора эффективных решений в экономике всегда имела исключительное значение. При анализе инновационной деятельности возникает необходимость разработки и применения новой методологии и инструментария оценки эффективности систем различного уровня. В работе рассматриваются вопросы определения уровня инновационного развития стратегических промышленных предприятий Нижегородской области путем формирования групповых предпочтений на основе индивидуальных ранжирований заинтересованных сторон.

Ключевые слова: индивидуальное ранжирование, групповое предпочтение, функция ценности, коэффициенты важности, выбор предпочтительных решений.

При выборе того или иного решения, в том числе и при оценке эффективности инновационной деятельности, принимают участие множество участников $J = \{J_i\}, i = \overline{1, n}$. В качестве J_i могут быть: отдельные предприниматели, фирмы, организации и т.д. В частности, совокупность J может представлять собой участника инновационного проекта. Каждый из участников располагает множеством альтернатив: $X_i = \{X_{il}\}, l = \overline{1, L}$, где X_{il} – способ решения поставленных задач i -м участником. В качестве альтернатив также могут выступать инновационные проекты, сравниваемые экономические системы, наборы показателей.

При сравнении альтернатив и выборе наиболее предпочтительных решений каждый участник определяет свое предпочтение R_i (индивидуальное предпочтение). Предпочтения определяются как «лучше – хуже», а не «больше – меньше». Каждому набору предпочтений ставится в соответствие набор показателей. Совокупность предпочтений участников обозначим через $R = \{R_i\}, i = \overline{1, n}$. Таким образом, согласно анализу, основанному на формировании теории предпочтений, располагая индивидуальными предпочтениями отдельных участников, необходимо определить модель группового предпочтения. Сущность проблемы заключается в следующем: при известных предпочтениях (ранжированиях) множества альтернатив каждым членом группы, необходимо определить, каким должно быть групповое ранжирование (предпочтение).

При решении реальных социально-экономических задач возникает необходимость применения общей теории, которая позволяла бы производить объективную оценку эффективности систем. В качестве такой теории может быть использована теория, основанная на научных выводах Эрроу. Базой этой теории являются принципы определения индивидуальных и групповых предпочтений, формирования функции ценности.

Для выбора наиболее эффективной альтернативы $x \in X$ необходимо построить функцию ценности (полезности) ЛППР, которую обозначим через V_D , $V(x) = V_D [V_1(x), V_2(x) \dots V_n(x)]$. Функции ценности участников считаются известными V_1, V_2, \dots, V_n . При решении данной задачи используются допущение 1 и допущение 2.

Сущность допущения 1. Критерии $\{V_i, V_j\}$ независимы по предпочтению от своих дополнений V_{ij} , для всех $i \neq j, N \geq 3$.

Сущность допущения 2. Пусть альтернативы X_i и X_j для группы будут одинаковы по предпочтительности. Если X_i изменится и превратится в X_i' таким образом, что индивид предпочтет альтернативе X_i альтернативу X_i' , в то время как все остальные лица считают их равнозначными, то X_i' предпочтительнее X_i всей группой. То есть, если инновационные проекты будут одинаковы по предпочтению для всех членов группы, а в дальнейшем, при замене лишь одного проекта на другой, но предпочитаемый хотя бы одним участником, этот вариант и станет предпочтительным по групповому ранжированию.

Таким образом, практически реализуется принцип доминирования, когда осуществляется попарное сравнение указанных альтернатив. При сравнении альтернатив (вариантов) с номерами I и J вариант с номером I доминирует (превосходит) вариант с номером J , если все показатели I -го варианта не хуже показателей J -го варианта и хотя бы один показатель является лучшим.

Так, каждый участник сначала формирует функцию ценности для каждой альтернативы (инновационного проекта, показателя инновационной деятельности), далее на этой основе формируется итоговая функция ценности, учитывающая индивидуальные предпочтения всех участников ранжирования.

В качестве функции ценности для оценки инновационной деятельности предприятия может выступать функция, учитывающая проранжированные показатели инновационного развития (объем отгруженной инновационной продукции, количество приобретенных технологий, удельный вес предприятий, занимающихся инновационной деятельностью). Функция имеет вид:

$$K_o = \sum_{i=1}^n \frac{V_i^*}{V_i} K_{i\text{прив}}$$
; где $K_{i\text{прив}}$ – показатель инновационного развития, приведенный к безразмерному виду, V_i^* – групповое предпочтение, сформированное для i -го показателя.

В процессе формирования данной функции возникают трудности, связанные:

- 1) с переводом показателей инновационной деятельности к безразмерному сопоставимому виду;
- 2) определением значений групповых предпочтений.

При определении эффективности принимаемых решений по совокупности показателей используем метод формирования обобщенных (комплексных) показателей.

Предлагается методика выбора определения эффективности инновационной деятельности экономических систем путем формирования групповых предпочтений. Этапы методики:

1. Определение целей анализа $Ца = \{Ца_i\}, i = \overline{1, n}$.

В качестве $Ца_i$ могут выступать: оценка инновационно-экономического состояния предприятий, определение эффективности инновационных проектов, формирование программ развития экономических систем.

2. Выбор средств достижения целей $X = \{X_j\}, j = \overline{1, J}$, где X_j ; могут представлять организационные, технические, нормативные, финансовые и иные факторы.

3. Определение объектов анализа $Оа = \{Оа_l\}, l = \overline{1, L}$. Объекты $Оа_l$ представляют предприятия, отрасли экономики, регионы, проекты и т.д.

4. Формирование критериев эффективности анализируемых альтернатив $K = \{K_m\}, m = \overline{1, M}$. В качестве показателей K_m выступают: экономические, социальные, технические и иные показатели.

5. Формирование индивидуальных ранжирований показателей по каждой альтернативе. Коэффициенты весомости показателей, определяющие его значимость для тех или иных участников проектов и заинтересованных сторон, определяются экспертным методом ран-

жирования. Ранжирование – процедура установления относительной значимости (предпочтительности) исследуемых объектов на основе их упорядочения. Ранг – это показатель, характеризующий порядковое место оцениваемого объекта в группе других объектов, обладающих существенными для оценки свойствами. Ранжирование предполагает расстановку объектов измерений или показателей качества в порядке их предпочтения или важности.

6. Формирование группового предпочтения по каждому показателю, где R_l – индивидуальное предпочтение ЛПР, относящееся к показателю с номером l . Для этого воспользуемся правилом уравнивания, согласно которому совокупное предпочтение является суммой значений индивидуальных ранжирований лиц, принимающих решение. На основе их индивидуальных ранжирований формируем групповое ранжирование всех показателей по каждой организации.

7. Преобразование показателей, не представленных в количественном выражении. Каждому ранжируемому критерию ставится в соответствие значение показателя в стоимостной форме, приведенное к безразмерному виду для получения объективных оценок альтернативных вариантов.

8. Установление взаимосвязи между рангами групповых предпочтений и коэффициентами важности. Как правило, при выборе экономических решений, принимают участие несколько участников (сторон). В качестве участников могут выступать акционеры, менеджеры, поставщики, потребители, инвесторы и др. Заинтересованные стороны представляют государственные органы разных уровней, общественные, природоохранные организации и др.

Для выяснения значимости каждого фактора для каждого участника необходимо определить их весовые коэффициенты:

$$\gamma_i = \frac{2(N - R + 1)}{(N + 1)N},$$

где N - количество показателей; R - ранг показателя.

9. Определение эффективности каждой альтернативы с учетом коэффициентов важности и значений полученных показателей. Значения весомости по каждому типу производства перемножаются с безразмерными показателями каждой группы, а затем суммируются.

$$\Pi_u = \sum_{i=1}^n \gamma_i * K_{ui}^y,$$

где γ_i – весомость показателя; K_{ui}^y - приведенный к безразмерному виду показатель.

Наиболее эффективным будет считаться тот вариант, для которого значение функции будет максимальным.

10. Сравнительная оценка эффективности альтернатив по рассчитанному критерию. Выбор предпочтительных альтернатив. Целью проведения данной оценки является выбор единственного эффективного решения по совокупности противоречивых критериев с учетом групповых предпочтений заинтересованных лиц.

11. Ранжирование предпочтительных альтернатив. В результате проведения оценки с помощью предложенной методики альтернативы распределяются по степени снижения их предпочтительности в заданных экономических условиях. Таким образом, данная методика позволяет выявить как лидирующие, так и отстающие альтернативы, в зависимости от целей проведения анализа.

Отметим особенности предложенной методики:

- применение данной методики позволяет осуществить оценку не по единственному критерию, а по совокупности показателей;
- методику возможно применять для оценки различных объектов;
- методика позволяет учесть не только показатели, представленные в стоимостном выражении, но и предпочтения лиц, принимающих решение;
- методика позволит ранжировать альтернативы по их предпочтительности;
- в результате применения данной методики достоверность оценки повысится за счет формирования групповых предпочтений на основе индивидуальных ранжирований.

Для выбора эффективных решений в сфере инновационной деятельности используем предложенную методику оценки с учетом групповых предпочтений:

1. Формирование набора альтернатив $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$. В качестве объектов анализа выступают стратегические предприятия.

2. Определение набора показателей для каждого предприятия $K_n = \{K_1, K_2, K_3, \dots, K_n\}$. Оценка инновационной деятельности осуществляется по следующим показателям:

- инвестиции в основной капитал за отчетный год;
- отгружено товаров собственного производства, выполнено работ и услуг;
- затраты на технологические, маркетинговые и организационные инновации;
- объем отгруженной инновационной продукции;
- затраты на технологические инновации из собственных средств в расчете на одного работника;
- затраты на технологические инновации из средств бюджетов всех уровней в расчете на одного работника;
- доля инновационной продукции в общем объеме отгруженной продукции;
- затраты на инновационную деятельность в расчете на одного работника;
- доля затрат на инновации в общем объеме инвестированного капитала;
- величина общих инвестиций в расчете на одного работника;
- доля работников с высшим образованием в общей численности;
- затраты на приобретение новых технологий в общем объеме инвестированного капитала;
- объем инновационной продукции в расчете на одного работника;
- количество совместных проектов;
- доля заемных средств в общем объеме затрат на инновационную деятельность;
- количество приобретенных и переданных технологий;
- затраты на приобретение и разработку объектов интеллектуальной собственности в общем объеме инвестированного капитала.

3. Приведение показателей к безразмерному виду. Для проведения достоверной оценки необходимо показатели, выраженные в стоимостной или количественной формах, привести к безразмерному виду. В данном случае это определяется по следующей формуле: $K_{\text{без}} = \frac{K_i}{K_{\text{max}}}$,

где K_i – исходное значение показателя, K_{max} – максимальное значение показателя.

Исходные данные, выраженные в безразмерном виде, характеризующие инновационную деятельность организации, согласно форме статистической отчетности, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для выбора предпочтительных решений

Данные за 2008 год	Инвестиции в основной капитал за отчетный год	Отгружено товаров собственного производства, выполнено работ и услуг	Затраты на технологические, маркетинговые и организационные инновации	Объем отгруженной инновационной продукции	Количество приобретенных новых технологий	Удельный вес инновационной продукции в общем объеме	Доля затрат на инновации в общем объеме инвестиций
ОАО "ГИДРОАГРЕГАТ"	0,215	0,789	1,000		1,000		1,000
ОАО "КРАСНЫЙ ЯКОРЬ"	0,053	0,253					
ОАО ПКО "ТЕПЛОБМЕННИК"	0,576	1,000	0,948	0,345	0,333	0,345	0,948
ОАО "ГЗАС им. А.С. Попова"	0,365	0,218	0,080	1,000	0,111	1,000	0,080
ОАО ЗИП"	0,089	0,261	0,039		0,333		0,039
ОАО "НМЗ"	1,000	0,317	0,009				0,009

Таблица 2

Формирование групповых предпочтений на основе индивидуальных ранжирований

	ОАО "ГИДРОАГРЕ- ГАТ"	ОАО "КРАСНЫЙ ЯКОРЬ"	ОАО ПКО "ТЕПЛО- ОБМЕННИК"	ОАО "ТЗАС им. А.С. Попова"	ОАО ЗИП"	ОАО "НМЗ"	Сумма рангов	Значимость	Весомость
ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ									
Недостаток собственных денежных средств	2	3	3	3	3	2	16	1	0,14286
Недостаток финансовой поддержки со стороны государства	2	2	2	3	2	2	13	2	0,13187
Низкий спрос на новые товары, работы, услуги	2	1	1	1	1	1	7	7	0,07692
Высокая стоимость нововведений	3	2	2	1	2	1	11	3	0,12088
Высокий экономический риск	2	2	2	1	1	2	10	4	0,10989
ВНУТРЕННИЕ ФАКТОРЫ									
Низкий инновационный потенциал предприятия	3	1	1	1	2	2	10	4	0,10989
Недостаток квалифицированного персонала	1	1	1	1	2	2	8	6	0,08791
Недостаток информации о новых технологиях	2	2	1	1	1	1	8	6	0,08791
Недостаток информации о рынках сбыта	2	1	1	1	2	1	8	6	0,08791
Неразвитость кооперационных связей	2	1	1	1	2	1	8	6	0,08791
ДРУГИЕ ФАКТОРЫ									
Недостаточность законодательных и нормативно-правовых документов, регулирующих и стимулирующих инновационную деятельность	2	2	2	1	1	1	9	5	0,09890
Неразвитость инновационной структуры (посреднические, информационные, юридические, банковские, прочие услуги)	1	1	1	1	1	1	6	8	0,06593
Неопределенность экономической выгоды от использования интеллектуальной собственности	1	1	1	1	2	1	7	7	0,07692

Перейдем к реализации методики, основанной на формировании групповых предпочтений.

1. В качестве цели анализа принят выбор эффективных решений в сфере инновационной деятельности по совокупности показателей с учетом групповых предпочтений

2. Выбор средств достижения целей, формирование набора альтернатив и показателей, характеризующих каждую альтернативу.

3. Определение объектов анализа. В качестве объектов анализа выступают уже обозначенные предприятия, имеющие стратегическое значение.

4. Формирование критериев эффективности анализируемых альтернатив. Наряду с показателями, представленными в стоимостной или количественной формах, для оценки используются и факторы, препятствующие инновационной деятельности предприятия, представленные в виде оценочных кодов.

5. Оценщиками выступают представители каждой анализируемой организации.

6. Формирование индивидуальных ранжирований показателей по каждой альтернативе.

Для каждой альтернативы формируем индивидуальное ранжирование показателей по значимости для предприятия.

Оценочные коды расставляются таким образом: 1 – малозначительное влияние, 2 – значительное влияние, 3 – определяющее значение. Формируем набор индивидуальных предпочтений заинтересованных сторон по каждому показателю для всех анализируемых альтернатив (табл. 2).

7. Формирование группового предпочтения по каждому показателю. Далее необходимо сформировать групповое предпочтение по каждому показателю для совокупности предприятий, имеющих стратегическое значение.

Для этого воспользуемся правилом уравнивания, согласно которому совокупное предпочтение является суммой значений индивидуальных ранжирований лиц, принимающих решение.

На основе их индивидуальных ранжирований формируем групповое ранжирование всех показателей по каждой организации. Это правило используется для устранения недостатка правила большинства, а именно устранения нетранзитивности. Каждый "член жюри" (эксперт) упорядочивает варианты по предпочтениям. Пусть имеется совокупность альтернатив $\{S_i\}, i = \overline{1, N}$.

При составлении индивидуального предпочтения эксперт присваивает 1 балл наиболее предпочтительному варианту, 2 балла - следующему за ним в порядке предпочтения, и т.д. N баллов присваивается варианту, наименее предпочтительному в соответствии с данным индивидуальным предпочтением.

Затем для каждой альтернативы находят сумму баллов, назначенных ей экспертами, и варианты упорядочиваются в соответствии с суммарным баллом.

Таблица 3

**Применение методики выбора эффективных инновационных решений
на основе формирования групповых предпочтений**

	ОАО "ГИДРОАГРЕ- ГАТ"	ОАО "КРАСНЫЙ ЯКОРЬ"	ОАО ПКО "ТЕПЛО- ОБМЕННИК"	ОАО "ГЗАС им. А.С. Попова"	ОАО ЗИП"	ОАО "НМЗ"
1	2	3	4	5	6	7
Затраты на технологические инновации из собственных средств в расчете на одного работника	7,46758	0,00000	2,11747	0,65618	0,58474	0,02233
Затраты на технологические инновации из средств бюджетов всех уровней в расчете на одного работника	0,00000	0,00000	1,49211	0,00000	0,00000	0,00000
Доля инновационной продукции в общем объеме отгруженной	0,00000	0,00000	0,00109	0,01454	0,00000	0,00000

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6	7
Затраты на инновационную деятельность в расчета на одного работника	6,31872	0,00000	3,98905	0,55523	0,49485	0,01889
Доля затрат на инновации в общем объеме инвестированного капитала	0,20322	0,00000	0,07187	0,00956	0,01882	0,00040
Величина общих инвестиций в расчете на одного работника	3,10613	3,01060	5,54515	5,80044	2,62675	4,75661
Доля работников с высшим образованием в общей численности	0,02307	0,02130	0,02650	0,01969	0,04046	0,01934
Затраты на приобретение новых технологий в общем объеме инвестированного капитала	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00001	0,00000
Объем инновационной продукции в расчете на одного работника	0,00000	0,00000	0,79013	3,78736	0,00000	0,00000
Количество совместных проектов	0,00000	0,00000	0,96703	0,26374	0,61538	0,00000
Доля заемных средств в общем объеме затрат на инновационную деятельность	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
Количество приобретенных и переданных технологий	0,59341	0,00000	0,19780	0,06593	0,19780	0,00000
Затраты на приобретение и разработку объектов интеллектуальной собственности в общем объеме инвестированного капитала	0,00000	0,00000	0,00007	0,00000	0,00000	0,00000
Суммарная оценка	17,71214	3,03190	15,19828	11,17266	4,57881	4,81757

8. Установление взаимосвязи между рангами групповых предпочтений и коэффициентами важности (табл. 3). Ранжируем показатели по величине рассчитанного группового предпочтения, в порядке убывания их значимости. Далее рассчитываем значение весомости каждого показателя и определяем обобщенный показатель, учитывающий весомости и приведенные в сопоставимый вид количественные показатели инновационной деятельности.

9. Сравнительная оценка эффективности альтернатив по критерию. Выбор предпочтительных альтернатив. Отбираем эффективное решение по максимуму полученного значения суммарной оценки альтернативы с учетом групповых предпочтений заинтересованных лиц. Лидирующим предприятием признано ОАО «Гидроагрегат».

Таким образом, для выбора эффективных решений при оценке инноваций следует учитывать не только показатели, выраженные в стоимостной форме, но и индивидуальные предпочтения лиц, принимающих решение. На основе индивидуальных ранжирований показателей по каждой альтернативе формируется групповое предпочтение, позволяющее оценить весомость каждого критерия.

На основании групповых ранжирований показателей по каждой оцениваемой альтернативе, полученных из индивидуальных предпочтений заинтересованных лиц, разработана методика оценки эффективности инновационной деятельности экономических систем, отличающаяся большей достоверностью, так как основана не только на количественных стоимостных показателях, но включает и критерий важности каждого показателя для группы лиц, принимающих решение.

Разработанный инструментарий позволил провести оценку эффективности инновационной деятельности предприятий Нижегородской области, имеющих стратегическое значение. Следует отметить, что предложенные методики применимы не только для выбора предпочтительных решений при анализе предприятий такого типа, но могут быть использованы различными заинтересованными сторонами для оценки эффективности инновационной деятельности экономических систем различного уровня.

*Дата поступления
в редакцию 25.01.2010*

F.F. Urlov, T.V. Bolonicheva, A.V. Razina

**METHODS OF DETERMINING THE EFFECTIVENESS OF INNOVATIONAL
ACTIVITIES OF ECONOMIC SYSTEMS THROUGH THE FORMATION
OF GROUP PREFERENCES**

The problem of choice of optimum solutions has always been of exceptional importance. In this context, it is necessary to develop and use a new methodology and new tools for evaluating the efficiency of systems at different levels. In this paper, some issues related to the determination of the economic situation of strategic industrial enterprises of the Nizhni Novgorod region with the aid of the proposed methods and principles. The consistent use of the above principles in their interrelation allows to find the most effective solutions.

Key word: individual ranking, group preference, function of value, factors to importance, choice of effective solutions.

УДК 338.45

С.Н. Яшин, Т.М. Крюкова

МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ НА ОСНОВЕ ФОРМИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Существуют общепринятые подходы к определению инновационного потенциала хозяйствующих субъектов, но они не являются общеприменимыми.

В статье предложена методика расчета эффективности инновационной деятельности промышленных предприятий на основе применения системы стандартизированных показателей и определения весовых коэффициентов, отражающих значимость различных учитываемых целей, что позволяет наиболее всесторонне оценить степень воздействия совокупности экономических факторов на инновационную привлекательность предприятия.

Ключевые слова: методика; оценка; методика оценки; эффективность; инновации; инновационная деятельность; показатели; система; промышленные предприятия.

Динамика развития современного промышленного производства определяет постоянную инновационную направленность как решения задач технологии и организации производства, так и задач управления. Российские предприятия ощущают уже сегодня необходимость насыщения новыми технологиями нашей экономики и общества в целом. Все большее количество предприятий оказывается вовлеченными в ужесточающуюся рыночную конкуренцию. В ближайшей и долговременной перспективе максимизация инновационного фактора становится решающим условием устойчивого развития промышленности страны.

Инновации на сегодняшний день – наиболее эффективное средство технологического развития предприятий, обеспечения прочных рыночных позиций, основанных на значительных конкурентных преимуществах. Такие понятия, как «инновация», «инновационная деятельность», «инновационные процессы» и т.д. прочно закрепились в лексиконе специалистов различного уровня. В настоящее время все большее количество предприятий осознают огромную роль инноваций в успешной организации своей деятельности, завоевания новых рынков, усиления конкурентных преимуществ. Предприятия стараются в силу своих возможностей обновлять основные фонды, внедряя новые технологии в производство, выпускать новые виды продукции, расширять перечень предоставляемых услуг, повышая их качество. Государственные органы управления признают важность инновационной деятельности как фактора ускорения экономического роста в России. Эта проблема находится в сфере внимания, как органов законодательной, так и исполнительной власти, которая разрабатывает стратегии инновационного развития всей страны и отдельных ее регионов. Актуальность проблемы инновационного развития отдельных предприятий и экономики в целом подтверждается огромным количеством научных трудов, посвященных этим вопросам.

Система управления инновационной деятельностью предполагает осуществление комплекса целенаправленных действий, обеспечивающих функционирование взаимосвязанных подразделений предприятия (научно-исследовательских, опытно-конструкторских, экономических, производственных и других), которая должна отвечать основным требованиям, представленным в табл. 1 [1].

Рассмотрим предлагаемую методику комплексной оценки эффективности инновационной деятельности промышленных предприятий на основе определения и расчета комплексного показателя – интегрального показателя инновационной деятельности промышленного предприятия.

Для реализации данной методики нами предлагается выполнить следующие действия:

1. Сформировать систему показателей оценки, определяющую основные составляющие инновационной деятельности;
2. Осуществить стандартизацию показателей с последующим их укрупнением;
3. Выявить аналитическую связь между показателями для определения инновационной деятельности предприятия;
4. Оценить инновационную деятельность предприятия, которая включает в себя комплексную оценку, в результате одновременного и согласованного изучения совокупности экономических показателей, отражающих все аспекты инновационной деятельности предприятия и сформировать на этой основе интегральный показатель.

Таблица 1

Основные требования, предъявляемые к системе управления инновационной деятельностью предприятия

Требование	Содержание
Необходимого и достаточного разнообразия	Система управления должна строго соответствовать объекту управления
Внешнего дополнения	Система должна динамично реагировать на изменение состояния управляемого объекта и внешней среды, быстро перестраиваться под влиянием этих изменений
Выбора решений	Предусматривается многовариантный анализ возможных управленческих решений
Обратной связи	Обеспечение единых информационных потоков между участниками инновационной деятельности
Иерархии целей	Общие интересы развития предприятия должны иметь приоритет над частными интересами отдельных подразделений

По нашему мнению, инновационная деятельность определяется составом и уровнем развития его составляющих, их взаимосвязями и способностью работать как единая система реализации нововведений, поэтому для оценки эффективности инновационной деятельности необходимо выявить его составляющие, измерить их, определить взаимосвязь между ними, и, таким образом, получить комплексную оценку эффективности инновационной деятельности предприятия. Сущность системы оценки эффективности инновационной деятельности заключается в создании предпосылок и условий эффективного управления развитием промышленного предприятия. Одним из условий которого является создание информационно-аналитической базы и формирование механизма ее функционирования, а также методических рекомендаций по принятию стратегических инновационно ориентированных управленческих решений.

Основной проблемой оценки эффективности инновационной деятельности предприятия является не только выбор и определение значений системы экономических показателей, но и возможность их использования на практике. Данная система должна давать объективную оценку реального состояния инновационной деятельности исследуемого промышленного предприятия. Кроме того, она должна учитывать отраслевые особенности инновационных процессов, характеристики производственной системы, тип производства; также в системе должны быть показатели, отражающие наличие и качество основных стратегически важных для предприятия ресурсов и показатели прямо или косвенно указывающие на результативность использования имеющихся ресурсов предприятия, задействованных в инновационной деятельности.

С учетом перечисленного, считаем целесообразным проводить оценку эффективности инновационной деятельности в виде расчета наиболее значимых относительных стандартизированных показателей, объективно отражающих инновационную деятельность предприятия. По каждому из показателей необходимо определить критериальное значение, которое

позволяло бы судить о состоянии показателя и принимать конкретные решения в рамках управления инновационной деятельностью на предприятии, другими словами, необходимо параметры измерения преобразовать в параметры управления. Критериальное значение, как база сравнения и оценки, является своего рода точкой отсчета, по отношению к которой можно оценить инновационную деятельность предприятия. С помощью обоснованных критериальных значений можно построить некоторую универсальную модель развития инновационной деятельности хозяйствующего субъекта. В качестве базы для сравнения могут быть использованы средние или пороговые значения показателей по отрасли за предыдущий период, прогнозные значения, значения аналогичных показателей у конкурентов.

Критерием научной обоснованности этих значений на уровне предприятия можно считать эффективную работу предприятия в течение продолжительного периода времени и определенные достигнутые результаты, позволяющие отнести это предприятие к эталонному. В качестве критериев для определения пороговых значений коэффициентов можно использовать данные статистического исследования инновационной деятельности ведущих предприятий промышленности России, Нижегородской области, результаты исследований отечественных ученых, аналитические данные, а также опыт зарубежных компаний.

В системе оценки эффективности инновационной деятельности предприятий предлагаем выделить шесть групп показателей, каждая из которых состоит из системы показателей, представленных на рис. 1. Предложенная система показателей основана на реально определяемых экономических показателях и направлена на исследование и анализ важнейших составляющих инновационной деятельности промышленного предприятия.

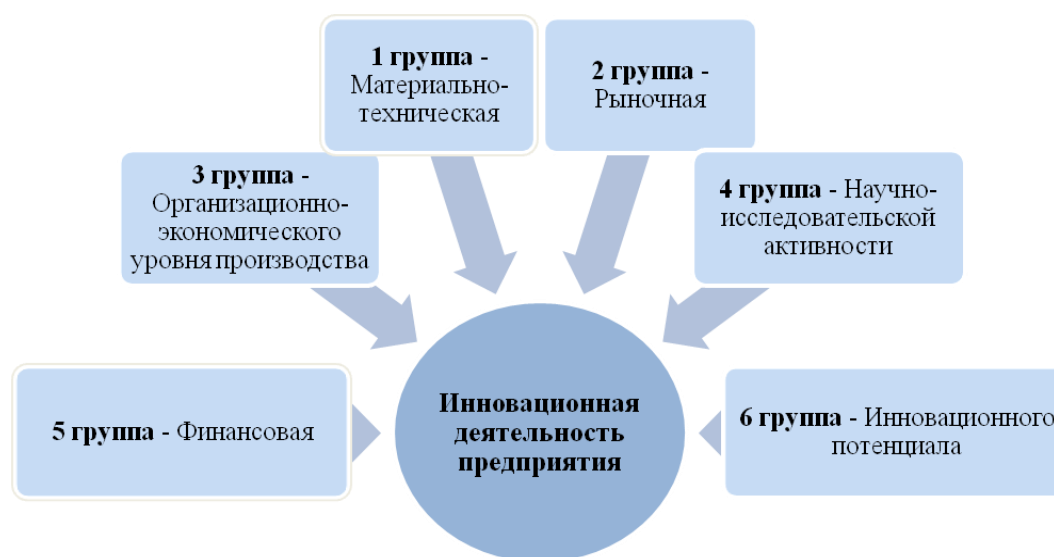


Рис. 1. Общая структура системы показателей оценки эффективности инновационной деятельности

Обозначим составные части каждой из выделенных групп показателей в виде коэффициентов, представленных в табл. 2. Основными источниками информации для расчета указанных показателей являются следующие формы бухгалтерской отчетности: бухгалтерский баланс (форма № 1), отчет о прибылях и убытках (форма № 2), отчет о движении денежных средств (форма № 4), приложение к бухгалтерскому балансу (форма № 5). В расчетах были использованы данные статистического учета и отчетности и форма федерального статистического наблюдения «№ 4-инновация» для анализа организационно-экономического уровня производства предприятия и его научно-исследовательской активности, а также для углубленного исследования отдельных аспектов формирования показателей, отнесенных к рыночной группе. Показатели, выделенные в рыночную группу, определяются по методике, предложенной в работе [4].

Таблица 2

Система показателей оценки эффективности инновационной деятельности предприятия

№ п/п	Наименование группы показателей	Составные элементы соответствующих групп показателей		
		№ п/п	Наименование	Условное обозначение
1	Материально-техническая	1	Эффективность внеоборотного капитала	G ₁₁
		2	Коэффициент модернизации оборудования	G ₁₂
		3	Коэффициент прогрессивности оборудования	G ₁₃
		4	Коэффициент освоения новой техники	G ₁₄
		5	Коэффициент обновления основных средств	G ₁₅
		6	Коэффициент фондовооруженности труда	G ₁₆
2	Рыночная	1	Рентабельность продаж	G ₂₁
		2	Коэффициент объема рынка	G ₂₂
		3	Коэффициент развития рынка	G ₂₃
		4	Коэффициент охвата сегментов рынка	G ₂₄
		5	Коэффициент доли инновационной продукции в общем объеме промышленной продукции	G ₂₅
		6	Коэффициент конкурентоспособности инновационной продукции	G ₂₆
3	Организационно-экономического уровня производства	1	Коэффициент оборотных средств в производстве	G ₃₁
		2	Коэффициент загрузки оборудования	G ₃₂
		3	Коэффициент интенсивного использования оборудования	G ₃₃
4	Научно-исследовательской активности	1	Коэффициент расходов на НИОКР в общих расходах предприятия	G ₄₁
		2	Коэффициент эффективности НИОКР	G ₄₂
		3	Коэффициент занятых исследованиями и разработками в общей численности персонала	G ₄₃
		4	Коэффициент квалификации научных кадров	G ₄₄
5	Финансовая	1	Коэффициент автономии (финансовой независимости)	G ₅₁
		2	Коэффициент обеспеченности оборотными средствами	G ₅₂
		3	Коэффициент текущей ликвидности (покрытия)	G ₅₃
		4	Коэффициент финансовой независимости	G ₅₄
6	Инновационного потенциала	1	Затраты на технологические, маркетинговые и организационные инновации	G ₆₁
		2	Количество реализованных инновационных проектов	G ₆₂
		3	Результаты инновационной деятельности по видам инноваций	G ₆₃
		4	Количество совместных проектов, в которых участвует организация	G ₆₄

В качестве первого этапа оценки инновационной деятельности рассмотрим группу предприятий и рассчитаем среднее значение для всех показателей в каждой группе, которое определяется по формуле (1):

$$\bar{G}_{ij} = \frac{\sum_{m=1}^M G_{ijm}}{M}, \quad (1)$$

где \bar{G}_{ij} - среднее значение j -го показателя в i -й группе;

- G_{ijk} - абсолютное значение j -го показателя по i -й группе;
- i - порядковый номер группы показателей $i=1 \div n$;
- j - порядковый номер показателя в группе $j=1 \div t$;
- m - порядковый номер предприятия $m=1 \div M$.

В связи с различной размерностью исследуемых показателей возникает необходимость привести все показатели к безразмерному виду, к общему началу отсчета, то есть к единому интервалу изменения на основе их стандартизации.

Стандартизованный показатель инновационной деятельности предприятия определяется отношением абсолютного значения показателя к среднему значению этого показателя в рассматриваемой группе предприятий, то есть абсолютные значения показателей заменяются отношениями индивидуальных абсолютных значений к их средним арифметическим по каждому показателю в группе.

Исходя из этого, стандартизация показателей определяется на основе применения следующей формулы:

$$S_{ij} = \frac{G_{ij}}{\bar{G}_{ij}}, \tag{2}$$

- где S_{ij} - стандартизованный j -показатель по i -й группе;
- G_{ij} - абсолютное значение j -го показателя по i -й группе;
- \bar{G}_{ij} - среднее значение j -го показателя по i -й группе.

Преимущество стандартизованного показателя состоит в том, что он является безразмерным и позволяет легко учитывать его в группе других показателей.

В табл. 3 представлена матрица стандартизованных показателей инновационной деятельности промышленных предприятий.

Таблица 3

Стандартизованные показатели инновационной деятельности промышленных предприятий

Стандартизованные показатели ($m = 1 \div M$)				
S_{11}	S_{12}	S_{13}	...	S_{1t}
S_{21}	S_{22}	S_{23}	...	S_{2t}
S_{31}	S_{32}	S_{33}	...	S_{3t}
...	S_{ij}	...
S_{n1}	S_{n2}	S_{n3}	...	S_{nt}

Среднее отношение по любому обоснованному показателю для соответствующего показателя инновационной деятельности предприятия будет характеризовать место данного предприятия в многомерном факторном пространстве. Средняя величина S_{ij} для всех предприятий всегда равна единице.

После замены абсолютных значений показателей, характеризующих инновационную деятельность промышленных предприятий, отношением их к средней с помощью метода укрупнения факторов, вычислим многомерные средние по каждой группе:

1. Показатели материально-технического обеспечения ($G_{11}, G_{12}, G_{13}, G_{14}, G_{15}, G_{16}$) - Sy_1 ;
2. Показатели рыночной группы ($G_{21}, G_{22}, G_{23}, G_{24}, G_{25}, G_{26}$) - Sy_2 ;
3. Показатели организационно-экономического уровня производства (G_{31}, G_{32}, G_{33}) - Sy_3 ;
4. Показатели научно-исследовательской активности ($G_{41}, G_{42}, G_{43}, G_{44}$) - Sy_4 ;
5. Финансовые показатели ($G_{51}, G_{52}, G_{53}, G_{54}$) - Sy_5 ;
6. Показатели инновационного потенциала ($G_{61}, G_{62}, G_{63}, G_{64}$) - Sy_6 .

Для определения укрупненных показателей, необходимо произвести расчет суммы стандартизованных показателей в каждой группе.

Укрупненные показатели рассчитываются по следующей формуле:

$$Sy_{mi} = \sum_{j=1}^t S_{ij}, \quad (3)$$

где Sy_{mi} - укрупненный стандартизованный показатель инновационной деятельности предприятия m по группе показателей i .

Для последующего анализа комплекса факторных признаков, представим укрупненные показатели инновационной деятельности промышленных предприятий в форме табл. 4.

С целью определения итогового стандартизованного результативного комплексного базисного факторного показателя – интегрального показателя инновационной деятельности промышленных предприятий, необходимо выявить закономерности их формирования под влиянием отдельных факторных показателей.

Успешная инновационная деятельность предприятия является результатом эффективного управления по всей совокупности производственной, финансовой деятельности предприятия и оценивается на основе значительного числа показателей, характеризующих материально-техническую, рыночную составляющие, организационно-экономический уровень производства, научно-исследовательскую активность, финансовые результаты деятельности, инновационную составляющую и другие результаты.

Таблица 4

Укрупненные показатели инновационной деятельности промышленных предприятий

№ предприятия	Укрупненные показатели первой группы (материально-технической)	Укрупненные показатели второй группы (рыночной)	Укрупненные показатели третьей группы (организационно-экономического уровня производства)	Укрупненные показатели четвертой группы (научно-исследовательской активности)	Укрупненные показатели пятой группы (финансовой)	Укрупненные показатели шестой группы (инновационного потенциала)
1	Sy_{11}	Sy_{12}	Sy_{13}	Sy_{14}	Sy_{15}	Sy_{16}
2	Sy_{21}	Sy_{22}	Sy_{23}	Sy_{24}	Sy_{25}	Sy_{26}
3	Sy_{31}	Sy_{32}	Sy_{33}	Sy_{34}	Sy_{35}	Sy_{36}
...
M	Sy_{M1}	Sy_{M2}	Sy_{M3}	Sy_{M4}	Sy_{M5}	Sy_{M6}

Для формирования интегрального показателя инновационной деятельности промышленного предприятия, предлагаем определить значимость каждой группы показателей на основе их рейтинговой оценки.

Экспертным путем с участием специалистов Министерства промышленности и инноваций Нижегородской области, Межрегионального фонда содействия инновациям и Нижегородского областного бизнес-инкубатора, были определены значения коэффициентов важности исследуемых показателей по каждой группе, которые представлены в табл. 5. Самой значимой является группа с наименьшим значением коэффициента, а именно – финансово-инновационная группа (рейтинг №1).

На основе коэффициентов важности можно определить весовые коэффициенты K_i для каждой укрупненной группы. Расчет коэффициентов может быть осуществлен различными методами, в том числе с использованием метода Фишера.

Таблица 5

Значения коэффициентов важности в исследуемых группах показателей промышленных предприятий

Первая группа (материально-техническая)	Вторая группа (рыночная)	Третья группа (организационно-экономического уровня производства)	Четвертая группа (научно-исследовательской активности)	Пятая группа (финансовая)	Шестая группа (инновационного потенциала)
4	3	6	5	2	1

В общем виде интегральный показатель инновационной деятельности ($S_{интm}$) может быть рассчитан следующим образом:

$$S_{интm} = \sum_{i=1}^n K_i S_{y_{im}}, \tag{4}$$

где $S_{интm}$ - интегральный показатель оценки эффективности инновационной деятельности по предприятию m .

В табл. 6 представлена матрица укрупненных стандартизированных показателей инновационной деятельности предприятий и соответствующие им интегральные значения показателей оценки инновационной деятельности.

Таблица 6

Расчет интегральных значений показателей инновационной деятельности промышленных предприятий

Номер предприятия	Первая группа		Вторая группа		Третья группа		Четвертая группа		Пятая группа		Шестая группа		Интегральный показатель инновационной деятельности по предприятию ($S_{интm}$)
	$S_{y_{1m}}$	K_1	$S_{y_{2m}}$	K_2	$S_{y_{3m}}$	K_3	$S_{y_{4m}}$	K_4	$S_{y_{5m}}$	K_5	$S_{y_{6m}}$	K_6	
1	$S_{y_{11}}$	K_1	$S_{y_{21}}$	K_2	$S_{y_{31}}$	K_3	$S_{y_{41}}$	K_4	$S_{y_{51}}$	K_5	$S_{y_{61}}$	K_6	$S_{инт1}$
2	$S_{y_{12}}$	K_1	$S_{y_{22}}$	K_2	$S_{y_{32}}$	K_3	$S_{y_{42}}$	K_4	$S_{y_{52}}$	K_5	$S_{y_{62}}$	K_6	$S_{инт2}$
...
M	$S_{y_{1M}}$	K_1	$S_{y_{2M}}$	K_2	$S_{y_{3M}}$	K_3	$S_{y_{4M}}$	K_4	$S_{y_{5M}}$	K_5	$S_{y_{6M}}$	K_6	$S_{интM}$

Наиболее предпочтительным для выбора является наибольшее значение интегрального показателя ($S_{интm}$). Используя указанный показатель, можно определить рейтинг предприятия в анализируемой группе, а также дать предложения по стратегии инновационного развития предприятия.

Предложенная методика комплексной оценки эффективности инновационной деятельности промышленных предприятий позволяет дать рекомендации по его инновационному развитию. Определение на этой основе интегрального показателя эффективности инновационной деятельности позволяет обосновать правильность выбранного направления развития предприятия с позиций его современного состояния и сложившейся системы управления. Разработанный метод можно применять также и для расчета прогноза инновационной деятельности предприятий.

Правительством Российской Федерации создан институт развития инновационного предпринимательства, который включает в себя такие мероприятия стимулирования, как государственная поддержка экспортно-ориентированных предприятий, а также создание в регионах инновационных бизнес-инкубаторов.

В настоящее время, администрация Нижегородской области выделяет инвестиционные

гранты предприятиям на реализацию различных инновационных проектов за счет средств областного бюджета. В связи с чем возникает необходимость выбора наиболее привлекательных предприятий для реализации инвестиционно-инновационных проектов. Следовательно, возможно применение предложенной методики для обоснования предоставления областных грантов.

Использование разработанной методики позволяет производить комплексную оценку эффективности инновационной деятельности предприятий, что повышает эффективность использования всех ресурсов предприятия в реализации инновационной стратегии.

Библиографический список

1. **Балацкий, Е.** Инновационный сектор в промышленности / Е. Балацкий, В. Лапин // Экономист. 2004. № 1. С. 20–33.
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.
3. Многокритериальная оценка экономического состояния и инновационной деятельности промышленных предприятий: учеб. пособие / Ф.Ф. Юрлов [и др.]; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2009. – 192 с.
4. **Трифилова, А.А.** Управление инновационным развитием предприятия / А.А. Трифилова. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 176 с.

*Дата поступления
в редакцию 28.12.2010*

S.N. Yashin, T.M. Kryukova

ESTIMATION INTEGRATED PROCEDURE EFFECTIVENESS INNOVATIVE ACTIVITY PLANT FACILITIES ON BASIS OF FORMING SYSTEM ECONOMIC INDEXES

Exist conventional approach for definition innovation potential economic player, but they don't generally applicable.

In article suggest estimation procedure effectiveness innovation activities industrial undertaking on basis of application standardize system activities and determination weighting coefficient, which reflecting significance different take into account as an object. Which permitting most thoroughly estimate severity of exposure the sum total permanent factors on innovation attractiveness business.

Key words: methodology; appraisal; estimation procedure; effectiveness; innovation; innovative activity; characteristic; system; manufacturing enterprise.

УДК 33.05

Г.А. Морозова

РАЗВИТИЕ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В РЕГИОНЕ

Волго-Вятская академии государственной службы

Статья посвящена актуальным вопросам и проблемам развития промышленности в регионе. Результаты анализа позволяют сделать вывод о том, что состояние развития промышленности для нашего региона является одним из важнейших показателей его благополучия в силу существенной промышленной ориентации экономики. Поэтому применение методов стратегического планирования как наиболее современных и актуальных механизмов содействия развитию для успешной реализации промышленного потенциала Нижегородской области является одной из важнейших задач, стоящих перед руководством региона.

На основе использования маркетинговых стратегий и технологий предлагается инновационный путь развития промышленности в регионе.

Ключевые слова: анализ возможностей производства и сбыта, анализ маркетинговых затрат, анализ плана маркетинга, анализ показателей производственно-сбытовой деятельности, анализ политических факторов, анализ потребителя, анализ сбыта, анализ структуры отрасли.

Как показывает проведенный анализ, роль промышленности в развитии региона, в повышении качества жизни населения является очень высокой.

Промышленность Нижегородской области на протяжении последних лет обеспечивает около трети всех рабочих мест в регионе, в то время как в среднем по России доля занятых в промышленности составляет 21%.

Также важно отметить, что среднемесячная заработная плата работников промышленных предприятий выше, чем средняя по Нижегородской области.

Доходы в обрабатывающей промышленности ниже чуть среднего показателя, а доходы в отрасли добычи полезных ископаемых почти в два раза выше, что является следствием сырьевой ориентации экономики нашей страны. Нижегородская область в отличие от большинства восточных регионов России является не ресурсообеспеченным регионом, а исторически сложившимся промышленным центром.

Что же касается валового регионального продукта – в Нижегородской области доля промышленности в этом показателе составляет около 35%. Темпы роста промышленного производства выше средних по видам экономической деятельности.

При этом в среднем по России доля промышленности в ВВП около 27% в 2007 и около 25% в 2008.

Все эти данные позволяют сделать вывод о том, что состояние развития промышленности для нашего региона является одним из важнейших показателей его благополучия в силу существенной промышленной ориентации экономики. Поэтому применение методов стратегического планирования как наиболее современных и актуальных механизмов содействия развитию для успешной реализации промышленного потенциала Нижегородской области является одной из важнейших задач, стоящих перед руководством региона.

Стратегия развития промышленности, как и любой стратегический план развития вообще, должна содержать следующие элементы:

- четко сформулированные цели и задачи;
- нормативно-правовую базу, касающуюся развития отрасли;
- описание объемов, источников и направлений финансирования;
- основные механизмы реализации;
- субъекты контроля;

Субъектом контроля реализации Стратегии развития промышленности Нижегородской области является Министерство промышленности и инноваций. Основной целью Стратегии является построение инновационного, эффективного, динамично развивающегося промышленного комплекса.

Реализация этой цели является одним из факторов достижения главной цели развития региона в целом – повышения качества жизни населения.

Для реализации Стратегии развития промышленности Нижегородской области необходимо решение ряда задач:

- создание более удобных условий для ведения предпринимательской деятельности в промышленности;
- повышение конкурентоспособности предприятий;
- создание благоприятных условий для привлечения инвестиций;
- содействие повышению производительности труда на предприятиях;
- помощь предприятиям в расширении рынков сбыта;
- создание современной транспортной инфраструктуры;
- совершенствование нормативно-правовой базы;
- подготовка и переподготовка рабочих и управленческих кадров;

Стратегия развития промышленности Нижегородской области не должна противоречить Конституции Российской Федерации, федеральным и региональным законам и другим нормативно-правовым актам.

Сама Стратегия должна быть утверждена в форме Постановления Правительства Нижегородской области. Реализация Стратегии должна проходить на основании и в соответствии с законами, регулирующими:

- основы и принципы государственной промышленной политики;
- основы и принципы государственной поддержки инновационной деятельности в Нижегородской области;
- основы и принципы государственной поддержки инвестиционной деятельности в Нижегородской области;
- политику органов государственной власти региона по формированию кадрового потенциала рабочих и управленческих кадров.

Региональная нормативно-правовая база нуждается в постоянном обновлении, особенно в условиях протекания мирового финансового кризиса, когда увеличивается скорость изменений во внешней и внутренней среде региона.

Также важно отметить, что Стратегия сама по себе в современных условиях очень быстро устаревает. Это очевидно просматривается на примере «Стратегии развития Нижегородской области до 2020 года». Со временем меняются вызовы и угрозы, возможности и перспективы, поэтому любая стратегия нуждается в постоянных корректировках.

Информационное обеспечение промышленной политики осуществляется органами государственной власти региона на основе действующего законодательства, на принципах гласности и открытости для всех субъектов промышленной политики и включает в себя:

- создание и поддержку системы ведения баз данных и реестров различного назначения;
- мониторинг и анализ деятельности предприятий, отраслей промышленности и всей промышленности области в целом;
- анализ текущей ситуации в промышленности на основе статистической информации.

Основными источниками информации для разработки и реализации Стратегии развития промышленности являются:

- данные территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Нижегородской области;
- информация, предоставляемая промышленными предприятиями региона;
- результаты мониторинга, контрольных и проверочных мероприятий профильного министерства.

Одной из основных составляющих деятельности региона по стимулированию промышленного развития является получение и обработка своевременной, точной и полной информации о состоянии промышленного развития региона.

Подготовка руководителей и специалистов для промышленности является одним из приоритетных направлений промышленной политики.

Правительство Нижегородской области должно содействовать развитию инфраструктуры по подготовке кадров для промышленности и координировать разработку и реализацию региональных программ по подготовке руководителей и специалистов для промышленности, программ совершенствования и развития менеджмента на предприятиях промышленности.

Стратегия развития промышленности региона должна предусматривать решение следующих задач:

- организацию взаимодействия рынка труда и рынка образовательных услуг;
- создание механизма повышения мобильности рабочей силы на рынке труда;
- создание механизма повышения эффективности деятельности системы профессионального образования;
- совершенствование нормативно-правового регулирования кадровых процессов.

Для решения этих задач необходимо тесное взаимодействие Министерства промышленности и инноваций с Министерством образования Нижегородской области.

Необходима разработка эффективного механизма управления формированием, сохранением, воспроизводством, развитием кадрового потенциала и обеспечения организаций экономической и социальной сфер Нижегородской области кадрами, удовлетворяющими требованиям работодателей в отношении готовности к профессионально-трудовой деятельности.

Выполнение задачи материального обеспечения Стратегии развития промышленности Нижегородской области лежит на Министерстве финансов, которое при формировании областного бюджета на соответствующие финансовые годы должно предусматривать средства на реализацию этой Стратегии.

В то же время, очевидно, что полноценное финансирование масштабных проектов в промышленности не под силу региональному бюджету. Поэтому вопросы финансирования ускоренного развития промышленности должны решаться, в том числе, и при помощи средств из федерального бюджета.

Третьим, и возможно основным, источником финансирования мероприятий Стратегии должны стать внебюджетные средства, а именно инвестиции.

На сегодняшний день в Нижегородской области существует Инвестиционный совет при губернаторе, который призван активизировать работу по привлечению инвестиций в экономику региона, обеспечить проведение последовательной и скоординированной государственной политики в сфере инвестиционной деятельности в Нижегородской области. В состав Инвестиционного совета при губернаторе Нижегородской области входят руководители структурных подразделений Правительства Нижегородской области, руководители территориальных органов федеральных органов государственной власти, главы крупных муниципальных образований, руководители ведущих предприятий области. Такая форма взаимодействия власти и бизнеса для привлечения инвестиций является эффективной и своевременной.

Объемы финансирования мероприятий Стратегии из различных источников должны ежегодно уточняться при формировании соответствующих бюджетов на очередной финансовый год.

В складывающихся условиях актуализируется вопрос формирования новой системы отношений между учреждениями профессионального образования и организациями, союзами работодателей, органами исполнительной власти и органами местного самоуправления, то есть системы социального партнерства в профессиональном образовании. Учитывая масштаб рассматриваемой проблемы, ее межведомственный характер, представляется целесообразным использовать программно-целевой метод решения.

Необходима разработка эффективного механизма управления формированием, сохра-

нением, воспроизводством, развитием кадрового потенциала и обеспечения организаций промышленности Нижегородской области кадрами, удовлетворяющими требованиям работодателей в отношении готовности к профессионально-трудовой деятельности.

Нижегородская область должна стать одним из наиболее привлекательных в России мест для работы, отдыха и воспитания детей, предоставляющим своим жителям обширные возможности для самореализации и раскрытия творческого потенциала, включая лучшие карьерные возможности для наиболее одаренных, образованных и амбициозных людей.

Необходимо создание условий для удержания на территории области наиболее талантливых и предприимчивых выпускников нижегородских ВУЗов, включая предоставление доступного жилья и создание условий для карьерного роста. Благоприятные условия для жизни повышают конкурентоспособность области, делая ее более привлекательной для квалифицированных кадров.

Повышение уровня производительности труда невозможно без развития системы профессионального образования. В условиях рыночной экономики существует только один регулятор повышения производительности труда – инвестиции в модернизацию существующих производств. При этом следует отметить, что инвесторы в ходе обсуждения возможности реализации проекта на территории какого-либо субъекта рассматривают сложившуюся в нем систему профессионального образования.

Необходима активная государственная поддержка инвестиционных проектов. Среди основных мер поддержки можно выделить:

- снижение ставки по налогу на прибыль в части, подлежащей зачислению в бюджет Нижегородской области;
- освобождение субъекта инвестиционной деятельности от налога на имущество;
- установление решением законодательного органа местного самоуправления ставки налога на землю;
- выдача инвестиционного налогового кредита;
- освобождение от арендной платы за земельные участки;
- поддержка ходатайств и обращений в федеральные органы государственной власти Российской Федерации об оказании содействия инвесторам при реализации инвестиционного проекта;
- распространение позитивной информации об инвесторе;
- развитие общей инфраструктуры бизнеса;
- сопровождение стратегически важных инвестиционных проектов на всех стадиях реализации;
- закрепление куратора из числа сотрудников министерства инвестиционной политики Нижегородской области за стратегически важными инвесторами.

Эти меры могут предоставляться в зависимости от значимости и перспективности того или иного проекта.

Высокие темпы роста промышленности должны обеспечиваться наличием соответствующей энергетической инфраструктуры. Помимо концентрации управленческих усилий, направленных на стратегически приоритетные секторы экономики, большое внимание должно уделяться и развитию энергетики. С одной стороны, необходимо постоянное наращивание мощностей (в том числе за счет строительства АЭС в области), а с другой – снижение энергозатрат на единицу продукции, перевод экономики на энергосберегающий путь развития.

Необходимы проведение технического перевооружения существующих ТЭС, замена устаревшего маломощного оборудования. Строительство новых генерирующих мощностей – более длительный и ресурсоемкий процесс. Наиболее значимым здесь будет проект по строительству парогазовой теплоэлектроцентрали на бывшей площадке атомной станции, что позволит сформировать местные пиковые мощности.

Необходимо создание стабильных условий хозяйствования, в том числе условий налогообложения и ставок налогов в течение финансового года.

Развитие транспортной инфраструктуры, строительство новых и ремонт старых железных и автодорог также являются необходимым условием для успешного развития промышленности Нижегородской области. Для этого необходимо привлечение инвесторов к созданию современных логистических центров, возведение современного терминального комплекса международного уровня, включающего железнодорожный узел, автодорожную инфраструктуру, эффективный таможенно-складской комплекс.

На территории Нижегородской области существуют все необходимые условия для эффективного развития научно-образовательного комплекса, инновационной деятельности и предприятий новой экономики.

Нижегородская область исторически является одним из наиболее развитых научно-промышленных и образовательных центров России, который в период реформ сумел в значительной степени сохранить свой потенциал.

Научно-образовательный комплекс является не только сектором, обеспечивающим значительный вклад в экономику области, но и одним из ключевых факторов конкурентоспособности области, обеспечивая ее квалифицированными трудовыми ресурсами и поддерживая высокий уровень инновационной активности в промышленности. Достигнутый уровень развития науки и технологий позволит существенно усилить конкурентные позиции таких секторов экономики, как информационные технологии, радиоэлектроника и приборостроение, оборонный комплекс, авиа- и судостроение, медицинская и фармацевтическая промышленности. При этом в области возможно создание эффективных механизмов коммерциализации научных исследований.

Нижегородская область обладает давно сложившимся автомобилестроительным потенциалом, здесь есть квалифицированные кадры для развития автопрома, производств автокомпонентов, а также логистики. Это одна из главных причин интереса крупных машиностроительных концернов к региону.

Регион имеет достижениями в сфере IT-технологий. И это тоже одна из перспективных сфер для инвестирования. Нижегородская область интересна таким компаниям, как Intel, Microsoft и т.д.

Область является активным участником международных экономических отношений. Высокая степень интернационализации, интенсивный обмен знаниями, людьми, продуктами и капиталами обеспечивает высокий уровень конкурентоспособности нижегородских предприятий на международных рынках и привлекательность области для внешних и внутренних инвесторов.

Многочисленные примеры из международного опыта подтверждают способность сектора выступать главным катализатором экономического роста территории.

Одним из важнейших для промышленности региона процессов является интернационализация. Наибольшее значение она будет оказывать на развитие автомобилестроения, авиастроения, приборостроения и электроники, пищевой промышленности, а также научно-образовательного комплекса и предприятий новой экономики. Проникновение иностранных игроков на российский рынок и открывающиеся возможности на зарубежных рынках требуют от предприятий привести выпускаемую продукцию и способы ведения бизнеса к международным стандартам.

Интенсивный обмен информацией, знаниями, технологиями и людьми является одним из ключевых факторов успеха предприятий на глобальных рынках. Задачей Стратегии является стимулирование интенсивного обмена лучшей практикой и вовлечение нижегородских предприятий в процессы международной кооперации.

Доступ к потребителям на российском и международных рынках является определяющим фактором для развития ряда приоритетных отраслей. Крупные компании в секторах автомобилестроения, пищевой, химико-фармацевтической промышленности могут решать эту задачу самостоятельно. Небольшие IT компании и высокотехнологичные предприятия новой экономики должны получить помощь администрации в организации национального и глобального маркетинга своих продуктов.

В условиях финансово-экономического кризиса особенно актуально содействие в финансировании посредством субсидирования ставок по кредитам для предприятий приоритетных секторов экономики.

Предпринимательская активность населения и готовность к риску являются важными условиями появления и развития высокотехнологичных предприятий инновационного пояса. Развитие малого предпринимательства позволит обеспечить трудоустройство высвобождающихся работников модернизируемых предприятий и условия для занятости населения в районах, с ограниченными возможностями для привлечения инвестиций.

Скорость модернизации действующих предприятий является наиболее критичным фактором, определяющим потенциал роста экономики региона. От результатов модернизации зависит не только конкурентоспособность региональных предприятий, но и инвестиционная привлекательность всей области. Также следует учитывать, что скорость модернизации существующих предприятий является критичным фактором, компенсирующим влияние демографических рисков, так как стимулирует сокращение избыточного персонала и перераспределение его на новые рабочие места.

В условиях финансово-экономического кризиса особенно актуально содействие в финансировании посредством субсидирования ставок по кредитам для предприятий приоритетных секторов экономики во многом эта задача сегодня уже реализуется.

Предпринимательская активность населения и готовность к риску являются важными условиями появления и развития высокотехнологичных предприятий инновационного пояса. Развитие малого предпринимательства позволит обеспечить трудоустройство высвобождающихся работников модернизируемых предприятий и условия для занятости населения в районах с ограниченными возможностями для привлечения инвестиций.

Скорость модернизации действующих предприятий является наиболее критичным фактором, определяющим потенциал роста экономики региона. От результатов модернизации зависит не только конкурентоспособность региональных предприятий, но и инвестиционная привлекательность всей области. Также следует учитывать, что скорость модернизации существующих предприятий является критичным фактором, компенсирующим влияние демографических рисков, так как стимулирует сокращение избыточного персонала и перераспределение его на новые рабочие места.

Реализация инновационной политики позволит достичь:

- привлечения ресурсов (финансовых, интеллектуальных, человеческих и т.д.) для реализации инновационных проектов;
- создания стартовых условий для малого бизнеса;
- развития инфраструктуры поддержки инновационного бизнеса;
- улучшения бизнес-культуры и повышения инвестиционной привлекательности региона;
- роста предложения новых технологий для потребностей бизнеса;
- повышения возможностей для подготовки квалифицированных специалистов;
- роста авторитета бизнеса;
- кластеризации промышленности региона.

Кластер – форма взаимовыгодного взаимодействия малых, средних и крупных производственных, инжиниринговых, инновационных, образовательных, консалтинговых, торговых, сервисных и других предприятий в рамках одной территории с целью создания добавочной стоимости в результате синергетического эффекта от кооперации, повышения эффективности хозяйствования и увеличения конкурентоспособности этой территории. Кластерная стратегия развития территории – взаимосвязанный комплекс долгосрочных мер государственного стимулирования развития и формирования эффективных кластеров на управляемой территории с целью повышения конкурентоспособности данной территории. Кластерный подход к развитию экономики заключается в оптимальном сочетании на определенной территории перспективных конкурентных преимуществ.

Для Нижегородской области можно выделить следующие перспективные кластеры: автомобильный; предприятий ОПК; нефтехимический; предприятий легкой промышленности; в лесном комплексе; стройиндустрии; переработки сельхозпродуктов; сервисный кластер, представляющий весь комплекс услуг по внедрению энергосберегающих технологий, от аудита энергопотребления, разработки проектов, их внедрения до совершенствования учета и контроля энергопотребления; экологический – разрабатывает, производит и внедряет средства защиты окружающей среды; инновационный.

Основываясь на данных о конкурентоспособных видах товаров на российском рынке и результатах проведенного SWOT-анализа, можно выделить следующие виды производственной деятельности, имеющие наибольший потенциал роста спроса:

- лесное хозяйство и обработка древесины;
- текстильное и швейное производство;
- химическое производство;
- целлюлозно-бумажное производство;
- производство машин и оборудования;
- ресурсосбережение (особенно разработка и внедрение энергосберегающих технологий).

Одним из направлений по достижению перехода к экономике, основанной на знаниях, а не на природных ресурсах, является создание и развитие технических парков по направлениям прикладной науки и наукоемкого производства, ведущих свою деятельность в сопредельных областях науки и техники в рамках единой инфраструктуры, что обусловлено также и стратегическими целями России – развитием страны, усилением ее влияния на мировой арене. Цель создания технопарка – разработка новых прорывных технологий и материалов и интенсификация процесса внедрения их в производство. Создание технопарка – наиболее эффективный путь достижения высокого уровня конкурентоспособности области и России в целом.

*Дата поступления
в редакцию 28.01.2010*

G.A. Morozova

DEVELOPMENT INDUSTRY OF THE REGION

The article in question is devoted to one of the most actual problems- strengthening the competitiveness of the region by using marketing research in order to form the strategic development of the region. The article analyses market instruments. Nowadays the region may involve world resources for its development but in this case it will compete with not only Russian competitors but in many cases with abroad territories. To offer itself to the world it is crucial to define what the region possesses and what it can offer. i.e. to solve a number of problems concerning territorial marketing.

Key word: production and sales analysis; marketing costs analysis; marketing plan analysis; production and sales indicator analysis; political factors analysis; consumer analysis; market analysis; branch analysis

СОЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ, ИННОВАЦИИ В ОБРАЗОВАНИИ, PR-ТЕХНОЛОГИИ

УДК 159.9.072

Е.А. Зайцева, И.А. Савченко

ОРГАНИЗАТОРСКИЕ СПОСОБНОСТИ PR-СПЕЦИАЛИСТА: СТРУКТУРНЫЕ И ГЕНДЕРНЫЕ АСПЕКТЫ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Предлагается анализ результатов опроса, направленного на определение структуры организаторских способностей PR-специалиста. Опрос показал, что эти способности имеют двухуровневую структуру. В ней выделяются базовые (первичные) и специфические (вторичные) свойства. В группу базовых качеств входят волевые, типологические и интеллектуальные свойства личности. К группе специфических свойств относятся психологическая ответственность, коммуникативная компетентность, психологическая проницательность, склонность к организаторской деятельности.

Наличие этих качеств способствует эффективной работе PR-профессионала.

Ключевые слова: PR-технологии, социальная психология, социологический опрос, коммуникация, коммуникативная активность, организационная деятельность.

Профессиональная деятельность специалиста в области коммуникаций предполагает, наряду с решением других задач, выполнение достаточно сложных организационных функций. Эти функции не ограничиваются управленческой работой и распределяются по трем блокам: самоорганизация, организация действий участников коммуникативного взаимодействия, организация всего процесса коммуникации. Для их успешного выполнения работнику необходимы организаторские способности.

Обзор научной литературы по психологическим проблемам организаторской деятельности [1, 2] показывает, что системный анализ и структурирование свойств личности способного организатора только на основе имеющихся теоретических исследований не представляется возможным. Мы пришли к выводу, что определение структуры организаторских способностей пиариста возможно лишь в результате специального научного исследования, основанного на практическом изучении особенностей организаторской работы в системе связей с общественностью.

С целью определения структуры способностей организатора в системе связей с общественностью авторами был проведен специальный опрос специалистов по связям с общественностью коммерческих предприятий и государственных учреждений г. Нижнего Новгорода. При проведении опроса мы исходили из положения, что в структуре организаторских способностей можно выделить три блока свойств: 1) общие; 2) базовые; 3) специфические.

К числу *общих свойств* были отнесены личностные характеристики (высокий уровень правосознания, социальной ответственности, принципиальность, бескорыстие и др.), которые большинство ученых рассматривают в качестве необходимого условия для эффективного выполнения сотрудником его организаторских функций. С нашей же точки зрения, влия-

ние данных качеств на успешность организаторской деятельности достаточно спорно. В ходе опроса предстояло определить, действительно ли они являются компонентом организаторских способностей сотрудника.

В блок *базовых свойств* были включены волевые, типологические и интеллектуальные свойства личности, от которых, по нашему мнению, во многом зависит успешность организаторской деятельности. Мы полагаем, что на их основе формируются наиболее значимые организаторские свойства – *специфические*. К их числу относятся четыре группы качеств: 1) психологическая ответственность, характеризующая умение воздействовать на людей и побуждать их к деятельности, 2) коммуникативная компетентность (способность устанавливать и поддерживать эмоциональные контакты с любыми участниками общения), 4) психологическая проницательность (способность определять психические особенности, мотивы и психические состояния людей); 4) склонность к организаторской деятельности (готовность и желание в нужный момент взять на себя роль лидера, организатора).

В соответствии с таким подходом мы разработали анкету, состоящую из 84 вопросов. Ответы респондентов на эти вопросы давали нам возможность выяснить, насколько высоко они оценивают важность в своей профессионально-организаторской деятельности всех свойств личности, предположительно входящих в структуру организаторских способностей. Каждое свойство в блоках оценивалось тремя отметками: 2 - названное качество является совершенно необходимым для работы в данной профессии, 1 - желательным, 0 - не имеет значения в профессиональной деятельности. Подобный метод оценивания личностных свойств был заимствован из опросного листа О. Липмана [3]. По такой же шкале оценивалось, нужно ли это качество всегда, иногда или никогда, а также возможность его развития и совершенствования с возрастом, в процессе профессионального образования или в ходе профессиональной деятельности.

Респондентами опроса явились специалисты по связям с общественностью г. Н. Новгорода, работающие как в коммерческой, так и в государственной сфере: 100 женщин и 104 мужчины в возрасте от 23 до 44 лет.

На основе данных опроса мы стремились определить структуру организаторских способностей специалиста по связям с общественностью. Опрос был направлен на выявление профессиональной специфики организаторских способностей пиариста и их гендерные особенности.

Результаты опроса и их обсуждение

Первый блок включал 13 общих качеств личности (см. табл. 1).

Таблица 1

Оценка PR-специалистами профессиональной значимости общих личностных свойств

№ п/п	Качества личности	Количество ответов (в %)					
		В данной профессии это качество					
		не имеет значения		желательно		совершенно необходимо	
		М*	Ж*	М	Ж	М	Ж
1	Высокий уровень правосознания, социальной ответственности	0	0	19,2	14	80,8	86
2	Принципиальность	1	3	69,2	86	29,8	19
3	Бескорыстие	72,1	8	20,2	19	7,7	73
4	Честность	69,2	10	21,2	31	9,6	59
5	Гражданское мужество	7,7	9	15,4	20	76,9	71
6	Совестливость	34,6	13	53,8	29	11,6	58
7	Скромность	90,4	5	5,8	35	3,8	60
8	Справедливость	3,8	3	35,6	33	60,6	54
9	Коллективизм	5,8	53	19,2	39	75	8
10	Целеустремленность	5,8	9	31,7	58	62,5	33
11	Обязательность, чувство ответственности за свои поступки	2,9	1	64,4	25	32,7	74
12	Доброжелательность	51	4	26	21	23	75

Примечание.* - М – мужчины, Ж – женщины.

Анализ результатов опроса по первому блоку качеств позволил установить, что основная часть пиаристов-мужчин (70,7%) и женщин (69,3%) оценивает как «совершенно необходимые» в своей профессиональной деятельности те свойства личности, проявление которых характеризует степень серьезности отношения индивида к профессии: высокий уровень правосознания, социальной ответственности, гражданского мужества, справедливости. При этом преобладание мужчин, дающих подобную оценку данным качествам, является очевидным.

Свойства личности, наиболее полно характеризующие ее моральный облик (бескорыстие, честность, скромность, доброжелательность), получают максимально высокую оценку («абсолютно необходимо») у большинства женщин (66,8%) и максимально низкую («не нужно совершенно») - у мужчин (70,7%).

Качества, определяющие степень личной и профессиональной надежности работника (совестливость и обязательность, чувство ответственности за свои поступки), рассматриваются женщинами преимущественно как совершенно необходимые (66%), мужчинами - как желательные (59,1%).

Свойства, характеризующие личность с точки зрения ее приверженности принципу общности, товарищеским началам в труде и общественной жизни (коллективизм, готовность прийти на помощь товарищу по службе), оцениваются мужчинами преимущественно как совершенно необходимые (75%). Женщины рассматривают данные качества как необязательные в их профессиональной деятельности (53%).

Свойства личности, наличие которых свидетельствует о существовании у индивида ясной цели, стремление к ее достижению, а также об определенных проявлениях карьеризма (целеустремленность, желание сделать карьеру), оцениваются основной долей мужчин как «абсолютно необходимые» (62,5%). Женщины же считают эти качества преимущественно желательными в своей профессиональной деятельности (58%).

Определение причин несоответствия оценки мужчинами и женщинами значимости различных общих свойств личности на данный момент может иметь исключительно гипотетический характер. Мы не склонны объяснять неоднозначность некоторых ответов исключительно явлением профессиональной деформации. Тот факт, что женщины, по сравнению с мужчинами, очень высоко оценивают значимость ценностно-нравственных характеристик личности, косвенно связан, вероятно, с общим более зрелым возрастом женщин-респондентов и, возможно, с их более высоким уровнем образования. Высокая оценка, которую дают «целеустремленности» и «коллективизму» мужчины, объясняется, возможно, тем, что большинство мужчин является очень молодыми людьми, наделенными амбициями и ценящими «мужскую дружбу». Мужчины, возможно, являются более «компанейскими», нежели женщины, что также повлияло на характер ответов. Кроме того, существуют, несомненно, глубинно-психологические причины оценивания женщинами и мужчинами тех или иных профессионально значимых свойств личности.

Данные опроса по волевой группе качеств представлены в табл. 2.

Таблица 2

Оценка специалистами по связям с общественностью профессиональной значимости волевых качеств личности

№ п/п	Качества личности	Количество ответов (в %)					
		В данной профессии это качество					
		не имеет значения		желательно		совершенно необходимо	
		М	Ж	М	Ж	М	Ж
1	Настойчивость	0	0	17,3	43	82,7	57
2	Самостоятельность	2,9	6	10,6	51	86,5	53
3	Самообладание	1	0	15,4	41	83,6	59
4	Решительность	2,9	6	7,7	36	89,4	55
5	Планомерность в работе	7,7	3	32,7	16	59,6	81
6	Организованность	3,8	0	43,3	9	52,9	91

Как видно из таблицы, качества, проявление которых в деятельности так или иначе сопряжено с преодолением определенных препятствий (настойчивость, самостоятельность, самообладание и решительность), рассматриваются подавляющим большинством мужчин (85,6%) как совершенно необходимые в их профессиональной деятельности. Женщины тоже признают особую значимость данных волевых характеристик в своей работе. Тем не менее, количество женщин, считающих данные качества обязательными для представителя своей профессии, составляет 56% и значительно уступает количеству мужчин, дающих этим качествам подобную оценку.

Волевые качества личности, характеризующие способность работника организовать собственную деятельность (организованность, планомерность в работе), получают максимально высокую оценку у большинства женщин (86%). Это мнение разделяет основная, но гораздо менее многочисленная, чем у женщин, часть мужчин (56,3%).

По третьему блоку анкеты (типологические свойства нервной системы) подавляющее большинство мужчин (78,4%) и женщин (88%) считает совершенно необходимыми в PR-деятельности наличие таких свойств нервной системы, как сила нервных процессов со стороны возбуждения и торможения, подвижность нервных процессов, нервно-психическая устойчивость (см. табл. 3).

Таблица 3

**Оценка PR-профессионалами профессиональной значимости
типологических свойств нервной системы**

№ п/п	Качества личности	Количество ответов (в %)					
		В данной профессии это качество					
		не имеет значения		желательно		совершенно необходимо	
		М	Ж	М	Ж	М	Ж
1	Сила процессов возбуждения	0	0	14,4	1	85,6	99
2	Сила процессов торможения	2,9	1	37,5	35	59,6	64
3	Нервно-психическая устойчивость	0	0	15,4	4	84,6	96
4	Подвижность нервных процессов	13,5	1	2,9	6	83,6	93

Из таблицы видно, что в целом PR-специалисты, как мужчины, так и женщины, высоко оценивают важность свойств, характеризующих нервную систему человека. Все же женщины оценивают значимость качеств данного блока на порядок о выше, чем мужчины. Данное несоответствие мы объясняем специфическими различиями в коммуникативной работе мужчин и женщин в сфере PR. В целом женщина и мужчина в относительно равной мере подвержены психофизическим перегрузкам и стрессу. Однако в сфере связей с общественностью мужчины изначально обозначают для себя области деятельности, в которых отсутствует элемент монотонности, который часто присутствует в работе многих женщин в системе общественных связей (работа с почтой, составление пресс-релизов и т.п.). Недостаток естественных антистрессовых факторов, которые проявляются, прежде всего, в частой «смене обстановки», является, по-видимому, причиной, по которой женщины более высоко оценивают факторы нервно-психической устойчивости личности.

Анкетные данные по четвертому блоку вопросов (познавательные свойства личности) представлены в табл.4.

Как видно из таблицы, интеллектуальные свойства рассматриваются основной долей мужчин (71,1%) и женщин (73,3%) как совершенно необходимые для осуществления PR-деятельности. В то же время важность различных интеллектуальных свойств для PR-деятельности мужчины и женщины оценивают неодинаково. В то время как основная доля мужчин (77,9%) оценивает как абсолютно необходимые в своей профессии такие качества, как активность, подвижность психических познавательных процессов (восприятия, мышления, внимания), развитую интуицию, находчивость, женщины (68%) дают аналогичную

оценку совсем другим качествам – широкому кругозору, эрудиции; умственной работоспособности, аналитическому складу ума; способности к абстрагированию, рефлексии.

Таблица 4

Оценка PR-специалистами профессиональной значимости познавательных свойств личности

№ п/п	Качества личности	Количество ответов (в %)					
		В данной профессии это качество					
		не имеет значения		желательно		совершенно необходимо	
		М	Ж	М	Ж	М	Ж
1	Широкий кругозор, эрудиция	0	1	69,2	34	30,8	63
2	Гибкое, творческое мышление	1	4	31,7	28	67,3	68
3	Умственная работоспособность	9,6	1	58,7	20	31,7	79
4	Сообразительность	0	3	28,8	33	71,2	64
5	Аналитический склад ума	25	8	54,8	23	20,2	69
6	Прогностические способности	5,8	4	31,7	33	62,5	63
7	Умение выделять главное	2,9	3	28,8	34	68,3	61
8	Активность, подвижность познавательн. процессов (восприятия, мышления, внимания)	2,9	1	25	54	72,1	45
9	Емкая память	0	0	35,6	24	64,4	76
10	Развитое воображение	20,2	24	16,3	27	73,5	61
11	Развитая интуиция	2,9	3	22,1	63	75	34
12	Способность к абстрагированию, рефлексии (самоанализу)	34,6	13	52,9	24	12,5	61
13	Находчивость	0	0	13,5	68	86,5	32
14	Наблюдательность	0	0	9,6	14	90,4	86

Таким образом, в системе связей с общественностью мужчины дают максимально высокую оценку когнитивным характеристикам, обеспечивающим, прежде всего, быстроту, оперативность интеллектуальной деятельности, женщины же наиболее высоко оценивают те познавательные особенности, которые способствуют углубленному и качественному ее осуществлению.

Далее оценивалась значимость специфических организаторских свойств в PR-работе. Группа специфических свойств, объединяющая качества, характеризующие умение воздействовать на людей и побуждать их к деятельности, т.е. психологическую ответственность (способности воздействовать на других энергичностью, логичностью доводов и аргументов, «заражать» и «заряжать» людей своими эмоциями и чувствами, создавать уверенность в успехе дела; требовательность, распорядительность, обоснованность и логичность критических замечаний), определяется основной частью женщин (55,5%) и мужчин (86,1%) как совершенно необходимая в PR-деятельности (см. табл. 5).

Таблица 5

Оценка PR-специалистами профессиональной значимости специфических свойств личности

№ п/п	Качества личности	Ответы (в %)					
		В данной профессии это качество					
		не имеет значения		желательно		совершенно необходимо	
		М	Ж*	М	Ж	М	Ж
1	2	3	4	5	6	7	8
	I. Психологическая ответственность						
1	Способность воздействовать на других убедительностью, логичностью доводов, аргументов	2,9	9	13,5	33	83,6	58
2	Способность «заражать» и «заряжать» людей своими эмоциями и чувствами	4,8	13	9,6	34	85,6	53

Окончание табл. 5

1	2	3	4	5	6	7	8
3	Способность создавать уверенность в успехе дела	3,8	16	4,8	32	91,4	52
4	Требовательность	1	11	9,6	32	89,4	57
5	Распорядительность	3,8	18	13,5	28	82,7	54
6	Обоснованность и логичность критич. замечаний	5,8	5	10,6	36	83,6	59
II. Коммуникативная компетентность							
1	Способность устанавливать и поддерживать эмоциональные контакты с любыми участми общения	3,8	0	11,5	5	84,7	95
2	Умение слушать	1	0	14,4	5	84,6	85
3	Свободное владение вербальными и невербальными средствами общения	2,9	0	11,5	6	85,6	94
4	Умение в конфликтных ситуациях проводить адекватную стратегию коммуникативного поведения	1,9	0	13,5	5	84,6	95
5	Способность к сотрудничеству, достижение компромиссов, соглашений	3,8	1	10,6	16	85,6	83
6	Умение находить правильный тон и общий язык с разными людьми и в разных обстоятельствах	4,8	3	6,7	11	90,4	86
7	Естественность в обращении с людьми, способность всегда оставаться самим собой	2,9	5	14,4	13	82,7	82
8	Чувство юмора	2,9	48	1,9	13	95,2	39
9	Доброжелательность, вежливость по отношению к людям	26	1	52,9	25	21,1	74
III. Психологическая проницательность							
1	Способность быстро уловить психические особенности и состояния, мотивы поведения других людей	1,9	3	12,5	16	85,6	81
2	Способность переживать то же, что и другие люди	15,4	6	7,7	15	76,9	79
3	Склонность к анализу поведения и поступков других людей	5,8	3	15,4	11	78,8	86
4	Способность мысленно поставить себя на место другого (в психологическую ситуацию)	1,9	3	9,6	23	88,5	78
5	Способность распределять обязанности, поручения с учетом индивидуальных особенностей	5,8	13	16,3	11	77,9	75
6	Способность быстро ориентироваться во взаимоотношениях людей	4,8	0	21,2	14	74	86
7	Способность быстро и легко усваивать положительный опыт коллег - руководителей и организаторов	8,7	3	17,3	24	74	73
IV. Склонность к организаторской деятельности							
1	Потребность в организаторской работе	5,8	13	9,6	31	84,6	56
2	Бескорыстное включение в организаторскую деятельность	8,7	19	11,5	33	79,8	51
3	Самостоятельное включение в работу	1,9	14	2,9	28	95,2	58
4	Готовность принять на себя роль организатора, ответственность за дело	0	18	4,8	19	95,2	53
5	Неутомимость в организаторской работе	2,9	16	6,7	28	90,4	56
6	Удовлетворенность (положительное самочувствие) в процессе организаторской деятельности	2,9	18	5,8	23	91,3	59

Как видно из таблицы, важность специфических свойств, характеризующих способность личности устанавливать и поддерживать эмоциональные контакты с любыми участниками общения (данную группу свойств мы называем коммуникативной компетентностью), признается примерно в равной степени как женщинами (88,6%), так и мужчинами (85,5%).

Тем не менее, стоит заметить, что «чувство юмора», которое мы также считаем качеством, способствующим установлению психологического контакта, мужчинами оценивается выше, чем женщинами. Так, необходимым в своей работе это качество считают 95,2% мужчин и только 39% женщин. При этом 48% женщин рассматривают данное свойство как не имеющее значения для выполнения своей профессиональной деятельности. При этом такая

важная характеристика коммуникативной компетентности работника, как «доброжелательность, вежливость по отношению к людям», напротив, получает максимально высокую оценку у женщин (74%) и максимально низкую – у четверти мужчин (26%).

Значимость в профессиональной специфических личностных особенностей, наличие которых у индивида свидетельствует о его способности определять психические особенности, мотивы и психические состояния людей (психологическая проницательность), также оценивается обеими категориями респондентов примерно одинаково: основная часть мужчин (79,4%) и женщин (79,7%) признает абсолютную профессиональную необходимость таких качеств, как способность быстро ориентироваться во взаимоотношениях людей, умение «разбираться в людях», способность переживать то же, что и другие люди, склонность к анализу поведения и поступков других людей, способность мысленно ставить себя на место другого (в психологическую ситуацию), а также способности к распределению обязанностей с учетом индивидуальных особенностей и быстро и легко усвоению положительного опыта коллег.

Специфические качества личности, определяющие ее готовность и желание в нужный момент взять на себя роль лидера, организатора (склонность к организаторской деятельности), получили у мужчин более высокую оценку, нежели у женщин. Так, большинство мужчин (89,4%) считают совершенно необходимыми в своей профессии потребность в организаторской работе, самостоятельное включение в работу, готовность принять на себя ответственность за дело, неутомимость в организаторской работе, удовлетворенность (положительное самочувствие) в процессе организаторской деятельности. Количество женщин, признающих обязательность наличия данных качеств у представителя своей профессии, соответствует 55,5%.

Анализ результатов оценки специфических свойств личности обеими группами респондентов показывает, что женщины в целом намного ниже, чем мужчины, оценивают личностные качества, связанные с осуществлением организационно-управленческих полномочий. Подобный факт может быть истолкован уже упоминаемой причиной: в системе связей с общественностью женщины в отличие от мужчин чаще выполняют работу, связанную не с прямыми коммуникациями и непосредственной организаторской работой с людьми, а написанием пресс-релизов, статей, общением преимущественно по телефону и электронной почте. Однако это предположение не имеет ничего общего с точкой зрения о том, что женщина «генетически» не имеет склонности к организаторской работе и не приспособлена к выполнению организационно-управленческих задач.

Беседы с практическими работниками, а также личные наблюдения во время проведения опроса позволили нам сделать гипотетический вывод, что специфические свойства личности работника PR-сферы, внесенные в пятый блок опросника, и являются главными организаторскими способностями – устойчивыми личностными свойствами, формирующимися в деятельности и обеспечивающими успешность осуществления организаторской работы. Интеллектуальные же, волевые качества и типологические свойства нервной системы являются природной основой для формирования этих способностей.

Полученные в результате опроса данные позволили нам составить гипотетическую схему структуры организаторских способностей PR-специалиста. В данную схему вошли качества, получившие одинаково высокую оценку «совершенно необходимо» как у мужчин, так и у женщин. Некоторые качества были объединены под общим названием в группы. Ряд качеств, обсуждаемых в ходе опроса, не были включены в структуру личности способного организатора. Это было сделано исключительно из нежелания дублировать подобные качества и стремления сделать схему структуры личности организатора по возможности краткой и сжатой.

Общие свойства личности в структуре организаторских способностей в отдельный блок не выделялись по двум причинам: 1) в ходе опроса основные качества данного блока получили противоположные оценки у женщин и мужчин, что не позволяет сделать точных выводов о значимости этих свойств в организаторской деятельности PR-специалиста; 2) беседы с практическими

работниками, а также личные наблюдения приводят к заключению о том, что свойства личности организатора - работника системы коммуникаций - определяют скорее не эффективность организаторской деятельности, а ее направление (положительное или отрицательное).

В то же время мы не склонны недооценивать важность морально-этических и личностных ценностей, которые личность имеет на данном конкретном этапе развития, а также осознание смысла жизни вообще и конкретной деятельности, в частности, уровень организованности жизни, соответствие поведения ценностным и смысловым ориентациям. Эту группу качеств мы называем «ценностно-смысловой организацией личности» и считаем возможным, наравне с волевыми свойствами личности, включить ее в состав отдельного важного блока качеств - *волевой организации личности*. В данный блок свойств мы ввели еще одно новое качество - «организацию деятельности» - способность работника к структурированию, отделению главного от второстепенного в поступках. Это качество, на наш взгляд, интегрирует понятия организованности и планомерности в работе.

Гипотетическая структура личности способного организатора в системе связей с общественностью выглядит следующим образом:

I. Базовые организаторские свойства:

1. *Волевая организация личности* – совокупность личностных свойств, отражающих уровень развития следующих качеств личности: ценностно-смысловой организации личности, уровня организации деятельности, решительности, настойчивости, самообладания, самостоятельности;
2. *Типологические свойства нервной системы* – группа качеств, объединяющая нервно-психическую устойчивость и оптимальный уровень развития нервных процессов (их подвижности и силы со стороны возбуждения и торможения);
3. *Оптимальный уровень интеллектуального развития личности*. Под уровнем интеллектуального развития личности мы подразумеваем степень развития основных когнитивных характеристик человека, значимость которых в PR-деятельности обсуждалась в ходе опроса: эрудиции, гибкого и творческого мышления, памяти, воображения и др.

II. Специфические организаторские свойства:

В данной группе объединены свойства, характеризующие четыре комплексных качества. Так, свойства личности, которые отражают ее способность к воздействию на людей и побуждению их к деятельности, были представлены под общим названием «психологическая возбудимость» (впервые этот термин был использован Л.И. Уманским [4. С. 126]). Качества, наличие которых у индивида свидетельствует о его способности устанавливать и поддерживать эмоциональные контакты с любыми участниками общения, были также интегрированы в одно комплексное свойство личности – «коммуникативную компетентность». Личностные свойства, определяющие способность работника определять психические особенности, мотивы и психические состояния людей, получили общее название «психологическая проницательность». Свойства личности, характеризующие ее готовность и желание в нужный момент взять на себя роль лидера (организатора) были объединены в комплексное качество – «склонность к организаторской деятельности».

Для подтверждения или опровержения соответствия предлагаемой структуры организаторских способностей реальным требованиям практики организаторской работы в PR-сфере мы провели дополнительный опрос специалистов по связям с общественностью, не задействованных в первом опросе. В опросе приняли участие 78 мужчин и 80 женщин в возрасте от 22 до 41 года.

Второй опросник был составлен аналогично первому. Однако в него были включены лишь те группы качеств, которые входят в предложенную нами гипотетическую структуру личности способного организатора в сфере общественных коммуникаций. Все они были распределены по двум блокам: 1) базовые (волевые, типологические и интеллектуальные) свойства; 2) специфические свойства. Оценка свойства личности производилась респондентами так же, как в первом опросе.

Анализ результатов опроса показал, что все качества, включенные в опросник, являются важными профессионально значимыми характеристиками специалистов по связям с общественностью (см. табл. 6). Из таблицы видно, что респондентами были достаточно высоко оценены базовые организаторские качества. Так, высокий уровень волевой организации личности оценивается как абсолютно необходимый 90% женщин и 94,9% мужчин. Типологические особенности нервной системы были также очень высоко оценены обеими категориями респондентов. Оптимальный уровень их развития считают совершенно необходимым в PR-деятельности 89,7% мужчин и 93,7% женщин. Оптимальный уровень развития когнитивных свойств большинство мужчин и женщин также считают абсолютно необходимым (соответственно 83,3% и 87,4%).

Таблица 6

Результаты заключительного опроса PR-специалистов

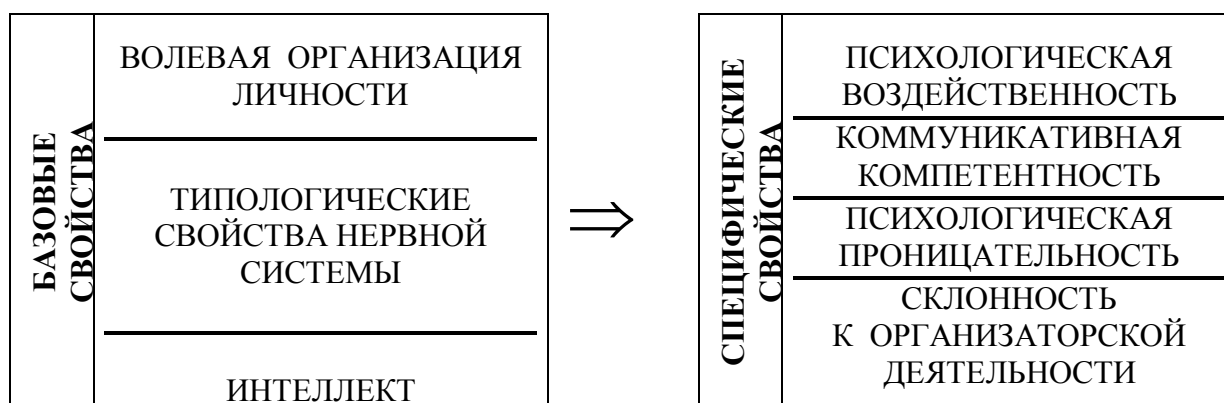
№ п/п	Качества личности	Количество ответов (в %)					
		В данной профессии это качество					
		не имеет значения		желательно		совершенно необходимо	
		О	С	О	С	О	С
I. Базовые свойства							
1	Высокий уровень волевой организации личности	0	0	5,1	10	94,9	90
2	Оптимальный уровень развития типологических свойств нервной системы	2,6	2,5	7,7	3,8	89,7	93,7
3	Оптимальный уровень развития когнитивных свойств	7,7	3,8	9	8,8	83,3	87,4
II. Специфические свойства							
1	Психологическая ответственность	2,6	2,5	5,1	12,5	92,3	85
2	Коммуникативная компетентность	0	1,3	11,5	8,7	88,5	90
3	Психологическая проницательность	1,3	2,5	6,4	7,5	92,3	90
4	Склонность к организаторской деятельности	3,8	8,7	2,6	22,5	93,6	68,8

Очень высокую оценку получили специфические свойства личности работника – психологическая ответственность: мужчины – 92,3%; женщины – 85%, коммуникативная компетентность (соответственно 88,5% и 90%), психологическая проницательность (92,3% и 90%), склонность к организаторской деятельности (93,6% и 68,8%).

Результаты первого и второго опросов позволили определить основные структурные составляющие организаторских способностей личности PR-специалиста. Проведение заключительного опроса подтвердило правильность предложенной нами иерархии компонентов структуры организаторских способностей. Полученные нами данные позволили составить окончательную модель данной структуры (см. табл. 7).

Таблица 7

Структура организаторских способностей специалиста по связям с общественностью
(на основании данных опроса)



Как показано в таблице, предлагаемая модель структуры организаторских способностей включает два блока личностных свойств: 1) базовые; 2) специфические. К базовым свойствам относятся: волевая организация личности, типологические свойства нервной системы (нервно-психическая устойчивость, подвижность нервных процессов и их сила со стороны возбуждения и торможения), интеллект. В блок специфических свойств входят психологическая ответственность, коммуникативная компетентность, психологическая проницательность, склонность к организаторской деятельности. Согласно нашей гипотезе, специфические свойства формируются на основе базовых в ходе практической PR-работы.

Библиографический список

1. **Bass, В.М.** Leadership, psychology and organization behavior / В. М. Bass. - N.-Y.: Free Press, 2004. – 361 p.
2. **Handy, С.В.** Understanding organizations / С.В. Handy. - Wash.: Harmondsworth, 2006. – 411 p.
3. **Липман, О.** Опросный лист для характеристики профессий и специальностей / О. Липман. – М.: Детгиз, 1928. – 29 с.
4. **Мангутов, И.С.** Организатор и организаторская деятельность / И.С. Мангутов, Л.И. Уманский. – Л.: Прогресс, 1975. – 523 с.

*Дата поступления
в редакцию 28.01.2010*

Е.А. Zayseva, I.A. Savchenko

ORGANIZING ABILITIES PR-SPECIALIST: STRUCTURAL AND GENDER ASPECTS

The article presents psychological empiric analysis was spent by authors according to the purpose of PR-specialist organizational abilities structure investigation.

The result is the discovering of two structure levels of PR-specialist organizational abilities. They are: basic (primary) level and specific (secondary) level. Basic features of person are spiritual, typological and intellectual ones. Specific features of person are psychological activeness, communicative competence, psychological cleverness, organization abilities.

Key words: PR-technology, social psychology, sociological questioning, communication, communicational rationality, organizational activity.

УДК 001.895:334.72

Н.А. Агеева, О.В. Антипина

**СОЦИАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ
МУНИЦИПАЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ**

Иркутский государственный технический университет

Определяется значимость инноваций как неотъемлемого элемента современного государства. Рассмотрены технологические и социальные инновации, их особенности, взаимосвязь. Проанализирована специфика инновационного процесса и инновационной деятельности применительно к конкретной территории, в качестве которой выбрано муниципальное образование как первоначальное звено жизнедеятельности каждого гражданина страны.

Рассмотрены некоторые вопросы, касающиеся инвестирования инновационной деятельности. Содержит анализ типологий регионов и муниципальных образований, используемых для задач инновационного и инвестиционного развития. Исследована методика оценки инвестиционного климата муниципального образования с учетом инновационной составляющей. Проведено ранжирование крупных городов Иркутской области по интегральному показателю инвестиционной привлекательности. Изложены некоторые аспекты управления инвестиционно-инновационным развитием муниципального образования.

Ключевые слова: технологические инновации, социальные инновации, муниципальные образования, типология муниципальных образований, инвестиционный климат.

Современный этап развития мирового сообщества характеризуется коренными изменениями в технологическом укладе производства, что оказывает существенное влияние как на экономический потенциал, так и на социально-экономические отношения. Изменения во всех сферах хозяйственной деятельности и жизни человека неразрывно связаны с нововведениями, которые следует рассматривать в виде цели, процесса и результата.

По утверждению многих исследователей, определяющей чертой современной экономики является ведущая роль инноваций, что и позволяет употреблять термин «инновационная экономика», т.е. экономика, в которой господствует инновационный принцип хозяйствования, суть которого состоит в том, что главным источником различных нововведений начинают выступать наука и образование.

В сфере экономических и общественных отношений концептуальные основы инноваций были рассмотрены в работах как зарубежных исследователей Й. Шумпетера, Г. Менша, С. Кузнеца, П. Сорокина, так и отечественных специалистов, в частности, в работах Н. Кондратьева, Ю. Яковца, А.И. Анчишкина, С.Ю. Глазьева, Д.С. Львова, А.И. Пригожина и др.

На сегодняшний день понятие *инновация* применяется ко всем новшествам в производственной, организационной, финансовой, научно-исследовательской и других сферах. При этом в научной литературе насчитывается более сотни определений понятия инновации, но нет ни одного достаточно четкого. Под инновацией мы понимаем использование результатов научных исследований и разработок, направленных на совершенствование производственных, экономических, социальных отношений в различных областях жизнедеятельности общества.

Важное значение для уяснения содержания инновации имеет их классификация. При этом типологию инноваций можно строить по разным основаниям. Одно и то же нововведение может оказаться в разных типологических группах, в зависимости от того, какой именно его признак будет в каждом случае принят во внимание. Поэтому в научной литературе наблюдается разнообразие классификаций инноваций, которое зависит от ряда критериев. Мы подразделяем инновации на две основные группы: технологические и социальные инновации.

Большинство исследователей уделяют внимание технологическим инновациям, являющимся прямой характеристикой интенсивного типа развития производства. К ним относят все изменения, затрагивающие средства, методы, технологии производства, определяющие научно-технический прогресс. Именно этот вид инноваций нацелен на создание новых или усовершенствованных продуктов, выпуск которых невозможен при использовании устаревшего оборудования или обычно применяемых методов организации производства.

Социальные инновации представляют собой процесс реализации мероприятий, направленных на изменение взаимоотношений в различных социальных группах, изменение экономических, экологических, культурных, образовательных и организационных аспектов. Социальные инновации нацелены на гармоничное, сбалансированное развитие человека и общества в целом; улучшение качества услуг социальной сферы за счет более полного соответствия меняющимся требованиям общества; снижение социальной дифференциации путем увеличения доступности оказываемых услуг и т.п.

Важно подчеркнуть, что технологические и социальные инновации взаимосвязаны. При этом каждое нововведение необходимо рассматривать как комплексное, поскольку не бывает «чисто» технологических или социальных нововведений, каждое из них имеет свои аспекты и последствия.

Инновации разрабатываются и осуществляются на конкретных территориях: будь – то регион или муниципальное образование. Любое управленческое решение или новый способ организации производства предназначен именно для конкретной территории и разработан с учетом её специфики. А значит, данные инновации являются пространственно ограниченными рамками определенных объектов. В связи с этим мы считаем необходимым рассматривать особенности инновационного процесса и инновационной деятельности применительно к конкретным территориям. В рамках нашего исследования такой территориальной единицей выбрано муниципальное образование как первоначальное звено жизнедеятельности каждого гражданина страны.

Анализируя исследования современных авторов, можно сделать вывод о том, что в их работах инновационное развитие рассматривается лишь относительно территорий, обладающих высоким научным, научно-техническим, образовательным и производственным потенциалом и расположенных преимущественно в западных регионах страны. По нашему мнению, такой ограниченный подход к осуществлению инновационной деятельности в современных условиях, особенно в условиях перехода РФ на инновационный путь развития, недостаточен.

Производство инноваций, прежде всего, технического характера, безусловно, происходит на подготовленных территориях, где имеются соответствующие условия для данного вида деятельности. Но это не должно стать причиной для исключения большей части территорий из инновационного процесса. Каждую отдельную территорию необходимо включать в процесс перехода страны к экономике нового типа. При этом территорию следует рассматривать как совокупность муниципальных образований и уже на основе анализа их инновационных и инвестиционных возможностей строить концепцию инновационного развития территорий.

В инновационном развитии территорий особое внимание должно быть уделено социальным инновациям. По нашему мнению, именно они формируют инновационную среду территорий, которая способствует научно-техническим, технологическим и информационным нововведениям, обеспечивают их ускорение, повышение эффективности использования новой техники и технологий и это, в конечном итоге, способствует формированию нового качества жизни населения.

Принятие Федерального закона «Об общих принципах организации местного самоуправления в РФ» № 131 - ФЗ предполагает введение ряда существенных социальных нововведений, которые применительно к муниципальным образованиям мы классифицируем как экономические, организационные и управленческие инновации.

Экономические инновации муниципальных образований включают новые механизмы формирования доходов муниципальных образований; новую систему межбюджетных отношений.

Организационные инновации муниципальных образований связаны с созданием новых форм территориальной организации местного самоуправления, участием населения в осуществлении местного самоуправления; новым порядком формирования органов местного самоуправления, взаимодействием органов местного самоуправления разных уровней и органов государственной власти.

Управленческие нововведения предполагают целенаправленное изменение принципов управления с целью ускорения, облегчения или улучшения выполнения поставленных задач. Они направлены на повышение эффективности функционирования системы управления.

Развитие инновационной деятельности территорий невозможно без достаточного использования капитальных, финансовых, интеллектуальных, трудовых, материальных ресурсов. В связи с этим особое место в разработке стратегии перехода муниципальных образований на инновационное развитие принадлежит формированию системы эффективного инновационного инвестирования.

Привлечение инвестиций в инновационную сферу территорий и умение эффективно инвестировать бюджетные средства для поддержания и развития этих территорий является на сегодняшний день одной из наиболее актуальных проблем.

В современных российских условиях наиболее типичными представителями территорий высокой концентрации науки и наукоемкого производства можно считать территории научно-технического развития, территории инновационного развития, территории комплексного развития по инновационному пути и территории традиционного развития экономики. Данная классификация характерна для субъектов РФ и крупных муниципальных образований, расположенных в западных регионах страны. Считая такой подход ограниченным, мы полагаем, что инновационное развитие возможно для любой территории, но с учетом особенностей их инновационного и инвестиционного развития. Эти особенности можно учесть посредством разработки типологии муниципальных образований.

Различные типы регионов и муниципальных образований в силу сложившихся историко-географических, этнокультурных, социально-экономических особенностей своего развития имеют различную восприимчивость к инновациям, обладают различными конкурентными преимуществами, инвестиционными возможностями, и как следствие, существенно отличающимися целями и стратегиями развития, разными типами экономической политики, выбором приоритетов развития.

Существует ряд типологий территорий, используемых для задач инновационного развития и воспроизводства, управления инновационным развитием. Может быть предложен ряд подходов к построению такой типологии – на основе инновационных социологических качественных оценок, на основе оценок инвестиционной активности и рейтинга, на основе инновационных рейтингов по типу инвестиционных рейтингов (по экспертным комплексным характеристикам инновационного климата, потенциала), на основе инновационных количественных показателей (инновационной активности, насыщенности и т.п.).

Прежде всего, рассмотрим типологии регионов, построенные с учетом инновационной составляющей. В качестве базовой типологии, по мнению некоторых исследователей [2, С. 31], может быть принята укрупненная классификация на основе инновационных социологических качественных оценок. В соответствии с данной типологией выделяют *регионы – генераторы инноваций*, осуществляющие миссию активного экспортера продукции и услуг высокой технологии; *регионы – преобразователи и распространители инноваций* действуют по стратегии обеспечения других регионов наукоемкой продукцией; *регионы – потребители инноваций* адаптируют инновации к потребностям региона, занимаются развитием предприятий своего региона.

В ряде случаев употребляемой, но менее информативной, является типология по уровню наукоемкости территорий. Выделяют территории с *высоким, средним* (когда вклад по-

тенциала в валовый региональный продукт не является существенным и имеются лишь отдельные элементы региональной инновационной системы) и *низким* уровнем наукоемкости (когда имеются отдельные элементы региональной инновационной системы и проводится несистемная инновационная деятельность).

Кроме того, в российской практике широко известна методика оценки инновационного потенциала регионов национального рейтингового агентства «Эксперт РА». Это агентство проводит ежегодное исследование рейтинга инновационного потенциала российских регионов в рамках оценки инвестиционного потенциала субъектов РФ. Однако такая оценка не может дать полной картины инновационного развития, поскольку охватывает ограниченный круг показателей, входящих в состав инновационного потенциала.

По аналогии с классификацией регионов существует классификация муниципальных образований. Так, например, выделяют города – генераторы инноваций, выполняющие задачу приращения научного потенциала и разработки новшеств. Города – трансляторы – преобразователи инноваций, осуществляющие адаптацию инноваций к формам, доступным для массового использования, апробации. Города – адсорбенты инноваций. Данный тип городов характеризуется ориентированностью на широкое использование адаптированных инноваций и превращением их в элемент образа жизни населения.

Существует достаточное количество классификаций и с учетом инвестиционных особенностей развития территорий. Ведущие позиции по оценке инвестиционного климата в регионах России занимает рейтинговое агентство «Эксперт РА». Им в ходе оценки составляющих инвестиционного климата – инвестиционного риска и потенциала – используется около двух сотен исходных количественных и качественных характеристик. В соответствии с данной классификацией регионы подразделяются на 12 групп: максимальный потенциал – минимальный риск; высокий потенциал – умеренный риск и т.п.

При классификации муниципальных образований по уровню инвестиционного развития, по нашему мнению, может быть положена *методика оценки инвестиционного климата муниципального образования*.

Для определения уровня (индекса) инвестиционного климата территории выделяются наиболее важные факторы на момент определения данного показателя. Высокий индекс инвестиционного климата получает территория, имеющая стабильную политическую, законодательную, природоохранную ситуацию, высокий уровень экономических, инфраструктурных, демографических, природно-климатических показателей в сочетании с ресурсной обеспеченностью.

Метод предполагает выведение балльных оценок муниципального образования по значениям каждого из показателей, характеризующих различные аспекты инвестиционной привлекательности территории.

Для получения балльных оценок строится шкала диапазонов реальных значений по каждому из показателей всех муниципальных образований. Диапазоны определяются исходя из минимальных и максимальных значений данного показателя. Диапазоны разбиваются на десять равных интервалов, где каждый интервал соответствует определенному количеству баллов, равному номеру интервала (от первого до десятого). Сумма балльных оценок по всем показателям данного муниципального образования, выведенная в соответствии с 10-балльной градуировочной шкалой, и составляет его интегральный показатель инвестиционной привлекательности.

В итоге, в соответствии с данной методикой, можно дать характеристику муниципальному образованию по различным видам инвестиционного потенциала (трудового, экономического, демографического и т.п.), выявив слабые и сильные стороны территорий.

Так, на примере крупных городов Иркутской области (Иркутска, Ангарска, Братска, Усть-Илимска, Усоля-Сибирского) была проведена оценка инвестиционного климата и подсчитана сумма баллов показателей, характеризующих виды инвестиционного потенциала и инвестиционного риска. Результаты подсчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Суммы баллов показателей, характеризующих виды инвестиционного потенциала и инвестиционного риска городов Иркутской области (2009 г.)

	Иркутск	Ангарск	Братск	Усть-Илимск	Усолье-Сибирское
Демографический потенциал	3	-4	1	1	-18
Экономический потенциал	49	10	21	25	6
Трудовой потенциал	12	10	5	12	13
Финансовый потенциал	11	23	21	12	3
Экономический риск	-3	-1	-1	-3	-1
Финансовый риск	1	-8	8	4	-1
Экологический риск	-2	-18	-16	-17	-15

Затем мы провели ранжирование городов области по интегральному показателю инвестиционной привлекательности, результаты которого представлены в табл. 2.

Таблица 2

Ранжирование городов Иркутской области по интегральному показателю инвестиционной привлекательности

Рейтинг по интегральному показателю инвестиционной привлекательности	Город	Интегральный показатель инвестиционной привлекательности
1	Иркутск	71
2	Братск	39
3	Усть-Илимск	34
4	Ангарск	12
5	Усолье-Сибирское	-22

По результатам оценки компонентов инвестиционного климата территорий мы видим, что, например, г. Иркутск занимает лидирующие позиции по таким видам инвестиционного потенциала, как демографический, трудовой, экономический; г. Ангарск, г. Братск – по финансовому потенциалу. В то же время практически все исследуемые города имеют высокий уровень экологического риска.

В целом анализ компонентов инвестиционного климата муниципального образования позволяет выявить сильные и слабые стороны территории, определить её возможности и угрозы. Так, например, высокий уровень трудового и экономического потенциала позволяет существующим предприятиям традиционных отраслей осуществить скачок в инновационно-инвестиционном развитии за счет внедрения новых технологий или новых способов производства, новых методов управления. Финансовый потенциал свидетельствует о наличии прибыльных предприятий, которые могут стать источником инвестирования перспективных, в том числе и инновационных проектов территорий. При разработке программ развития территорий с низким демографическим и трудовым потенциалом максимальное внимание должно быть уделено мероприятиям, направленным на их повышение, поскольку именно демографические и трудовые ресурсы являются основой для других видов потенциала.

При рассмотрении вопросов инвестирования инновационной деятельности в данной методике необходимо особое внимание уделять оценке инновационного потенциала территорий. Результатом комплексной оценки должна стать разработка инвестиционно-инновационной стратегии муниципалитета, направленной на более полную реализацию имеющихся возможностей территории, в то же время способствующей улучшению отдельных компонентов инвестиционного климата. Это в свою очередь позволит выбрать модель

управления инвестиционной и инновационной деятельностью, учитывающую специфику каждой территории.

В решении крупных социально-экономических управленческих проблем часто опираются на два основных подхода, на две традиции, идущие еще от Ф. Тейлора и Э. Мэйо в классическом менеджменте. *Первый* – это программно-целевой; предполагает постановку задачи, поиск решений, оценку альтернатив, выбор оптимального пути, формирование программ и обеспечение ее инфраструктуры (руководящих органов и институтов, системы сбора и анализа информации, обратных связей и контроля). В управлении на муниципальном уровне преимущественно применяется именно этот подход.

Второй подход вытекает из того факта, что имеются «пределы управления», то есть пределы силового воздействия на поведение подсистем управляемого объекта. В рамках этого подхода предполагается, что изменение нежелательного, «неправильного» поведения элементов управляемой системы или объекта управления в целом должно происходить «мягко», не по внешнему принуждению, а по внутреннему призыву. Его сильной стороной является опора на механизмы самоуправления, авторегулирования; акцент перемещается на способность объекта управления к собственному развитию, а управление понимается как воздействие на этот процесс в желательном отношении (скорость, направление, радикальность).

Управление инвестиционно-инновационным развитием муниципалитета должно основываться, по нашему мнению, именно на втором подходе, поскольку основным фактором, препятствующим инновационному развитию территорий, является незаинтересованность органов местного самоуправления в использовании инноваций.

Таким образом, инновационное решение вопросов развития муниципального образования в современный период становится важнейшим условием преодоления социальных проблем.

Библиографический список

1. **Глазырин, М.В.** Инновационный социально-производственный комплекс на уровне муниципального образования / М.В. Глазырин. – М.: Изд-во «Наука», 2007. – 307 с.
2. **Гусаков, М.А.** Инновационное направление развития регионов / М.А. Гусаков, Е.М. Рогова, Д.В. Проскура // Экономика и управление. 2008. № 1 (33). С. 27-31.
3. Инновационный тип развития экономики России: учеб. пособие. – М.: Изд-во РАГС, 2005. – 184 с.
4. **Колчина, О.** Разработка методики оценки инвестиционного климата муниципального образования // Муниципальная власть. 2006. № 3. С. 35.

*Дата поступления
в редакцию 28.01.2010*

N.A. Ageeva, O.V. Antipina

SOCIAL ASPECTS OF MUNICIPAL ORGANIZATIONS INNOVATIONAL DEVELOPMENT

The importance of innovations is defined in this article as the necessary element of modern state. Technological and social innovations and its connections are also considered here. The specificity of innovational activity within regional territory is analyzed. Municipal entertainment is considered to be the primary element of every citizen life.

Some questions connected with innovational activity investing are discovered. The analysis of region and municipal entertainments typology is used for the dissolving of innovational tasks. The estimating investing climate methodology is investigated by means of innovational component. The ranging of Irkutsk region centers investing attractiveness is made. Some aspects of investing innovational development steering are described.

Key words: technological innovations, social innovations, municipal entertainments, municipal entertainments typology, investing climate.

УДК 796.011

А.А. Ахматгатин

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ПРОФЕССИОНАЛЬНО-ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ КУЛЬТУРЫ
КУРСАНТА ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ МВД РОССИИ**

Восточносибирский институт МВД России

Анализируются тенденции развития физической культуры в системе высшего профессионального образования и современного состояния системы физической подготовки курсантов образовательных учреждений МВД России.

Делается вывод, что современная система физической подготовки в указанных образовательных учреждениях не обеспечивает полноценного решения задач, отвечающих за подготовленность выпускников к эффективной профессиональной деятельности и дальнейшей успешной жизни. Поэтому, на сегодняшний день назрела острая необходимость в концептуальных изменениях, предусматривающих смену подхода к системе физической подготовки курсантов образовательных учреждений МВД России. Совершенствование данной системы заключается в переходе от концепции «физической подготовки» к концепции «формирования профессионально-прикладной физической культуры».

Ключевые слова: образование, образовательная система, физическая культура, профессиональная деятельность.

Физическая культура в системе высшего профессионального образования

Культура общества и образование – явления, тесно взаимосвязанные и взаимообусловленные. Взаимосвязь их состоит в том, что культура общества определяет содержание образования его субъектов, которое, в свою очередь, воздействуя на них посредством накопления информации, характерной для различных отраслей знаний, развития интеллекта и формирования соответствующего мировоззрения, делает их носителями культуры более высокого порядка, и обуславливает выход культуры общества на новый более высокий уровень. Данные явления обеспечивают поступательное развитие культуры общества и образования, при этом развитие одного из этих компонентов стимулирует развитие второго.

В настоящее время наблюдаются глобальные изменения, происходящие в мировой культуре. Эти изменения являются следствием технического прогресса и заключаются в переходе от этапа индустриальной культуры к новому этапу культуры постиндустриальной, характеризующейся следующими основными признаками: доминирующим субъектом культуры – человеком с автономно-гуманистическим типом сознания; формой социальной организации – гражданским обществом; супердинамичным характером коммуникаций; доминирующим электронным социокодом; креативной моделью образования и др. [7].

Данные изменения, отражаясь в системе образования, привели к смене образовательной парадигмы, обусловленной переходом от репродуктивно-педагогической цивилизации к цивилизации креативно-педагогической [24].

Изменения, произошедшие в системе образования, привели к значительному повышению требований, предъявляемых к выпускникам вузов. От современного высшего учебного заведения требуется внедрение новых подходов к обучению, обеспечивающих наряду с его фундаментальностью и соблюдением требований Государственных образовательных стандартов развитие коммуникативных, творческих и профессиональных компетенций обучающихся, их потребностей в самообразовании [12].

На сегодняшний день перед вузами стоит задача, заключающаяся не только в подготов-

ке специалиста, обладающего комплексом необходимых ему знаний, умений и навыков, способного успешно выполнять свои профессиональные функции, но и в формировании творческой личности, способной самостоятельно совершенствовать свое профессиональное мастерство и, что не менее важно, имеющей устойчивую мотивацию на его совершенствование.

Одним из важных компонентов культуры общества и одновременно составляющих образования его субъектов является физическая культура общества и личности [9; 24 и др.].

Поэтому изменения, происходящие в культуре и образовании, непременно обуславливают необходимость изменений в сфере физической культуры.

При этом теория физического воспитания, длительное время выполнявшая функцию отрасли знаний обеспечивающей физическое совершенствование человека, соответствовавшая периоду индустриальной культуры, развивалась и дополнялась научными идеями. На определенном этапе она трансформировалась в теорию воспитания физической культуры, новую концепцию, основанную на радикальных переменах в жизни общества и соответствующую этапу постиндустриальной культуры [7; 32 и др.].

Исходя из концептуальных положений новой теории, целью физической культуры студентов является формирование (или воспитание) физической культуры личности [1; 8; 25; 32 и др.].

При этом В.К. Бальсевич выделил две основные группы физкультурных ценностей: общественную и личную. К общественной группе ценностей он отнес общий уровень знаний о средствах и методах физического совершенствования человека; общий научно-технический потенциал физической культуры, составляющий ее интеллектуальную основу, включающую в себя обширный комплекс специализированных знаний о физической активности человека, о правилах, методах и условиях реализации их при воспитании человека; накопленный обществом опыт физического воспитания и физической подготовки молодежи; опыт организации физической активности; общественное мнение, уровень престижности физической культуры и структуру факторов, определяющих ее популярность в обществе; уровень активности общества в сфере физической культуры. Физическая культура личности отдельного человека рассматривается им, как совокупность трех составляющих: знания (образованность в области физической культуры), двигательные достижения (уровень развития физических качеств, двигательные умения и навыки) и мотивация двигательной активности [2].

Таким образом, в сфере физического совершенствования студента произошла смена целеполагания с ориентации на исключительно двигательное развитие обучаемого, заключающееся в совершенствовании уровня его физических кондиций, формировании двигательных умений и навыков, к установке на одновременное воспитание интеллектуального, мотивационного и двигательного компонентов.

В основе нового подхода лежит направленность не столько на подготовку выпускника, обладающего необходимым уровнем физических кондиций и владеющего достаточным фондом двигательных умений и навыков, сколько на формирование личности, обладающей необходимыми знаниями и умениями, позволяющими ей физически совершенствоваться и мотивированной на физическое совершенствование и поддержание здорового образа и стиля жизни.

Физическая культура в образовательном учреждении кроме всего прочего выполняет прикладную функцию, заключающуюся в подготовке студента к эффективной профессиональной деятельности. Поэтому, вопросам профессионально-прикладной физической подготовки студентов посвящено большое количество научных исследований [20; 26; 28; 30 и др.].

В свете новой теории специалистами предлагается заменить программы профессионально-прикладной физической подготовки на более емкие программы профессионально-прикладной физической культуры, имеющие расширенное культурно-образовательное и жизненно-прикладное значение [20].

При этом под профессионально-прикладной физической культурой понимается « ... - вид культуры, слагаемая культуры труда и физической культуры в целом, специфика кото-

рой заключается в содействии формированию и обеспечении условий функционирования двигательного компонента профессиональной деятельности, а более широкое воздействие – в использовании разнообразных факторов и эффектов применительно к другим компонентам и элементам, на других направлениях оптимизации профессионального труда и его последствий для человека» [28. С. 13].

Индивидуальная профессионально-прикладная физическая культура является частью физической культуры личности [26].

Физическая культура в образовательных учреждениях МВД России

В образовательных учреждениях МВД России для решения задач неспециального физкультурного образования учебными планами по всем реализуемым в них специальностям предусмотрена дисциплина «физическая подготовка».

Под физической подготовкой в общем смысле понимается процесс воспитания физических качеств и овладения жизненно-важными движениями, имеющий прикладную направленность к трудовой, военной или иной деятельности [21].

Само название дисциплины в данных образовательных учреждениях указывает на ее большую прикладную направленность, что связано с очень высокими требованиями, предъявляемыми к физической работоспособности выпускников условиями профессиональной деятельности. То есть – это процесс физического воспитания, ориентированный на реализацию практических нужд общества и государства, включающих в себя защиту его целостности и безопасности, обеспечение общественного порядка и законности.

Вопросы физической подготовки курсантов образовательных учреждений МВД России рассматривались многими специалистами [3; 10; 11; 13; 14; 15; 19; 22; 23; 31; 33; 34 и др.].

В ходе проведенных исследований выявлен ряд свойственных ее организации и содержанию проблем и недостатков.

Так, в настоящее время проблема гибели и ранения сотрудников милиции по причине недостаточной подготовленности к силовому единоборству с противником остается весьма актуальной. По данным статистики, в год при исполнении служебных обязанностей погибают порядка 400 сотрудников и более 1000 получают ранения [3; 29].

Специалистами отмечается устойчивая тенденция увеличения заболеваемости и профессиональной инвалидности сотрудников ОВД, одной из причин которой является слабая физическая подготовленность [27].

При этом существующая система подготовки курсантов образовательных учреждений МВД России не обеспечивает их полноценной готовности к выполнению профессиональных задач. Нагрузки, предлагаемые в процессе учебных занятий, являются недостаточно высокими и по своей направленности не имеют прогрессирующего характера. Нормативные требования не отвечают требованиям боевой подготовленности курсантов с учетом различных этапов обучения [22; 23 и др.].

В настоящее время начальный уровень физической подготовленности кандидатов на учебу является недостаточным, ввиду низкой эффективности функционирования системы физического воспитания общеобразовательной школы, что накладывает дополнительную нагрузку на процесс физической подготовки в образовательных учреждениях МВД России [13].

Исследования, проведенные специалистами, показали отсутствие устойчивой динамики роста показателей общей физической подготовленности и эффективности выполнения боевых приемов борьбы курсантами образовательных учреждений МВД России в течение всего периода обучения [19; 33 и др.].

Отмечается отсутствие у курсантов сознательной учебно-профессиональной мотивации по предмету «Физическая подготовка», что является одной из причин пропусков занятий и тем самым обстоятельством, затрудняющим совершенствование процесса обучения [19].

На сегодняшний день правоохранительная деятельность рассматривается преимущественно с точки зрения действий в ситуациях, когда возникают основания к применению физической силы, в том числе боевых приемов борьбы, а также специальных средств и огнестрельного оружия. На основании этого строятся программы подготовки, направленные на совершенствование физических качеств и соответствующих двигательных навыков. При этом данная составляющая правоохранительной деятельности не отражает всего спектра присущих ей особенностей и происходящих в ней изменений, касающихся психических (ценностных, эмоциональных, когнитивных) и физических (двигательный режим, направленность и характер физической нагрузки) компонентов, организационных и санитарно-гигиенических условий, экологической ситуации и материально-технической базы [3].

Учебные программы в вузах МВД России в большей степени ориентированы на решение задач обучения двигательным действиям и развития физических качеств, и, в гораздо меньшей степени, на решение задач воспитания потребностей в ценностях физической культуры для достижения жизненных и профессиональных целей [13; 34].

Процесс физического совершенствования курсантов образовательных учреждений МВД России в настоящее время строится на основе теории физического воспитания, соответствующей этапу индустриальной культуры, что значительно ограничивает ее возможности в воспитании сотрудника, способного и мотивированного на активное и деятельностное отношение к оптимизации своего физического состояния.

Для повышения эффективности физической подготовки курсантов образовательных учреждений МВД России специалистами предлагаются различные подходы.

Одним из направлений ее совершенствования является внедрение в данный процесс технологий спортивной подготовки. Так, для оптимизации физической подготовки курсантов образовательных учреждений МВД России специалистами были экстраполированы следующие принципы теории и практики спорта [5; 6]:

- принцип отражения цели как основы построения тренировочной деятельности;
- использование программно-целевой организации тренировочного процесса;
- концентрация на ограниченном по времени этапе подготовки однонаправленной физической нагрузки;
- применение сопряжено-последовательной системы организации нагрузки.

Опираясь на данные положения, были разработаны методики физической подготовки курсантов образовательных учреждений МВД России.

Основными признаками данной педагогической технологии выступили [10; 14; 31]:

- выделение семестрового макроцикла, в течение которого решаются основные задачи достижения занимающимися модельного уровня физической подготовленности;
- поэтапное концентрированное формирование каждого из физических качеств, составляющих модель физической подготовленности курсанта в рамках однонаправленных мезоциклов продолжительностью 7-8 недель;
- рациональная организация физической подготовки, предусматривающая опережающее развитие силовых и скоростно-силовых качеств, затем формирование выносливости с последующей реализацией достигнутого двигательного потенциала в условиях моделирования служебно-боевой деятельности.

Уместное внедрение технологий спортивной подготовки способно привести к значительному положительному эффекту в решении задач физической подготовки курсантов образовательных учреждений МВД России, однако вряд ли это достижимо посредством обычного механического наложения подходов, используемых в спорте, в рассматриваемый нами процесс. Одна из причин этого кроется в различиях между целевой направленностью спортивной подготовки, заключающейся в достижении максимально возможных показателей физической работоспособ-

ности спортсмена в определенный период времени, соответствующие его участию в главных соревнованиях; и целевой направленностью физической подготовки курсанта образовательного учреждения МВД России, заключающейся в достижении определенного уровня физической работоспособности и его поддержании в течение длительного периода времени. Вторая причина – это большая разница степени тренировочных воздействий, оказываемых на спортсмена и курсанта, что делает нецелесообразным применение для физического совершенствования последнего сопряжено-последовательной системы организации нагрузки.

Другим направлением совершенствования системы физической подготовки курсантов образовательных учреждений МВД России видится специалистами в ее комплексировании на основе использования упражнений, одновременно обеспечивающих совершенствование физических качеств, двигательных умений и навыков, а также решающих задачи смежных дисциплин, таких как огневая и тактико-специальная подготовка [4; 22].

Еще одним из направлений совершенствования физической подготовки курсантов образовательных учреждений МВД России является внедрение в нее методов моделирования различных ситуаций, встречающихся в профессиональной деятельности сотрудников милиции [4; 10; 16; 23; 31 и др.].

Оба эти направления способствуют повышению эффективности процесса физической подготовки, но в корне изменить ситуацию они не могут. Для того чтобы физическая подготовка в полной мере обеспечивала решение стоящих перед ней задач, необходимы концептуальные изменения в ее организации, заключающиеся в переходе от концепции «физического воспитания (физической подготовки) курсанта» к концепции «формирования его физической культуры».

При этом некоторыми специалистами разрабатывались возможности воспитания физической культуры личности у курсантов вузов МВД России, предусматривающего формирование всех свойственных ей компонентов [11; 34].

Основы профессионально-прикладной физической культуры курсанта образовательного учреждения МВД России

Эффективное решение задач физического совершенствования может обеспечить специально организованный педагогический процесс, целью которого в соответствии с новыми концептуальными положениями будет являться воспитание или формирование физической культуры курсанта образовательного учреждения МВД России.

В отличие от физической подготовленности, физическая культура курсанта подразумевает не только соответствующий требованиям, предъявляемым условиями профессиональной деятельности, уровень развития физических качеств и способностей, а также степень сформированности прикладных двигательных умений и навыков, но и состояние человека, включающее все компоненты, свойственные физической культуре личности.

На физическую культуру курсанта вуза МВД России, как на процесс неспециального образования в этой области, так и на состояние личности, формируемое в ходе данного процесса, очень большое влияние оказывают специфические условия его служебной деятельности. Это связано с высокими требованиями, предъявляемыми ими к физической работоспособности сотрудника органов внутренних дел. Поэтому физическая культура в образовательных учреждениях МВД России для обеспечения своих функций должна носить выраженный профессионально-прикладной характер, в значительно большей степени, чем в деятельности специалистов ряда других профессий.

Поэтому мы полагаем, что процесс освоения ценностей физической культуры курсантом вуза МВД России ввиду выраженной специфической направленности будет корректно именовать *профессионально-прикладной физической культурой*.

Курсанты образовательных учреждений МВД России являются сотрудниками органов

внутренних дел, обучающимися по специальности высшего профессионального образования. Этап обучения в вузе является наиболее важным с точки зрения формирования индивида, как специалиста и как личности, обладающей соответствующим уровнем культуры, в том числе и физической. Поэтому профессионально-прикладная физическая культура в образовательном учреждении МВД России должна обеспечить воспитание профессионально-прикладной физической культуры курсанта, как определенной основы на весь период его службы в органах внутренних дел и жизни в целом.

Профессионально-прикладная физическая культура в образовательных учреждениях МВД России рассматривается нами, как система, включающая в себя следующие элементы:

1. Неспециальное физкультурное образование, реализуемое, главным образом, на учебных занятиях по физической подготовке. Является главным элементом системы профессионально-прикладной физической культуры в образовательном учреждении МВД России. С одной стороны, данный вид физической культуры обеспечивает достаточно полное овладение курсантом ценностями физической культуры, с другой стороны, имея выраженную учебно-тренировочную направленность, формирует его физическую подготовленность к решению оперативно-служебных задач.

2. Прикладные виды спорта, занятия которыми, с одной стороны, значительно повышают уровень физической подготовленности занимающихся, с другой стороны, способствуют более глубокому освоению ими ценностей физической культуры и играют большую роль в воспитании мотивации к занятиям физическими упражнениями и формированию здорового образа жизни.

3. Физическая рекреация, направленная на удовлетворение биологических потребностей в движении, является дополнительным фактором, способствующим укреплению здоровья, повышению физической работоспособности, формированию здорового образа жизни. Выполняет также функцию активного отдыха и организации досуга курсантов. Этот элемент физической культуры при его частом применении играет существенную роль в обеспечении физической подготовленности занимающихся. Его значение возрастает на старших курсах, когда курсанты переходят с казарменного проживания на свободный режим и, у них появляется больше возможности самостоятельно организовать свой досуг. Также физическая рекреация имеет большое значение для поддержания работоспособности сотрудников органов внутренних дел в период всей их службы.

4. Двигательная реабилитация, данный вид профессионально-прикладной физической культуры направлен на ускорение процесса восстановления здоровья после различных заболеваний и травм. Важность этого вида заключается в условиях службы сотрудника органов внутренних дел, обуславливающих значительное негативное влияние на состояние его здоровья и наличие экстремальных ситуаций, что повышает вероятность заболеваний и получения сотрудниками травм.

Профессионально-прикладная физическая культура курсанта образовательного учреждения МВД России является целевым ориентиром и системообразующим фактором всего процесса профессионально-прикладной физической культуры в вузе.

Под профессионально-прикладной физической культурой курсанта образовательного учреждения МВД России мы понимаем область его личностной культуры, характеризующуюся необходимым уровнем образованности в сфере физической культуры, физической подготовленностью к решению оперативно-служебных задач, психофизическим здоровьем, наличием мотивационно-ценностных ориентаций и социально-духовных ценностей, направленных на занятия физическими упражнениями, прикладными видами спорта и здоровый образ жизни.

Профессионально-прикладная физическая культура курсанта образовательного учреждения МВД России включает в себя следующие компоненты:

1. Образовательный, подразумевающий знание средств, методов и принципов физической культуры, а также умение их использования для укрепления здоровья, повышения физической и умственной работоспособности, формирования двигательных умений и навыков, совершенствования профессионального мастерства.

2. Мотивационно-ценностный, подразумевающий ориентацию личности на деятельностное и активное отношение к освоению ценностей физической культуры, использованию их в служебной деятельности и во время досуга, устойчивую потребность в занятиях физическими упражнениями и здоровом образе жизни.

3. Практико-деятельностный, подразумевающий участие личности в различных физкультурно-спортивных мероприятиях в качестве физкультурника, спортсмена, инструктора, организатора, судьи и т.д.;

4. Физическую подготовленность, подразумевающую большую физическую и умственную работоспособность, высокий уровень развития физических качеств, совершенное владение профессионально-прикладными двигательными умениями и навыками, крепкое здоровье, высокий уровень адаптивных возможностей.

Формирование профессионально-прикладной физической культуры курсанта образовательного учреждения МВД России, включающей в себя все эти компоненты, обеспечит подготовку сотрудника органов внутренних дел, не только обладающего требуемым уровнем физической подготовленности, но и мотивированного на занятие физическими упражнениями и поддержание достигнутого уровня физической работоспособности, умеющего целесообразно и эффективно использовать средства физической культуры для решения задач физической подготовки и укрепления здоровья, способного в течение всего периода службы поддерживать оптимальную работоспособность и крепкое здоровье, как залог успешной профессиональной деятельности.

Библиографический список

1. **Акулова, Л.Н.** Информационное обеспечение физической культуры студентов педагогического вуза: дисс. ... д-ра пед. наук / Л.Н. Акулова. – СПб., 2005. – 380 с.
2. **Бальсевич, В.К.** Физическая культура для всех и для каждого / В.К. Бальсевич. – М.: Физкультура и спорт, 1988. – 208 с.
3. **Баркалов, С.Н.** Методика служебно-боевой подготовки курсантов вузов МВД России с учетом специфики профессиональной деятельности: дисс. ... канд. пед. наук / С.Н. Баркалов. – М., 2005. – 224 с.
4. **Баркалов, С.Н.** Основные направления совершенствования служебно-боевой подготовки курсантов вузов МВД России // Проблемы совершенствования служебно-боевой подготовки сотрудников силовых ведомств: сб. материалов Всерос. науч.-практич. конф. / ГОУ ВПО ВСИ МВД России. – Иркутск. 2007. – С. 12-17.
5. **Верхошанский, Ю.В.** Основы специальной физической подготовки спортсменов / Ю.В. Верхошанский. – М.: Физкультура и спорт, 1988. – 331 с.
6. **Верхошанский, Ю.В.** Программирование и организация тренировочного процесса / Ю.В. Верхошанский. – М.: Физкультура и спорт, 1985. – 176 с.
7. **Видт, И.Е.** Образование как феномен культуры: эволюция образовательных моделей в историко-культурном процессе: автореф. дисс. ... д-ра пед. наук / И.Е. Видт. – Тюмень, 2003. – 50 с.
8. **Виленский, М.Я.** Формирование физической культуры личности учителя в процессе его профессиональной подготовки: дисс. ... д-ра пед. наук в виде научного доклада / М.Я. Виленский. – М., 1990. – 84 с.
9. **Выдрин, В.М.** Советская физическая культура как феномен культурной революции в СССР: автореф. дисс. ... д-ра пед. наук / В.М. Выдрин. – М., 1980. – 41 с.
10. **Гадалов, А.В.** Формирование готовности курсантов вузов МВД России к единоборству с правонарушителями: автореф. дисс. ... канд. пед. наук / А.В. Гадалов. – М., 2000. – 24 с.

11. **Евтушенко, А.В.** Формирование профессиональной физической культуры курсантов высших учебных заведений МВД России: дисс. ... канд. пед. наук / А.В. Евтушенко. – Смоленск, 1999. – 145 с.
12. **Захарова, И.Г.** Формирование информационной образовательной среды высшего учебного заведения: автореф. дисс. ... д-ра пед. наук / И.Г. Захарова. – Тюмень, 2003. – 46 с.
13. **Кашин, Н.И.** Содержание и методика профессионально-прикладной физической подготовки курсантов вузов силовых ведомств (на примере вузов МВД): автореф. дисс. ... канд. пед. наук / Н.И. Кашин. – СПб., 2005. – 24 с.
14. **Колюхов, В.Г.** Блочный принцип физической подготовки в образовательных учреждениях МВД России / В.Г. Колюхов, В.И. Лисицын, А.И. Лысов // Проблемы совершенствования системы профессиональной подготовки сотрудников ОВД: материалы межвузовской научно-практич. конф. (8-9 апреля 2005 г.) / Московский ун-т МВД России. – М.: 2005. С. 43-49.
15. **Колюхов, В.Г.** Методика обучения курсантов образовательных учреждений МВД России боевым приемам борьбы: учебно-методическое пособие / В.Г. Колюхов, В.И. Лисицын. – М.: ЦИИНМОКП МВД России, 2000. – 84 с.
16. **Колюхов, В.Г.** Физическая подготовка сотрудников органов внутренних дел: учеб. пособие / В.Г. Колюхов. – М.: ЦОКР МВД России, 2006. – 136 с.
17. **Лубышева, Л.И.** Концепция формирования физической культуры человека / Л.И. Лубышева. – М.: ГЦИФК, 1992. – 119 с.
18. **Лубышева, Л.И.** Теоретико-методические и организационные основы формирования физической культуры студентов: дисс. ... д-ра пед. наук / Л.И. Лубышева. – М., 1992. – 476 с.
19. **Лупырь, В.Г.** Организационно-технологические особенности совершенствования профессионально-прикладной физической подготовки курсантов юридических вузов МВД России: автореф. дисс. ... канд. пед. наук / В.Г. Лупырь. – М., 2002. – 24 с.
20. **Матвеев, Л.П.** Прикладность физической культуры: понятийные основы и их конкретизация в современных условиях / Л.П. Матвеев, В.П. Полянский // Теория и практика физической культуры. 1996. № 7. С. 42-47.
21. **Матвеев, Л.П.** Теория и методики физической культуры. Введение в предмет: учебник для высших специальных физкультурных учебных заведений / Л.П. Матвеев. – 3-е изд. доп.. – СПб.: Издательство «Лань», 2003. – 160 с.
22. **Медведев, И.М.** Организация профессионально-прикладной физической подготовки в учебных заведениях МВД России: дисс. ... канд. пед. наук / И.М. Медведев. – Волгоград, 1999. – 165 с.
23. **Морев, Д.Г.** Методика боевой подготовки курсантов образовательных учреждений МВД России в условиях ограниченного пространства: автореф. дисс. ... канд. пед. наук / Д.Г. Морев. – М., 2001. – 24 с.
24. **Николаев, Ю.М.** Теоретико-методологические основы физической культуры: дисс. ... д-ра пед. наук / Ю.М. Николаев. – СПб., 1998. – 338 с.
25. **Петьков, В.А.** Теоретические основы и прикладные аспекты формирования физической культуры личности в системе непрерывного образования: дисс. ... д-ра пед. наук / В.А. Петьков. – Армавир, 1999. – 414 с.
26. **Полянский, В.П.** Теоретико-методические основы совершенствования прикладных форм физической культуры (её содержания и форм) в современном обществе: дисс. ... д-ра пед. наук / В.П. Полянский. – М., 1999. – 352 с.
27. **Полянский, В.П.** Теоретико-методическое обеспечение служебно-боевой подготовки в связи с модернизацией системы профессионального образования // Современные технологии спорта высших достижений в профессиональной подготовке сотрудников силовых ведомств: материалы Международного научного конгресса / Москва 2-4 февраля 2006 г. – М.: ООО «Антиа Пресс», 2006. С.243-249.
28. **Полянский, В.П.** Формирование теории и совершенствование практики профессионально-прикладной физической культуры как особого социокультурного образования // Теория и практика физической культуры. 2008. № 5. С. 12-17.
29. **Путан, Л.Я.** Формирование ориентации на здоровый образ жизни у курсантов в вузе МВД России: дисс. ... канд. пед. наук / Л.Я. Путан. – СПб., 2003. – 174 с.

30. **Раевский, Р.Т.** Профессионально-прикладная физическая подготовка студентов технических вузов / Р.Т. Раевский. – М.: Высшая школа, 1985. – 138 с.
31. **Сидоров, С.Г.** Формирование служебно-прикладной физической подготовленности слушателей (курсантов) вузов МВД России: дисс... канд. пед. наук / С.Г. Сидоров. – Челябинск, 1998. – 160 с.
32. **Соловьев, Г.М.** Педагогическая технология в формировании физической культуры личности студента: дисс. ... д-ра пед. наук / Г.М. Соловьев. – Ставрополь, 1999. – 388 с.
33. **Степанов, Г.И.** Поэтапное формирование навыков выполнения боевых приемов борьбы у курсантов образовательных учреждений МВД России: автореф. дисс.... канд. пед. наук / Г.И. Степанов. – М., 2006. – 23 с.
34. **Шамрай, С.Д.** Воспитание физической культуры у слушателей вузов МВД России: автореф. дисс.... канд. пед. наук / С.Д. Шамрай. – СПб.: СПб. Ун-т МВД России, 2000. – 24 с.

*Дата поступления
в редакцию 28.02.2010*

A.A. Ahmatgatin

TEORETICAL ASPECTS OF PROFESSIONAL-APPLIED PHYSICAL CULTURE WITHIN MVD RUSSIA CADET EDUCATIONAL INSTITUT

The subject of present article is the analysis of physical culture development tendencies within the high educational system. Modern physical culture education situation within the MVD Russia cadet educational institutions system is also considered here.

Author arrives to the conclusion that modern physical culture education does not ensure complete decision of effective professional activity tasks. It is necessary to modify conceptual basis of physical culture education, system purposes should be changed. The improving of this system means the transition from physical culture training to professional applied physical culture concept.

Key words: education, educational concept, physical culture, professional activity.

МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 531.781.2

В.Д. Вавилов, И.В. Вавилов, В.И. Поздяев

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ КРЕМНИЕВЫХ ДАТЧИКОВ ЗА СЧЕТ ДВОЙНОГО СИНХРОННОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ

Арзамасский политехнический институт (филиал) НГТУ им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрена возможность повышения точности кремниевых датчиков по пути схемного решения – применением двойного синхронного детектирования – на примере микрогироскопа. Даются конструктивная и принципиальная схемы микрогироскопа, математическая модель, теоретическая оценка характеристик.

Ключевые слова: кремниевый датчик, микрогироскоп, синхронное детектирование, повышение точности.

В настоящее время кремниевые датчики получили широкое распространение во многих областях науки и техники. Тем не менее, точность кремниевых датчиков является еще не достаточной, например, с точки зрения применения их в навигационных системах летательных аппаратов. Известны частные случаи решения повышения точности за счет аппаратной или алгоритмической коррекции [1]. Данная статья посвящена одному из таких вопросов, повышению точности кремниевых датчиков схемным решением, а именно за счет двойного синхронного детектирования. Рассмотрим принцип повышения точности на примере микрогироскопа дрейперовской схемы.

Вначале опишем его конструктивные особенности. Микрогироскоп включает в свой состав ЧЭ в виде слоистой структуры стекло-кремний-стекло (рис. 1). На кремниевой несущей пластине 1 посредством микроэлектронной технологии по специально спроектированным фотошаблонам изготовлены следующие элементы: консольная пластина 2, в прямоугольном окне которой размещена рамка привода 3, подвешенная в консольной пластине на двух торсионах, работающих на изгиб. Внутри консольной пластины на таких же торсионах 5 подвешена чувствительная масса 6. Торсионы имеют сечение, близкое к крестообразному, получаемому при анизотропном травлении кремния в плоскости (100) щелочным травителем и последующим изотропным полированием.

Чувствительная масса выполнена из проводящего монокремния и является одновременно подвижным электродом емкостного преобразователя перемещений и подвижным электродом силового электростатического преобразователя. Подвижный электрод соединен с общей точкой питания «землей». Характерной особенностью чувствительного элемента является простота конструктивного решения, выливающаяся в схему “чувствительная масса в вибрирующей рамке”. Вибрирующая рамка и чувствительная масса имеют по одной степени свободы – это угловые колебания во взаимно перпендикулярных осях. Подвесы (торсионы) вибрирующей рамки и чувствительной массы могут работать как на кручение, так и на изгиб.

На рис. 1 кристаллографические направления для всех граней находятся в семействе направлений [110], а верхняя и нижняя плоскости - в семействе направлений [100], что соот-

ветствует максимальной прочности при минимальной жесткости торсиона. Чувствительная масса 6 вместе с дополнительным грузом 7 в данной конструкции выполняют роль гирочувствительного узла, а рамка привода 3 – функции гиromотора, и приводится в принудительные колебания относительно оси x с помощью электростатического преобразователя. Межэлектродные емкости преобразователя перемещений для смежных плеч моста изменяются при этом одинаково, в результате схема является нечувствительной к таким перемещениям. Для соединения с неподвижным основанием служит площадка 4 , а для энергетической развязки между основанием и подвижными рамками служит консоль 9 .

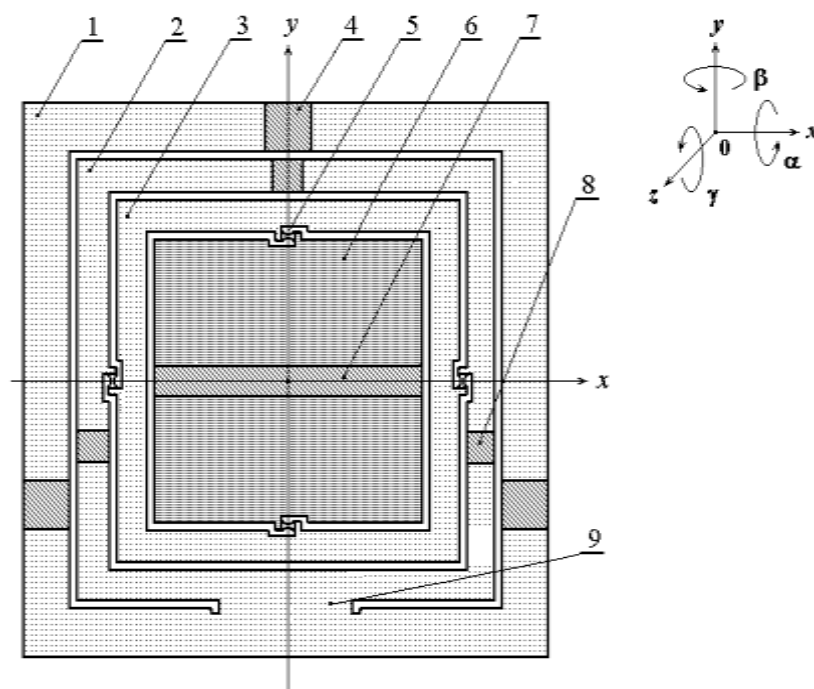


Рис. 1. Кристалл чувствительного элемента ДУС:

1 – несущая пластина; 2 – консольная пластина; 3 – рамка привода; 4 – площадка крепления несущей пластины к корпусу; 5 – упругий подвес; 6 – чувствительная масса; 7 – дополнительный груз; 8 – площадка соединения с обкладкой 9 – опора консоли (хвостовик)

Под рамкой привода (она же внешняя рамка) на стеклянной крышке расположены электроды 3 (рис. 2), возбуждающие резонансные колебания, а под внутренней рамкой – силовые электроды 4 и электроды емкостного преобразователя угловых перемещений 5 . При отсутствии угловой скорости Ω чувствительная масса совершает вместе с внешней рамкой колебательные движения относительно оси x и не имеет их относительно оси y .

Пересечение всех осей: измерительной, возбуждающей и оси воздействия угловой скорости – в данной конструкции совмещено в одной точке, а именно в центре тяжести чувствительной массы, в свою очередь выполненной внутри рамки привода 3 .

При наличии поворотной скорости Ω_z на лепестках внутренней рамки возникает знакопеременная кориолисова сила, направленная по оси x и возбуждающая во внутренней рамке колебания относительно оси y . Частота этих колебаний совпадает с частотой вынужденных колебаний внешней рамки, а амплитуда колебаний пропорциональна поворотной скорости. Для повышения чувствительности микрогироскопа масса внутренней рамки может быть увеличена за счет дополнительного груза 7 . Однако такое конструктивное решение не является приемлемым по двум причинам: во-первых, при неразъемном соединении кремния с большинством металлов имеет место несовпадение температурных коэффициентов, а, во-вторых, дополнительный груз требует выделения площади на подвижном электроде, что приводит к снижению электроста-

тической силы обработки. Удачным решением является вакуумное напыление металла с близким температурным коэффициентом линейных расширений на поверхность кремниевого маятника, например, нержавеющей сталью типа ковара.

Оптимальным режимом работы гироскопа является случай, когда собственная частота внутренней рамки совпадает с частотой возбуждения внешней рамки. Принципиально, без учета воздействия внешней среды, условием динамической настройки являются следующие соотношения:

$$G_{y1}/J_1 = G_{y2}/J_2, \quad \omega_{\text{возб}} = \sqrt{G_{y2}/J_2}, \quad (1)$$

где $J_1 = m_1(a_1^2/3 + c_1^2/12)$ и $J_2 = m_2(a_2^2/3 + c_2^2/12)$ – моменты инерции внешней и внутренней рамок; $G_{y1} = E_{[100]}b_{п1}c_{п1}^3/16a_{п1}$ и $G_{y2} = E_{[100]}b_{п2}c_{п2}^3/16a_{п2}$ – жесткости подвесов внешней и внутренней рамок при работе на изгиб; $a_{п1}$, $a_{п2}$, $b_{п1}$, $b_{п2}$, $c_{п1}$, $c_{п2}$ – соответственно размеры подвесов внешней и внутренней рамок; $E_{[100]}$ – модуль упругости кремния в направлении [100]; γ – коэффициент Пуассона для кремния. В практических конструкциях микрогироскопов собственные частоты рамки привода и чувствительной массы определяются значительно сложнее, чем в соотношении (1), так как на подвижные узлы кроме сил инерции и упругости могут воздействовать силы демпфирования и компенсации перемещений.

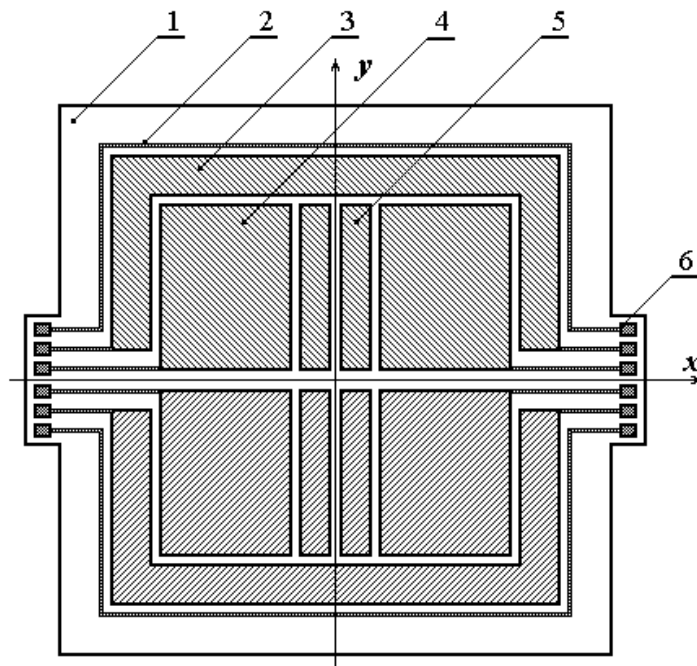


Рис. 2. Обкладка с неподвижными электродами:

- 1 – стеклянная пластина (или пластина из непроводящего кремния);
- 2 – охранный контур; 3 – электрод возбуждения вынужденных колебаний; 4 – электрод силового датчика; 5 – электрод датчика перемещений;
- 6 – контактная площадка

В соответствии с гипотезой Буссенеска с целью снижения контактных напряжений необходимо увеличивать расстояния от контактных площадок до мест, чутко реагирующих на изменения напряжений (например, от точек жесткого треугольника, т.е. мест соединения несущей пластины с корпусом до упругих подвесов). Система из двух элементов, колеблющихся относительно взаимно перпендикулярных осей и расположенных на дополнительной консольной пластине, в свою очередь неразъемно соединенной с несущей пластиной с помощью консоли (хвостовика), развязана с корпусом.

Короткие подвесы с криволинейными обводами по ширине и толщине получены за счет комбинированного травления кремния (анизотропного и изотропного) с применением специальных маскирующих корректоров; они идеально подходят для работы на изгиб.

Внешняя рамка является виброприводом, частота ее колебаний выбирается равной собственной частоте подвешенной в ней чувствительной массы. Внешняя рамка осуществляет угловые колебания относительно оси y , возбуждение которых задается резонансным генератором со стабилизированной амплитудой и фазой.

Модуль полного углового ускорения внешней рамки

$$\varepsilon = \omega\Omega \sin(\omega, \Omega), \quad (2)$$

где ω - переносная угловая скорость; Ω - относительная угловая скорость (измеряемая). В проекциях на прямоугольные оси координат уравнение (2) запишется так:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \omega_y \Omega_z - \omega_z \Omega_y, \\ \varepsilon_y &= \omega_x \Omega_z - \omega_z \Omega_x, \\ \varepsilon_z &= \omega_y \Omega_x - \omega_x \Omega_y, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ - проекции углового ускорения на координатные оси; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ - проекции переносной угловой скорости; $\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$ - проекции относительной угловой скорости.

Учтем, что в рассматриваемой кинематической схеме имеется всего две степени свободы, по которым возможны перемещения.

Произведение углового ускорения ε_x на момент инерции относительно той же оси создает момент кориолисовой силы

$$M_{\text{кор}} = J_y \omega_y \Omega_z, \quad (4)$$

где J_y - момент инерции внутренней рамки вместе с чувствительным грузом относительно оси y .

Поскольку момент кориолисовой силы является знакопеременным, то он приводит во вторичные колебания внутреннюю рамку с той же частотой и осью колебаний, ортогональной двум другим. Других движений в кинематической схеме нет. Мерой, определяющей величину поворотной скорости, является амплитуда колебаний внутренней рамки, на которую ее смещает момент кориолисовой силы.

С целью математического описания характеристик интегрального ДУС запишем уравнения Лагранжа второго рода для кинематической схемы по рис. 1

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \alpha} = Q_\alpha, \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\beta}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \beta} = Q_\beta, \quad (5)$$

где $T = J_x \dot{\alpha}^2 / 2 + J_y \dot{\beta}^2 / 2$ - кинематическая энергия системы; $Q_\alpha = J_y \omega_0 \Omega - K_{d\alpha} \dot{\alpha} - G_\alpha \alpha$ - обобщенная сила относительно угловой координаты α ; $Q_\beta = M_{\text{эл}} - K_{d\beta} \dot{\beta} - G_\beta \beta$ - обобщенная сила относительно угловой координаты β ; $M_{\text{эл}}$ - момент электрической силы привода; $K_{d\alpha}$ и $K_{d\beta}$ - абсолютные коэффициенты газодинамического демпфирования относительно угловых координат α и β ; G_α и G_β - жесткости упругих подвесов относительно осей α и β . В развернутой форме уравнение (5) имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} J_x \ddot{\alpha} + K_{d\alpha} \dot{\alpha} + G_\alpha \alpha &= J_x \omega_0 \Omega, \\ J_y \ddot{\beta} + K_{d\beta} \dot{\beta} + G_\beta \beta &= M_{\text{эл}}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Первое уравнение в (6) характеризует внутреннюю рамку, а второе – внешнюю. Между собой они связаны только частотой колебаний, причем колебания во внутреннюю рамку передаются от внешней посредством момента кориолисовых сил. Внутренняя же рамка никак не влияет на внешнюю. Используем первое уравнение для формирования характеристик измерительного канала, а второе для возбуждения стабильных колебаний внешней рамки.

Полный электронный блок ДУС должен выполнять следующие функции: 1) преобразовывать угловую скорость чувствительного элемента в пропорциональный электрический сигнал по напряжению; 2) выделять знак измеряемой угловой скорости; 3) обеспечивать оптимальное демпфирование подвижному узлу посредством электрического контура совместно с корректирующим устройством; 4) отфильтровывать шумовые составляющие в измерительном сигнале. Для реализации отмеченных функций электронный блок (рис. 3) включает следующие узлы: 1) емкостный широтно-импульсный преобразователь перемещений чувствительной массы, выполненный на двух симметричных мультивибраторах (ключи Кл1 и Кл2, триггеры Шмидта Тл1-Тл4, и измерительные емкости C_1 и C_2); 2) первый синхронный детектор (ключи Кл3 и Кл4 и емкость C_5); 3) первый фильтр нижних частот (пассивный – резистор R_7 и емкость C_6); 4) корректирующее устройство (дифференциатор на ОУ1, интегратор на ОУ2, пропорциональное звено на ОУ3 и сумматор управляющих сигналов на ОУ4); 5) второй синхронный детектор (ключи Кл5 и Кл6 и емкость C_9); 6) второй фильтр нижних частот (активный) на ОУ5.

Первый и второй синхронные детекторы тактируются импульсными последовательностями разной частоты. Первый синхронный детектор предназначен для выделения полезного сигнала и знака в зашумленном сигнале емкостного преобразователя перемещений, а первый фильтр нижних частот – для очистки сигнала от несущей высокочастотной составляющей. Далее очищенный сигнал в виде переменного напряжения с частотой возбуждения принудительных колебаний чувствительной массы и с амплитудой, пропорциональной измеряемой угловой скорости, смешивается с корректирующим сигналом и с обратным знаком подается по цепи отрицательной обратной связи на силовую обработку.

Вторичные колебания чувствительной массы – это колебания относительно оси y . Они возникают от действия кориолисовой силы, т.е. при наличии угловой скорости относительно оси z . Сигнал обратной связи стремится свести к нулю амплитуду вторичных колебаний. Второй синхронный детектор предназначен для выделения знака в выходном сигнале и тактируется частотой, на два порядка меньшей по сравнению с первым, причем его частоту выбирают равной собственной частоте механического узла. Первая и вторая тактирующие частоты должны быть кратными, т.е. в период второй импульсной последовательности должно укладываться целое число периодов первой импульсной последовательности.

Выберем корректирующее устройство таким образом, чтобы его передаточная функция совместно с электронным блоком представляла собой ПИД-регулятор (пропорционально-интегрально-дифференциальный), как наиболее оптимальный:

$$W_{\text{кор}}(s) = a_0 + a_1 s + \frac{1}{a_2 s}, \quad (7)$$

где a_0, a_1, a_2 - параметры корректирующего устройства.

Для определения параметров корректирующего устройства используем следующие допущения и ограничения: 1) в статике корректирующее устройство не должно оказывать влияния на измерительный процесс, поэтому $\alpha_0 = 1$; 2) с целью обеспечения синхронной работы интегратора и корректирующего устройства как единого целого их постоянные времени должны быть равны, при этом имеем $\alpha_1 = T$; 3) выполним конструктивно равенство постоянных времени микромеханического узла и электронного блока (за исключением постоянной времени фильтра нижних частот емкостного преобразователя перемещений), т.е.

$J_x/G_\alpha = T^2$. Более гибкое определение коэффициентов корректирующего устройства возможно при постановке задачи оптимизации, например, переходного процесса.

Электронный усилитель в соответствии с принципиальной схемой представляет собой фильтр нижних частот первого порядка (апериодическое звено), это участок схемы на ОУ1 с внешними цепями обратных связей. Соответственно его передаточная функция имеет вид:

$$W_{yc}(s) = \frac{K_{yc}}{1 + \tau s},$$

где $K_{yc} = R_8/R_7$ – коэффициент усиления; $\tau = R_7 C_6$ – постоянная времени фильтра. Здесь следует заметить, что порядок фильтра нижних частот может быть иным в зависимости от требований к фильтрации помех, следовательно, и его передаточная функция.

В замкнутом контуре с силовой электростатической обратной связью передаточная функция интегрального ДУС с учетом описания отдельных звеньев имеет вид

$$W_{акс}(s) = \frac{K(\beta_2 s^2 + \beta_1 s + \beta_0)}{\alpha_4 s^4 + \alpha_3 s^3 + \alpha_2 s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0}, \quad (8)$$

где

$$K = K_{чз} K_{пп} K_{yc}, \alpha_4 = JT\tau; \alpha_3 = K_{дy} T\tau + JT; \alpha_2 = G_y T\tau + K_{дy} T + K_{oc} K_{пп} K_{yc} T^2; \\ \alpha_1 = (G_y + K_{oc} K_{пп} K_{yc}) T; \alpha_0 = K_{oc} K_{пп} K_{yc}; \beta_2 = T^2; \beta_1 = T; \beta_0 = 1.$$

В (8) входят параметры структурной схемы, имеющие следующий смысл: $K_{чз} = J_y \omega_0$ – коэффициент передачи чувствительного элемента; $W_{ny}(s) = 1/J_x s^2 + K_{дy} s + G_\alpha$ – передаточная функция подвижного узла; $K_{oc} = 2\varepsilon \varepsilon_0 U_{оп} Fl_{ц} / h^2$ – коэффициент передачи электростатического преобразователя момента; $K_{пп} = U_{оп} l_{ц} Q / h$ – коэффициент передачи преобразователя перемещений; $l_{ц}$ – плечо качания внутренней рамки; h – зазор между проводящей внутренней рамкой и неподвижным электродом; Q – добротность механического узла. Соответственно, чем выше добротность, тем выше амплитуда колебаний и, следовательно, чувствительность механического узла. Добротность оценивается следующим образом:

$$Q = \frac{1}{2\xi + \eta}, \quad (9)$$

где ξ – относительный коэффициент скоростного демпфирования (газодинамического, магнитоэлектрического, контурного и др.); η – коэффициент потерь на внутреннее трение в кристаллической решетке материала упругих подвесов.

Проверка ДУС на устойчивость по критерию Гурвица дает следующие соотношения:

$$\alpha_1 \alpha_2 - \alpha_0 \alpha_3 > 0; \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 - \alpha_1^2 \alpha_4 - \alpha_3^2 \alpha_0 > 0, \quad (10)$$

которые должны выполняться при условии положительности всех остальных миноров определителя Гурвица. При допущении $K_{дy} = 0$, $\tau \ll T$ соотношения (10) критерия Гурвица преобразуются в одно простое неравенство:

$$(G + K_{oc} K_{пп} K_{yc}) T^2 > J. \quad (11)$$

Учитывая равенство постоянных времени микромеханического подвижного узла и электронного корректирующего устройства, из (11) видим, что исследуемый ДУС устойчив.

Полная передаточная функция ДУС с учетом второго синхронного детектора и второго фильтра нижних частот имеет следующий вид:

$$W_{\text{дус}}(s) = \frac{K_{\text{чз}} K_{\text{пп}} K_{\text{yc}} (b_2 s^2 + b_1 s + b_0)}{a_6 s^6 + a_5 s^5 + a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}, \quad (12)$$

где

$$\begin{aligned} a_6 &= T^3 J\tau; \quad a_5 = (K_{\text{дy}}\tau + J)T^3 + 2T^2 J\tau; \quad a_4 = JT\tau + 2T^2(K_{\text{дy}}\tau + J) + T^3(G_y\tau + K_{\text{дy}} + K_{\text{oc}}K_{\text{пп}}K_{\text{yc}}T); \\ a_3 &= (K_{\text{дy}}\tau + J)T + 2T^2(G_y\tau + K_{\text{дy}} + K_{\text{oc}}K_{\text{пп}}K_{\text{yc}}T) + T^3(G_y + K_{\text{oc}}K_{\text{пп}}K_{\text{yc}}); \\ a_2 &= (G_y\tau + K_{\text{дy}} + K_{\text{oc}}K_{\text{пп}}K_{\text{yc}}T)T + 2(G_y + 2K_{\text{oc}}K_{\text{пп}}K_{\text{yc}})T^2; \\ a_1 &= (G_y + 3K_{\text{oc}}K_{\text{пп}}K_{\text{yc}})T; \quad a_0 = K_{\text{oc}}K_{\text{пп}}K_{\text{yc}}; \quad b_2 = T^2; \quad b_1 = T; \quad b_0 = 1. \end{aligned}$$

Рассмотрим далее влияние добротности колебательной системы на характеристики ДУС. При возбуждении на резонансной частоте внешней рамки ее амплитуда прямо пропорциональна добротности.

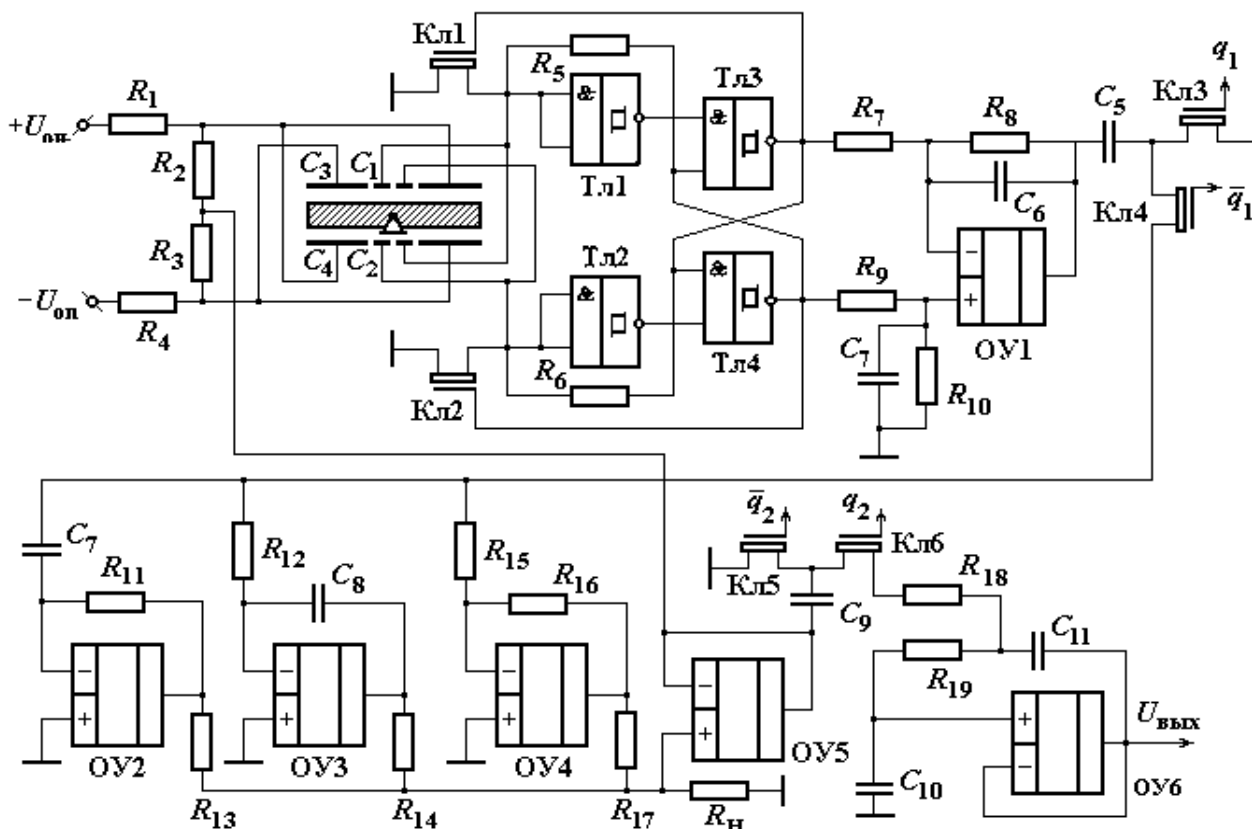


Рис. 3. Принципиальная схема микросистемного ДУС типа «угловой вибратор» с двойным синхронным детектированием

Относительный коэффициент скоростного демпфирования, например, газодинамический зависит от конструкции чувствительного элемента и свойств среды, в которой осуществляются колебания. Для увеличения добротности колебательной системы чувствительный элемент вакуумируют. При этом коэффициенты скоростного демпфирования обращаются в нуль, т.е. $K_{\text{дх}} = K_{\text{дх}} = 0$, а необходимые динамические свойства измерительному каналу задают введением в него корректирующих устройств. Коэффициент потерь на внутреннее тре-

ние зависит от свойств кристаллической решетки материала упругих подвесов и от их геометрических размеров. Он более чем на два порядка меньше коэффициента скоростного демпфирования. Следовательно, при вакуумировании добротность повышается во столько же раз. Дальнейшее повышение добротности возможно за счет применения для упругих подвесов материалов с малым внутренним трением, таких как кварцевое стекло, монокремний и другие полупроводниковые соединения.

Подгонку частот, как правило, осуществляют лазерным испарением материала с внутренней рамки непосредственно через стеклянную крышку. При подгонке частот влиять на жесткости торсионов внешней и внутренней рамок нежелательно, поскольку все характеристики гироскопа зависят от точности изготовления торсионов. Масса внутренней рамки может быть увеличена с помощью дополнительного груза.

Газодинамическое демпфирование используется преимущественно со схемами прямого измерения. При повышенных требованиях к характеристикам микрогироскопа применяют компенсационные схемы с силовой обработкой перемещений подвижного узла, а сам подвижный узел вакуумируют.

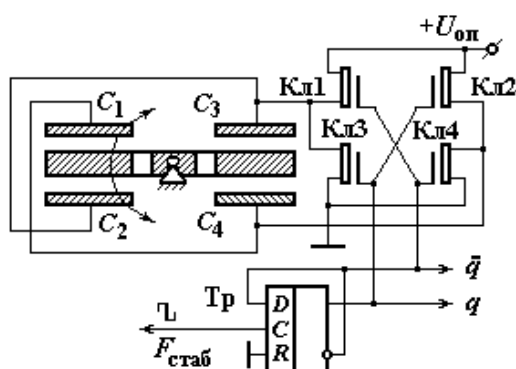


Рис. 4. Схема возбуждения колебаний внешней рамки ЧЭ

Абсолютный коэффициент газодинамического демпфирования при этом равен нулю, так как динамическая вязкость вакуума равна нулю. Демпфирование подвижного узла обеспечивают введением корректирующего устройства в электрический контур микрогироскопа. На рис. 4 приведена принципиальная схема возбуждения колебаний внешней рамки ЧЭ. Неподвижные электроды внешней рамки перекрестно соединены для выполнения функций силового преобразователя (емкости C_1 и C_4 , а также C_2 и C_3). Схема возбуждения включает в свой состав ключевое устройство Кл1-Кл4, управляемое счетным триггером Тр и переключающее опорное напряжение между неподвижными электродами силового преобразователя.

Противодействие моменту от кориолисовых сил на чувствительную массу осуществляется линеаризованным по напряжению электростатическим преобразователем. Линеаризаторы выполнены на резистивных делителях $R_1 - R_4$ (рис. 3). Применение в прямой цепи в составе корректирующего устройства интегратора обеспечивает линеаризацию электростатического преобразователя по перемещению.

С целью обеспечения максимальной чувствительности микрогироскопа конструктивные параметры внутренней рамки должны быть выбраны так, чтобы ее резонансная частота совпадала с частотой колебаний, вынуждаемых знакопеременной кориолисовой силой. Резонансные частоты могут быть найдены как полюсы передаточной функции (8). Так, для первого резонансного пика имеем

$$\omega_p = \sqrt{a_1/a_3}.$$

Приравнявая резонансную частоту к частоте возбуждения внешней рамки, получим расчетное соотношение для динамической настройки микрогироскопа:

$$\sqrt{G_1/J_1} = 2\pi C_1 R_1. \quad (13)$$

Реализация соотношения (13) осуществляется технологическим путем. Причем подгонку возможно осуществлять подстройкой и механических, и электронных компонентов.

Таким образом, можно сделать выводы:

1. Рассмотренная конструктивная схема с двумя синхронными детекторами позволяет выполнить микрогироскоп на любой желаемый диапазон измерений. При этом для повыше-

ния чувствительности на нижних пределах момент инерции внутренней рамки можно увеличить вакуумным наращиванием слоя металлизации.

2. Точность микрогирокопа с двумя синхронными детекторами ограничивается точностью электростатического силового преобразователя, включенного в цепь отрицательной обратной связи.

3. Компьютерное моделирование рассмотренной схемы показало существенное снижение (до двух порядков) уровня шумов, обусловленное применением двойного синхронного детектирования.

Библиографический список

1. **Мокров, Е.А.** Акселерометры НИИ физических измерений - элементы микросистемотехники / Е.А. Мокров, А.А. Папко // Микросистемная техника. 2002. № 1. С. 3–9.
2. **Былинкин, С.Ф.** Интегральные акселерометры прямого измерения / С.Ф. Былинкин [и др.] // Датчики и системы. № 6. 2000. С. 30–33
3. **Паршин, В.А.** Особенности технологии мультисенсорных датчиков с нелегированными упругими подвесами / В.А. Паршин, В.И. Харитонов // Датчики и системы. 2002. № 2. С. 22–24.

*Дата поступления
в редакцию 16.02.2010*

V.D. Vavilov, I.V. Vavilov, V.I. Pozdyaev

PRECISION ENHANCEMENT OF SILICON SENSORS BY MEANS OF DOUBLE SYNCHRONOUS DETECTION

We discuss possibility of increasing precision of silicon sensors via circuit solutions – by applying double synchronous detection – using a microgyroscope as a case study. We give construction and circuit diagrams of a microgyroscope, a mathematical model, and a theoretical estimation of characteristics.

Key words: silicon sensor, microgyroscope, synchronous detection, precision enhancement

УДК 539.67

В.И. Обухов, Р.А. Денисов

ИНЖЕНЕРНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ

Арзамасский политехнический институт (филиал) НГТУ им. Р.Е. Алексева

Рассмотрены теоретические аспекты температурных и структурных деформаций в кристаллах чувствительных элементов интегральных датчиков. На основе проведенного анализа определены возможные температурные напряжения в чувствительных элементах и погрешности выходных характеристик интегральных датчиков, выполненных на основе полупроводникового кремния. Предложен инженерный метод расчета температурных погрешностей интегральных датчиков.

Ключевые слова: интегральный датчик, температурные деформации, структурные деформации, полупроводниковый кремний, чувствительный элемент, температурные погрешности, двухслойная система, прогиб пластины, упругий подвес, мембрана.

В процессе производства интегральных датчиков (ИД) на поверхности полупроводникового кремния как основного конструкционного материала создаются как микромеханические, так и пассивные и активные элементы микроэлектронных структур (МЭМС). У микромеханических элементов это могут быть упругие подвесы и чувствительные массы акселерометров, мембраны с жестким центром или без – для датчиков давлений. Для микроэлектронных структур к таким элементам могут быть отнесены токоведущие дорожки и контактные площадки, резисторы, тензорезисторы, «n-p-n» и «p-n-p» переходы, «стоп-слои» и др. Толщина или глубина залегания таких элементов может составлять от долей до нескольких микрометров, и они формируют специфические области. Структурное состояние измененных слоев может существенно отличаться от структуры исходного материала. Такие структуры получают путем напыления материала в вакууме, диффузией, ионным легированием примесных атомов или эпитаксией. Структурные изменения в материале, в результате диффузии точечных атомов (атомы внедрения и замещения, вакансии), могут быть существенными [4] и могут носить как локальный характер в пределах чувствительных элементов (ЧЭ) ИД, так и тотальный по всей площади исходной пластины, например при ее окислении. Окисные пленки полупроводникового кремния при толщине около одного микрометра имеют существенно измененную структуру.

Полупроводниковый кремний характеризуется как идеальный упругий материал [1], деформируется, точно следуя за приложенным напряжением в соответствии с законом Гука. Другими словами, в этом законе отсутствует фактор времени, т.е. практически в материале отсутствует гистерезис. Полупроводниковый кремний имеет малый коэффициент температурного расширения. Тем не менее, в нем могут формироваться структурные, термические и механические напряжения в силу особенностей технологических операций. Температурные напряжения могут быть обусловлены разностью коэффициентов температурного расширения кремния и новой образованной структурой на его поверхности (окисная пленка, токопроводящий слой, «стоп-слой» и т.п.). Если на пластине кремния толщиной h_1 при температуре ΔT формируется слой SiO_2 толщиной h_2 , то при охлаждении на ΔT в слоях SiO_2 возникают напряжения сжатия [2]:

$$\sigma_2 = (\alpha_{si} - \alpha_{sio_2}) \Delta T E_2 / (1 - \mu_2), \quad (1)$$

где $(\alpha_{si} - \alpha_{sio_2})$ - разность коэффициентов линейного температурного расширения кремния

и диоксида кремния; E_2 - модуль упругости первого рода (Юнга) диоксида кремния (SiO_2); μ_2 - коэффициент Пуассона SiO_2 .

Практически речь идет о двухслойной системе, работающей по аналогии с биметаллами. В зависимости от способа закрепления пластины при окислении подложка может оказаться деформированной по цилиндру или по сфере. На основании теории упругости для двухслойной системы [2]

$$\sigma_{\max} = \frac{E_1}{6(1-\mu_1)} \frac{h_1^2}{h_2} \frac{1}{R_k}, \quad (2)$$

где E_1 и μ_1 - модуль упругости Юнга и коэффициент Пуассона для кремниевой пластины; h_2 - толщина окисленного слоя (диоксид кремния). Обычно $h_2 = 0,4 \dots 0,8$ мкм.

Температурные напряжения вызывают прогиб t , величина которого пропорциональна изменению температуры и разности коэффициентов температурного расширения кремниевой пластины и вновь образованного слоя на ней. Для пластин диаметром 76 мм и толщиной 0,38 мм величина прогиба может составлять более 10 мкм.

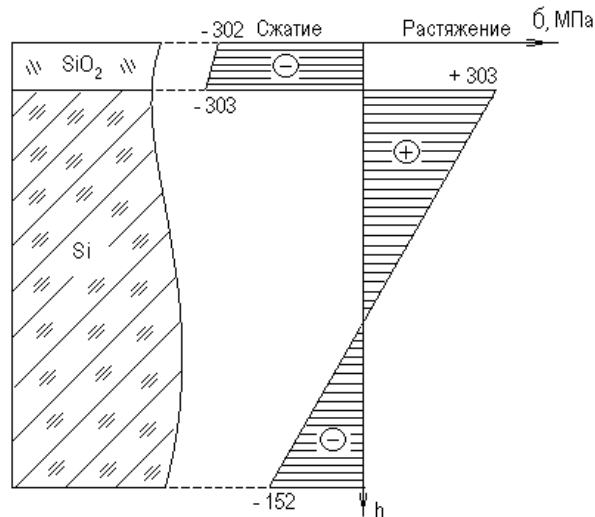


Рис. 1. Распределение напряжений в окисной пластине и кремнии

Структурные напряжения в естественных условиях склонны к релаксации в течение длительного времени. Для ускорения этого процесса проводится интенсивная релаксация (термообработка). Интенсивность релаксации зависит от величины структурных напряжений, времени термического воздействия, температуры и состава газовой среды. Как показывает анализ и практика, после каждого выполнения операции диффузии, эпитаксии, окисления необходим отжиг для снятия структурных напряжений.

Величина прогиба пластины, деформированной за счет структурных напряжений, может быть измерена инструментально. Прогиб круглой пластины (в центре) диаметром $D_{пл}$ может быть вычислен по формуле

$$t = \frac{3h_2\sigma_2^{\max}(1-\mu_1)}{E_1h_1^2}. \quad (3)$$

Для пластины с $h_1 \leq 0,2$ мм и толщиной окисленного слоя $h_2 = 0,8$ мкм величина прогиба может составлять 10...15 мкм.

При изготовлении акселерометров, датчиков давления, их упругие подвесы и мембраны могут иметь толщину от 10 до 50 мкм и более. В случае одностороннего расположения окисной пленки температурные напряжения могут существенно деформировать упругий подвес, мембрану.

Рассмотрим обобщенную схему ЧЭ акселерометра с емкостным преобразователем перемещения, представленную на рис. 2. Чувствительная масса 1 ЧЭ выполняет функцию подвижной обкладки, закрепленной на упругом подвесе 3. На упругий подвес по всей его длине и ширине нанесен токопроводящий слой. Величину прогиба подвеса за счет температурных напряжений в нем можно определить [5]

$$\Delta z_n = (\alpha_m - \alpha_{si}) \Delta T \frac{3l_n^2}{4(h_1 + h_2)}, \quad (4)$$

где α_m - коэффициент температурного расширения токопроводящего материала; l_n , h_1 , h_2 - длина, толщина упругого подвеса и толщина пленки соответственно.

Для емкостного преобразователя перемещение подвижной обкладки 1 (рис. 2) вызовет изменение зазора между неподвижными обкладками 2 и изменение емкости C_0 . Величину изменения емкости преобразователя можно определить по выражениям:

$$\begin{aligned} C_0 - \Delta C &= \varepsilon \varepsilon_0 \frac{S}{z + \Delta z}, \\ C_0 + \Delta C &= \varepsilon \varepsilon_0 \frac{S}{z - \Delta z}, \end{aligned} \quad (5)$$

где z - начальный зазор между подвижной и неподвижной обкладками при нейтральном положении подвижной обкладки 1; S - площадь обкладок 1, 2; $\varepsilon \varepsilon_0$ - диэлектрическая проницаемость среды между обкладками; C_0 - емкость преобразователя перемещения при зазоре z между обкладками; ΔC - изменение емкости преобразователя перемещения за счет изменения положения подвижной обкладки 1 на величину Δz .

Изменение зазора между обкладками Δz может быть определено с учетом равенства (4) следующим образом:

$$\Delta z = \frac{\Delta z_n}{l_n} (l_n + 0,5l_m), \quad (6)$$

где Δz_n - величина прогиба конца упругого подвеса о - о'; l_m - длина подвижной обкладки.

Для инженерных расчетов температурную погрешность емкостного датчика перемещения с учетом (4) и (6) можно оценить по формуле

$$\Delta C = C_0 \left[\pm \frac{4z(h_1 + h_2)}{3\Delta T(\alpha_m - \alpha_{si})l_n(l_n + 0,5l_m)} \right]. \quad (7)$$

Учитывая, что произведение l_n^2 - величина малая, ею можно пренебречь. Уравнение (7) в этом случае можно преобразовать к следующему виду:

$$\Delta C = C_0 \left[\pm \frac{4z(h_1 + h_2)}{3\Delta T(\alpha_m - \alpha_{si})l_n(0,5l_m)} \right] \quad (8)$$

Прикидочные расчеты для упругого подвеса длиной $l_n = 0,8$ мм, толщиной $h_n = 0,01$ м, шириной $b_n = 0,6$ мм и металлизацией его алюминием толщиной слоя $h_2 = 0,8$ мкм и $\alpha_{Al} = 2,5 \cdot 10^{-5}$ /град показывают, что температурная погрешность ЧЭ ИД прямого измерения может достигать 3% при изменении температуры в пределах 40°C .

Изгибные деформации исходных пластин (подложек) возникают из-за градиента внутренних сил в результате нарушенных слоев вблизи их поверхности при выполнении заключительных операций шлифования и полирования. Выполняя такие операции, как фотолитография, эпитаксия, диффузия, окисление, необходимо помнить о влиянии изгибных деформаций на точность их выполнения.

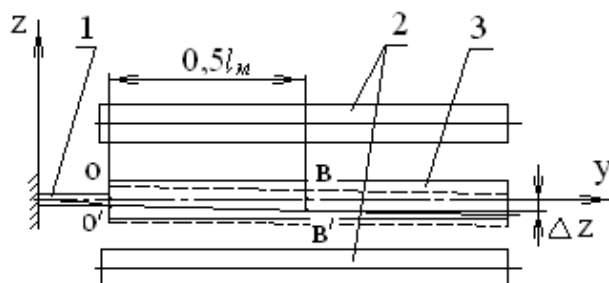


Рис. 2. Кинематическая схема преобразователя перемещения ЧЭ ИД:

1 – упругий подвес; 2 – неподвижные обкладки; 3 – подвижная обкладка

Рассмотрим ЧЭ интегрального датчика давления (ИДД) с емкостным датчиком перемещения. Кинематическая схема датчика приведена на рис. 3.

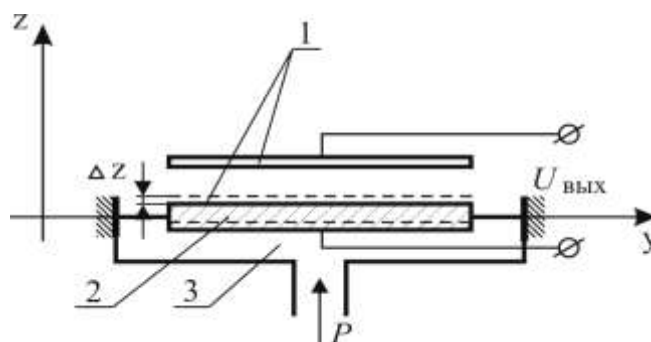


Рис. 3. Кинематическая схема емкостного ЧЭ ИДД:

1 – обкладки конденсатора; 2 – мембрана с жестким центром; 3 – камера с измеряемым давлением

Измеряемое давление P поступает в камеру 3. Под его действием мембрана с жестким центром 2 изменяет свое положение и, как следствие, изменяется зазор между обкладками конденсатора 1. Изменение емкости может быть мерой действующего давления.

Мембрана ИДД на своей поверхности может иметь металлизированную поверхность или внедренные примесные атомы для обеспечения соответствующей электропроводности. В этом случае мембрана представляет собой биматериал с толщиной пленки h_2 и толщиной мембраны h_1 . При изменении температуры из-за разности коэффициентов температурного расширения проводящего слоя и мембраны в ней возникают температурные напряжения. Температурные напряжения вызовут изменение исходного положения мембраны

$$\Delta z = f(\sigma_T), \quad (9)$$

где $\sigma_T = f(h_1, h_2, \alpha_1, \alpha_2, \Delta T)$ – величина температурного напряжения в структуре ЧЭ ИДД для двухслойной системы.

Для круглой мембраны с жестким центром величина Δz может быть определена с помощью выражения [5]

$$\Delta z = A_p \frac{\sigma_T R^4}{Eh^3}, \quad (10)$$

где $A_p = R/r_0$ – коэффициент, зависящий от отношения рабочего полного радиуса мембраны R к радиусу жесткого центра мембраны r_0 ; r_0 – радиус жесткого центра мембраны; R – полный радиус мембраны; E – модуль упругости Юнга; $h = h_1 + h_2$ – толщина жесткого центра мембраны; h_1 , h_2 – толщина металлической пленки или глубина диффузионного слоя и кремниевого основания.

Величина Δz для квадратной или прямоугольной мембраны с жестким центром может быть определена на основании уравнения [1], которое можно преобразовать в виде

$$\Delta z = \frac{\sigma_T AB}{G}, \quad (11)$$

где A , B – длина и ширина мембраны; G – жесткость мембраны. Подставив формулы (9), (10) в равенство (5), получим:

- для круглой мембраны

$$\Delta C = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{S}{z \mp A_p \frac{\sigma_T R^4}{Eh^3}}, \quad (12)$$

- для мембраны квадратной или прямоугольной формы

$$\Delta C = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{S}{z \mp \frac{\sigma_T AB}{G}}. \quad (13)$$

Для пластины, окисленной с двух сторон, прогиб может составлять около 5 мкм. Этот прогиб обусловлен неравномерностью толщины полученных слоев и неодинаковыми локальными дефектами на пластине. При стравливания окисла с одной стороны, прогиб может возрасти почти в два раза. В результате загонки фосфора прогиб пластин может быть больше, чем при загонке бора [4].

На упругих подвесах, толщина которых на порядок меньше, чем толщина пластины, этот прогиб может иметь еще большую величину, и его влияние на выходные характеристики ИД может быть значительным.

Результаты исследований указывают на возможные изменения модуля упругости полупроводникового кремния при изменении его структуры. Выводы, приведенные в статье [3], должны нацеливать конструкторов интегральных датчиков на учет реального модуля упругости в измененных структурах кремния. После каждой операции, которая может приводить к структурным изменениям поверхностного слоя полупроводникового кремния, необходимы меры к устранению структурных напряжений как причины, вызывающей погрешности ЧЭ ИД. Основной способ устранения структурных напряжений – отжиг. При этом для каждого случая структурных напряжений необходимо определить режимы отжига. В каждом конкретном случае он будет разным по температуре, времени, по среде, в которой должен проходить отжиг.

В процессе проектирования технологии изготовления ЧЭ ИД и ее реализации следует учитывать влияние структурных и температурных напряжений на их выходные характеристики. Для этого необходимо:

- подбирать материалы с коэффициентами температурного расширения, близкими или равными коэффициенту температурного расширения полупроводникового кремния;

- по возможности проектировать упругие подвесы с максимально возможной толщиной за счет уменьшения ширины и минимальной длины;
- наносить с противоположной стороны подвеса такой же слой, с теми же свойствами, что и с лицевой стороны, если это допускается конструкцией и технологией;
- каждый раз после выполнения операций окисления, эпитаксии, диффузии назначать интенсивную релаксацию, задавая необходимую температуру, время и газовую среду отжига.

Библиографический список

1. **Вавилов, В.Д.** Интегральные датчики / В.Д. Вавилов. – Н. Новгород: НГТУ, 2003.
2. **Михайлов, И.Ф.** Термическая и структурная деформация в системе кремний-окисел / И.Ф. Михайлов, Ю.М. Спалек, А.Г. Федоров // Микроэлектроника. 1986. Т. 15. Вып. 4.
3. **Обухов, В.И.** Влияние технологических факторов на изменение упругих свойств кремния в производстве интегральных датчиков // Датчики и системы. 2001. №2.
4. **Перевощиков, В.А.** Геттерирование примесей и дефектов в полупроводниках / В.А. Перевощиков, В.Д. Скупов. – Н. Новгород: Изд-во ННГУ. 2002.
5. Расчет упругих элементов машин и приборов / С.Д. Пономарев [др.]. – М. Машиностроение, 1980.

*Дата поступления
в редакцию 16.02.2010*

V.I. Obuchov, R.A. Denisov

ENGINEERING METHODS OF CALCULATING THE TEMPERATURE ERROR OF INTEGRATED SENSORS

The theoretical aspects of thermal and structural deformation in the crystals of sensitive elements of integrated sensors. Based on the analysis performed by the identification of possible thermal stresses in the sensitive elements and the error of the output characteristics of integrated sensors, made on the basis of semiconductor silicon. The engineering calculation of temperature errors of integral sensors is offered.

Key words: integrated sensor, thermal deformation, structural deformation, semiconductor silicon, sensing element, temperature error, bilayer system, deflection plates, elastic suspension, membrane.

УДК531.7.084/.085

А.А. Яковлев, А.В. Улюшкин

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПОДВИЖНОГО УЗЛА
ТИПА “КОРОМЫСЛО”

Арзамасский политехнический институт (филиал) НГТУ им. Р.Е. Алексева

Рассматривается получение математической модели интегрального маятникового подвижного узла типа “коромысло”, которая в дальнейшем может быть использована для решения задач анализа и синтеза на стадии проектирования и разработки акселерометра.

Ключевые слова: математическая модель, передаточная функция, подвижный узел, интегральный акселерометр.

Разработано множество конструкций подвижных узлов микросистемных датчиков измерения ускорений. Но для всех ранее спроектированных конструкций характерен один существенный недостаток – недостаточность электростатической силы обратной связи. Это является препятствием для увеличения диапазона измерений.

Наиболее перспективным с этой точки зрения является конструктивная схема маятника типа “коромысло”. Подвижный узел типа “коромысло”, изображенный на рис. 1, является разновидностью интегральных маятников с более гибкими характеристиками. Принципиально такая схема может применяться с любым типом силового преобразователя, например, с электростатическим. Данная статья посвящена теоретическим основам построения подвижного узла интегрального акселерометра с использованием ЧЭ типа “коромысло”.

С целью установления математической модели чувствительного элемента акселерометра типа “коромысло” проведем оценку эффективного числа степеней свободы маятника. Отношение жесткости подвеса при изгибе относительно оси z к жесткости относительно оси y определяется квадратом отношения ширины подвеса к минимальной толщине подвеса:

$$\frac{G_{zox}}{G_{yox}} = \left(\frac{b_{п}}{c_{п\min}} \right)^2. \quad (1)$$

Ширина подвеса в рассматриваемой конструкции равна толщине маятника и имеет порядок $b_{п}=1 \cdot 10^{-3}$ м, а минимальная толщина подвеса составляет $c_{п\min}=5 \dots 10 \cdot 10^{-6}$ м. Таким образом, жесткость подвеса при изгибе в поперечном направлении превосходит жесткость в направлении оси чувствительности примерно на четыре порядка. Жесткость подвеса на кручение относительно оси x , а также жесткость растяжения (сжатия) в направлении этой же оси не соизмеримы с жесткостью в направлении оси чувствительности y , поскольку криволинейная форма короткого подвеса является чрезвычайно жесткой конструкцией в осевом направлении. Здесь следует отметить, что при снижении длины подвеса угловая жесткость увеличивается по линейному закону, а осевая – по кубическому.

Проведенная оценка позволяет сделать вывод, что подвижный узел, как динамическая система, имеет две степени свободы. Его положение определяется обобщенными координатами $q_1=y$ и $q_2=\alpha$. Соответственно положение маятника определяется двумя координатами y и α .

Дальнейшие исследования проведем с помощью уравнений Лагранжа второго рода

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i, \quad (i=1,2), \quad (2)$$

где T – кинетическая энергия; Q_i – обобщенная сила, соответствующая i -й обобщенной координате; q_i – i -я обобщенная координата.

Здесь обобщенные координаты (y_A – перемещение точки А вдоль оси y)

$$q_1 = y_A; q_2 = \alpha. \quad (3)$$

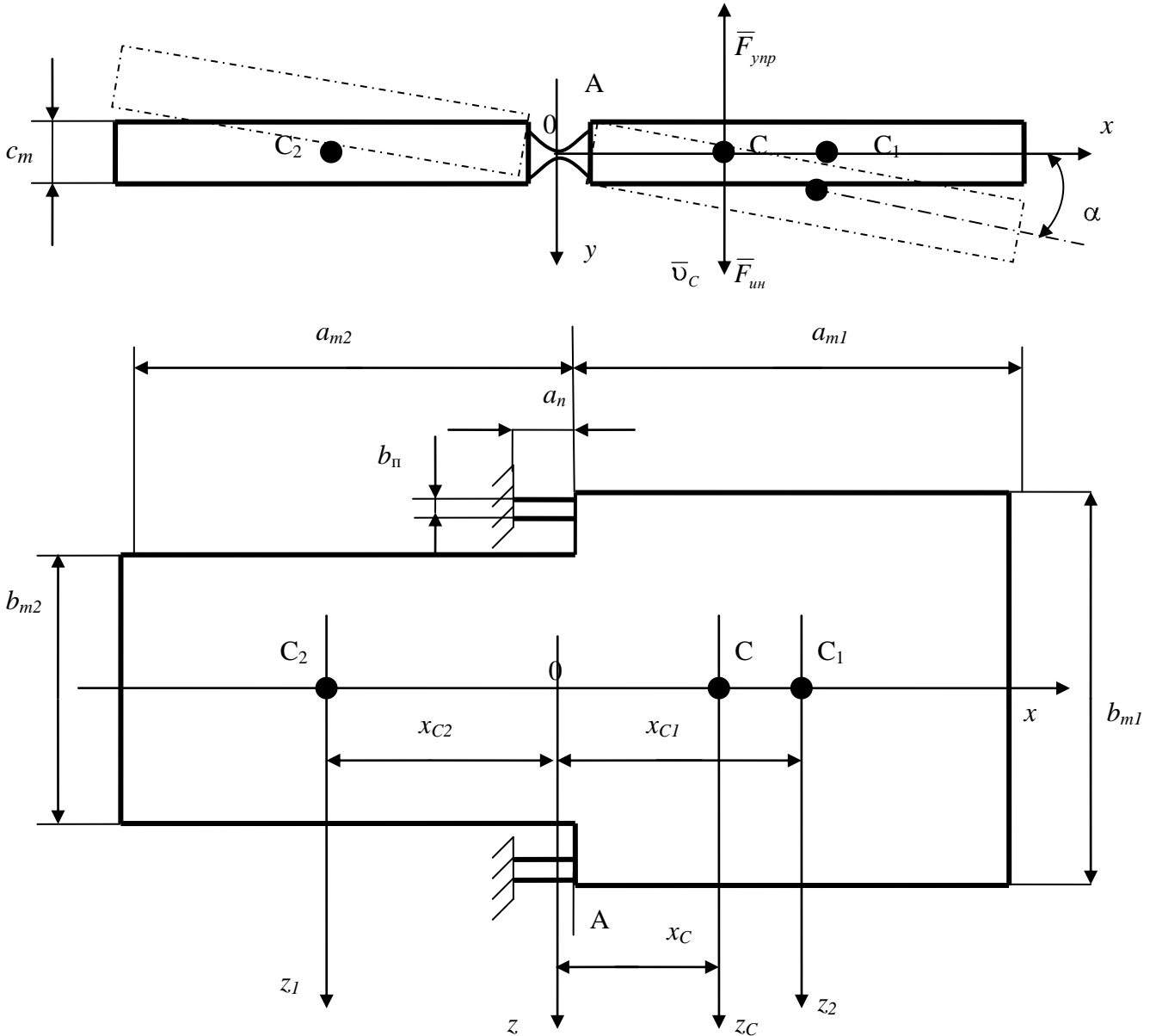


Рис. 1. Чувствительный элемент типа “коромысло”

Перепишем уравнение (2) с учетом (3):

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{y}_A} - \frac{\partial T}{\partial y_A} = Q_{y_A}, \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}} - \frac{\partial T}{\partial \alpha} = Q_{\alpha}. \end{cases} \quad (4)$$

Кинетическая энергия системы определяется следующим соотношением:

$$T = \frac{(m_1 + m_2)v_C^2}{2} + J_{z_C} \frac{\dot{\alpha}^2}{2}, \quad (5)$$

здесь

$$v_C = \dot{y}_C = \dot{y}_A + \left(x_C - \frac{a_n}{2}\right)\dot{\alpha}, \quad (6)$$

где

$$y_C = y_A + \left(x_C - \frac{a_n}{2}\right)\alpha. \quad (7)$$

В формулах (5) - (7) применены следующие обозначения:

J_{z_C} - момент инерции относительно оси z в точке C , где C – центр масс; m_1 и m_2 – массы чувствительного элемента широкой и узкой части соответственно (“плечи коромысла”); v_C - скорость точки C относительно оси z ; a_n - длина подвеса; x_C – расстояние от начала координат до центра масс.

Расстояние от начала координат до центра масс определяются следующим образом:

$$x_C = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2}{m_1 + m_2}, \quad (8)$$

здесь

$$\begin{cases} m_2 = \rho a_{m2} b_{m2} c_m, & m_1 = \rho a_{m1} b_{m1} c_m, \\ x_2 = \frac{a_{m2} - a_n}{2}, & x_1 = \frac{a_{m1} - a_n}{2}, \end{cases} \quad (9)$$

где ρ - плотность кремния; a_{m2} и a_{m1} - длины “плеч коромысла”; b_{m2} и b_{m1} - ширина “плеч коромысла”; c_m - толщина маятника; x_1 и x_2 - расстояния от начала координат до центра масс “плеч коромысла”.

Подставив (9) в (8), получим

$$x_C = \frac{a_{m1} b_{m1} (a_{m1} + a_n) + a_{m2} b_{m2} (a_{m2} + a_n)}{2(a_{m1} b_{m1} + a_{m2} b_{m2})}. \quad (10)$$

Момент инерции J_{z_C} маятника относительно z_C :

$$J_{z_C} = J_{z_C}^{(1)} + J_{z_C}^{(2)}, \quad (11)$$

здесь

$$\begin{cases} J_{z_C}^{(1)} = J_{z_1} + m_1 \left(\frac{a_{m1} + a_n}{2} - x_C \right)^2; \\ J_{z_C}^{(2)} = J_{z_2} + m_2 \left(\frac{a_{m2} + a_n}{2} - x_C \right)^2, \end{cases} \quad (12)$$

где

$$\begin{cases} J_{z_1} = \frac{m_1}{12} (a_{m1}^2 + c_m^2), \\ J_{z_2} = \frac{m_2}{12} (a_{m2}^2 + c_m^2). \end{cases} \quad (13)$$

Отсюда

$$\begin{aligned} J_{z_C} = (m_1 + m_2) & \left(\frac{c_m^2}{12} + \frac{a_n^2}{4} - a_n x_C + x_C^2 \right) + m_1 \left(\frac{a_{m1}^2}{3} + \frac{a_{m1} a_n}{2} - a_{m1} x_C \right) + \\ & + m_2 \left(\frac{a_{m2}^2}{3} - \frac{a_{m2} a_n}{2} + a_{m2} x_C \right). \end{aligned} \quad (14)$$

Рассмотрим частный случай, когда $a_{m1} = a_{m2} = a_m$. Тогда получим

$$x_1 = \frac{a_m + a_n}{2}, \quad x_2 = \frac{a_m - a_n}{2}, \quad (15)$$

$$x_c = \frac{b_{m1}(a_m + a_n) + b_{m2}(a_m - a_n)}{2(b_{m1} + b_{m2})}. \quad (16)$$

Момент инерции

$$J_{z_c} = \frac{m_1 + m_2}{12}(a_m^2 + c_m^2) + m_1 \left[\frac{a_m + a_n}{2} - x_c \right]^2 + m_2 \left[\frac{a_m - a_n}{2} + x_c \right]^2 \quad (17)$$

или

$$J_{z_c} = (m_1 + m_2) \left[\frac{a_m^2}{3} + \frac{c_m^2}{12} + \frac{a_n^2}{4} - x_c(a_n - x_c) \right] + (m_1 + m_2) a_n \left(\frac{a_n}{2} - x_c \right). \quad (18)$$

Возвращаемся к общему случаю. Подставив (6), (7) и (14) в (5), получим

$$T = \frac{m_1 + m_2}{2} (\dot{y}_A^2 + 2l_{ц} \dot{\alpha} \dot{y}_A + l_{ц}^2 \dot{\alpha}^2) + J_{z_c} \frac{\dot{\alpha}^2}{2}, \quad (19)$$

где $l_{ц}$ - расстояние от центра масс до линии соединения “плеч коромысла”, определяемое следующим образом:

$$l_{ц} = x_c - \frac{a_n}{2}. \quad (20)$$

Подставив (19), (20) в (4), получим

$$\begin{cases} (m_1 + m_2) \ddot{y}_A + (m_1 + m_2) l_{ц} \ddot{\alpha} = Q_{y_A}, \\ (m_1 + m_2) l_{ц} \ddot{y}_A + [(m_1 + m_2) l_{ц}^2 + J_{z_c}] \ddot{\alpha} = Q_{\alpha}. \end{cases} \quad (21)$$

Обобщенная сила и обобщенный момент равны:

$$Q_{y_A} = m a_C - K_D \dot{y}_A - G y_A, \quad (22)$$

$$Q_{\alpha} = m a_C l_{ц} - K_{D\alpha} \dot{\alpha} - G_y \alpha, \quad (23)$$

где a_C - ускорение вдоль оси z ; K_D , $K_{D\alpha}$ - линейный и угловой абсолютные коэффициенты газодинамического демпфирования; $G = 12 E_{[100]} J_x / a_n^3$, $G_y = E_{[100]} J_y / a_n$ G , G_y - осевая и угловая жесткости подвеса.

Подставив (22), (23) в (21), получим

$$\begin{cases} m \dot{y}_A^2 + m l_{ц} \ddot{\alpha} + K_D \dot{y}_A + G y_A = m a_C, \\ m l_{ц} \dot{y}_A^2 + (J_{z_c} + m l_{ц}^2) \ddot{\alpha} + K_{D\alpha} \dot{\alpha} + G_y \alpha = m a_C l_{ц}. \end{cases} \quad (24)$$

Уравнения (24) можно записать в операторной форме:

$$\begin{cases} (m s^2 + K_D s + G) y_A + (m l_{ц} s^2) \alpha = m a_C, \\ (m l_{ц} s^2) y_A + [(J_{z_c} + m l_{ц}^2) s^2 + K_{D\alpha} s + G_y] \alpha = m a_C l_{ц}, \end{cases} \quad (25)$$

где s - оператор Лапласа.

Определим передаточную функцию маятника в виде отношения суммарного перемещения центра тяжести маятника к действующему ускорению, взятых в преобразованиях Лапласа:

$$W_{\text{чз}}(s) = \frac{\alpha_{\Sigma}(s)}{a(s)}. \quad (26)$$

Учитывая малость угловых перемещений (2-3 угловые минуты), суммарное перемещение центра тяжести маятника определим через угловую и линейную компоненты в следующем виде:

$$\alpha = \alpha_{\text{вр}} + y_c / l_{\text{ц}}. \quad (27)$$

Для определения угловой и линейной компонент перемещения центра тяжести маятника запишем детерминанты системы уравнений (25):

$$\left. \begin{aligned} \Delta(s) &= (ms^2 + K_{\text{д}}s + G)[(J_{Z_c} + ml^2)s^2 + K_{\text{дв}}s + G_y] - (ml_{\text{ц}}s^2)(ml_{\text{ц}}s^2), \\ \Delta_{\alpha}(s) &= (ms^2 + K_{\text{д}}s + G)(ml_{\text{ц}}a) - (ml_{\text{ц}}s^2)(ma), \\ \Delta_x(s) &= [(J_{Z_c} + ml_{\text{ц}}^2)s^2 + K_{\text{дв}}s + G_y](ma) - (ml_{\text{ц}}s^2)(ml_{\text{ц}}a). \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

Используя (26) для (27), определим передаточную функцию подвижного узла в окончательном виде

$$W_{\text{ны}}(s) = ml_{\text{ц}} \sum_{m=0}^{m=2} b_m s^m / \sum_{n=0}^{n=4} a_n s^n, \quad (29)$$

где коэффициенты передаточной функции находятся через параметры подвижного узла:

$$\left. \begin{aligned} b_0 &= \left(\frac{G_y}{l_{\text{ц}}^2} + G \right), b_1 = \left(\frac{K_{\text{дв}}}{l_{\text{ц}}^2} + K_{\text{д}} \right), b_2 = \frac{J_{Z_c}}{l_{\text{ц}}^2}, a_0 = GG_y, a_1 = K_{\text{д}}G_y + K_{\text{дв}}G, \\ a_2 &= mG_y + (J_{Z_c} + ml_{\text{ц}}^2)G + K_{\text{д}}K_{\text{дв}}, a_3 = mK_{\text{дв}} + (J_{Z_c} + ml_{\text{ц}}^2)K_{\text{д}}, a_4 = mJ_{Z_c}. \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

Крутизну статической характеристики чувствительного элемента определим из (29) с учетом (30) при $s = 0$:

$$K_{\text{4ппоря}}^{\text{ст}} = \frac{ml_{\text{ц}}}{G_y} + \frac{m}{l_{\text{ц}}G}. \quad (31)$$

При рассмотрении математической модели подвижного узла интегрального акселерометра с подвесами, работающими на кручение, можно получить передаточную функцию, аналогичную (29), с той лишь разницей, что изгибную жесткость G_y следует заменить на жесткость для кручения $G_{\text{кр}}$. Таким образом, здесь нет принципиальных затруднений в построении математической модели ЧЭ.

Однако в практических конструкциях акселерометров в целях подавления влияний тех или иных боковых составляющих ЧЭ выполняют чисто осевого или чисто маятникового типа. При этом исключаются взаимные влияния между линейными и угловыми перемещениями, а система уравнений (26) распадается на два самостоятельных уравнения:

- для ЧЭ осевого типа $m\ddot{y} + K_{\text{д}}\dot{y} + Gy = ma_c,$
- для ЧЭ маятникового типа $J_{Z_c}\ddot{\alpha} + K_{\text{дв}}\dot{\alpha} + G_y\alpha = ma_c l_{\text{ц}},$

где a_c - компонента ускорения, действующего на корпус и ЧЭ акселерометра, представляющая собой входное воздействие в виде сложной функции времени.

Как правило, акселерометры выполняют для измерения одной компоненты, а для измерения полного ускорения строят блок из шести акселерометров: трех линейных и трех угловых. При разработке и исследовании акселерометров дифференциальные уравнения (25) и (26) удобно представить в виде передаточных функций, применив преобразование Лапласа. Передаточные функции эквивалентны дифференциальным уравнениям, т.е. также содержат исчерпывающую информацию о статических и динамических характеристиках разрабатываемых приборов. Передаточные функции чисто осевого и чисто маятникового ЧЭ можно представить в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} W_o(s) = y(s)/a(s) = \frac{m}{ms^2 + K_d s + G} = \frac{K_o}{\frac{1}{\omega_o^2} s^2 + 2\xi_o \frac{1}{\omega_o} s + 1}; \\ W_M(s) = \alpha(s)/a(s) = \frac{ml_u}{J_{z_c} s^2 + K_{dy} s + G_y} = \frac{K_M}{\frac{1}{\omega_M^2} s^2 + 2\xi_M \frac{1}{\omega_M} s + 1}, \end{array} \right. \quad (32)$$

где $K_o = m/G$, $K_M = ml_u/G_y$ - статические коэффициенты передачи осевого и маятникового ЧЭ; $\xi_o = K_d/(2\sqrt{mG})$, $\xi_M = K_{dy}/(2\sqrt{J_{z_c} G_y})$ - соответственно относительные коэффициенты демпфирования осевого и маятникового ЧЭ; $\omega_o = \sqrt{G/m}$, $\omega_M = \sqrt{G_y/J_{z_c}}$ - собственные частоты осевого и маятникового ЧЭ.

Вывод

Данная статья содержит описание процедуры определения математической модели подвижного узла типа “коромысло”. Конечный результат представлен в виде передаточных функций второго порядка по двум обобщенным координатам.

Библиографический список

1. **Вавилов, В.Д.** Интегральные датчики: учебник / В.Д. Вавилов; НГТУ. – Н. Новгород, 2003. – 503 с.
2. **Распопов, В.Я.** Микромеханические приборы / В.Я. Распопов. – Тула: Изд-во ГРИФ, 2004. – 476 с.

Дата поступления
в редакцию 16.02.2010

A.A. Yakovlev, A.V. Ulyushkin

MATHEMATICAL MODEL FOR INTEGRAL PENDULUM ROCKER

The objective of the paper is to develop mathematical model for pendulum rocker which can be afterwards applied for solving analysis and synthesis problems within design phase for integral accelerometer.

Key words: mathematical model, transfer function, rocker, integral accelerometer.

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

№ 1 (80)

Редакторы: **Т.В. Третьякова, Е.В. Комарова**

Редакция:

603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24,
тел.: 436-73-72, rio@nntu.nnov.ru

Подписано в печать 05.03.2010. Формат 60x84 ¹/₈. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 39,0. Уч.-изд. л. 35,0. Тираж 300 экз. Заказ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева.
Типография НГТУ.

Адрес университета и полиграфического предприятия:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.