

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»

ТРУДЫ НГТУ
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА

Журнал издается с 2010 года

№ 4 (123)

Нижний Новгород 2018

УДК 050(06)
ББК 9я54
Т 78

Т 78 Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2018. №4(123).
– 264 с.

Выходит 4 раза в год

Журнал включен ВАК при Минобрнауки России

в «Перечень рецензируемых научных изданий», в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» по специальностям: 05.05.03 – Колесные и гусеничные машины; 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации; 05.13.17 – Теоретические основы информатики; 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы; 05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование и вывод из эксплуатации

Главный редактор С.М. Дмитриев

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Н.Ю. Бабанов (зам. гл. редактора), В.П. Хранилов (ответственный секретарь),
В.И. Казакова (отв. редактор), А.В. Крылова (гл. редактор выпуска)

Члены редколлегии: В.В. Беляков, Г.Я. Вагин, В.А. Горбунов, Г.О. Котиев, В.В. Кондратьев,
А.А. Куркин, А.Л. Куликов, В.Н. Ланцов, А.Б. Лоскутов, В.Н. Наумов, Н.А. Прибатурин, А.Е. Хробостов

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

**И.О. председателя,
заместитель председателя**

Сергей Михайлович Дмитриев
(д. т. н., проф., ректор НГТУ им. Р.Е. Алексеева)

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА

<i>Пелиновский Дмитрий Ефимович</i>	PhD, проф. математики, Университет Мак Мастер, Гамильтон, Онтарио, Канада
<i>Палкович Ласло</i>	Проф. Сечени Иштван Университет, Дьёр, Венгрия
<i>Варлаки Петер</i>	Проф. Сечени Иштван Университет, Дьёр, Венгрия
<i>Виджай Кумар Чакка</i>	PhD, проф., Университет Шив Надар, Индия
<i>Ялцинер Ахмет Джевдет</i>	д., проф., METU, директор OERC, Турция

Учредитель

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»
(603950, Нижегородская обл., г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24)

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

*Свидетельство о регистрации
периодического печатного издания:*
ПИ № ФС 77-56417

УДК 050(06)
ББК 9я54

© Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2018

**MINISTRY OF SCIENCE EDUCATION AND OF THE RUSSIAN FEDERATION
FEDERAL STATE BUDGETARY EDUCATIONAL INSTITUTION
OF HIGHER EDUCATION
NIZHNY NOVGOROD STATE TECHNICAL UNIVERSITY
n. a. R.E. ALEKSEEV**

**TRANSACTIONS
of NNSTU n.a. R.E. ALEKSEEV**

Published since 2010

№ 4 (123)

Nizhny Novgorod 2018

The journal is issued 4 times a year

The journal is included in HAC Ministry of Education and Science

in the "List of peer-reviewed scientific publications where must be published basic scientific results of dissertations on competition of a scientific degree of Candidate of Science, on competition of a scientific degree of Doctor of Science" in specialties: 05.05.03 – Wheeled and tracked vehicles; 05.13.01 – System analysis, management and information processing; 05.13.17 – Theoretical foundations of computer science; 05.14.02 – Electric power stations and electric power systems; 05.14.03 – Nuclear power plants, including design and decommissioning

Editor-in-Chief S. M. Dmitriev

EDITORIAL BOARD

N.Yu. Babanov (Deputy Editor-in-Chief), V.P. Khranilov (Executive Secretary),
V. I. Kazakova (Executive Editor), A.V. Krylova (Executive Editor)

Members of Editorial Board: V.V. Belyakov, G.Ya. Vagin, V.A. Gorbunov, G.O. Kotiev, V.V. Kondratiev,
A.A. Kurkin, A.L. Kulikov, V.N. Lantsov, A.B. Loskutov, V.N. Naumov, N.A. Pribaturin, A.Ye. Khrobostov

EDITORIAL COUNCIL

**Acting Chairman,
Vice-chairman**

Sergei Mikhailovich Dmitriev
Doctor of Technical Science, Professor, NNSTU Rector (Nizhny Novgorod, Russia)

Members of Editorial Council

Pelenovski Dmitri Efimovich

PhD, Doctor of Mathematical Science, Professor
McMaster University (Ontario, Canada)

László Palkovics

The Széchenyi István University (Győr, Hungary)

Péter Várlaki

The Széchenyi István University (Győr, Hungary)

Vijay Kumar Chakka

PhD, Doctor of Philosophical Science, Professor
Shiv Nadar University (India)

Yalciner Akhmet Cevdet.

Professor, Head of Ocean Engineering Research Center of
Middle East Technical University (Turkey)

*The certificate on registration of periodic printed editions:
III № ФС 77-56417*

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ.....	9
Голованов А.А., Пелиновский Е.Н. Оценка степени оправдываемости прогноза экстремумов температур в Нижнем Новгороде.....	9
Гордеев М.М., Санников А.Н., Бушуева М.Е. Оптимизация алгоритма обработки изображений «HOUGH TRANSFORM» с использованием OPENCV.....	16
Карпычев В.Ю. Функциональное моделирование (IDEF0) как метод исследования блокчейн-технологии.....	22
Лоцилов А.А., Ильичева М.Н., Иконников В.В., Шаулов Д.А., Орлов Ю.Ф., Зенькович А.В. Математическое моделирование тушения лесного пожара при помощи направленного взрыва.....	33
Пелиновский Е.Н., Диденкулова (Шургалина) Е.Г., Талипова Т.Г., Тобиш Е., Орлов Ю.Ф., Зенькович А.В. Семейство уравнений типа Кортевега-де Вриза в приложениях.....	41
Тимофеева О.П., Неимушев С.А., Неимушева Л.И. Исследование популяционных алгоритмов в решении задач непрерывной оптимизации.....	48
Юрова Н. В. О классах сопряженности в симплектической группе $SP_4(q)$	56
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ.....	61
Андреев В.В., Берберова М.А., Сапаркин Л.М. Разработка модели оценки ущерба, нанесённого населению в результате воздействия радиоактивных веществ при авариях на АЭС (на примере Нововоронежской АЭС).....	61
Асабин А.А., Кралин А.А., Крюков Е.В., Чернов Е.А., Онищенко Г.Б. Способы плавного регулирования величины выходного напряжения тиристорного регулятора вольтодобавки.....	69
Безносков А.В., Львов А.В., Волков Н.С., Лукичев Н.С., Боков П.А., Бокова Т.А., Новинский Э.Г. Экспериментальные исследования зависимостей характеристик осевых насосов, перекачивающих свинцовый теплоноситель, от направления потока на входе в межлопаточные каналы рабочего колеса.....	76
Гагарин Ю. А., Пичков С. Н., Шумаев А. А., Новинский Э.Г. Исследования деформаций цилиндрических оболочек с водой при её замерзании.....	83
Дарьенков А.Б., Чернов Е.А., Кочеганов Д.М., Абузяров Т.Х. Сравнительное имитационное моделирование работы матричного преобразователя частоты со скалярным и пространственно-векторным алгоритмами управления.....	89
Дегтерёв Е.Г., Соколова Г.М., Хорьков С.В., Яшина А.Н., Яшина Н.Ф. Влияние магнитного поля на нелинейные свойства упорядоченной двумерной проводящей среды.....	99
Дмитриев С.М., Крутякова О.Л., Козелков А.С., Куркин А.А., Курулин В.В., Денисова О.В., Уткин Д.А. Минимальный базис задач валидации методов моделирования течений с низкими числами Прандтля.....	104
Калинин Е.В., Чернов Е.А. Потери в стыках шихтованных сердечников. Исследование возможностей снижения прироста потерь.....	124
Кузнецов Н.М., Морозов И.Н. Применение нейросетевого регулирования в управлении водоотливными установками.....	135
Маслеева О.В., Бедретдинов Р.Ш., Эрдили Н.И. Исследование влияния элект-	

ромагнитного поля при обслуживании электрических подстанций	143
Новожилова О.О., Егошин М.А., Мелузов А.Г., Безносков А.В. Ускорительно-управляемая система как источник нейтронов для медицинских приложений	151
Пичков С.Н., Захаров Д.А., Новинский Э.Г. Исследования кавитационных процессов в насосном оборудовании акустическим методом	158
Соколов А.Н., Полуничев В.И., Андреев В.В., Баринов А.А., Михай С.А. Метод экспресс оценки инновационных систем аварийного расхолаживания	164
Фадеев Ю.П., Пахомов А.Н., Полуничев В.И., Турусов А.Ю. Плавающее и блочно-транспортные атомные станции малой мощности	172
МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО	178
Дмитриев П.Е., Кравец В.Н., Бажан П.И., Захаров Л.А., Кузнецов Ю.П., Палутин Ю.И., Слюсарев А.С., Согин А.В. Потери при качении эластичного колеса по твердой опорной поверхности	178
Дыгало В.Г., Ларин Е.С., Котов В.В., Дыгало Л.В. Экспертная система диагностики АБС и СДС	186
Дьяков А.С., Сученина А.С., Новиков В.В., Поздеев А.В., Голяткин И.А. Конструктивные особенности основных узлов отечественных снегоходов	193
Жилейкин М.М., Захаров А.Ю., Панышин М.В. Проверка адекватности и точности математической модели взаимодействия эластичного колеса с деформируемым опорным основанием	206
Кантор П.Я., Плотников С.А., Пляго А.В., Втюрина М.Н. Влияние дисульфида молибдена на процессы горения этанола-топливной эмульсии	215
Лузанова Л.Н., Соколова В.А., Марков В.А., Парфенопуло Г.К., Черных Л.Г. Снижение шумовых характеристик при проведении лесозаготовительных работ...	221
Манянин С.Е., Дмитриев П.Е., Палутин Ю.И., Слюсарев А.С., Аникин А.А. Разделение движений на «быстрые» и «медленные» при построении динамических моделей транспортных средств	227
Мардоян Г.Р., Симонян Р.И., Карпов Н.А., Пронин Н.А., Метелев С.Ю. Современные подходы к испытанию систем ADAS на всех этапах разработки.....	233
Молев Ю.И., Черевастов М.Г., Бажан П.И., Захаров Л.А., Аникин А.А., Кузнецов Ю.П., Слюсарев А.С. Анализ изменений, внесенных в конструкции транспортных средств, при производстве переоборудования автомобилей на территории Нижегородской области в 2015 году	243
Плотников С.А., Черемисинов П.Н., Бажан П.И., Захаров Л.А. Исследование процесса сгорания дизеля 4чн 11,0/12,5 при работе на дизельном топливе с добавкой рапсового масла	249

CONTENTS

INFORMATICS AND MANAGEMENT IN TECHNICAL AND SOCIAL SYSTEMS....	9
Golovanov A.A., Pelinovsky E.N. Evaluation of forecast performance degree of extremal temperatures in Nizhny Novgorod	9
Gordeev M.M., Sannikov A.N., Bushueva M.E. Optimize the image processing algorithm “HOUGH TRANSFORM” by using OPENCV.....	16
Karpychev V.Y. Functional modeling (IDEF0) as a method of research on blockchain technology.....	22
Loschilov A.A., Ilicheva M.N., Ikonnikov V.I., Shaulov D.A., Orlov Yu.F., Zen’kovich A.V. Mathematical modeling of forest fire extinguishing with directional explosion.....	33
Pelinovsky E.N., Didenkulova (Shurgalina) E.G., Talipova T.G., Tobish E., Orlov Yu.F., Zen’kovich A.V. Korteweg-de Vries type equations in applications.....	41
Timofeeva O.P., Neimushchev S.A., Neimushcheva L.I. Investigation of population-based algorithms in the solution of continuous optimization problems.....	48
Yurova N.V. On conjugacy classes in the symplectic group $SP_4(q)$	56
 ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES.....	 61
Andreev V.V., Berberova M.A., Saparkin L.M. Development of a model for assessing damage to the population as a result of exposure to radioactive substances in an accident at a NPP (by the example of the Novovoronezh NPP).....	61
Asabin A.A., Kralin A.A., Kryukov E.V., Chernov E.A., Onischenko G.B. Output voltage smooth regulation methods of boost voltage thyristor regulator.....	69
Beznosov A.V., Lvov A.V., Volkov N.S., Lukichev N.S., Bokov P.A., Bokova T.A., Novinsky E.G. Experimental studies of the dependencies of the characteristics of axial pumps, pumping lead coolant, on the flow at the inlet, interscapular channels of the impeller.....	76
Gagarin Y., Pichkov S., Shumaev A., Novinsky E.G. Deformation research of cylindrical sheath with water inside while freezing.....	83
Daryenkov A.B., Chernov E.A., Kocheganov D.M., Abuzyarov T.H. Comparative simulation of matrix converter with scalar and space vector control algorithms.....	89
Degtyarev E.G., Sokolova G.M., Khorkov S.V., Yashina A.N., Yashina N.F. The influence of magnetic field on nonlinear properties of ordered two-dimensional conducting medium.....	99
Dmitriev S.M., Krutyakova O.L., Kozelkov A.S., Kurkin A.A., Kurulin V.V., Denisova O.V., Utkin D.A. Minimum basis of tasks of the validation of methods of flow modeling with low prandt numbers.....	104
Kalinin E.V., Chernov E.A. Losses at the joints of laminated cores. Investigation of the possibilities of reducing the increase of losses.....	124
Kuznetsov N.M., Morozov I.N. Application of neural network controller in the control of pump plant.....	135
Masleeva O.V., Bedretdinov R.Sh., Erdili N.I. The research of the electromagnetic field influence during the electrical substations maintenance.....	143
Novozhilova O.O., Egoshin M.A., Meluzov A.G., Beznosov A.V. Accelerator-driven system as the neutron source for medical application.....	151
Pichkov S.N., Zakharov D.A., Novinskiy E.G. Research of cavitation processes in pumping equipment by acoustic method.....	158

Sokolov A.N., Polunichev V.I., Andreev V.V., Barinov A.A., Mikhay S.A. The method of rapid assessment of innovative emergency cooling systems.....	164
Fadeev Yu.P., Pakhomov A.N., Polunichev V.I., Turusov A.Yu. Floating and modular transportable small power NPP.....	172
MECHANICAL AND TRANSPORT: THEORY, TECHNOLOGY, PRODUCTION...	178
Dmitriev P.E., Kravets V.N., Bazhan P.I., Zakharov L.A., Kuznetsov Yu.P., Palutin Yu.I., Slusarev A.S., Sogin A.V. The losses of rolling elastic wheels on a solid support surface.....	178
Dygalo V.G., Larin E.S., Kotov V.V., Dygalo L.V. Expert diagnostic system ABS and ESP.....	186
Dyakov A.S., Suchenina A.S., Novikov V.V., Pozdeev A.V., Golyatkin I.A. Constructive features of the main knots of domestic snowmobals.....	193
Zhileykin M.M., Zakharov A.J., Panshin M.V. Verification of the adequacy and accuracy of the mathematical model of the interaction of the elastic wheel with a deformable support base.....	206
Kantor P.Y., Plotnikov S.A., Plyago A.V., Vtyurina M.N. The influence of molybdenum disulphide on the process of combustion ethanol-fuel emulsion.....	215
Luzanova L.N., Sokolova V.A., Markov V.A., Parfenopulo G.K., Chernykh L.G. Decrease in noise characteristics when carrying out lesozagoto-vitelnyh of works on the onezhets 300 trelevochny tractor.....	221
Manyanin S.E., Dmitriev P.E., Palutin Yu.I., Slusarev A.S., Anikin A.A. Separation of movements into “fast” and “slow” when building dynamic vehicle models.....	227
Mardoyan G.R., Simonyan R.I., Karpov N.A., Pronin N.A., Metelev S.Yu. Modern approaches to testing ADAS systems at all stages of development.....	233
Molev Yu.I., Cherevastov M.G., Bazhan P.I., Zakharov L.A., Anikin A.A., Kuznetsov Yu.P., Slusarev A.S. Analysis of changes in vehicle construction, in the production of the conversion of vehicles on the territory of Nizhniy Novgorod region in 2015.....	243
Plotnikov S.A., Cheremisinov P.N., Bazhan P.I., Zakharov L.A. Investigation of diesel combustion process by working on diesel 4ЧН 11,0/12,5 fuel with raxed rape seed oil..	249

ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

УДК 519.254

А.А. Голованов¹, Е.Н. Пелиновский¹⁻³

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ОПРАВДЫВАЕМОСТИ ПРОГНОЗА ЭКСТРЕМУМОВ ТЕМПЕРАТУР В НИЖНЕМ НОВГОРОДЕ

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва¹,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²,
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород³

В настоящее время существует множество метеорологических организаций, публикующих прогнозы погоды, зачастую не совпадающие между собой. В силу значимости данных прогнозов для многих отраслей экономики, большую роль играет оценка степени оправдываемости прогноза одной из важнейших метеорологических величин – температуры (минимальной и максимальной) на основе данных с нескольких метеорологических ресурсов. Методологической основой исследований является математическая статистика. Полученные результаты представлены по сезонам и в целом по обследуемому региону на срок до шести дней вперед. Показано, что наименее оправдываемым сезоном прогноза экстремумов температур оказалась зима.

Ключевые слова: качество прогноза погоды, оправдываемость прогноза температур.

Введение

Погодные условия во многом определяют эффективность работы народного хозяйства и бизнеса, оказывая на деятельность человечества в целом. Особо отметим влияние погодных условий на планирование туризма и отдыха; этой проблеме сейчас уделяется большое влияние [1]. Прогноз погоды является сложной и комплексной задачей физики атмосферы, решаемой с применением аналитических, численных и статистических методов [2-5]. Для потребителей важно знать, насколько оправдываются прогнозы отдельных характеристик погоды, и этим вопросам посвящен ряд работ [6-10]. Здесь используются разные методы, такие как оценка среднеквадратичной ошибки [6] и анализ компонент метеорологических моделей [7, 8].

В данной работе поставлена цель независимо оценить эффективность прогнозов температуры в Нижнем Новгороде, предоставляемых различными сайтами. Из всех метеорологических характеристик был выбран анализ экстремумов температур (ежедневных максимальных и минимальных значений температуры воздуха). Для сравнительной оценки качества прогнозов взяты три популярных метеоресурса: weather.com, gismeteo.ru и meteoinfo.ru. Оправдываемость прогноза проверяется с помощью методов математической статистики [5,11]. Данное исследование ограничено исключительно рамками Нижнего Новгорода. Оцениваются ежедневные прогнозы до 6 дней вперед по максимумам и минимумам температур. Периоды, в течение которых собирались данные: 01.10.2016 – 30.04.2017 и 01.10.2017 – 30.04.2018. Сбор данных с сайтов метеорологических организаций осуществлялся в автоматическом режиме.

Выбранные метеорологические информационные системы

Нижеперечисленные метеоресурсы выбраны в силу их популярности на территории России.

Weather.com – сайт компании The weather company, которая основана в 1982 году и с 2016 года является дочерней организацией IBM. Она является одной из самых авторитетных метеорологических компаний. Метеоресурсом пользуются 100 млн пользователей в месяц.

Gismeteo.ru – российская метеорологическая компания, начавшая свою деятельность в 1990-х гг. Ресурс посещается около 10 млн пользователей в месяц с прогнозами для 13 000 населенных пунктов России.

Meteoinfo.ru – официальный сайт Гидрометцентра России – организации, являющейся членом Всемирной Метеорологической Организации (ВМО).

Обычно метеорологические информационные системы предоставляют прогнозы на различные временные периоды. Выбранные выше ресурсы дают прогнозы до шести дней вперед. Конечно, некоторые из них предоставляют прогнозы и на больший срок, но именно диапазон в шесть дней является наиболее общим для них. Это позволит сравнить оправдываемость прогноза на одинаковый срок.

Хранение данных температуры и расчётов

Собираемые данные – максимумы и минимумы температур. Собираются шесть чисел максимумов (прогноз до 6 дней вперед) и столько же минимумов. Такой размер прогнозирования является среднесрочным, и зачастую именно он исследуется в метеорологии [9]. В результате получаются два листа в таблице для каждого информационного ресурса, одна для максимумов, а другая – для минимумов; всего 6 листов. На рис. 1 показан фрагмент таблицы с данными с одного ресурса для максимальной температуры. Строки в данной таблице представляют конкретные даты, во время которых производится прогноз до шести дней вперед. Первый столбец – температура в текущую дату (0-дней), остальные столбцы – температуры предсказаний на будущие дни (1-6 дней). Обработка данных производится по выделенным (серым) элементам таблицы, которые соответствуют предсказаниям на одну и ту же дату. Левый нижний конец такой диагонали есть реальная температура этого дня (например, B8), следующий элемент (C7) есть температура на этот же день, предсказываемая накануне, последующий элемент (D6) есть прогностическая температура на тот же день, предсказанная за два дня до этого, и т.д., вплоть до ячейки H2, где представлена прогностическая температура за 6 дней до этого. Несколько элементов таблице в начале и конце рассматриваемого периода времени приходится обрезать, но если период времени достаточно большой, то уменьшение числа элементов не влияет на репрезентативность выводов.

Обозначим реально наблюдаемые данные температур как x_n (n – соответствует дате измерений) и прогностические данные как y_{ni} , где индекс $i = 1-6$ соответствует прогнозам на этот же день, сделанным за i дней до этого. Все данные разбиты по сезонам, чтобы иметь однородные выборки, так что число данных в каждой выборке около 60-90. На плоскости x - y получаем облако точек (рис. 2), где каждому x_n соответствует шесть значений y_{ni} . Идеальному прогнозу соответствует биссектриса на данной плоскости, в реальности же имеется разброс между измеренными и прогностическими данными.

В качестве количественного критерия оправдываемости прогноза выберем здесь коэффициент детерминации, известный как R^2 [5, 11-13]

$$R_i^2 = 1 - \frac{\sum_{n=1}^N (y_{ni} - x_i)^2}{\sum_{n=1}^N (y_{ni} - \bar{x})^2}, \quad (1)$$

где \bar{x} – среднее значение температуры по выборке из N элементов. По сравнению с существующими метриками качества прогнозов [12, 13] оценка R^2 вполне информативна и в какой-то степени устойчива к выбросам и нулевым значениям.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	дата/диапазон прогнозирования	0-дней	1-дней	2-дней	3-дней	4-дней	5-дней	6-дней
2	1.10.2017	8	8	9	10	10	12	12
3	2.10.2017	7	6	10	9	11	10	11
4	3.10.2017	7	10	8	10	12	12	12
5	04.10.2017	8	8	10	12	12	13	11
6	05.10.2017	7	10	11	13	14	13	10
7	06.10.2017	10	11	14	14	11	11	10
8	07.10.2017	12	14	15	12	11	12	11
9	08.10.2017	13	15	13	10	11	10	9
10	09.10.2017	16	13	11	11	10	10	8
11	10.10.2017	14	12	12	10	9	8	7

Рис. 1. Формат хранения экстремумов температур

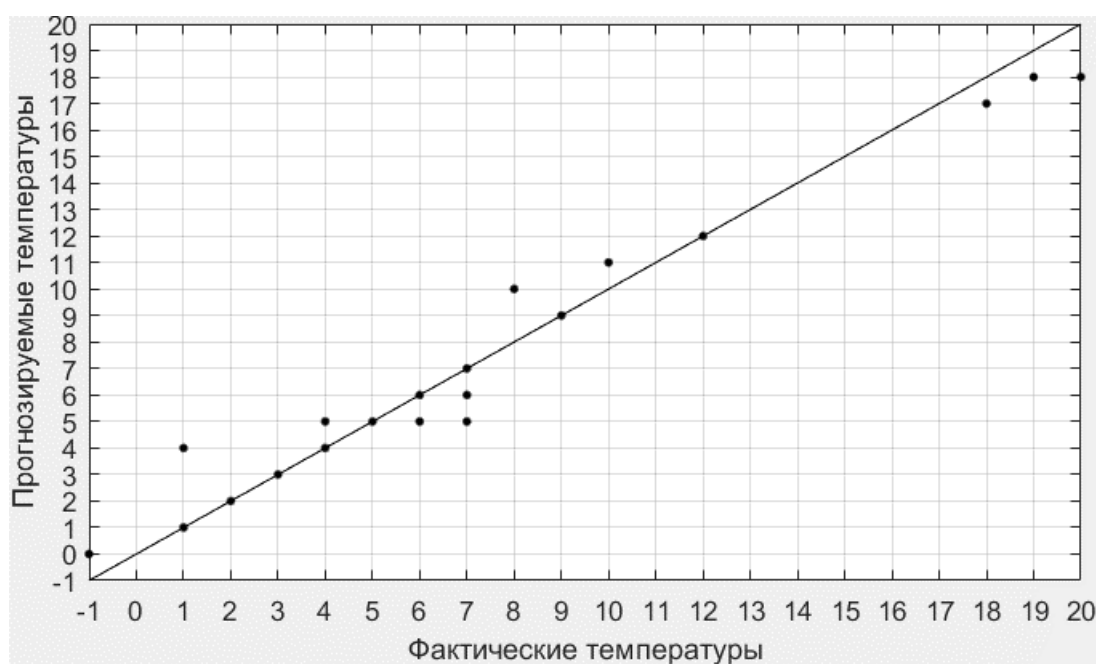


Рис. 2. Представление анализируемых данных (для максимумов температур с сайта weather.com за октябрь-ноябрь 2016 года) на плоскости, сплошная линия – модель «идеально» спрогнозированной температуры

Полученные результаты

По описанному выше принципу осуществлено вычисление R^2 по трём сезонам (осень, зима, весна) для трёх метеоресурсов (weather.com, gismeteo.ru, meteoinfo.ru) по максимумам и минимумам температур на срок от 1 до 6 дней вперед. В табл. 1 показаны значения R^2 для максимальных и минимальных температур в осенний период. Строки соответствуют размеру прогноза, а столбцы – точности для трёх метеоресурсов. В каждой строчке верхние значения соответствуют осеннему периоду 2017 и 2016 года, а нижние – только 2016 года (уменьшенное

количество данных). Серым цветом в данных выделено наибольшее значение величины R^2 среди трех метеосайтов. Как и следовало ожидать, коэффициент R^2 убывает с ростом периода прогноза и оправдываемость прогноза на 6 дней составляет меньше 70%. Если же говорить о сопоставлении разных метеоресурсов, то однодневные прогнозы осенью делаются лучше сайтом weather.com (97%). Вместе с тем, различие в процентах для максимальных температур незначительно (2%), а вот для минимальных температур оно больше (7%). Точность прогноза на 2 дня убывает незначительно в случае прогноза максимальных температур (93% в среднем с разбросом 1% в обе стороны от среднего), и она более заметна в прогнозе минимальных температур (83-87%). Точность прогнозов на шесть дней самая плохая: по максимальной температуре разброс 13%, с наилучшим прогнозом в 79%, а по минимальной температуре наилучший прогноз 70%. В целом в осенний период лучший прогноз максимальной температуры выдавал сайт weather.com, а по минимальной температуре – сайт gismeteo.ru. Отметим также, что учет двух осенних сезонов 2016 и 2017 года привел в целом к увеличению коэффициента детерминации по сравнению с данными только одного сезона 2016 года, что говорит о необходимости анализа длительных рядов.

Таблица 1

Точность прогноза максимумов и минимумов температур за период октябрь-ноябрь 2016 и 2017 года (верхние значения) в сравнении с 2016 годом (нижние значения)

про- гноз/ сайт	MAX			MIN		
	weather.com	gismeteo.ru	meteoinfo.ru	weather.com	gismeteo.ru	meteoinfo.ru
1-дней	0,97	0,95	0,95	0,94	0,94	0,87
	0,94	0,95	0,95	0,90	0,92	0,80
2-дней	0,92	0,93	0,94	0,83	0,89	0,87
	0,92	0,92	0,95	0,88	0,83	0,80
3-дней	0,90	0,90	0,90	0,76	0,89	0,79
	0,89	0,89	0,93	0,63	0,84	0,67
4-дней	0,85	0,83	0,86	0,73	0,80	0,72
	0,86	0,81	0,88	0,60	0,73	0,55
5-дней	0,83	0,81	0,79	0,72	0,77	0,63
	0,83	0,74	0,77	0,69	0,73	0,41
6-дней	0,79	0,75	0,68	0,66	0,70	0,61
	0,75	0,68	0,67	0,65	0,67	0,56

Прогнозы максимумов/минимумов зимнего периода (табл. 2) на 1-2 дня вперед не уступают по точности осеннему периоду (83-97%), но при увеличении времени прогнозирования тенденция к уменьшению точности резко обостряется. Для прогнозов на 4-6 дней, значение точности приближается к 50% отметке, а шестидневные прогнозы максимальных температур становятся чрезмерно низкими: 30-45%. Выделить здесь однозначно наиболее лучший сайт затруднительно.

Отметим, что в целом максимальные температуры зимой предсказывается хуже, чем осенью, а при прогнозах на 4-6 дней точность становится ниже 50%. Таким образом, естественное предположение, что стабильные сезоны лучше прогнозируются, данными не подтверждается.

Таблица 2

Точность прогноза максимумов и минимумов температур за зимний период (декабрь-февраль) 2016/2017 и 2017/2018 годов (верхние значения) в сравнении с 2016/2017 годом (нижние значения)

прогноз/ сайт	MAX			MIN		
	weather.com	gismeteo.ru	meteoinfo.ru	weather.com	gismeteo.ru	meteoinfo.ru
1-дней	0,95	0,83	0,93	0,94	0,88	0,92
	0,95	0,92	0,91	0,89	0,89	0,88
2-дней	0,85	0,83	0,85	0,97	0,82	0,92
	0,86	0,82	0,84	0,91	0,79	0,90
3-дней	0,80	0,79	0,77	0,88	0,78	0,82
	0,75	0,76	0,72	0,87	0,58	0,73
4-дней	0,63	0,65	0,65	0,80	0,59	0,57
	0,69	0,54	0,58	0,79	0,23	0,33
5-дней	0,55	0,58	0,48	0,33	0,44	0,56
	0,46	0,46	0,43	0,55	0,16	0,46
6-дней	0,45	0,37	0,30	0,27	0,41	0,31
	0,35	0,20	0,07	0,15	0,12	0,14

Прогнозы максимумов и минимумов весеннего периода (табл. 3) имеют такую же оправдываемость, как и в осенний период. Прогнозы на один день вперёд довольно точные, и удваивание объёма данных для вычисления R^2 почти не повлияло на их значения (за исключением gismeteo.ru). Двухдневные прогнозы оправдываются тоже достаточно хорошо: 93-94%. Увеличение данных за два сезона приводит к возрастанию R^2 на 2-9%. Трёхдневные прогнозы также обладают высокой точностью – около 90%.

Таблица 3

Точность прогноза максимумов и минимумов температур за весенний период (март-апрель) 2018 года (верхние значения) и 2017 года (нижние значения)

прогноз/ сайт	MAX			MIN		
	weather.com	gismeteo.ru	meteoinfo.ru	weather.com	gismeteo.ru	meteoinfo.ru
1-дней	0,97	0,95	0,94	0,99	0,94	0,97
	0,94	0,86	0,94	0,95	0,82	0,89
2-дней	0,94	0,94	0,93	0,97	0,91	0,95
	0,90	0,85	0,91	0,91	0,67	0,81
3-дней	0,90	0,91	0,90	0,95	0,86	0,92
	0,85	0,83	0,83	0,87	0,69	0,72
4-дней	0,92	0,90	0,90	0,89	0,83	0,91
	0,83	0,81	0,79	0,79	0,68	0,69
5-дней	0,80	0,79	0,81	0,73	0,78	0,84
	0,74	0,71	0,65	0,55	0,65	0,42
6-дней	0,70	0,69	0,72	0,67	0,71	0,70
	0,66	0,54	0,51	0,24	0,45	0,20

Оправдываемость прогнозов максимальных температур на 5 и 6 дней вперед достаточно высока и варьируется от 69 до 81%. Увеличение объема выборки для таких среднесрочных прогнозов сильнее влияет на величину R^2 , чем для краткосрочных прогнозов на 1-3 дня вперед. Для прогнозов минимальных температур точность примерно такая же, как и максимальных температур, но краткосрочные прогнозы weather.com наиболее оправдываемые, а на 4-5 дней лучший прогноз выдает meteoinfo.ru. Оправдываемость прогноза минимальных температур весной на 1-3 дня вперед варьируется от 86 до 99%. Естественно, с увеличением срока прогнозов точность падает.

Для количественного сопоставления различных метеоресурсов мы дали один балл метеоресурсу, который показал наиболее высокое значение величины R^2 . Если два или три ресурса дают максимальное значение величины R^2 , то им также присваивается один балл. Из-за этого сумма баллов не всегда равна шести (сколько дней прогноза). Результаты сравнения представлены в табл. 4. Серым цветом в таблице выделен ресурс, который имеет наибольшее количество баллов для различных сезонов. Из этих данных следует, что наиболее оправдываемым метеоресурсом является weather.com.

Таблица 4

Сравнение баллов метеорологических информационных систем по сезонам

	осень		Зима		весна	
	max	min	max	min	max	min
weather.com	4	1	4	4	4	3
gismeteo.ru	1	6	2	1	2	1
meteoinfo.ru	3	0	2	1	1	2

Заключение

Таким образом, анализ работы различных метеоресурсов по прогнозу ежедневной температуры на срок от одного до шести дней привел к следующим двум важным выводам.

Степень оправдываемости прогнозов экстремальных температур действительно убывает по мере увеличения периода прогнозирования, что теперь можно характеризовать количественно. Наименее оправдываемые прогнозы выдавались на зимний период по сравнению с весенними и осенними сезонами, что представляется несколько неожиданным. В нашем распоряжении нет данных по летнему периоду, поэтому полученный вывод нуждается в дальнейшей проверке.

Представленный анализ является независимым, и у авторов нет конфликта интересов ни с одной из этих метеорологических организаций.

Исследование опасных явлений для одного из авторов (ЕП) поддерживается в рамках гранта РФФИ 18-05-80019.

Библиографический список

1. **de Freitas, C.R.** Tourism climatology: evaluating environmental information for decision making and business planning in the recreation and tourism sector / C.R. de Freitas // International Journal of Bilmeteorology. – 2003. – Vol. 48 – P. 45-54.
2. **Вайсберг, Дж.** Погода на Земле / Дж. Вайсберг. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 247 с.
3. **Гордин, В.А.** Математические задачи гидродинамического прогноза погоды / В.А. Гордин. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 256 с.
4. **Гордин, В.А.** Математика, компьютер, прогноз погоды и другие сценарии математической физики / В. А. Гордин. – М.: Физматгиз, 2010 – 736 с.
5. **Wilks, D.** Statistical methods in atmospheric science / D. Wilks // Elsevier. – 2006 – 627 pages.

6. **Bhomia, S.** Accuracy assessment of rainfall prediction by global models during the landfall of tropics / S. Bhomia, N. Jaiswa, C. M. Kishtawal // *Meteorological Applications*. – 2017. – Vol. 24. – Issue 3. – P. 503-511.
7. **Mason, I.** A model for assessment weather forecast / I. Mason // *Australian Meteorological Magazine*. – 1982. – Vol. 30. – P. 291-302.
8. **Pascal, J.M.** Quality of weather forecast / J.M. Pascal, T. J. Ian, David B. Stephenson // *Quarterly Journal of the royal Meteorological Society*. – 2006. – Vol. 132 (614). – P. 25-33.
9. **Palmer, M.** Estimates of flow-dependent predictability of wintertime Euro-Atlantic weather regimes in medium-range forecasts / M. Palmer, T.N. Matsueda // *Quarterly Journal of the royal Meteorological Society*. – 2018. – Vol 144 (713). – P. 1-16.
10. **Choungla, M.** Towards improved objective analysis of lake surface water temperature in a NWP model: preliminary assessment of statistical properties / M. Choungla, K. Eerola, E. Kourzeneva, L. Rountu, F.Pan, C.R. Duguay // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. – 2017. – Vol. 69, No. 1. – P. 5-9.
11. **Пелиновский, Е.Н.** Методы прогнозирования природных катастроф. Часть 1. Статистические методы прогноза / Е.Н. Пелиновский, Т.Г. Талипова, И.И. Диденкулова, А.А. Куркин. – Нижний Новгород, 2014. – 56 с.
12. **Бахрушин, В.Е.** Методы оценивания характеристик нелинейных статистических связей / В.Е. Бахрушин // *Системные технологии*. – 2011. – № 2 (73). – С. 9-14
13. **Chen, C.** A new accuracy measure based on bounded relative error for time series forecasting / C. Chen, J. Twycross, J. M. Garibaldi // *PLoS One*. – 2017. – Vol. 12, No. 3 – e0174202 (23 pages).

*Дата поступления
в редакцию: 25.09.2018*

A.A. Golovanov¹, E.N. Pelinovsky¹⁻³

EVALUATION OF FORECAST PERFORMANCE DEGREE OF EXTREMAL TEMPERATURES IN NIZHNY NOVGOROD

National research university – Higher school of economics, Moscow¹

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev²

Institute of applied physics, Nizhny Novgorod³

Purpose: an independent evaluation of degree of temperatures forecast performance.

Design/methodology/approach: an automatized daily collection and calculation via GAS/Matlab scripts, R-square usage, storage data in the table format.

Findings: the methodology of devising the temperature forecast accuracy

Research limitations/implications: maximum and minimum temperatures forecast from 1 to 6 days ahead, observed meteorological databases: weather.com, gismeteo.ru, meteoinfo.ru, observation period is 01.10.2016-30.04.2017, 01.10.2017-30.04.2018.

Key words: quality of weather forecast, performance of temperature forecast, accuracy weather evaluation.

УДК 004.932.721

М.М. Гордеев, А.Н. Санников, М.Е. Бушуева

**ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ
«HOUGH TRANSFORM» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ OPENCV**

Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева

Задача обнаружения концентрических окружностей – одна из актуальных задач цифровой обработки изображений. Существующий алгоритм Хафа имеет ряд недостатков, связанных с обработкой изображений, отличающихся резкой сменой цветовой гаммы фона, большим зашумлением и яркостью. Рассматриваемый в данной статье модифицированный алгоритм позволяет выявлять минимальные окружности, что значительно увеличит применимость данного метода. В статье приводится описание модификации, а также результаты тестирования алгоритма на разных выборках, доказывающие его работоспособность и эффективность.

Ключевые слова: обнаружение объектов-окружностей, распознавание образов, цифровая обработка изображений.

Введение

В настоящее время, исходя из потребности определения на изображениях простых фигур, количество приложений с использованием компьютерного зрения стремительно растет. Одним из наиболее распространенных алгоритмов для обработки изображений является преобразование Хафа. «Hough Transform» – это алгоритм, предназначенный для обнаружения прямых и кривых линий на полутоновых или цветных изображениях, частными случаями которых являются эллипсы и окружности. Данный алгоритм уже применяется для определения линий горизонта, распознавания контуров зданий, нахождения дорожной разметки, однако наиболее широкое применение данное преобразование получило в медицине. С помощью «Hough Transform» стало возможным диагностирование циркулирующих опухолевых клеток, которые до недавнего времени вызывали летальный исход человека почти со сто процентной вероятностью. Активно используется данный метод и для выявления диабетической ретинопатии на ранних стадиях, что позволяет задержать резкое падение зрения у людей, страдающих сахарным диабетом. Исходя из вышесказанного, исследование выбранной области является крайне актуальным в наше время.

Обобщенное преобразование Хафа

Преобразование Хафа используется для обнаружения объектов, описываемых как аналитическими уравнениями, так и их моделями. Задача нахождения того или иного объекта на изображении может быть выполнена вычислением позиции модели и преобразуется в задачу определения параметров преобразования, которые отображают положение модели.

В простейшем случае преобразование Хафа представляет собой линейное преобразование для поиска прямых, которые могут быть заданы уравнением (1) и может быть вычислена для любой пары точек (x, y) , находящихся в системе координат рассматриваемого изображения. В формуле (1) m – коэффициент наклона прямой, b – точки пересечения.

$$y = mx + b \quad (1)$$

Основываясь на данном утверждении, прямая может быть представлена в виде точки с координатами (b, m) в пространстве параметров. Однако возникает проблема: вертикальные прямые имеют бесконечные значения для параметров m и, соответственно, для удобства вычислений прямую представляют с помощью длины радиус-вектора, являющимся ближайшим к

началу координат точки, принадлежащей прямой, r , и углом между этим вектором и осью координат θ . Таким образом, уравнение примет вид (2) и может быть преобразовано в выражение (3). Такое пространство, связанное с каждой прямой на изображении парой (r, θ) , получило название пространством Хафа [6].

$$y = \left(-\frac{\cos\theta}{\sin\theta}\right)x + \left(\frac{r}{\sin\theta}\right) \quad (2)$$

$$r = x\cos\theta + y\sin\theta \quad (3)$$

Рассмотрим задачу обнаружения объекта произвольной формы, заданного эталонным изображением. В этом случае важно, что расстояние R от текущего пикселя границы до ее центра является функцией $R(\phi)$ от угла ϕ радиус-вектора, направленного от точки контура к центру. Причем понятие «центр» соответствует некой условной точке локализации O (рис. 1). Предполагается, что ее выбор является неединственным, а положение рядом с центром тяжести периметра объекта минимизирует ошибки, обусловленные неточностью оценки ориентации края.

Для определения простых форм функция $R(\phi)$ может быть описана аналитически. Однако для большинства форм это невозможно. Тем не менее, Ballard доказал, что для запоминания информации о форме можно использовать специальные просмотрные таблицы (look-up-table), содержащие дискретные значения $R(\theta)$ для различных значений углов. Соответственно, алгоритм состоит из этапов обучения детектора Хафа путем составления LUT по эталонному изображению и этапа обнаружения объекта на тестовом изображении путем голосования контурных точек с использованием этой LUT. Если же рассматривать обнаружение объекта произвольной формы в условиях, когда объект кроме перемещения еще и вращается в плоскости изображения, то в данном случае радиус-вектор в краевой точке является функцией относительного угла между направлением градиента и направлением радиуса-вектора.

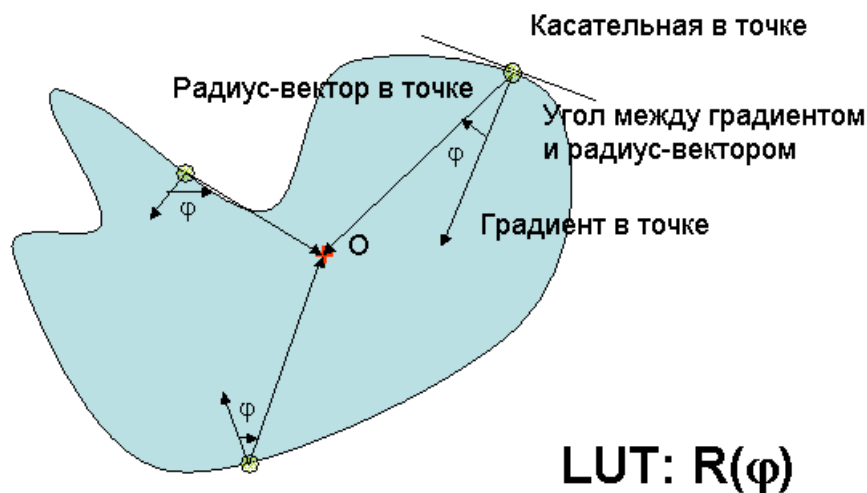


Рис 1. Графическое представление обобщенного преобразования Хафа

Постановка задачи

Цель данного исследования заключается в оптимизации существующего алгоритма Хафа и его адаптации для поиска наиболее мелких объектов-окружностей путем обработки ядер меньшего размера с заданными коэффициентами.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи.

1. Обойти проблему разрастания трехмерного накопителя (небольшого зашумления).

2. Решить проблему «центра-кандидата» – так как для каждого центра выбирается только одна окружность, то в случае существования концентрических окружностей, сделать так, чтобы использовалась не только одна из них [1].

3. Выполнить контурный анализ.

Рассмотрим реализацию исходного алгоритма. Точки, лежащие на одной окружности можно представить формулой (1).

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = R^2 \quad (4)$$

В формуле (4): $(a; b)$ – координаты центра окружности; R – радиус данной окружности. Тогда семейство окружностей будет задаваться формулой (5).

$$F(a, b, R, x, y) = (x - a)^2 + (y - b)^2 - R^2 \quad (5)$$

Как видно из формулы (2), для нахождения заданных окружностей необходимо задавать три параметра, а именно координаты центра окружности и ее радиус, что приводит к увеличению пространства Хафа. Данный процесс негативно сказывается на скорости работы алгоритма, уменьшая его быстродействие. Для того чтобы исключить данный аспект, для поиска окружностей применяется градиентный метод Хафа [2].

Одним из основных этапов градиентного метода Хафа является определение границ (ребер) – таких кривых, вдоль которых происходит резкое изменение яркости или других видов неоднородностей. Выделяют следующие случаи возникновения краёв:

- изменение освещенности;
- изменение цвета;
- изменение глубины сцены (ориентации поверхности).

Таким образом, запоминается расположение каждой ненулевой точки на изображении краев. Центры-кандидаты затем выбираются из тех точек накопителя, величины которых выше заданного порога и, одновременно, больше всех непосредственных соседей; сортируются в порядке убывания их величины в накопителе так, что центры с наибольшим количеством пикселей выбираются первыми. Далее для каждого центра, анализируются все ненулевые пиксели в соответствии с их расстоянием от центра. Обработывая от наименьших расстояний до наибольших радиусов, выбирается единственный радиус, который лучше всего подходит ненулевым пикселям. Центр сохраняется, если он имеет достаточное количество ненулевых пикселей на краях изображения и, если расстояние от любого ранее выбранного центра удовлетворяет заданному значению [3, с. 250].

Описание модифицированного алгоритма

Учитывая специфику поставленной задачи, был реализован алгоритм компьютерного зрения с использованием библиотеки OpenCV, адаптированный для поиска на изображениях окружностей минимального размера. Рассмотрим его подробнее. На начальном этапе осуществляется предварительная обработка изображения – сглаживание, которое обеспечивает устранение шума на поступившем на вход изображении. При этом используется тип сглаживания – CV_GAUSSIAN – свертка изображения с гауссовым ядром размера 5x5 по умолчанию, если пользователем не задан иной параметр.

Перед началом основного цикла алгоритма применяется градация серого для изображения. Задается тип CV_8CU1 (8-битный, беззнаковый, 1-канальный). Используем полезный метод хранения и сравнения графических объектов – контурный анализ. При его проведении полагается, что контур содержит необходимую информацию о форме объекта, однако внутренние точки в рассмотрение не берутся. Важность использования контурного анализа заключается в слабой устойчивости к помехам, что дает возможность успешно получить изображение на контрастном фоне с отсутствием помех. Получить контуры помогает детектор Кенни. После его обработки мы имеем бинарное изображение, где границы объектов четко определяют сформированные совокупности пикселей.





Чтобы манипулировать полученным контуром, нужно его закодировать, используя цепной код Фримена. Он применяется для представления границы в виде совокупности отрезков, заданных кодами направления и длин на основе 4- или 8-связной решетки. При нахождении контуров на двоичном изображении выбирается режим поиска CV_RETR_LIST – размещение найденных контуров сортированным списком и метод аппроксимации (CV_CHAIN_APPROX_SIMPLE), сжимающий горизонтальные, вертикальные и диагональные сегменты. После эквализации контуров, что обеспечивает инвариантность к масштабу, выполняется перебор всех найденных контуров и отбор по максимальной схожести к шаблону. Ключевой признак – площадь (наиболее минимальная). Отобранные окружности вместе с радиусом и последовательностью 2D-точек передаются функции, которая отрисовывает данные объекты на уже новом изображении, подающемся отфильтрованным на выход алгоритма. Функция меню отвечает за проверку заданных параметров и тип изображения, а также запускает его на последовательную обработку данными операциями в четко установленном порядке.

Тестирование

Для реализации разработанного алгоритма была написана программа в среде Visual Studio 2015 на языке C++ для 64-разрядной операционной системы Windows, которая принимает на вход изображение, обрабатывает заданные пользователем параметры и осуществляет поиск окружностей, подавая на выход отфильтрованное изображение. Для проведения тестирования и сравнительного анализа модифицированного алгоритма с исходным были выбраны различные изображения, разделенные по представленной ниже классификации (табл. 1):

Таблица 1

Результаты тестирования

Использование исходного алгоритма	Использование модифицированного алгоритма
Тестирование зашумленного изображения на темном фоне	
 <p style="text-align: center;">Рис. 2</p>	 <p style="text-align: center;">Рис. 3</p>
Тестирование дорожной разметки и городского пейзажа	
 <p style="text-align: center;">Рис. 4</p>	 <p style="text-align: center;">Рис. 5</p>

Тестирование в области медицины



Рис. 6

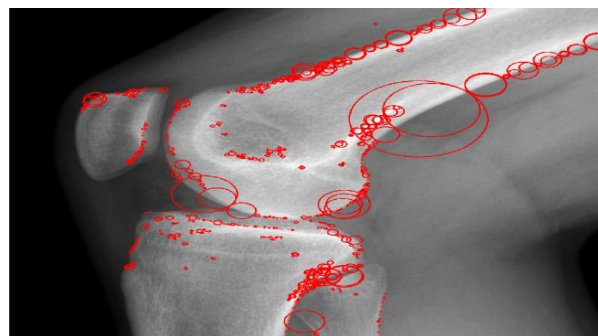


Рис. 7

Результаты

В ходе исследования были получены следующие результаты.

1. За счет свертки исходного изображения с гауссовым фильтром удалось адаптировать алгоритм к чувствительности шумов (на темном фоне при свете фонарей он продолжает находить мелкие объекты-окружности так же эффективно (рис. 3).
2. В ходе экспериментального тестирования установлено, что пороговое значение оказывает слабое воздействие на результат работы алгоритма, а уменьшение размера гауссова ядра, наоборот, дает наиболее точное приближение к действительным границам и контурам изображения (рис. 7).
3. Были найдены ключевые пересечения на изображениях. Причем если в исходном алгоритме это линии соприкосновения окружностей достаточно большого радиуса, то в модифицированном – четкая грань контрастных объектов разной яркости.

Заключение

Создано приложение, в основе которого лежит обнаружение мелких деталей на объектах, имеющих форму окружностей. Специфичная его черта – предварительная операция свертки исходного двумерного изображения с ядром перед использованием модифицированного алгоритма. Это способствует получению оптимального решения задачи поиска границ объектов на изображениях.

Реализован на языке C++ адаптированный к задаче распознавания алгоритм компьютерного зрения с наличием выбора для пользователя исходных параметров. В результате тестирования было установлено наилучшее сочетание параметров модифицированного алгоритма, обеспечивающего более высокий процент распознавания деталей определенной формы.

Библиографический список

1. **Hough, P.V.C.** Methods, Means for Recognizing Complex Patterns / U.S., Patent 3069654, 1962. P. 188.
2. **Ballard D. H., Ballard D.H.** Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes \ Dslash Pattern Recognition. – 1981. – 13(2). – P. 111-122.
3. **Risse, T.** Hough Transform for line Recognition: Complexity of Evidence Accumulation, Cluster Detection. Computer Vision, Graphics, Image Processing. – 1989. – № 46. – P. 327-345.

4. **Arefi, H.** Levels of detail in 3D building reconstruction from lidar data / H. Arefi, J. Engels, M. Hahn, H. Mayer. – Stuttgart: Stuttgart University of Applied Sciences; Munich: Bundeswehr University Munich, 2008. – 490 с.
5. **Samuel, A.** Inverso. Computer Vision: Ellipse Detection Using Randomized Hough Transform [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.saminverso.com/res/vision/>. (дата обращения 03.09.2018).
6. **Гайдуков, Н.П.** Применение преобразования Хафа для распознавания текста / Н.П. Гайдуков, Е.О. Савкова [Электронный ресурс] // Информатика и компьютерные технологии-2012. – URL: <http://ea.donntu.org/handle/123456789/15585>. (дата обращения 03.09.2018).
7. **Калинкина, Д.** Проблемы подавления шума на изображениях и видео и различные подходы к ее решениям» / Д. Калинкина, Д. Ватонин // Компьютерная графика и мультимедиа: сетевой журнал. – 2005. – №3 (2). – URL: <http://cgm.computergraphics.ru/content/view/74>. (дата обращения 03.09.2018).

*Дата поступления
в редакцию: 16.10.2018*

M.M. Gordeev, A.N. Sannikov, M.E. Bushueva

**OPTIMIZE THE IMAGE PROCESSING ALGORITHM
«HOUGH TRANSFORM» BY USING OPENCV**

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alekseev

Purpose: Optimization of HAF algorithm to adapt it for the search of the smallest objects and further use in various fields of activity including medicine.

Design/methodology/approach: The methodological approach is to convert the original HAF algorithm into a modified version corresponding to the criteria described in the article.

Research limitations/implications: As a result of testing a solution is obtained for finding smaller concentric circles as compared with the original algorithm, which makes it possible to determine more clearly the contour lines of images of varying degrees of brightness, noisiness and color gamut of the background.

Key words: detection of objects-circles, pattern recognition, digital image processing.

УДК 65.012.123

В.Ю. Карпычев

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ (IDEF0) КАК МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ БЛОКЧЕЙН-ТЕХНОЛОГИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Функциональное моделирование на основе стандарта IDEF0 – создание графических моделей любой предметной деятельности, включающих иерархическое описание процессов, операций, ресурсов (информации), инструментария, исполнителей, управления и связей между ними. В статье предложена функциональная модель управления активами различной природы на основе блокчейн-технологии. Модель не только специфицирует основные функциональные блоки исследуемой БЧ-системы, но и наглядно представляет логику ее работы путем последовательной декомпозиции целевой функции до уровня предметных операций. В модели интегрированы понятия предметной области (экономической деятельности) и информационных технологий. Используемый в модели IDEF0-язык позволяет обеспечить понятийный интерфейс предметных и IT-специалистов.

Ключевые слова: управление активами, функциональное моделирование, блокчейн-технологии.

Введение

В настоящее время большое внимание ученых и специалистов в различных областях привлекает блокчейн (БЧ) технология. Известно много определений данного термина. В контексте данной статьи будем рассматривать *блокчейн* как «многофункциональную и многоуровневую информационную технологию, предназначенную для надежного учета различных активов» [1]. На портале «e-library» размещены сведения о сотнях русскоязычных публикаций по БЧ-тематике экономической, правовой, технической и управленческой направленности. Однако среди этого обилия работ только некоторые отличаются глубиной, системностью и доступностью изложения теории БЧ-технологии. В статье предпринята попытка интерпретировать БЧ-технологии в моделях методологии/стандарта SADT/IDEF0.

Для создания модели БЧ-технологии использована книга Д. Дрешера [2] как наиболее отвечающая, по мнению автора, указанным требованиям. Методология IDEF0 изложена во многих работах, в качестве первоисточника рекомендуем [3]. Стандарт IDEF0 принят в США [4] и рекомендован Госстандартом России для исследования структуры, параметров и характеристик производственных и организационно-экономических систем [5, 6]. Главными компонентами IDEF0-модели являются диаграммы, графически представляющие структуру функций предметной области, а также информации и объектов, связывающих эти функции. Функции и их интерфейсы представлены как блоки и дуги соответственно. При IDEF0-моделировании производится декомпозиция предметной контекстной (целевой) функции на согласованные и непротиворечивые функции следующего уровня детализации. Предметная функция любого уровня, начиная с контекстной, преобразует входной поток сущностей – физических объектов или информации в выходной. Будем называть такие потоки **Входом** и **Выходом** функции. Для активации функций необходимы **Управление** (управленческое воздействие), которое определяет условия выполнения функции, и **Механизмы** – средства, непосредственно реализующие функцию. Для поддержки моделирования используются CASE (Computer Aided Software Engineering) средства.

Характеристика предметной области

В качестве предметной области моделирования будем рассматривать экономический оборот активов различной природы. Основная процедура оборота – *обмен* (передача) активов.

В современной экономике значительная часть активов существует в форме документированной цифровой информации, в том числе сведений о количестве актива. Тогда оборот актива – не что иное, как уменьшение количества актива у одного субъекта отношений и приращение его – у другого. При наличии волеизъявления субъектов и необходимых организационно-правовых условий оборот актива можно рассматривать как бизнес-процесс (БП) «Управлять правом владения активом», A_0 . (например, передавать цифровые денежные средства).

IDEF0-модель

Построение IDEF0-модели БП начинается с контекстной диаграммы, A_0 , описывающей в общем виде работу системы в предметной области (рис. 1а).

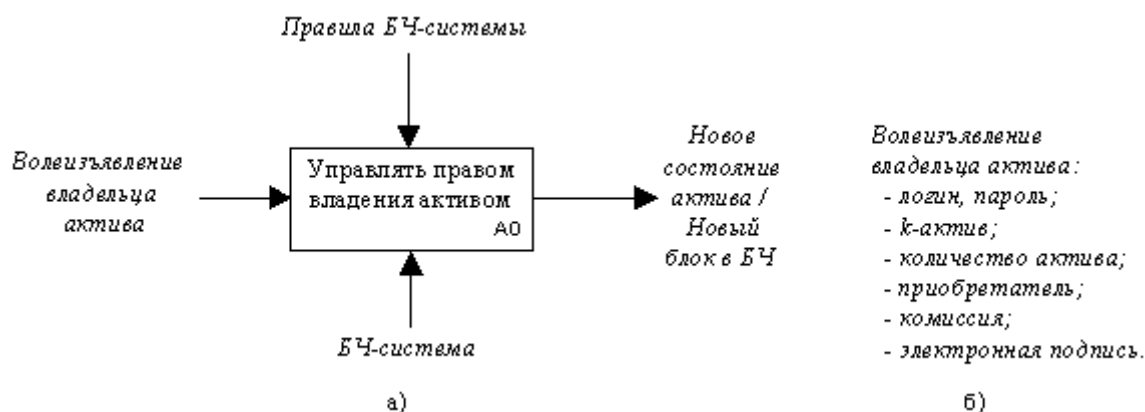


Рис. 1. Контекстная диаграмма БП «Управлять правом владения активом», A_0

В качестве **Входа** будем рассматривать *Волеизъявление владельца актива* на передачу части/всего актива любому приобретателю, отвечающему рассматриваемым ниже требованиям. **Выходом** диаграммы является *Новое состояние <количество> актива* у субъектов экономического оборота. **Управление** сформулируем в общем виде: *Правила работы БЧ-системы*. **Механизм:** техническим средством поддержки БП A_0 , является БЧ-система – автоматизированная система, основные компоненты которой – вычислительные средства (ВС), операторы ВС и P2P-сеть, реализованная в Интернете. Объединим понятие ВС и его оператора термином «узел» и будем рассматривать, соответственно, множество узлов. Некоторые узлы (операторы ВС) являются владельцами/приобретателями актива $N = \{1, n\}$ и используют БЧ-систему по назначению. Остальные – M -узлы (майнеры) – обеспечивают функционирование БЧ-системы (выполняют технологические функции). Множества M и N пересекаются.

Внутренняя организация и функционал БП A_0 , использующего БЧ-систему, имеют оригинальные решения. Кратко рассмотрим их. Любая система поддержки управления правом владения активом должна документировать это право, то есть устанавливать связь владельца и актива. В БЧ-системе документирование права владения осуществляется ведением реестра хронологии транзакций, фиксирующим все факты передачи права владения. Каждая передача права владения описывается данными транзакции: владелец, передаваемый актив, приобретатель актива, количество и время передачи актива. В технических терминах транзакция содержит данные об учетных записях, передающей и принимающей право владения конкретным активом. Данные транзакций хранятся в порядке выполнения в структуре данных БЧ. Включение транзакций в БЧ меняет данные владельцев актива, определяет текущего владельца и подтверждает действительность транзакций. Описанная концепция организации БЧ-системы позволяет переформулировать **Выход** процесса A_0 в терминах БЧ-технологии: *Новый блок в БЧ*.

На рис. 2 представлен первый уровень декомпозиции БП A_0 , который можно рассматривать как последовательное достижение двух предметных целей: «Подтверждение права владения активом» и «Передача права владения активом».

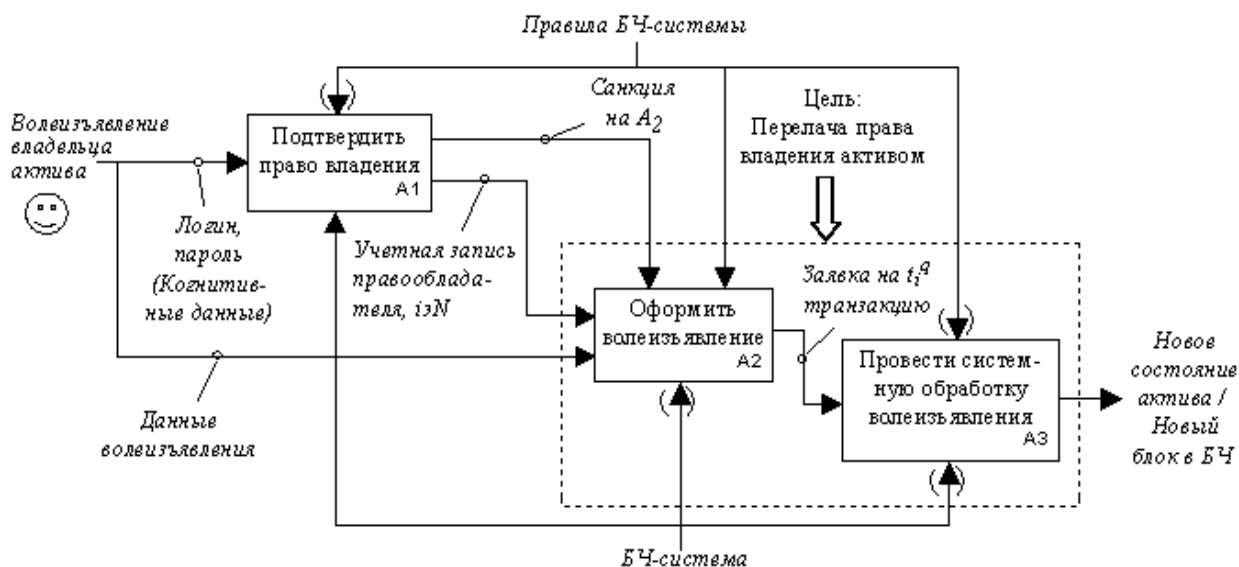


Рис. 2. Декомпозиция БП «Управлять правом владения активом», A_0

Технически право владения активом может быть подтверждено путем предоставления доступа к активу. Тогда в модели процесс A_1 можно именовать «Получить доступ в БЧ-систему» и интерпретировать его назначение как исключение несанкционированного доступа к активу. В БЧ-системе передача права владения активом предусматривает выполнение как предметно значимых действий (процесс «Оформить волеизъявление», A_2), так и исключительно технологических процедур (процесс «Провести системную обработку волеизъявления», A_3). Обработка волеизъявления обеспечивается структурно-параметрическими и функциональными решениями БЧ-системы. Семантика процесса A_1 : каждая транзакция должна содержать информацию, документирующую волеизъявление владельца актива на его передачу. Поэтому доступ в БЧ-систему для выполнения транзакции разрешен только владельцу актива, или, в IT-терминах, владельцу соответствующей учетной записи.

Вход процесса A_1 . Волеизъявление владельца является сложной информационной сущностью (рис. 16). В контексте процесса A_1 используются реквизиты этой сущности *логин* и *пароль* (когнитивные данные). Также для выполнения процесса необходимы данные *хранилища данных (ХД) учетных записей* БЧ-системы. Функционал процесса A_1 включает три стандартные функции управления доступом к учетной записи БЧ-системы: «Идентифицировать владельца» (A_{11}), «Аутентифицировать владельца» (A_{12}) и «Авторизировать <владельца> (Обеспечить доступ к активу)», (A_{13}), на рис. 3.

Процесс A_1 (A_{13}) имеет два **Выхода**.

1. Сущность *Санкция (разрешение функции) на A_2* на проведение операции с активами владельца.
2. Сущность *Учетная запись владельца*, поступающая на вход функции A_{214} .

Управление процессом A_{11} осуществляется в соответствии с *Порядком доступа в БЧ-систему*, который входит в *Правила БЧ-системы*. **Механизмы:** доступ в БЧ-систему производится с ВС любого N -узла сети. Для конкретизации дальнейшего описания работы БЧ-системы будем считать, что доступ происходит с i -узла ($i \in N$). Примечание. Для удобства чтения некоторых диаграмм элементы **Управление** и **Механизмы** оформлены только текстовыми надписями (без соответствующих дуг). Также для повышения информативности на диаграммах приведено несколько графических примитивов, не предусмотренных нотацией

IDEF0. Пользовательская цель «Передача права владения активом» достигается последовательным выполнением процессов A_2 и A_3 (рис. 2) и с предметной точки зрения означает изменение текущего состояния прав владения активом.

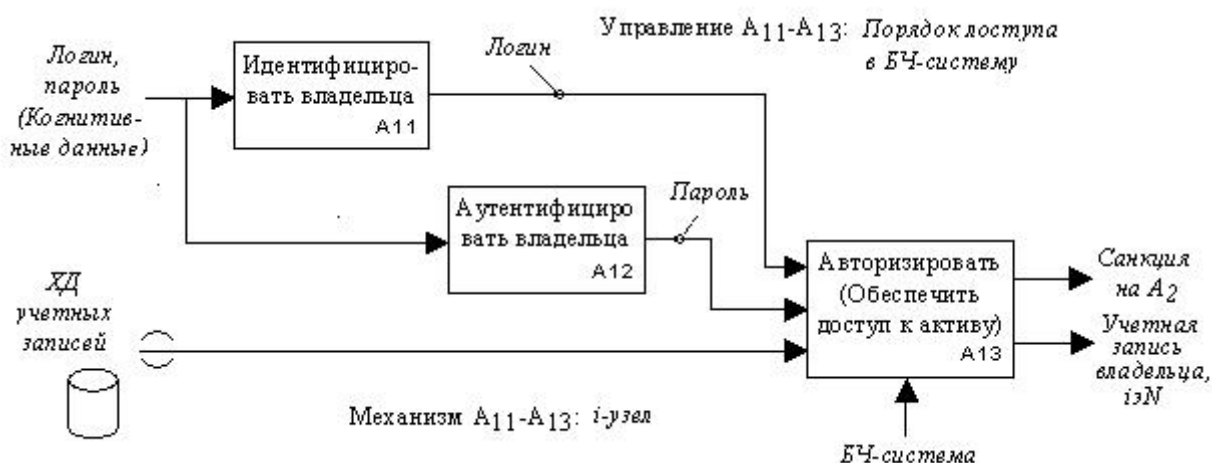


Рис. 3. Декомпозиция процесса «Получить доступ в БЧ-систему», A_1

Процесс «Оформить волеизъявление» A_2 состоит из процессов A_{21} и A_{22} , (диаграмма декомпозиции A_2 не приводится).

Семантика процесса «Сформировать проект заявки на транзакцию» A_{21} заключается в последовательном формировании владельцем актива данных планируемой транзакции. Термин «проект заявки...» использован для формализованного отражения намерений владельца на передачу актива.

На **Вход** процесса поступают когнитивные данные i -владельца: *передаваемый k -актив* ($k \in K$), при наличии у владельца нескольких активов K ; *размер передаваемого актива и комиссии*, которая может быть уплачена за выполнение транзакции, данные j -приобретателя актива ($j \in N$). Также необходимы системные данные *хранилища данных учетных записей* и *текущее время*. Декомпозиция процесса A_{21} приведена на рис. 4.

На диаграмме отражены следующие функции.

- «Выбрать актив», A_{211} при работе БЧ-системы с несколькими активами;
- «Определить размер актива и комиссии», A_{212} , если предусмотрено возмездное выполнение транзакции;
- «Определить приобретателя актива» (учетная запись $j \in N$), A_{213} ;
- «Собрать проект заявки» на транзакцию», A_{214} .

Выход процесса A_{21} (A_{214}) – *проект заявки на транзакцию*, которая содержит следующие реквизиты: идентификатор учетной записи, передающей право владения k -активом; идентификатор учетной записи, принимающей право владения k -активом; количество передаваемого актива; время, выполнения транзакции; комиссия, предлагаемая БЧ-системе (майнеру) за проведение транзакции.

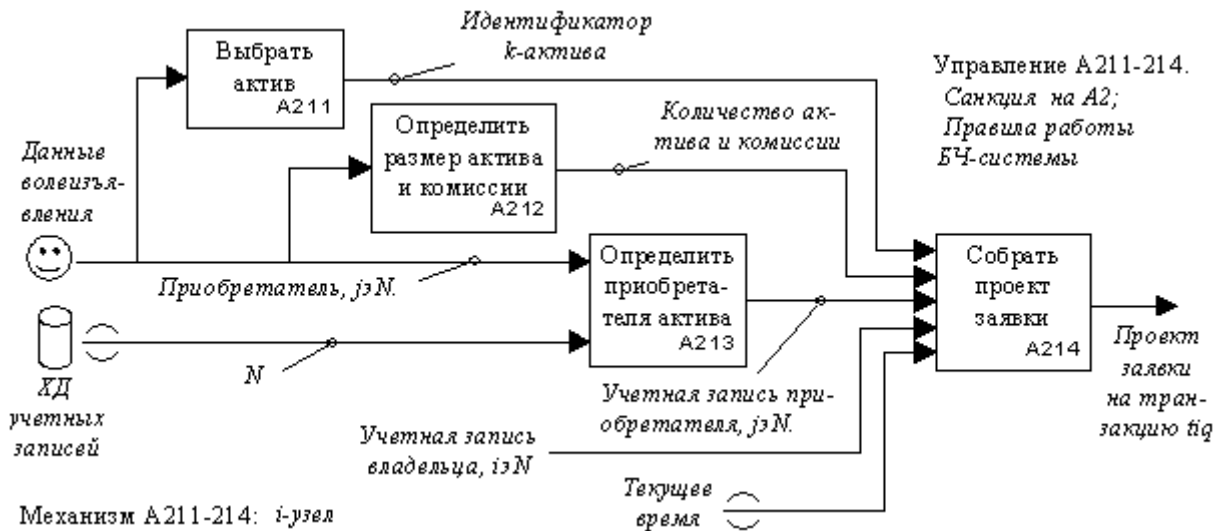


Рис. 4. Декомпозиция процесса «Сформировать проект заявки на транзакцию», A₂₁

Будем полагать, что i -узел формирует проект заявки на q -транзакцию $t_i^q \in T_i$, где T_i – множество транзакций i -узла в БЧ-системе. Для актуализации процесса A₂₁ необходимы **Управление** – санкция процесса A₁₃ (авторизация i -го владельца) и **Механизм**: ВС i -узла. Процесс «Актуализировать заявку на транзакцию», A₂₂ является комплексным и включает в себя предметные и технологические процедуры (рис. 5).

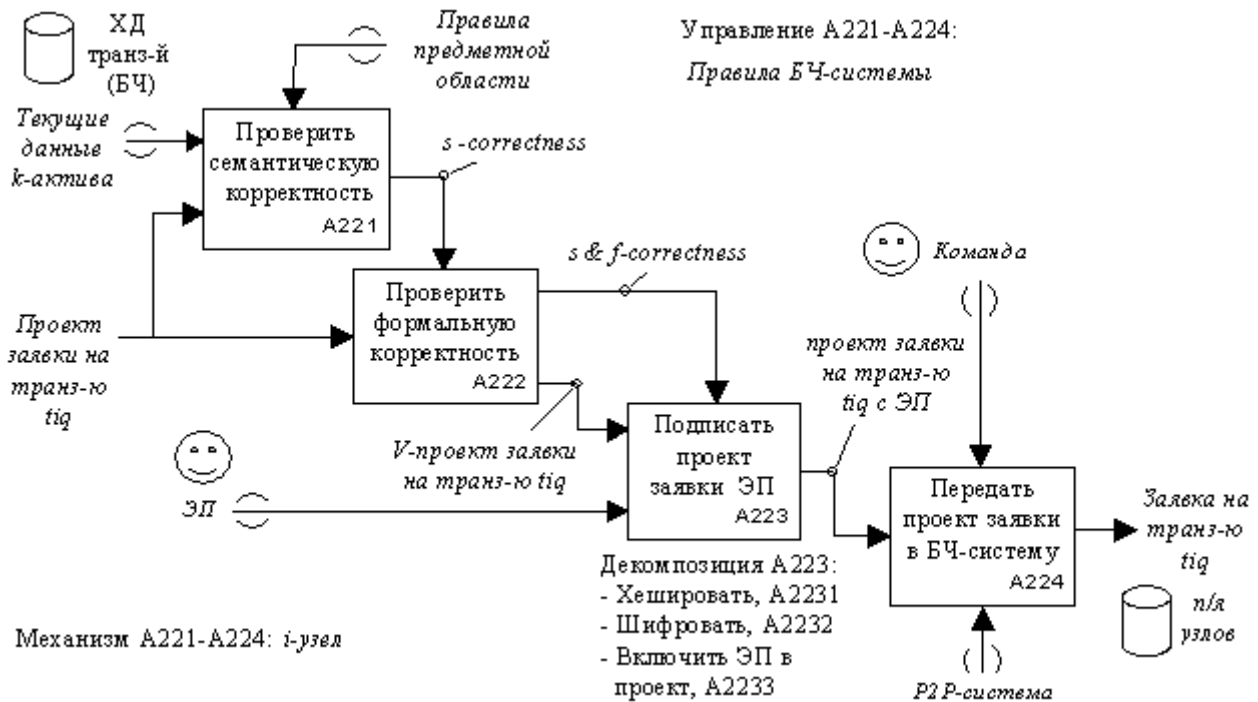


Рис. 5. Декомпозиция процесса «Актуализировать заявку на транзакцию», A₂₂

Семантика процесса A₂₂ заключается в верификации (проверке корректности) и валидации сформированного проекта заявки на транзакцию t_i^q . Под семантической корректностью (*semantic correctness*) будем понимать соответствие данных транзакции правилам предметной области, например:

- количество заявляемого владельцем для передачи актива не должно превышать количество этого актива, находящегося во владении, или предельного значения для одной транзакции;
- количество транзакций владельца актива не должно превышать определенного значения в единицу времени;
- общее количество актива, передаваемого за определенный интервал времени, не должно превышать установленного значения;
- время владения активом не должно быть менее некоторого значения и др.

Формальная корректность (formal correctness) – корректный формат описания транзакции – устанавливается *правилами БЧ-системы*.

Валидация является результатом применения электронной подписи (ЭП), гарантирующей подлинность, невозможность отказа от авторства транзакции (неотрицаемость), неизменность подписанных данных (целостность).

Входами процесса A_{22} (A_{221}) являются *проект заявки на транзакцию t_i^q и текущие данные k -актива*. Отметим, что термин *текущие данные* не является синонимом термину *баланс*, поскольку БЧ реализует транзакционный учет данных (не ведет баланс) актива [6]. Поэтому на вход A_{22} БЧ-система выдает БЧ – хронологию транзакций *k -актива*, данные которых используются в семантической проверке.

Верификация *проекта заявки на транзакцию* включает функции «Проверить семантическую корректность», A_{221} и «Проверить формальную корректность», A_{222} <проекта заявки на транзакцию>.

Выходами функций верификации является верифицированный *V -проект заявки на транзакцию* и санкция *s & f -correctness* на подписание *V -проекта ЭП i -владельца актива (Управление на A_{222})*.

Приведенные выше *Правила предметной области* можно рассматривать как **Управление** функцией A_{221} , а *Правила БЧ-системы* в части требований к формату транзакции – как **Управление** функцией A_{222} .

Процесс A_{22} включает также функцию «Подписать проект заявки ЭП», A_{223} , гарантирующей волеизъявление владельца учетной записи на передачу актива другим учетным записям и исключающей несанкционированный доступ (дополнительно к A_1) к активу в части распоряжения.

Электронная подпись представляет собой хэш-значение (хэш, h) данных *V -проекта заявки на транзакцию (Вход A_{223})*, зашифрованных закрытым ключом, ассоциированным с учетной записью владельца актива.

Подписание *V -проекта заявки на транзакцию ЭП*, A_{223} , в свою очередь, включает выполнение следующих функций (отдельная диаграмма не приводится).

1. «Хешировать» (создать хэш) данные *V -проекта заявки на транзакцию*, A_{2231} . Это гарантирует неизменность данных.
2. «Шифровать» хэш *V -проекта заявки на транзакцию* закрытым ключом владельца актива (создать ЭП), A_{2232} .
3. «Включить ЭП в проект» заявки на транзакцию, A_{2233} .

Выход функции A_{223} – *проект заявки на транзакцию с ЭП*.

Управление A_{233} – выход (санкция) функции проверки корректности проекта заявки на транзакцию A_{232} - *s & f -correctness*. **Механизм** A_{223} : ВС i -узла.

Завершает подготовку заявки на транзакцию функция «Передать проект заявки в БЧ-систему», A_{224} . При поступлении *Команды* владельца актива (**Управление** A_{224}) *Заявка на транзакцию t_i^q* поступает в БЧ-систему на почтовые ящики (п/я) всех M -узлов сети (мемпул неподтвержденных заявок T). В специальной литературе эта сущность иногда называется «неподтвержденная транзакция». Подтверждение транзакции происходит после включения заявки в БЧ (A_2, A_3).

С этого момента заявка на транзакцию t_i^q подлежит сложной многоуровневой и многофункциональной обработке системным процессом, предназначенным для включения неподтвержденных транзакций в реестр выполненных транзакций (в предметных терминах процесс «Провести системную обработку волеизъявления», A_3). С технологической точки зрения этот процесс заключается в модификации БЧ, хранящего данные транзакций. Модификация состоит в создании нового блока-кандидата данных, его верификации и включении в существующую структуру данных (цепочку блоков). В БЧ-системе все узлы в любой момент времени находятся в одном из режимов: обработка данных заявок на транзакцию и создание нового блока-кандидата b_z^{cem} или верификация корректности нового блока-кандидата b_z^{cem} .

В функциональной модели это означает декомпозицию A_3 (диаграмма не приводится) и выполнение БЧ-системой, соответственно, процессов «Создать блок-кандидат на включение в БЧ», A_{31} и «Верифицировать блок-кандидат», A_{32} . Рассмотрим алгоритм и функционал БЧ-системы в этих режимах.

Мемпул заявок на транзакции поступает на **Вход** процесса A_{31} . **Выходом** A_{31} является распространенная сетевая версия блока-кандидата b_z^{cem} на включение в структуру БЧ.

Управление A_{31} выполняется по рассматриваемым ниже системным Правилам (алгоритму) создания блоков. **Механизм** A_{31} : в процессе сначала участвуют все M -узлы БЧ-системы (функции A_{311} - A_{313}), а затем s -узел ($s \in M$), первым решивший сложную хэш-задачу, например, для заявки на транзакцию t_i^q (функции A_{314} - A_{315}).

Процесс A_{31} сложный, поскольку в его рамках решается не только собственно задача модификации структуры данных БЧ, но и задача поддержания целостности хронологии данных транзакций при обеспечении открытости БЧ-системы. Процесс A_{31} включает функции, представленные на рис. 6. Рассмотрим их.

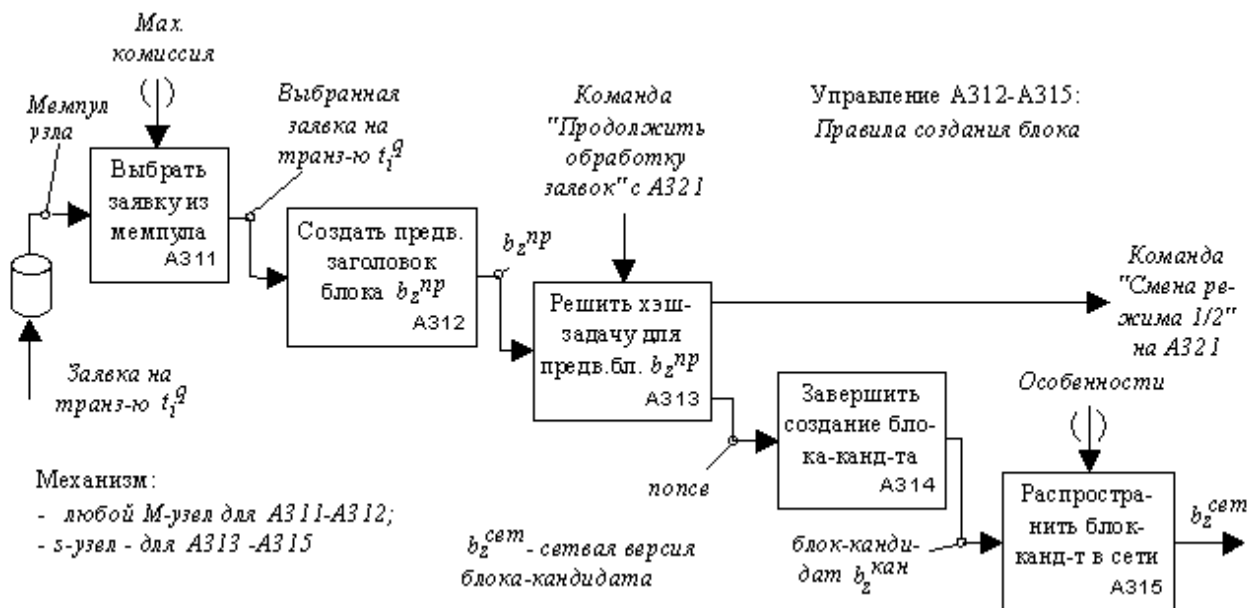


Рис. 6. Декомпозиция процесса «Создать блок-кандидат на включение в БЧ», A_{31}

Функция «Выбрать заявку из мемпула», A_{311} производит выбор заявки для дальнейшей обработки из множества заявок T , одновременно находящихся в сети. Пусть это будет заявка на транзакцию t_i^q (Выход A_{311}). **Управление** A_{311} и **Механизм** A_{311} показаны на рис. 6. Сущность функции «Создать предв.<арительный> заголовок блока b_z^{np} », A_{312} удобно рассматривать на ее декомпозиции (рис. 7).

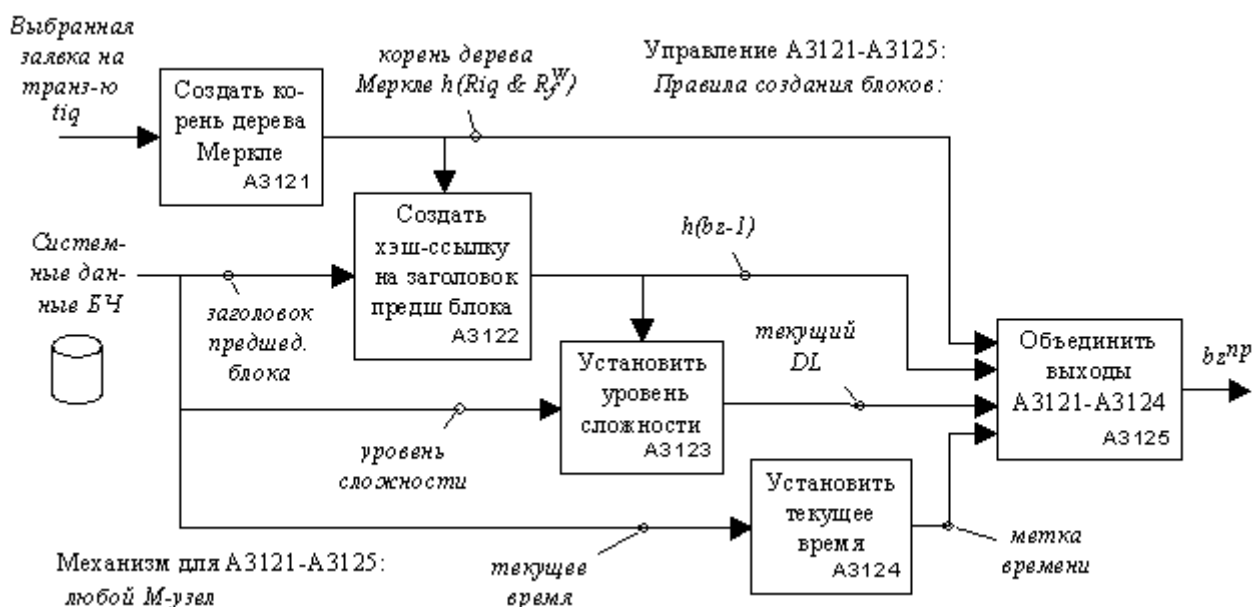


Рис. 7. Декомпозиция функции «Создать предв. заголовок блока b_z^{np} », A312

Функция «Создать корень дерева Меркле», A_{3121} заключается в хэшировании данных заявки и выполняется всеми M -узлами. **Выход:** хэш $h(R_i^q \& R_j^w)$, где R_i^q и R_j^w , соответственно, хэши данных заявки на транзакцию t_i^q и любой предшествующей ей, например, w -заявки из мемпула T от f -узла.

Функция «Создать хэш-ссылку на заголовок пред.<шествующего> блока», A_{3122} . **Выход:** хэш $h(b_{z-1})$. Блок $b_{z-1} < b_z \in B$, где B – упорядоченное множество блоков транзакций, БЧ.

Функции A_{3121} - A_{3122} создают основу структуры данных БЧ – упорядоченную цепочку заголовков блоков и деревьев Меркле, содержащих данные транзакций. После хэширования результатов A_{3121} - A_{3122} процесс добавления нового блока b_z в БЧ (A_{31}) мог бы быть закончен.

При этом архитектурные и технологические (хэширование) решения позволяют выявлять изменения: данных транзакции, ссылки на дерево Меркле, корня дерева Меркле, ссылки на заголовок блока, а также замену транзакции [2]. Эти изменения возможны без значительных затрат, так как предполагают лишь добавления хэш-ссылки, указывающей на заголовок нового блока в цепочке и объявление этой ссылки как новой головы цепочки. Но свойство открытости БЧ-системы (P2P-системы) актуализирует угрозу изменения хронологии данных транзакций. Поэтому необходимо обеспечить ее целостность при сохранении открытости системы. Для решения этой задачи использована идея понуждения интересанта к отказу от любых действий, вносящих изменения в БЧ. Это достигается целенаправленным созданием значительных организационно-технологических трудностей внесения изменений в структуру данных, преодоление которых делает изменения экономически нецелесообразными. Практическая реализация идеи обеспечивается выполнением следующих требований к БЧ-системе.

1. Выявление любых изменений хронологии данных транзакций (см. выше).
2. Создание усложненного алгоритма внесения изменений в хронологию транзакций, предполагающего редактирование и принудительную перезапись значительной части всей хронологии, начиная с места внесения изменения.
3. Решение сложных хэш-задач, различных для каждого заголовка блока.

Выполнение этих требований ведет к необходимости наличия значительных вычислительных мощностей для внесения изменений в хронологию транзакций. Конкретная реализация изложенных подходов к обеспечению целостности структуры данных БЧ осуществляется выполнением следующих функций.

1. «Установить требуемый уровень сложности», A_{3123} . Уровень сложности (difficulty level, DL) решения хэш-задачи, определяющий время для ее решения – системно устанавливаемый параметр, необходимый для последующего выполнения функции A_{313} (рис. 6).

2. «Установить текущее время» создания блока, A_{3124} (рис. 7).

3. «Решить хэш-задачу для <конкретного> предв.<арительного> <заголовка> блока b_z^{pp} », A_{313} , например, s -узлом (рис. 6).

Функция A_{313} имеет два **Выхода**: 1. Найденное решение хэш-задачи (nonce); 2. Команда *Смена режима 1/2*, поступающая в БЧ-систему. Эта команда останавливает функции A_{313} и актуализирует функции A_{321} (рис. 8) иных (не s)-узлов.

4. «Завершить создание блока-кандидата» $b_z^{кан}$, добавив одноразовый случайный код (nonce) к предварительному заголовку b_z^{pp} , A_{314} .

Реализация данного подхода включает в заголовок каждого блока БЧ следующие данные (информационная модель блока-кандидата):

- корень дерева Меркле, содержащего данные транзакции;
- хэш-ссылка на заголовок предыдущего блока;
- уровень сложности хэш-задачи;
- время начала решения хэш-задачи;
- одноразовый случайный код (nonce), решающий хэш-задачу.

Функция «Распространить блок-кандидат в сети», A_{315} . В БЧ (P2P)-системе каждый узел поддерживает собственную версию неизменяемого БЧ. Поэтому вновь созданный s -узлом блок-кандидат должен быть децентрализованно передан остальным узлам. **Вход**: $b_z^{кан}$, **Выход**: b_z^{cem} .

Управление A_{315} . Передача сообщений в P2P-системе имеет *Особенности*, затрудняющие их доставку адресатам. Эти трудности устраняются специальным алгоритмом и функционалом (в статье не рассматриваются).

Механизм A_{315} : транспортной основой БЧ-системы является Интернет.

Процесс «**Верифицировать блок-кандидат**», A_{32} необходим, поскольку в БЧ-систему возможно поступление некорректных блоков-кандидатов. **Входом** A_{32} является *сетевая версия блока-кандидата* b_z^{cem} . **Выходы** A_{32} (A_{321} , на рис. 8):

- *новый блок в БЧ* (модернизированный БЧ) с включенным новым блоком b_z в случае верификации блока-кандидата b_z^{cem} ;
- команда блоку A_{313} (см. рис. 6) «*продолжить обработку заявок на транзакции*» (продолжить формирование новых блоков-кандидатов), остановленную s -узлом при нахождении nonce для транзакции t_i^p в противном случае.

Управление A_{32} рассматривается ниже. **Механизм**: процесс A_{32} выполняется всеми M -узлами БЧ-системы.

Декомпозиция A_{32} (рис. 8). Блок-кандидат b_z^{cem} проходит процедуру «Проверить корректность блока-кандидата», A_{321} , которая определяется корректностью: данных транзакций (A_{3211}); заголовков блоков (A_{3212}); решения хэш-задачи (nonce), A_{3213} .

Управление. Правила проверки данных транзакций содержат условия формальной корректности, семантической (смысловой) корректности и авторизации (см. выше). Функция A_{321} актуализируется командой «Смена режима 1/2», поступающей с выхода функции A_{313} в момент нахождения nonce s -узлом.

Функция A_{321} имеет три выхода. **Выход 1**. В случае признания блока-кандидата b_z^{cem} корректным, актуализируются функции БЧ-системы: «Добавить новый блок в свою копию БЧ», A_{322} ; «Удалить заявку на транзакцию t_i^d », A_{323} ; «Вознаградить s -узел», создавший новый блок, A_{324} .

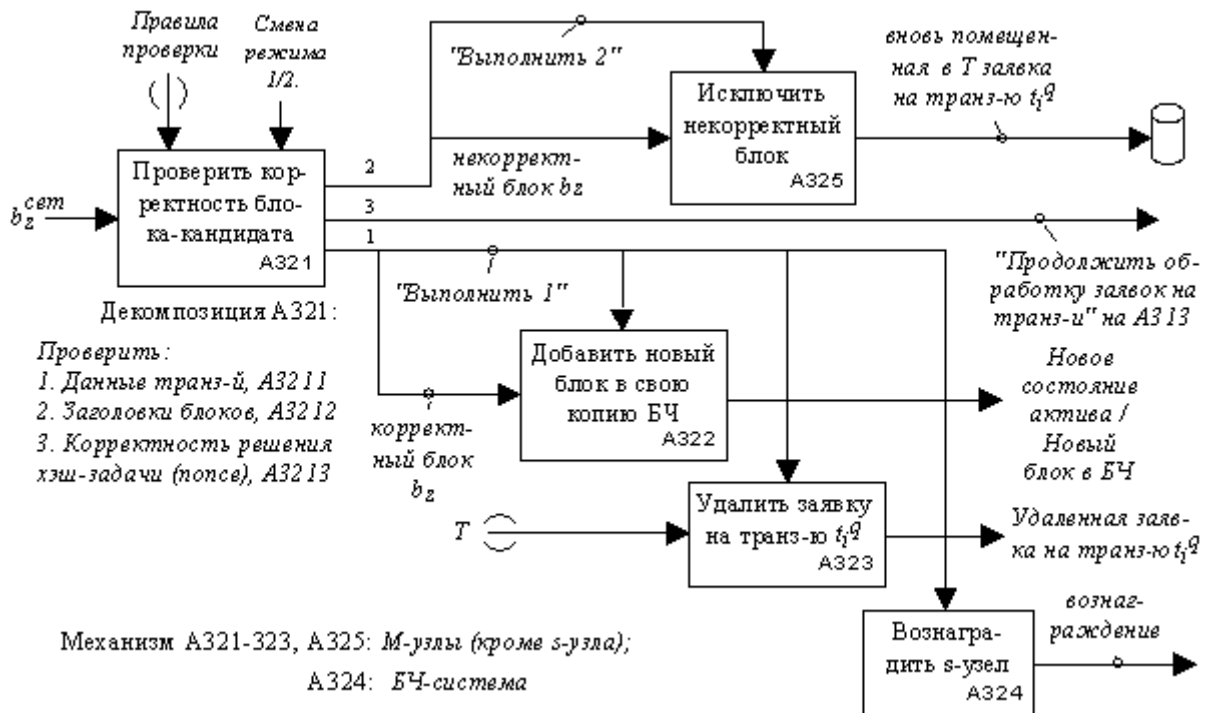


Рис. 8. Декомпозиция процесса «Верифицировать блок-кандидат», A_{321}

Функция A_{322} включает верифицированный блок b_z в копию БЧ. Функция A_{323} удаляет заявку на t_i^q -транзакцию из мемпулов всех узлов БЧ-системы (множества T заявок на транзакцию). Функция A_{324} предназначена для выявления, компенсации затрат (вознаграждение) и стимулирования (конкуренция) наиболее эффективных <владельцев> узлов, создающих и проверяющих блоки. Блок A_{324} , не имеет явного **Входа**, поскольку моделирует режим генерации БЧ-системой (**Механизм**) единицы **вознаграждения** (**Выход** s-узла).

Выход 2 A_{321} . В случае некорректности блока-кандидата $b_z^{сет}$ БЧ-система также по команде «Продолжить обработку заявок на транзакции» с **Выхода 3** возобновляет остановленный s-узлом режим формирования блоков-кандидатов (A_{313}), и узлы могут завершить этот этап добавлением своего блока. Данные транзакции t_i^q из неверифицированного блока возвращаются в мемпул для повторной обработки.

Актуализация (**Управление**) функций A_{322} - A_{325} производится признанием блока b_z корректным/некорректным (команды «выполнить 1» / «выполнить 2»). **Механизм** A_{321} - A_{324} , A_{325} : любой не s-узел.

Заключение

В заключение отметим, что в представленной модели отражены только основные функции БЧ-системы, необходимые для получения предметного результата. Состав этих функций согласуется с перечнем этапов проведения транзакций, представленным в специальной литературе: появление транзакции; опубликование транзакции в БЧ-сети; включение транзакции в новый блок; хэш нового блока засчитывается; новый блок предьявляется БЧ-сети; блок принимается сетью, выплачивается вознаграждение [8, 9].

За пределами детального рассмотрения (декомпозиции) остались «чисто» технологические функции, такие как «Передать проект заявки в БЧ-систему», A_{224} , «Вознаградить хх-узел», A_{324} и другие.

Также необходимо указать на отражение в модели ряда авторских представлений о логике работы БЧ-системы, в явном виде не описанной в литературе. Эти пробелы устранены введением, например, различных *команд*.

В целом, разработанную функциональную модель БЧ-технологии следует рассматривать как первую версию, требующую в соответствии с принципами IDEF0/SADT моделирования итеративной доработки.

Библиографический список

1. **Свон, М.** Схема новой экономики / М. Свон. – М.: Олимп-Бизнес, 2016. – 224 с.
2. **Дрешер, Д.** Основы блокчейна: вводный курс для начинающих в 25 небольших главах. / Д. Дрешер. – М.: ДМК Пресс, 2018. – 320 с.
3. **Марка, Д.А.** Методология структурного анализа и проектирования SADT (Structured Analysis & Design Technique) / Д. А. Марка, К. МакГоуэн. – М.: МетаТехнология, 1993. – 240 с.
4. Integration DEFinition for function modeling (IDEF0). Draft Federal Information Processing Standards Publication 183 ,1993 December 21. URL: <http://idef.com/wp-content/uploads/2016/02/idef0.pdf>.
5. РД IDEF0-2000. Методология функционального моделирования IDEF0. – М.: Госстандарт России, 2000. – 75 с.
6. Р 50.1.028-2001. Рекомендации по стандартизации. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования. – М.: Госстандарт России, 2003. – 50 с.
7. **Лелу, Л.** Блокчейн от А до Я. Все о технологии десятилетия / Л. Лелу. – М.: Эксмо, 2018. – 256 с.
8. **Галкова, Е.В.** Биткойн – альтернатива инвестициям, криптовалюта или «стеклянные бусы» без реальной торговой стоимости? Обзор основных подходов регулирования / Е.В. Галкова // Законодательство. – 2016. – № 11. – С. 25-36.
9. **Максуров, А.А.** Майнинг как юридическая и информационная категория / А.А. Максуров // Актуальные проблемы экономики и права. – 2018. – Т. 12, № 2. – С. 256-265.

*Дата поступления
в редакцию: 16.10.2018*

V.Y. Karpychev

FUNCTIONAL MODELING (IDEF0) AS A METHOD OF RESEARCH ON BLOCKCHAIN TECHNOLOGY

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alekseev

Purpose: Development of blockchain technology model in the IDEF0 standard notation.

Methodology: The proposed blockchain technology model is based on Structured Analysis & Design Technique (SADT), a well-known methodology for modeling with objects of different nature. SADT/IDEF0 is applied to the known formal and verbal descriptions of the blockchain.

Value: The proposed model can be used in the development of original blockchain applications, as well as in foundational studies of the blockchain technology.

Research implications: The purpose of research is to further detail the model, represent structural and parametric characteristics of blockchain, identify model's possible vulnerabilities and limitations and propose ways to overcome them.

Keywords: asset management, functional modeling, blockchain technologies.

УДК 544.454; 536.46; 614.841.1

А.А. Лоцилов, М.Н. Ильичева, В.В. Иконников,
Д.А. Шаулов, Ю.Ф. Орлов, А.В. Зенькович

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУШЕНИЯ ЛЕСНОГО ПОЖАРА ПРИ ПОМОЩИ НАПРАВЛЕННОГО ВЗРЫВА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Работа посвящена численному моделированию тушения лесного пожара при помощи взрыва. Использование направленного взрыва в заданном диапазоне углов позволяет усилить в нем ударную волну, повышая эффективность тушения пожара. Практическое применение данного подхода требует изучения закономерностей протекающих процессов. Используется новая упрощенная модель взрыва, основанная на мгновенном сдвиге среды вокруг точки детонации, а также срыве элементов растительности ударной волной. Доля срываемых элементов определяется на основе экспериментальных данных. На основе численного моделирования исследуется динамика лесного пожара после воздействия взрывной волны. В результате серии расчетов выявлено, что масса взрывчатки, требуемая для эффективного тушения волны горения, незначительно меняется при расстоянии от 1 до 4 м между зарядом и зоной прогрева пожара.

Ключевые слова: численное моделирование, лесной пожар, направленный взрыв, тушение пожара при помощи взрыва.

Введение

Тушение пожаров при помощи взрывов – одно из актуальных направлений научных исследований. Прекращение горения происходит за счет отбрасывания пламени от горючих материалов взрывной волной. Это разрушает структуру пламени и предотвращает его поддержку за счёт окисления горючего, после чего горение прекращается. Дополнительно к этому взрыв может переносить тушащее вещество, например, воду, которая измельчается ударной волной и быстро доставляется в область пламени.

Воздействию взрыва на лесной пожар посвящено большое количество работ. Среди них следует выделить работы [1, 2]. В работе [1] выполнено моделирование динамики ударной волны при постоянном коэффициенте аэродинамического сопротивления леса и детерминированном критерии отрыва растительности, основанном на пороговом значении избытка давления. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что полного отрыва элементов растительности не происходит и существует тенденция к убыванию доли сорванных элементов растительности [2].

Цель исследования

Использование направленного взрыва в заданном диапазоне углов позволяет усилить в нем ударную волну, повышая эффективность тушения пожара. В данной работе выполняется анализ эффективности тушения лесного пожара при помощи направленного взрыва на основе численного моделирования. Выполнена серия расчётов, в которых варьировались масса взрывного заряда и расстояние от него до активатора, который инициировал взрыв при нагреве до 500 К. На рис. 1 показано взаимное расположение взрывного заряда, его активатора и направление взрыва. Диапазон углов от -60° до $+60^\circ$ относительно горизонта.

Для определения доли отбрасываемых элементов растительности было учтено, что доля сорванных элементов растительности имеет тенденцию к убыванию с ростом расстояния без жестко определенного перепада давления или расстояния [2]. В связи с этим, для определения закономерностей срыва растительности решается обратная задача.

В данной работе предполагается, что доля сорванных элементов определяется формулой

$$D_{break}(x, z) = \left[1 - \frac{1}{2} \left[1 + \Phi \left(\frac{x_f(x, z)(2\pi\varphi^{-1}W)^{-0.5} - \mu}{\sqrt{2\sigma^2}} \right) \right] \right] \Psi(x, z) \quad (1)$$

где $x_f(x, z)$ – расстояние от эпицентра до точки, м; W – масса шнурового заряда, отнесенная к его длине, кг/м; μ и σ – параметры нормального распределения, $m^{3/2}$ и $kg^{-1/2}$ соответственно; $\Psi(x, z)$ – функция, принимающее значение 1 в направлении взрыва и 0 за его пределами; φ – угол, в котором направлен взрыв; $\Phi(x)$ – функция ошибок (Лапласа), имеющая следующий вид

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt.$$

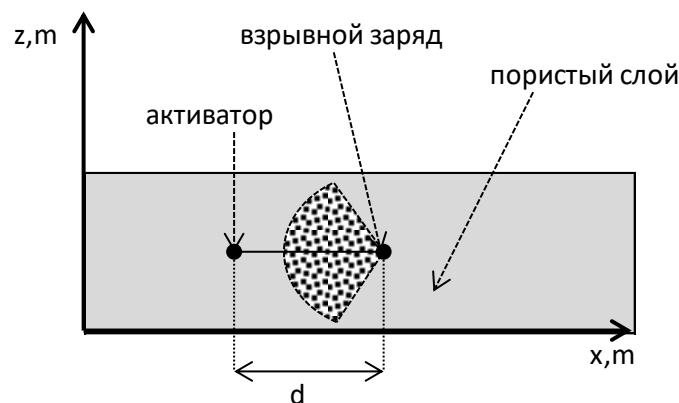


Рис. 1. Схема тушения пожара направленным взрывом

Значения параметров нормального распределения μ , σ определялись на основе согласования экспериментальных данных работы [2] с формулой (1).

В основе работы использовалась математическая модель, описанная в [3, 10]. В процессе моделирования среда предполагалась однотемпературной, а протекающие газодинамические процессы независимыми от координаты y [4-5]. При моделировании лучистого теплопереноса пожара использовано диффузионное приближение с учетом серости среды [6-8]. При расчетах пожара использовались параметры, приведенные в работах [9-10]. Считается, что взрыв происходит мгновенно, высвобождая тепловую энергию и продукты реакции вокруг точки расположения заряда, занимая объем, требуемый для их размещения при температуре взрыва и постоянном давлении. Это, в свою очередь, приводит к мгновенному сдвигу среды в диапазоне углов, соответствующем направленному взрыву, перенося массу, импульс и энергию газовой фазы. После взрыва учитывается перераспределение энергии между газовой и конденсированной фазой и далее с учетом этих изменений возобновляется моделирование лесного пожара.

Результаты

Динамика лесного пожара, сформировавшаяся к моменту взрыва, была одинаковой во всех случаях. Она показана на рис. 2. Взрыв происходил в момент достижения температуры 500 К в точке расположения активатора с координатами $x=27$ м, $z=1.5$ м. Сдвиг заряда в положительном направлении оси x был варьируемым параметром, а его значения указаны ниже. Стрелки показывают направление течения газовой фазы, заливка области цветом – температура, согласно шкале, зеленая линия – контур доли непрореагировавшего сухого органического вещества 50% от исходного значения, крестик – положение заряда.

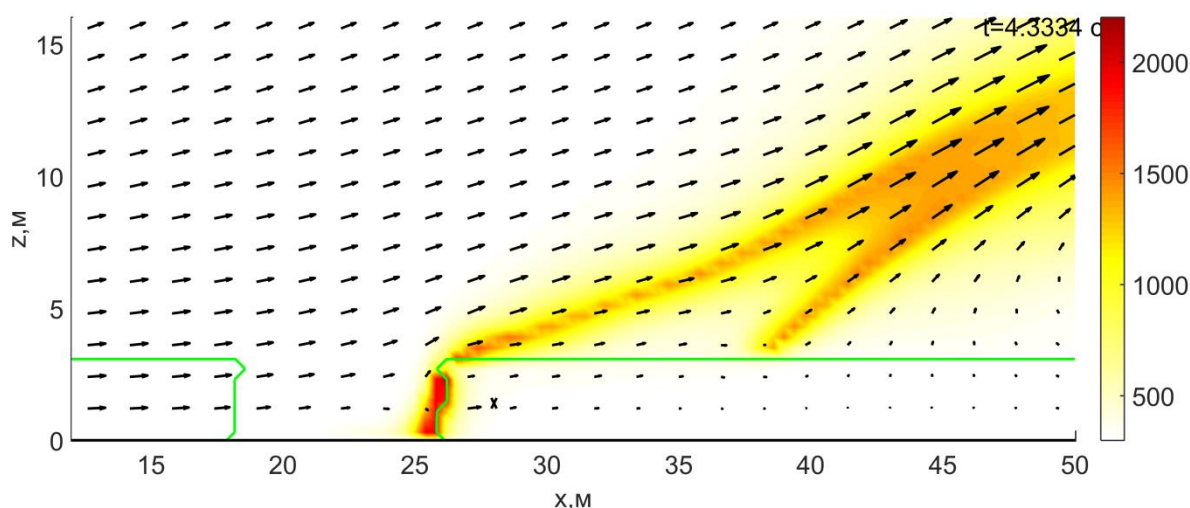


Рис. 2. Динамика лесного пожара до взрыва

На рис. 3 показана динамика распространения лесного пожара после направленного взрыва массой 0,5 кг/м на расстоянии 1 м от активатора. На первом этапе происходит отрыв части пламени от лесной растительности. Данный эффект связан с тем, что взрывная волна переносит только газовую фазу вместе с её энергией, тогда как конденсированная фаза вновь нагревает вокруг себя среду, как показано на момент времени 4,4 с. На момент 5 с видно, что верхняя часть нагретой области унесена с конвективной колонкой, тогда как нижняя входит в область невыгоревшей растительности. На момент 5,2 с процесс горения вновь начинает развиваться в нижней части слоя лесной растительности, что, в конечном счете, приводит к возобновлению пожара.

В случае увеличения массы заряда до 0,6 кг/м динамика в целом аналогична, однако мощности очага горения в приземной области недостаточно для возобновления устойчивого горения, что в итоге приводит к затуханию.

При увеличении расстояния заряда от волны горения до 2 м имеет место отражение ударной волны от поверхности земли и её частичное рассеяние над пористым органическим слоем. Динамика пожара после взрыва, при массе заряда 0,7 кг/м, в этом случае показана на рис. 4. Так же, как и в случае меньшего расстояния от заряда до волны горения, нагретая среда остается в приземной области. Массы заряда 0,7 кг/м достаточно, чтобы пожар не возобновился, а при 0,6 кг/м происходит повторное возгорание.

Динамика при расстоянии от заряда до волны горения до 4 м показана на рис. 5. После взрыва его энергия поглощается конденсированной фазой, что приводит к охлаждению среды и формированию вихря вокруг него на момент $t=4.35$ с. В результате имеет место ускоренное втягивание остатков нагретой газовой фазы в область горючего пористого слоя и возобновление горения в момент $t=4,7$ с. Начало процесса возобновления пожара показано на момент 5,1 с.

Как видно из результатов расчёта, во всех случаях имеет место отбрасывание волны горения назад, после чего происходит частичное рассеяние её энергии и возвращение вместе с внешним полем скоростей в область с запасом горючих материалов. В зависимости от массы заряда оставшейся его части определяется, достаточно ли энергии волны горения для возобновления пожара.

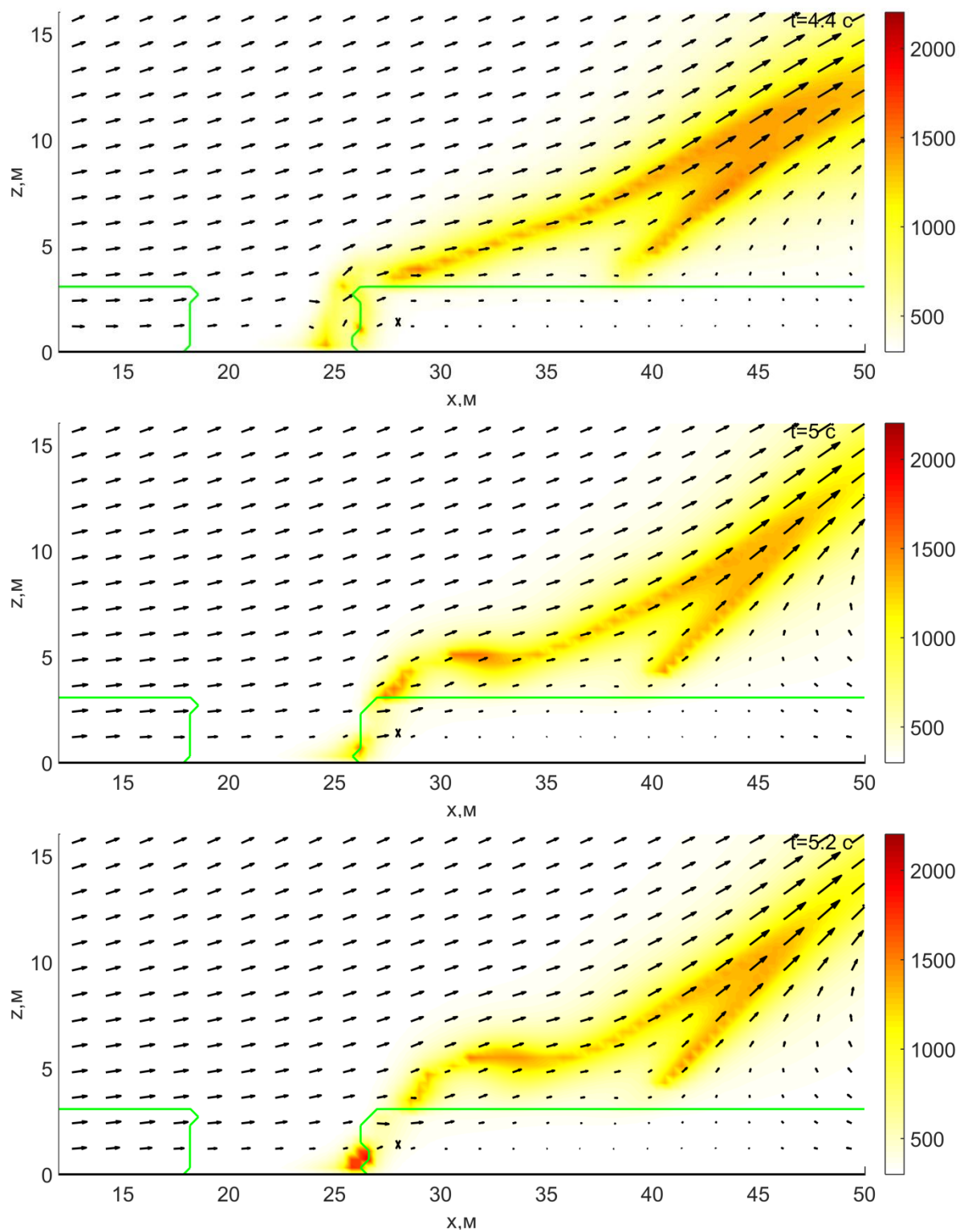


Рис. 3. Динамика лесного пожара после взрыва заряда массой 0,5 кг/м на расстоянии 1 м от волны горения

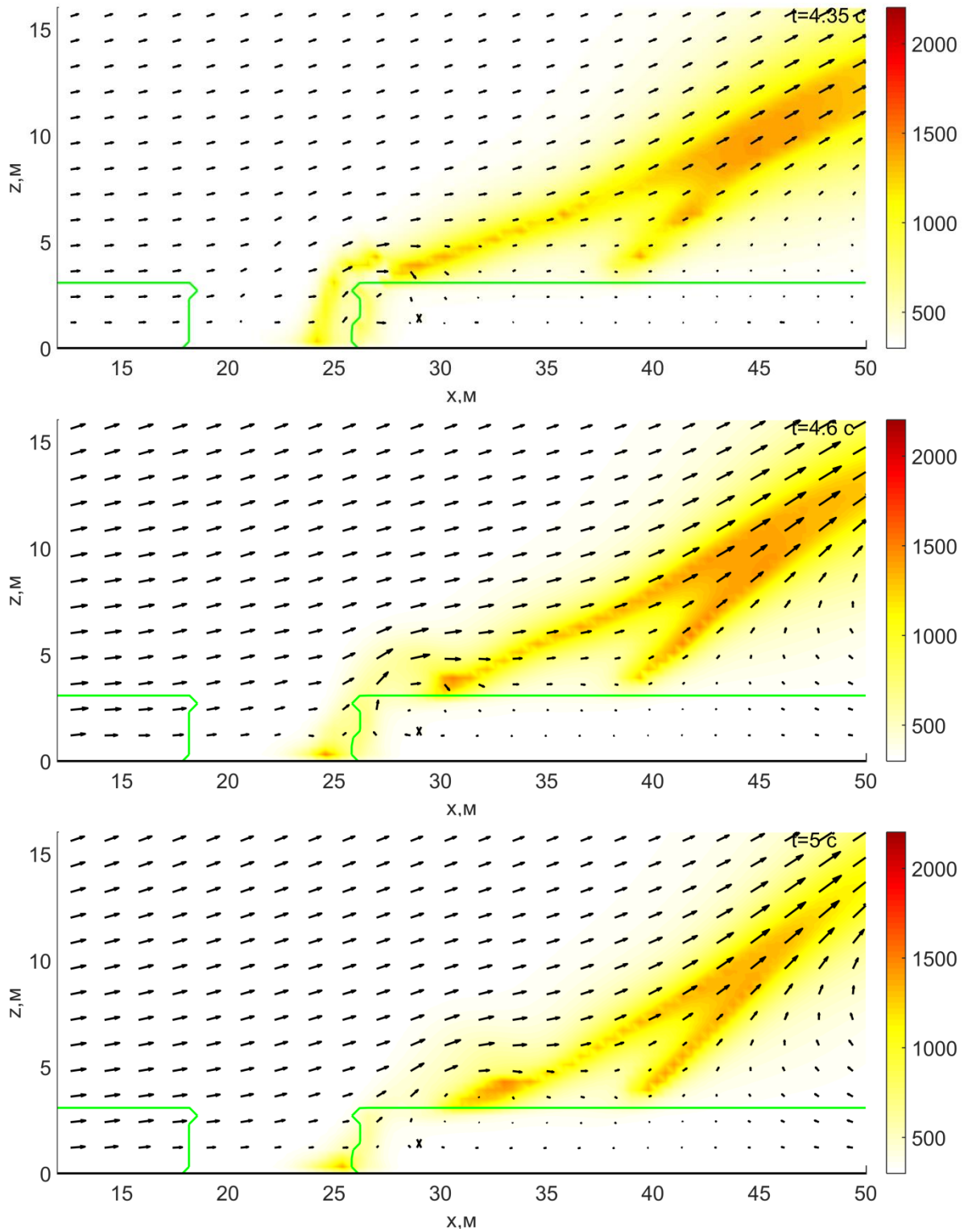


Рис. 4. Динамика лесного пожара после взрыва заряда массой 0,7 кг/м на расстоянии 2 м от волны горения

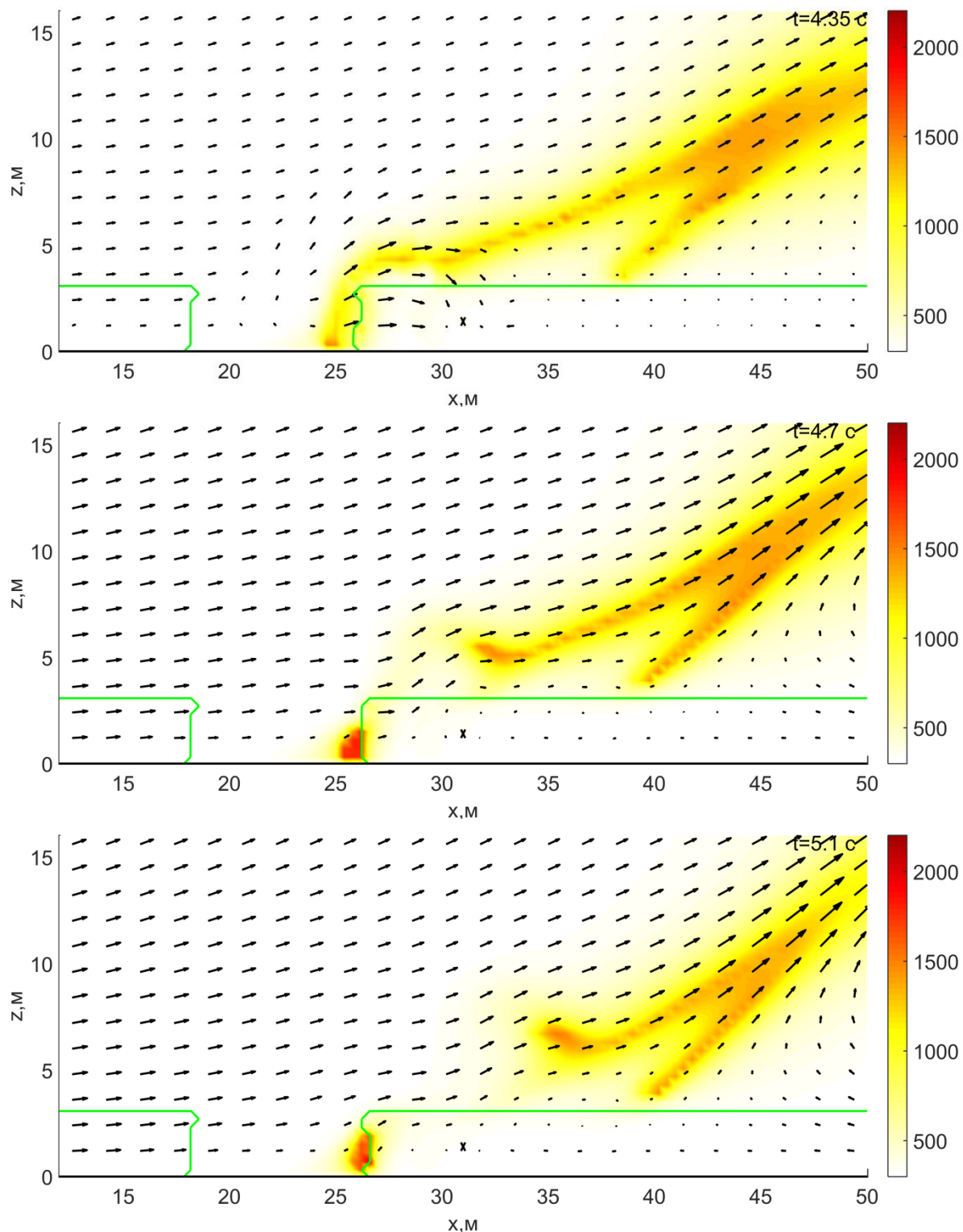


Рис. 5. Динамика лесного пожара после взрыва заряда массой 0,6 кг/м на расстоянии 4 м от волны горения

Обсуждение

В случае направленного взрыва расстояние до волны горения оказывает незначительное влияние на эффективность тушения пожара в достаточно широких пределах. Это весьма полезно, так как в реальных условиях пожар может находиться на разном расстоянии от частей шнурового заряда.

Заключение

Полученные результаты свидетельствуют об эффективности использования направленных взрывов при тушении лесных пожаров. В то время как в случае тушения водой имеют место потери ее за счет стекания на землю, испарения до достижения зоны горения, прилипания к элементам растительности. Техника тушения пожаров взрывами свободна от этого недостатка. Потери механической энергии и импульса ударной волны за счёт аэродинамического сопротивления растительности не оказывают влияния на массу газа, вытесняющего волну горения.

К недостаткам использования взрывов при тушении лесных пожаров следует отнести невозможность скорректировать действия в процессе тушения пожара с учетом его динамики, что накладывает более высокие требования на предварительное изучение сопутствующих процессов.

Библиографический список

1. **Гришин, А.М.** Математическое моделирование срыва лесных горючих материалов в результате взрыва шнурового заряда взрывчатого вещества / А.М. Гришин, А.Ф. Цимбалюк // Физика горения и взрыва. – 2006. – Т. 42, № 3. – С. 92-99.
2. **Гришин, А.М.** Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними / А.М. Гришин. - Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1992. – 405 с.
3. **Катаева, Л.Ю.** О методе Гира численного моделирования динамических систем, описываемых жесткими обыкновенными дифференциальными уравнениями / Л.Ю. Катаева, В. Б. Карпухин // Наука и техника транспорта. – 2008. – № 1. – С. 57-66.
4. **Катаева, Л.Ю.** Анализ динамических процессов аварийных ситуаций природного и техногенного характера: дис. ... докт. физ.-мат. наук / Л.Ю. Катаева. – Нижний Новгород, 2009.
5. **Катаева, Л.Ю.** Численное моделирование динамики пожара с учетом рельефа местности и внешнего поля скоростей / Л.Ю. Катаева, Д.А. Масленников, И.Е. Белоцерковская // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 21, № 12. – С. 49-58.
6. **Гришин, А.М.** Математическое моделирование сушки слоя лесных горючих материалов / Гришин А.М., Катаева Л.Ю., Лобода Е.Л. // Вычислительные технологии. – 2001. – Т. 6. – С. 140.
7. **Масленников, Д.А.** Об особенностях моделирования излучения при пожарах / Д.А. Масленников, Л.Ю. Катаева, И.Е. Белоцерковская // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2012. – № 2 (95). – С. 66-75.
8. **Масленников, Д.А.** Особенности численного моделирования распространения суммарного теплового потока при лесных пожарах / Д.А. Масленников, И.Е. Белоцерковская, С.А. Лощилов, Л.Ю. Катаева. – Нижний Новгород, 2013.
9. **Kataeva, L.Y.** On the laws of combustion wave suppression by free water in a homogeneous porous layer of organic combustible materials / L.Y. Kataeva, D.A. Maslennikov, N.A. Loshchilova // Fluid Dynamics. – Vol. 51, No 3. – P. 389-399, 2016.
10. **Гришин, А.М.** Математическое моделирование некоторых экологических последствий природных и техногенных катастроф: отчет о НИР / А.М. Гришин, А.А. Долгов, В.П. Зима, Л.Ю. Катаева, А.Н. Субботин, Р.Ш. Цвык, А.Ф. Цимбалюк. № 96-01-00011 (Российский фонд фундаментальных исследований).

*Дата поступления
в редакцию: 25.09.2018*

**A.A. Loschilov, M.N. Ilcheva, V.I. Ikonnikov, D.A. Shaulov,
Yu.F. Orlov, Zen'kovich A.V.**

**MATHEMATICAL MODELING OF FOREST FIRE EXTINGUISHING
WITH DIRECTIONAL EXPLOSION**

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alekseev

Purpose: Numerical modeling of forest fire extinguishing with the explosion.

Methodology: We use simplified explosion model based on an instantaneous medium shift around the detonation point and vegetable elements breaking by explosion wave. The fraction of broken elements is determined on the basis of experimental data. On the basis of numerical modeling; the dynamics of forest fire after explosive wave is investigated.

Value: The result a series of calculations revealed that the mass of explosive required to effectively extinguish a combustion wave varies slightly at a distance of from 1 to 4 meters between the explosion and warm-up area of fire.

Research implications: The practical application of this approach requires studying the regularities of the processes that are taking place. The use of directional explosion in a given range of angles allows strengthening the shock wave in it, increasing the efficiency of fire extinguishing.

Keywords: numerical modeling, forest fire, directional explosion, fire extinguishing with explosion.

УДК 517.9

Е.Н. Пелиновский^{1,4}, Е.Г. Диденкулова (Шургалина)^{1,2}, Т.Г. Талипова^{1,2},
Е. Тобиш⁵, Ю.Ф. Орлов², А.В. Зенькович²

СЕМЕЙСТВО УРАВНЕНИЙ ТИПА КОРТЕВЕГА-ДЕ ВРИЗА В ПРИЛОЖЕНИЯХ

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород¹,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²,
Национальный исследовательский университет – Высшая школа экономики, Москва³,
Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований
ДВО РАН, Южно-Сахалинск⁴,
Университет Кеплера, Линц, Австрия⁵

Классические уравнение Кортевега-де Вриза (КдВ) и модифицированное КдВ уравнение играют заметную роль в физике нелинейных волн в виду их интегрируемости. Менее известны другие уравнения из этого же семейства, выводимые в разных физических и технических приложениях. Это модулярное КдВ уравнение, лог-нормальное КдВ уравнение, уравнение Гарднера, уравнение Шамеля, уравнения Бенджамина-Оно и Кавахары, а также фракционные уравнения. Эти уравнения различаются степенью нелинейности в адвективном члене и порядком линейной дисперсии (в том числе и дробной). Целью статьи является обсуждение практических приложений семейства КдВ уравнений и общих свойств их решений. Методология исследований основана на теории слабонелинейных волн в слабодисперсионных средах различной физической природы. Показано, что многие уравнения КдВ иерархии имеют общие свойства решений и не обладают взрывной неустойчивостью. Для этого степень нелинейности не должна быть очень большой.

Ключевые слова: уравнения типа Кортевега-де Вриза, бегущие волны, солитоны.

Введение

Уравнение Кортевега-де Вриза в канонических переменных

$$\frac{\partial u}{\partial t} + 6u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} = 0, \quad (1)$$

выведенное Кортевегом и де Вризом в 1895 году для гравитационно-капиллярных волн на поверхности тонкого слоя воды, стало эталонным уравнением теории нелинейных волн и математической физики после открытия способа точного его решения с помощью метода обратной задачи теории рассеяния, которое теперь воспроизводится во всех учебниках по теории нелинейных волн. Решения этого уравнения обладают удивительными свойствами: уединенные волны (солитоны) взаимодействуют между собой упруго, имеет место периодическая рекуррентия основного состояния и т.д. Практически еще в 1970-е гг. прошлого столетия было показано, что это уравнение описывает широкий класс волновых процессов в механике, плазме, астрофизике, океане и электродинамике. По существу, оно получается в любых физических системах, в которых возможны слабо нелинейные и слабо дисперсионные волны, и его вывод делается в рамках первого приближения асимптотических разложений. Если квадратичная нелинейность, тем не менее, отсутствует, то аналогично (1) может быть выведено модифицированное уравнение Кортевега-де Вриза

$$\frac{\partial u}{\partial t} \pm 6u^2 \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} = 0, \quad (2)$$

которое также полностью интегрируемое. Основываясь на методе обратной задачи теории рассеяния в 1970-1990-е гг., было выведено много уравнений КдВ типа (содержащих в

правой части слагаемые, ответственные за нелинейность и дисперсию высших порядков, нелинейную дисперсию и т.п.), которые также были интегрируемы. Между тем многие из них не были связаны с какими-то физическими приложениями и имеют решения непригодные с точки зрения здравого смысла. Так, например, учет дисперсии высшего порядка ведет к тому, что групповая скорость мелкомасштабных возмущений становится больше фазовой, в то время как в исходных уравнениях групповая скорость всегда меньше фазовой. Кроме того, такие уравнения часто имеют дополнительные решения, которые не соответствуют известным данным о волнах в рамках полных по нелинейности уравнений. Именно поэтому с физической точки зрения разумно сводить расширенные версии уравнений КдВ типа к классическому КдВ уравнению с помощью асимптотических замен, используя малость нелинейности и дисперсии.

В настоящей работе дается сводка семейства уравнений КдВ типа, которые действительно получаются в различных физических системах.

Семейство уравнений КдВ типа с произвольной нелинейностью

Прежде всего, необходимо отметить, что модифицированное КдВ уравнение (2) имеет широкую область применения в электродинамике, динамике размерно-квантованных пленок, в астрофизической плазме, в твердом теле, в динамике волн в стратифицированной жидкости при определенных условиях на стратификацию плотности. В частности, если имеется двухслойная жидкость, то коэффициент при кубическом нелинейном члене отрицателен, а если жидкость трехслойная, то возможны оба знака нелинейности [1]. Особый интерес вызывает уравнение (2) в случае положительного знака кубической нелинейности. Волновые пакеты при этом модуляционно неустойчивы, что приводит к появлению волн-убийц [2]. Более того, даже в солитонном газе возможно возникновение волн-убийц, но только в том случае, если солитонный газ содержит солитоны обеих полярностей [3-5].

Стратифицированная жидкость дает примеры нескольких уравнений КдВ типа, кроме указанных выше уравнений (1) и (2). Наиболее известный пример – это уравнение Гарднера, которое содержит квадратичную и кубическую нелинейности в одном порядке теории возмущений

$$\frac{\partial u}{\partial t} + 6u(1 \pm u) \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} = 0, \quad (3)$$

и это уравнение сейчас стало расчетным для описания внутренних волн в океане [6]. В научно-исследовательской лаборатории моделирования природных и техногенных катастроф Нижегородского государственного технического университета разработан специальный вычислительный комплекс IWRsearch, решающий уравнение (3) с переменными коэффициентами и рядом дополнительных слагаемых, важных для динамики внутренних волн [7]. В трехслойной жидкости при определенных условиях на толщину слоев динамика внутренних волн описывается так называемым 2+4 уравнением Кортевега-де Вриза [8]

$$\frac{\partial u}{\partial t} + 6u^2(1 - u^2) \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} = 0 \quad (4)$$

Уравнение (4) уже не интегрируемо в общем случае, хотя структуру бегущих волн легко исследовать на фазовой плоскости. Солитоны в такой системе взаимодействуют неупруго, и за ними появляются осциллирующие хвосты. В случае многослойной стратификации водного потока возможно появление членов более высокого порядка по нелинейности [9], что приводит к существованию решений в виде «многомасштабных» солитонов. Следует, правда, отметить, что более высокие степени нелинейности в уравнении типа Кортевега-де Вриза могут приводить к неустойчивости решений взрывного характера, так что наличие даже малых слагаемых по дисперсии и диссипации является принципиальным с физической точки зрения для подавления взрывной неустойчивости. Для волн в упругих средах, свойства которых разные по отношению к растяжению или сжатию, недавно выведено «модулярное» КдВ уравнение [10, 11]

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial |u|}{\partial x} + \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} = 0 \quad (5)$$

которое также неинтегрируемо. Для однополярных импульсов оно становится линейным, так что сразу ясно, что оно не допускает существование однополярных солитонов. Однако такие солитоны могут существовать на пьедестале. Периодические волны в такой системе не являются гладкими.

Ионно-звуковые волны в плазме также описываются различными уравнениями КдВ типа. Так, если в плазме есть отрицательные ионы, то в зависимости от концентрации можно получить уравнение (3) [12, 13]. Если же есть в плазме резонансные частицы, то динамика волн описывается уравнением Шамеля [14]

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{5}{2} \frac{\partial |u|^{3/2}}{\partial x} + \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} = 0 \quad (6)$$

Оно нелинейно даже в случае однополярных импульсов и допускает существование солитонов на нулевом пьедестале.

В кристаллических решетках при определенных условиях длинные волны описываются лог-КдВ уравнением [15-17]

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(u \ln |u|)}{\partial x} + \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} = 0 \quad (7)$$

В рамках этого уравнения солитон описывается гауссовой функцией.

Приведенные примеры показывают широкое разнообразие уравнений КдВ типа с высшими нелинейностями, описывающих реальные физические процессы. Важно, что все они сохраняют главное свойство исходных систем в линейном приближении: неизменность знака отношения групповой скорости к фазовой, так что возможные излучения волн (дисперсионных хвостов) происходят только в одном направлении.

Фракционные уравнения КдВ типа

В ряде случаев возникают уравнения Кортевега-де Вриза, в которых линейная дисперсия третьего порядка исчезает. Такая ситуация возникла еще при выводе классического уравнения Кортевега-де Вриза в их оригинальной статье для гравитационно-капиллярных волн на поверхности тонкого слоя воды в случае компенсации эффектов гравитации капиллярными эффектами. В этом случае уравнение (1) заменяется на

$$\frac{\partial u}{\partial t} + 6u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial^5 u}{\partial x^5} = 0. \quad (8)$$

Это уравнение, получившее название уравнения Кавахары, встречается в динамике плазмы, когда волна распространяется под определенным углом к магнитному полю [18], в нелинейных электрических цепях [19] и для внутренних волн в двухслойной жидкости с учетом поверхностного натяжения между слоями в стратифицированной жидкости [20]. В рамках этого уравнения солитоны имеют осциллирующие хвосты и могут притягиваться друг к другу. Уравнение (8) не является интегрируемым с точки зрения математической физики.

В случае, когда закон дисперсии описывается не аналитическими функциями, уравнение типа Кортевега-де Вриза становится интегро-дифференциальным. Такая ситуация реализуется для внутренних волн в двухслойном океане, когда один слой тонкий, а другой толстый (по сравнению с длиной волны). Дисперсионное соотношение для волн в таком океане в пределе длинных волн имеет вид (без коэффициентов): $\omega = k(1-|k|)$, а соответствующее эволюционное уравнение, называемое уравнением Бенджамина-Оно, имеет вид [21]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + 6u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \frac{dy}{y-x} = 0. \quad (9)$$

Уединенные волны в уравнении Бенджамина-Оно описываются алгебраическими функциями с медленно спадающими хвостами. Это уравнение оказалось интегрируемым методами обратной задачи. Есть и другие примеры интегральной дисперсии, например, уравнение Уизема, где дисперсионное соотношение для волн на воде учитывается в самом общем виде [21]. Удалось показать, что волновые пакеты в рамках уравнения Уизема модуляционно неустойчивы, а, следовательно, возможно появление волн-убийц [22].

В самом общем виде, приведенные выше уравнения являются частными случаями дробного уравнения КдВ типа

$$\frac{\partial u}{\partial t} + bu \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} [L(u)] = 0, \quad (10)$$

где в Фурье пространстве оператор L является степенной функцией волнового числа

$$L(k)u(k) = -|k|^\alpha u(k). \quad (11)$$

При $\alpha = 1$ уравнение (10) сводится к уравнению Кортевега-де Вриза, при $\alpha = 2$ – к уравнению Бенджамина-Оно, а при $\alpha = 4$ – к уравнению Кавахара. В приложениях число α может быть и дробным (но положительным).

Фракционные уравнения КдВ типа, когда они не сводятся к дифференциальным уравнениям, трудно исследовать аналитически. Численно же они легко решаются с использованием псевдо-спектрального метода, на чем мы здесь останавливаться не будем. Структура бегущих волн (как периодических, так и уединенных) находится численно с помощью метода Петвиашвили [23, 24].

Бегущие волны в системах, описываемых уравнениями КдВ типа с дисперсией третьего порядка

Для последующего анализа удобно записать уравнения КдВ типа с дисперсией третьего порядка в обобщенном виде

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} f(u) + \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} = 0. \quad (12)$$

Бегущие волны (как периодические, так и уединенные) описываются простым уравнением второго порядка, вытекающим из (12)

$$\frac{d^2 u}{dx^2} + f(u) - cu + B = 0, \quad (13)$$

где c – скорость движения волны, B – произвольная константа интегрирования. При исследовании солитонов с физической точки зрения можно считать пьедестал нулевым, иначе вывод уравнения типа КдВ необходимо проводить относительно другого невозмущенного уровня. Тогда $B = -f(0)$. Во всех рассматриваемых выше случаях $f(0) = 0$, так что $B = 0$. Интегрируя еще раз уравнение (13), получим

$$\frac{1}{2} \left(\frac{du}{dx} \right)^2 + F(u) - \frac{c}{2} u^2 = 0, \quad (14)$$

где $F(u) = \int_0^u f(v) dv$ и константа интегрирования выбрана равной нулю из условия нулевого пьедестала. В максимуме солитона $du/dx = 0$, поэтому из (14) легко находится связь скорости солитона с его амплитудой

$$c = \frac{2F(A)}{A^2}. \quad (15)$$

Форма солитона легко находится из (14) в интегральной форме

$$\pm x = \int \frac{du}{\sqrt{cu^2 - 2F(u)}}. \quad (16)$$

В случае $f(u)=|u|^m$, где m – любое число, не обязательно целое ($m > 1$), солитон описывается явной формулой

$$u(x,t) = A \operatorname{sech}^{\frac{2}{m-1}} \left[\frac{m-1}{2} \sqrt{\frac{A^{m-1}}{m+1}} (x-ct) \right], \quad c = \frac{2}{m+1} A^{m-1}, \quad (17)$$

за исключением случая $m = 1$ (модулярное КдВ уравнение), для которого не существует солитонов на нулевом пьедестале, о чем уже говорилось выше. Отметим важные свойства солитона, в частности, подсчитаем его массу

$$M = \int_{-\infty}^{+\infty} u(x) dx \sim A^{\frac{3-m}{2}}, \quad (18)$$

и энергию

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} u^2(x) dx \sim A^{\frac{5-m}{2}}. \quad (19)$$

Обратим внимание, что уже для модифицированного КдВ уравнения ($m = 3$) масса солитона не зависит от амплитуды. Это значит, что в задаче об эволюции начального возмущения можно сразу найти число генерируемых солитонов, подсчитав массу начального возмущения. С увеличением m масса солитона начинает падать с ростом его амплитуды, и это уже означает необычность поведения солитона во внешних полях. С точки зрения энергии переходный режим осуществляется при $m = 5$, и с физической точки зрения солитон уже должен разрушаться, например, при введении сколько угодно малой диссипации, когда энергия должна только уменьшаться.

Эти простые соображения подкрепляются анализом устойчивости солитонов, а также прямого численного решения уравнения КдВ типа с $m \geq 5$, когда решения становятся неустойчивыми и взрываются на конечных временах [25]. Отметим, правда, что если знак нелинейности отрицательный при $m = 5$, как в уравнении (4), то решение этого уравнения устойчиво, хотя оно не допускает солитонов на нулевом пьедестале. Таким образом, физически разумные уравнения КдВ типа не обладают неустойчивыми свойствами. Это означает, что солитонный газ в такого рода уравнениях будет обладать в какой-то степени тривиальной динамикой, солитоны будут сохраняться (в интегрируемых системах) или жить конечное время (в неинтегрируемых системах). Тем не менее, в процессе их взаимодействия могут появляться очень большие волны, называемые волнами-убийцами, и этот процесс уже исследован нами для модифицированного КдВ уравнения (2) и уравнения Гарднера (3), см., например, [3].

Аналогичные результаты получаются и для периодических, так называемых кноидальных волн, эти результаты суммированы в [26].

Заключение

Приведенные уравнения семейства КдВ типа описывают разнообразные волновые процессы в океане, электродинамике, теории упругости и астрофизической плазме. Некоторые из них достаточно нетривиальны и содержат модули от волновых полей или интегральную дисперсию, что должно приводить к трудностям их аналитического анализа. В настоящее время в основном исследованы волновые процессы в средах с полиномиальной нелинейностью $f(u)=u^m$, а «модульные» и «фракционные» уравнения еще предстоит изучить. Отметим, что ранее обращалось внимание на интегрируемость уравнений КдВ типа и устойчивости соли-

тона. Сейчас же пик исследований переносится здесь на волновые пакеты и солитонную турбулентность, а также на возможность образования волн-убийц. Точные результаты здесь пока получены для частных случаев.

Представленные результаты получены в рамках выполнения гос. задания в сфере научной деятельности (Задание № 5.5176.2017/8.9), гранта Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ РФ НШ-2685.2018.5, грантов РФФИ (17-05-00067, 16-02-00167, 16-05-00049, 16-32-60012), а также при поддержке Австрийского научного фонда (FWF), проекты P24671 и P30887.

Библиографический список

1. **Grimshaw, R.** The modified Korteweg – de Vries equation in the theory of large-amplitude internal waves / R. Grimshaw, E. Pelinovsky, T. Talipova // *Nonl. Processes in Geoph.* – 1997. – Vol. 4. – P. 237-350.
2. **Grimshaw, R.** Short-lived large-amplitude pulses in the nonlinear long-wave model described by the modified Korteweg–de Vries equation / R. Grimshaw, E. Pelinovsky, T. Talipova, M. Ruderman, R. Erdelyi // *Studied Applied Mathematics.* – 2005. – Vol. 114. – P. 189-210.
3. **Пелиновский, Е.Н.** Солитонный газ; взаимодействия, турбулентность и волны-убийцы / Е.Н. Пелиновский, Е.Г. Шургалина, А.В. Слюняев // *Нелинейные волны-2016.* – Нижний Новгород: ИПФ, 2017. – С. 279-293.
4. **Shurgalina, E.G.** Nonlinear dynamics of a soliton gas: Modified Korteweg-de Vries equation framework / E.G. Shurgalina, E.N. Pelinovsky // *Physics Letters A.* – 2016. – Vol. 380 (24). – P. 2049-2053.
5. **Пелиновский, Е.Н.** Формирование волн-убийц в солитонном газе, описываемом модифицированным уравнением Кортевега - де Вриза / Е.Н. Пелиновский, Е.Г. Шургалина // *Доклады Академии Наук.* – 2016. – Т. 470. – №1. – С. 26-29.
6. **Holloway, P.** A Generalized Korteweg - de Vries Model of internal tide transformation in the coastal zone / P. Holloway, E. Pelinovsky, T. Talipova // *J. Geophys. Res.* – 1999. – Vol. 104. – No. C8. – P. 18333-18350.
7. **Тюгин, Д.Ю.** Проблемно-ориентированный программный комплекс для моделирования динамики внутренних волн в стратифицированном океане / Д.Ю. Тюгин, А.А. Куркин, О.Е. Куркина // *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева.* – 2018. – № 2. – С. 52-59.
8. **Куркина, О.Е.** Динамика солитонов неинтегрируемой версии модифицированного уравнения Кортевега – де Вриза / О.Е. Куркина, А.А. Куркин, Е.А. Рувинская, Е.Н. Пелиновский, Т. Соомере // *Письма в ЖЭТФ.* – 2012. – Т. 95. – С. 98-103.
9. **Derzho, O.G.** Brief communication: Multiscaled solitary waves / O.G. Derzho // *Nonlinear Processes Geophysics.* – 2017. – Vol. 24. – P. 695-700.
10. **Руденко, О.В.** Модельные солитоны / О.В. Руденко // *ДАН.* – 2016. – Т. 471. – С. 651-654.
11. **Nazarov, V.E.** Stationary waves in a bimodular rod of finite radius / V.E. Nazarov, S.B. Kiyashko, A.V. Radostin // *Wave Motion.* – 2017. – Vol. 75. – P. 72-76.
12. **Ruderman, M.S.** Dynamics of modulationally unstable ion-acoustic wave packets in plasmas with negative ions / M.S. Ruderman, T. Talipova, E. Pelinovsky // *J. Plasma Physics.* – 2008. – Vol. 74. – P. 639-656.
13. **El-Tantawy, S.A.** Rogue waves in electronegative space plasmas: The link between the family of the KdV equations and the NLS equation / S.A. El-Tantawy // *Astrophys Space Sci.* – 2016. – Vol. 361. – ID 164 (9 pages).
14. **Schamel, H.** A modified Korteweg-de Vries equation for ion acoustic waves due to resonant electrons / H. Schamel // *J. Plasma Phys.* – 1973. – Vol. 9. – P. 377–387.
15. **Пелиновский, Д.Е.** Аналитические приближения уединенных волн в зернистых кристаллах / Д.Е. Пелиновский, А.Р. Гиниятуллин, Ю.А. Панфилова, Е.Г. Шургалина, А.А. Родин // *Труды НГТУ.* – 2013. – № 3 (100). – С. 55-69.
16. **Dumas, E.** Justification of the log-KdV equation in granular chains: the case of precompression / E. Dumas, D.E. Pelinovsky // *SIAM J. Math. Anal.* – 2014. – Vol. 46. – 4075-4103.
17. **Pelinovsky, D.E.** On the linearized log-KdV equation // *Commun. Math. Sci.* – 2017. – Vol. 15. – P. 863–880.

18. **Obregon, M.A.** Oblique magneto-acoustic solitons in rotating plasma / M.A. Obregon, Yu.A. Stepanyants // Phys. Lett. A. – 1998. – Vol. 249. – P. 315-323.
19. **Nagashima, H.** Experiment on solitary waves in the non-linear transmission-line described by the equation $du/dt + udu/dz - d^2u/dz^2 = 0$ / H. Nagashima // J. Phys. Soc. Japan. – 1979. – Vol. 47. – P. 1387-1388
20. **Гиниятуллин, А.Р.** Обобщенное уравнение Кортевега-де Вриза для внутренних волн в двухслойной жидкости / А.Р. Гиниятуллин, А.А. Куркин, О.Е. Куркина, Ю.А. Степанянц // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. – 2014. – Т. 7. – № 4. – С. 16-28.
21. **Додд, Р.** Солитоны и нелинейные волновые уравнения / Дж. Эйлбек, Дж. Гиббон, Х. Морис, Р. Додд. – М.: Мир, 1988. – 694 с.
22. **Hur, V.** Modulational instability in the Whitham equation for water waves / V. Hur, M.A. Johnson // Stud. Appl. Math. – 2014. – Vol. 134. – P. 120-143.
23. **Duran, A.** An efficient method to compute solitary wave solutions of fractional Korteweg - de Vries equations / A. Duran // Int. J. Comp. Math. – 2018. – Vol. 95. – P. 1362-1374.
24. **Le, U.** Convergence of Petviashvili's method near periodic waves in the fractional Korteweg-de Vries equation / U. Le, D. Pelinovsky // ArXiv:1809.02725v1 [math.AP], 8 Sept 2018.
25. **Klein, C.** Numerical study of blow-up and dispersive shocks in solutions to generalized Korteweg-de Vries equations / C. Klein, R. Peter // Physica D. – 2015. – Vol. 304-305. – P. 52-78.
26. **Tobisch, E.** Conditions for modulation instability in higher order Korteweg–de Vries Equations / E. Tobisch, E. Pelinovsky // Applied Mathematics Letters. – 2018. <https://doi.org/10.1016/j.aml.2018.08.001> (дата обращения 03.08.2018).

Дата поступления

в редакцию: 25.09.2018

**E.N. Pelinovsky¹⁻⁴, E.G. Didenkulova (Shurgalina)^{1,2}, T.G. Talipova^{1,2},
E. Tobisch⁵, Yu.F. Orlov², A.V. Zen'kovich²**

KORTEWEG-DE VRIES TYPE EQUATIONS IN APPLICATIONS

Institute of applied physics RAS, Nizhny Novgorod¹,
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev²,
National research university - Higher school of economics, Moscow³,
Special research bureau for automation of marine researches, far eastern branch of Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk⁴,
Kepler university, Linz, Austria⁵

Purpose: Discussed some practical applications of the KdV-type equations and the general properties of their solutions.

Design/methodology/approach: A theoretical framework based on weakly nonlinear theory. A set of models based on classical KdV equation are considered.

Findings: A set of integrable and non-integrable equations of Korteweg-de Vries type describing different wave processes in the ocean, electrodynamics, elasticity theory and astrophysical plasma are collected and discussed.

Research limitations/implications: Collected and considered here equations expand the class of known Korteweg–de Vries and modified Korteweg-de Vries equations to non-integrable models used in different physical and technical applications.

Key words: Korteweg-de Vries type equations, *travelling waves, solitons.*

УДК 004.023

О.П. Тимофеева, С.А. Неимушев, Л.И. Неимущева

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОПУЛЯЦИОННЫХ АЛГОРИТМОВ
В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ НЕПРЕРЫВНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Задачи поиска оптимальных решений часто возникают как в науке, так и в прикладных областях человеческой деятельности. Планирование событий, управление экономическими системами, проектирование производственных систем направлено на поиск наилучшего варианта для нахождения поставленной цели. Задачи могут иметь множество особенностей, что объясняет отсутствие универсального алгоритма для их решения. Особенно сложны в решении задачи со сложным ландшафтом поверхности поиска, связанные с такими понятиями, как многоэкстремальность, овражность, многокритериальность. Для эффективного решения сложных оптимизационных задач актуально использовать класс алгоритмов, называемый популяционными алгоритмами. В статье рассматриваются принципы работы обезьяньего алгоритма, поиска косяком рыб и электромагнитного алгоритма. Приведен набор задач для тестирования алгоритмов и сравнительный анализ результатов тестирования.

Ключевые слова: непрерывная оптимизация, популяционные алгоритмы, обезьяний алгоритм, поиск косяком рыб, электромагнитный алгоритм.

Введение

В последние годы глобальная оптимизация стала быстро развивающейся областью. Вопросы поиска оптимальных решений возникают во многих сферах, как в области научных исследований, так и в прикладных областях. Многие задачи оптимизации, например, в физике, химии; а также проблемы построения методов, например, в классе машинного обучения, включают нелинейные функции многих переменных с различными дополнительными атрибутами (мульти-modalность, разрыв и т.д.), которые трудно оптимизировать с помощью обычных математических инструментов, таких как градиентные методы, относящихся к группе аналитических методов. Появление метаэвристических алгоритмов стало ответом на спрос на надежные, быстрые и гибкие методы оптимизации.

Для общего обозначения членов популяции используется термин «агент». В каждом виде популяционного алгоритма присутствует свой вид агента: частицы, муравьи, пчелы, обезьяны, а в более общем случае индивидуумы или особи. Популяционные алгоритмы предполагают наличие одного и более агентов. На каждом шаге решения агенты перемещаются в соответствии с конкретным алгоритмом. В зависимости от конкретного популяционного алгоритма у агента есть стратегия поведения. Это формирует сложное поведение популяции и называется роевым интеллектом.

На первых шагах решения задачи агенты занимаются исследованием поисковой области для нахождения вариантов решения, а на дальнейших этапах занимаются уточнением полученных результатов. Поскольку принцип работы популяционных алгоритмов является стохастическим, то на эффективность их работы сильно влияет результат начального приближения, полученного на стадии инициализации популяции. По этой причине для корректной оценки эффективности этих алгоритмов алгоритм прогоняется несколько раз, исходя из различных начальных приближений, полученных после инициализации. Таким образом, для оценки алгоритма используются такие критерии, как вероятность нахождения глобального экстремума, скорость сходимости и определение среднего необходимого числа прогонов (испытаний) [1].

Одной из особенностей популяционных алгоритмов является наличие большого числа свободных параметров, от которых напрямую зависит эффективность. Рекомендации по подбору свободных параметров отсутствуют, поэтому они подбираются уникально для каждой

задачи. Для исследования эффективности популяционных алгоритмов были выбраны три алгоритма, идеи которых инспирированы живой и неживой природой: обезьяний алгоритм, поиск косяком рыб и электромагнитный алгоритм.

Обезьяний алгоритм

Обезьяний алгоритм моделирует поведение обезьян в процессе их лазания по горам с целью поиска пищи. Полагают, что обезьяны исходят из того, что чем выше гора, тем больше пищи на ее вершине [2].

Метод основан на моделировании поведения обезьян, которые исследуют гористую местность с целью поиска пищи. Цель обезьян – найти самую высокую вершину горы. Эта вершина является максимальным значением целевой функции. На вершину обезьяна будет взбираться с ее начальной позиции. Этот шаг называется набором высоты или процессом движения вверх (climb process). Для каждой обезьяны, когда она добирается до вершины, естественно осмотреться и узнать, есть ли вокруг горы выше. Если есть, то обезьяна прыгнет на эту гору, то есть совершит локальный прыжок (watch-jump process), а затем повторит процесс набора высоты. После повторений процесса набора высоты и процесса локального прыжка обезьяна найдет локально максимальную вершину вокруг своей начальной позиции. Чтобы найти гораздо более высокую вершину горы, каждой обезьяне необходимо совершить глобальный прыжок (somersault process). Оптимальное решение будет получено после окончания всех повторных итераций набора высоты, локального и глобального прыжков.

Инициализация популяции. Для каждой обезьяны в популяции необходимо инициализировать позицию. Для этого в алгоритме полагается, что пространство, содержащее потенциальные оптимальные решения, определено заранее. Обычно эта область имеет правильную форму, например, n -мерный гиперкуб, поскольку компьютеру удобно отбирать случайные точки из такой области. Такая точка будет получена в том случае, если удовлетворяет всем ограничениям.

Процесс движения вверх. Процесс подъема – это пошаговая процедура для изменения позиций обезьян от исходных до новых, которые могут улучшить целевую функцию. На каждой итерации в процессе подъема случайным образом генерируется вектор шага перемещения, значения которого могут равновероятно принимать значения свободного параметра a . Если значение целевой функции в новой позиции является более оптимальным, то обезьяна перемещается вдоль этого вектора, в противном случае она перемещается в противоположную этому вектору сторону. Количество итераций определяется свободным параметром алгоритма.

Локальный прыжок. После процесса подъема каждая обезьяна прибывает на свою собственную вершину. После этого она осматривается и определяет, существуют ли другие точки вокруг неё выше текущей. Данный процесс выполняется для каждого агента популяции и заключается в поиске более оптимальной позиции по сравнению с текущей в окрестности этого агента, размер которой определяется свободным параметром алгоритма b .

Этот параметр можно характеризовать как зрение обезьян. Он является тем расстоянием, которое обезьяна может просматривать с вершины горы и на которое она, соответственно, может с неё прыгнуть. Обычно, чем больше область допустимых значений функции, тем больше задается значение данного параметра.

Глобальный прыжок. Основная цель глобального прыжка – дать возможность обезьянам изучить новые поисковые области. В качестве основы выбирается центр масс позиций всех обезьян. Еще одним свободным параметром является интервал глобального прыжка $[c, d]$. Из этого интервала случайно генерируется число α . Если $\alpha \geq 0$, то обезьяна будет совершать глобальный прыжок по направлению центра тяжести, в противном случае будет двигаться от него.

Поиск косяком рыб

Поиск косяком рыб или поиск агрегацией рыб – это оптимизационный алгоритм, основанный на поведении стаи рыб. Многие виды рыб проявляют так называемое стадное поведение, направленное в основном на повышение их выживаемости. С одной стороны, группировка рыб в стае нужна для защиты от преследования хищниками, а, с другой стороны – как средство достижения коллективной цели, то есть поиска пищи [3]. Областью допустимых решений является аквариум, при этом положение рыбы в нем отражает текущий вектор решений. Этапами алгоритма здесь являются операторы, применяемые ко всей популяции. Основные операторы были взяты из поведения агрегации рыб в живой природе и представляют собой кормление и плавание. Такая характеристика как кормление вдохновлена естественным инстинктом рыб к поиску пищи. От этого процесса зависит такой параметр алгоритма, как вес рыбы. Вес рыбы рассчитывается как разница между значением целевой функции на текущем и предыдущем шаге. Процесс кормления в алгоритме является аналогичным процессу оценки решений в оптимизации целевой функции. Этап плавания направлен на подражание коллективному движению, производимому каждой рыбой в агрегации. Процесс плавания управляется кормлением, то есть зависит от веса рыб, и в конечном счете будет направлять процесс поиска с целью получения оптимальных позиций рыб.

Оператор кормления. Под областью поиска оптимума будем понимать аквариум, в котором находятся рыбы. Рыбы привлекаются пищей, которая разбросана по аквариуму. Чтобы найти больше пищи, рыбы могут выполнять независимые передвижения отдельно от стаи. В результате этого каждая рыба может увеличиваться или уменьшаться в весе в зависимости от ее успеха или неудачи в поиске пищи. Предполагается, что изменение веса рыбы пропорционально нормализованной разнице между значением целевой функции на текущем и предыдущем шаге относительно концентрации пищи в этих позициях.

Изменение веса рыбы оценивается один раз в каждом цикле алгоритма. Для того, чтобы ограничить вес рыбы, в алгоритме существует свободный параметр, называемый максимальным весом агента популяции и обозначаемый W_{scale} . Вес рыбы может изменяться от единицы до величины этого параметра. В начале работы алгоритма вес рыб равен значению $\frac{W_{scale}}{2}$.

Оператор плавания. В алгоритме поиска косяком рыб плавание агрегации рыб является результатом нескольких явлений, таких как индивидуальное и коллективное плавание, кормление, размножение, побег от хищников, а также перемещение в более пригодные для жизни районы аквариума. Именно эти процессы разбивают этот оператор на группы: индивидуальное плавание, коллективно-инстинктивное плавание и коллективно-волевое плавание.

Индивидуальные перемещения происходят у каждой рыбы в аквариуме в каждом цикле алгоритма. Направление плавания выбирается случайным образом. Если точка перемещения агента находится в границах аквариума, то рыба оценивает плотность пищи в этой точке. С точки зрения задачи оптимизации на этом этапе проверяется, находится ли точка в области допустимых значений, а также проверяется, лучше ли значение целевой функции в этой точке. Если какое-то из этих условий не выполняется, то индивидуальное движение рыбы не происходит. Вскоре после каждого отдельного движения происходит кормление. Для индивидуального плавания определяется свободный параметр алгоритма, называемый максимальным шагом индивидуального перемещения. Индивидуальное плавание может включать в себя как одну, так и несколько итераций, поэтому этот процесс также можно назвать локальным поиском решения.

Коллективно-инстинктивное плавание. После индивидуального плавания рыб вычисляется среднее взвешенное количество отдельных движений, основанных на мгновенном успехе всех рыб в популяции. Это означает, что рыбы, которые имели успешные индивидуальные перемещения, больше других влияют на результирующее направление.

После индивидуального и коллективно-инстинктивного плавания нужна еще одна корректировка позиций рыб, а именно *коллективно-волевое плавание*. Это движение сформировано как общая оценка успеха или неудачи популяции, основанная на постепенном изменении веса агрегации рыб в целом. То есть этот этап основан на общей производительности рыб. Если стая рыб набирает вес (что означает успех поиска), то все агенты популяции смещаются в направлении текущего центра тяжести всей агрегации, а если теряет вес, то от него. Считается, что этот этап помогает в возможности разведки области допустимых решений.

Коллективно-волевое движение будет иметь разное направление в зависимости от того, увеличился или уменьшился ранее зарегистрированный вес агрегации в зависимости от нового общего веса, наблюдаемого в конце текущего цикла. Для этого определяется свободный параметр алгоритма *vol*, называемый волевым шагом. Этот параметр умножается на случайное число, порожденное равномерным распределением в интервале $[0, 1]$. С каждой итерацией волевой шаг алгоритма линейно уменьшается с коэффициентом, называемым коэффициентом уменьшения шага.

Электромагнитный алгоритм

Электромагнитный алгоритм имеет в своей основе идею механизма притяжения-отталкивания теории электромагнетизма. Каждый элемент популяции – это заряженная частица, которая высвобождается в пространство. Пространством является область допустимых решений, а позиция частицы в этом пространстве – потенциальным вектором решения задачи [4].

Основной характеристикой частицы является заряд частицы, зависящий от значения целевой функции в текущей позиции. Он также определяет величину притяжения или отталкивания точки по отношению к популяции – чем выше значение целевой функции, тем выше величина притяжения. Алгоритм состоит из четырех фаз: фаза инициализации популяции, вычисление суммарной силы, действующей на каждую из частиц, движение частиц вдоль направления этой силы и применение локального поиска для продвижения к локальному минимуму.

Инициализация. Процедура инициализации используется для распределения m точек равномерно по области допустимых значений, которая, в свою очередь, является n -мерным гиперкубом. После того, как точка была распределена в пространстве, необходимо вычислить значение целевой функции с набором параметров, соответствующих положению этой точки. Конец процедуры наступает тогда, когда все m точек были распределены.

Локальный поиск. Процедура локального поиска используется для получения информации об окрестности каждой точки. Свободные параметры *LSITER* и δ представляют собой количество итераций в локальном поиске и множитель для поиска в окрестности соответственно. Процедура повторяется следующим образом: во-первых, вычисляется максимально допустимая длина шага в соответствии со свободным параметром δ . Во-вторых, для i -ой частицы, улучшение в ее положении x^i происходит итеративно по каждой координате. Для каждой координаты, положение x^i назначается временной точке u для хранения исходной информации. Затем в качестве длины шага выбирается случайное число, и точка u изменяет текущую координату на выбранную длину. Если в новой точке за количество итераций *LSITER* достигается лучшее значение целевой функции, то положение x^i заменяется положением точки u и локальный поиск для частицы i заканчивается. В конце процедуры обновляется текущая лучшая точка.

Вычисление вектора суммарной силы. Если частица s_i находится в электростатическом поле с множеством других частиц s_j , то справедлив принцип суперпозиции, в соответствии с которым результирующий вектор \vec{F}_i сил, действующих на s_i , представляет собой сумму векторов \vec{F}_{ij} (рис. 1).

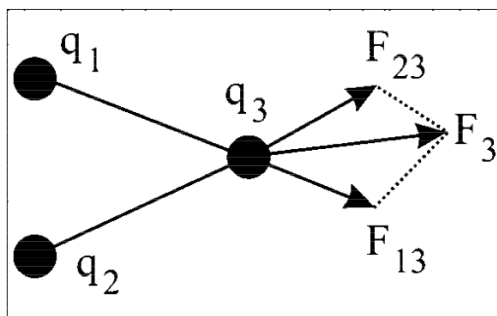


Рис. 1. Демонстрация принципа суперпозиции

На этапе вычисления вектора суммарной силы в первую очередь происходит вычисление зарядов точек согласно значениям их целевой функции. Однако в данной эвристике заряд каждой точки не является постоянным и меняется от итерации к итерации. Заряд каждой точки i , q^i , определяет силу притяжения или отталкивания точки i . Точки, которые имеют лучшие значения целевой функции, имеют более высокие заряды. Необходимо обратить внимание, что в отличие от электрических зарядов никакие знаки не привязаны к заряду отдельной точки в уравнении. Вместо этого направление определенной силы между двумя точками определяется после сравнения значений их целевой функции.

При рассмотрении двух точек точка, имеющая лучшее значение целевой функции, привлекает другую. Напротив, точка с худшим значением целевой функции отталкивает другую. Поскольку в популяции всегда существует точка, которая имеет минимальное значение целевой функции, то она действует как абсолютная точка притяжения, к которой привлекаются все остальные точки в популяции.

Движение вдоль вектора суммарной силы. После вычисления суммарного вектора силы F^i , i -ая частица перемещается в направлении этой силы на случайную длину шага. Здесь предполагается, что случайная длина шага λ равномерно распределена между 0 и 1. Очевидно, что существует множество других распределений, которые могут быть использованы при вычислении этой длины шага. Но для удобства вычислений применяется равномерное распределение. Длина шага выбирается случайным образом, чтобы гарантировать, что точки могут переместиться в еще не посещенные ранее области вдоль этого направления и вероятность такого перемещения не равна нулю.

Исследование результатов работы алгоритмов

Исследование популяционных алгоритмов проводилось на наборе тестовых математических функций без привязки к конкретной прикладной области.

Для каждого из алгоритмов свободные параметры и начальное приближение подбираются случайно, поэтому чтобы оценить эффективность работы конкретного алгоритма, необходимо использовать многократный прогон этого алгоритма. Для тестирования алгоритмов было реализовано программное обеспечение, позволяющее запускать каждый из алгоритмов на наборе тестовых функций как условной, так и безусловной оптимизации, модифицировать свободные параметры алгоритма, при этом имеется возможность запускать серию прогонов алгоритма и получить статистику по лучшему, худшему и среднему результату в серии. На рис. 2 представлен пример работы программы для обезьяньего алгоритма.

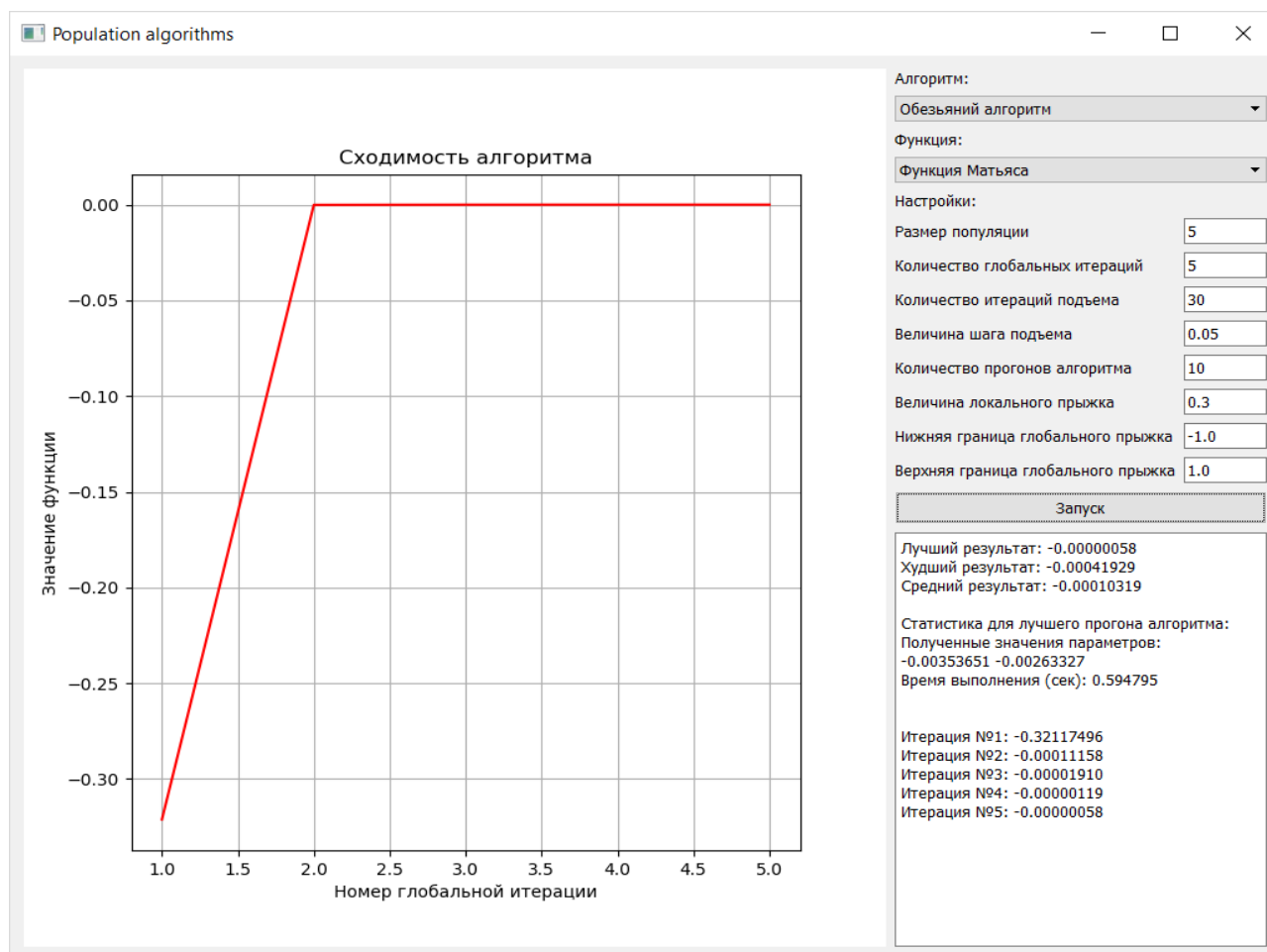


Рис. 2. Пример работы программы

Работоспособность оптимизационных алгоритмов проверялась на наборе тестовых функций, обладающих специфической топографией [5]. Тестовые функции представлены в табл. 1.

Таблица 1

Функции для тестирования оптимизационных алгоритмов

Название задачи	Постановка задачи
Функция Розенброка	$f_1 = (1 - x_1)^2 + 100(x_2 - x_1^2)^2 \rightarrow \min$
Функция Растригина	$f_2 = 20 + x_1^2 + x_2^2 - 10(\cos 2\pi x_1 + \cos 2\pi x_2) \rightarrow \min$
Функция Экли	$f_3 = 20 + e - 20e^{-\frac{1}{5}\sqrt{\frac{1}{2}(x_1^2 + x_2^2)}} - e^{\frac{1}{2}(\cos(2\pi x_1) + \cos(2\pi x_2))} \rightarrow \min$
Функция Химмельбау	$f_4 = (x_1^2 + x_2 - 11)^2 + (x_1 + x_2^2 - 7)^2 \rightarrow \min$
Функция Матьяса	$f_5 = 0.26(x_1^2 + x_2^2) - 0.48x_1x_2 \rightarrow \min$

Окончание табл. 1.

Функция Била	$f_6 = (1.5 - x_1 + x_1x_2)^2 + (2.25 - x_1 + x_1x_2^2)^2 + (2.625 - x_1 + x_1x_2^3)^2 \rightarrow \min$
Задача линейного программирования с пятью параметрами	$f_7 = \begin{cases} 70x_1 + 50x_2 + 4x_3 + 6x_4 + 8x_5 \rightarrow \max \\ x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 \leq 37 \\ 6x_1 + 10x_2 + 2x_3 + 2x_4 + 6x_5 \leq 168 \\ 5x_1 + 5x_2 + x_3 + 2x_4 + x_5 \leq 100 \\ 2x_1 + 3x_2 + 3x_5 \leq 30 \\ x_{1,2,3,4,5} \geq 0 \end{cases}$
Функция Розенброка с ограничениями в виде кубической и прямой	$f_8 = \begin{cases} (1 - x_1)^2 + 100(x_2 - x_1^2)^2 \rightarrow \min \\ (x_1 - 1)^3 - x_2 + 1 < 0 \\ x_1 + x_2 - 2 < 0 \end{cases}$

В табл. 2 приведены результаты работы алгоритмов для тестовых функций. Для каждого алгоритма выполнено 10 прогонов и приведены три результата, где «Л» – лучший результат, «Х» – худший результат, «С» – средний результат.

Таблица 2

Результаты работы алгоритмов на тестовых функциях

f	Обезьяний алгоритм			Поиск косяком рыб			Электромагнитный алгоритм			Точный результат $f(x_1, x_2)$
	Л	Х	С	Л	Х	С	Л	Х	С	
f_1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0129	0.2920	0.0745	0.0000	0.0030	0.0007	0
f_2	0.0000	4.9753	2.7860	0.0001	4.9837	1.3948	0.0000	0.0000	0.0000	0
f_3	0.0001	3.5745	0.3582	0.0001	0.0010	0.0007	0.0000	0.0001	0.0000	0
f_4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3.6189	0.5463	0.0000	0.0000	0.0000	0
f_5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0
f_6	0.0001	0.0166	0.0048	0.0000	0.0029	0.0008	0.0000	0.0017	0.0004	0
f_7	1139.11	1115.92	1132.61	1132.37	1015.66	1084.29	1137.85	1077.75	1109.76	1144
f_8	0.0113	0.9995	0.9002	0.0000	4.9801	1.7377	0.0000	1.0397	0.7203	0

Заключение

В результате тестирования набора функций была подтверждена гибкость и универсальность популяционных алгоритмов при решении комплексных задач оптимизации. Выявлена хорошая сходимость алгоритма. Необходимо отметить, что реализация электромагнитного алгоритма дает наиболее точные результаты при решении задач с большим набором переменных. Все изученные алгоритмы решают поставленные задачи за достаточно короткое время, являются производительными, поэтому их можно применять и для решения практических задач в различных прикладных областях исследования.

Библиографический список

1. **Матренин, П.В.** Методы стохастической оптимизации: учебное пособие / П.В. Матренин, М.Г. Гриф, В.Г. Сакаев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – 67 с.
2. **Zhao, R.** Monkey Algorithm for Global Numerical Optimization / R. Zhao, W. Tang // Journal of Uncertain Systems. – 2008. – № 3. – С. 165-176.
3. **Карпенко, А.П.** Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: Учебное пособие / А.П. Карпенко. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 446 с.
4. **Ali M.M., Golalikhani M.** An electromagnetism-like method for nonlinearly constrained global optimization / M.M. Ali, M. Golalikhani // Computers & Mathematics with Applications. – 2010. – № 60. – С. 2279-2285.
5. Тестовые функции для оптимизации // Википедия. [2018—2018]. – URL: <http://ru.wikipedia.org/?oldid=92053592> (дата обращения: 01.04.2018).

*Дата поступления
в редакцию: 16.10.2018*

O.P. Timofeeva, S.A. Neimushchev, L.I. Neimushcheva

**INVESTIGATION OF POPULATION-BASED ALGORITHMS IN THE SOLUTION
OF CONTINUOUS OPTIMIZATION PROBLEMS**

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alekseev

Purpose: This article is devoted to research the effectiveness of population-based algorithms for solving various types of continuous optimization problems, selecting parameters for which the result of the algorithms will be most accurate, and also comparing the efficiency of these algorithms.

Design/methodology/approach: The methodology consists in testing three population-based algorithms: monkey algorithm, fish school search and electromagnetism-like algorithm on a set of test problems and make a comparative analysis of the accuracy of the results in comparison with the analytical solution, as well as analyzing the rate of convergence.

Findings: When using the same parameter values, the algorithms showed good convergence results on a set of tasks that differ from one another in the presence of certain attributes, as well as with the search area. In problems with a large number of parameters, the realization of the electromagnetic algorithm provided the most accurate results.

Research limitations/implications: This research opens further prospects for both studying new modifications of this family of algorithms and for applying the current implementation of the algorithms to existing practical optimization problems.

Originality/value: Implementations of algorithms created during the research have shown good results in solving test problems and can be used in applied problems or for comparative analysis with new modifications of algorithms.

Key words: continuous optimization, population-based algorithms, monkey algorithm, fish school search, electromagnetism-like algorithm.

УДК 512

Н.В. Юрова

О КЛАССАХ СОПРЯЖЕННОСТИ В СИМПЛЕКТИЧЕСКОЙ ГРУППЕ $SP_4(q)$

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

Данная статья продолжает ряд работ по проверке гипотезы о том, что в конечной простой группе неединичный класс сопряженности содержит коммутирующие элементы. Ранее это утверждение было проверено для спорадических, проективных $L_n(q)$, знакопеременных групп A_n , групп Ри ${}^2G_2(q)$ и Сузуки ${}^2B_2(q)$. Ряд серий простых конечных групп остается непроверенным, среди них имеются ортогональные $O_{2n+1}(q)$, $O_{2n}(q)^\pm$, унитарные $U_n(q)$ и симплектические $Sp_{2n}(q)$ группы. В данной работе начата проверка упомянутого выше предложения для серии симплектических групп.

Ключевые слова: симплектическая группа, класс сопряженности, конечная простая группа, коммутирующие элементы, центральный элемент.

В предлагаемой статье производится проверка группы $SP_4(q)$ в качестве подготовительного этапа в исследовании группы $SP_{2n}(q)$. Сведения о симплектических группах можно найти в [1-3]. Следующее утверждение оказывается полезным при исследовании как $SP_4(q)$, так и других групп Шевалле [1].

Предложение 1. [4, с. 442]. Пусть V конечномерное векторное пространство над конечным полем F_q и x линейное преобразование с характеристическим многочленом $f(x)$. Если $f(x) = f_1^{n_1}(x)f_2^{n_2}(x)\dots$ разложен на неприводимые множители, то V разлагается в прямую сумму x инвариантных подпространств

$$V = V_1 \oplus V_2 \oplus \dots \oplus V_k = \sum_{i=1}^k V_i,$$

где подпространство V_i аннулируется многочленом $f_i^{n_i}(x)$, то есть $f_i^{n_i}(x)(u) = 0$ при любых u из пространства V , $i = \overline{1, k}$.

В симплектическом случае предложение 1 можно уточнить: при $x \rightarrow x^{-1}$ корни характеристического уравнения $f(x) = 0$ переходят в себя.

Это следует из

$$(xu, v) = \left(u, \frac{1}{x}v \right),$$

где (u, v) – симплектическая метрика.

Обратимся теперь к исследованию группы $SP_4(q)$. Сначала разберем случай четного q .

Можно считать, что $q > 2$, так как группа $SP_4(2)$ изоморфна симметрической группе Σ_6 , а она разобрана в [5].

Информация о классах сопряженности в группе $SP_4(q)$ содержится в статье Еномото [6]. Еномото рассматривает $SP_4(q)$ как группу Шевалле [1], построенную по диаграмме Дынкина [7, с. 312].

Система корней исследуемой группы выглядит следующим образом.

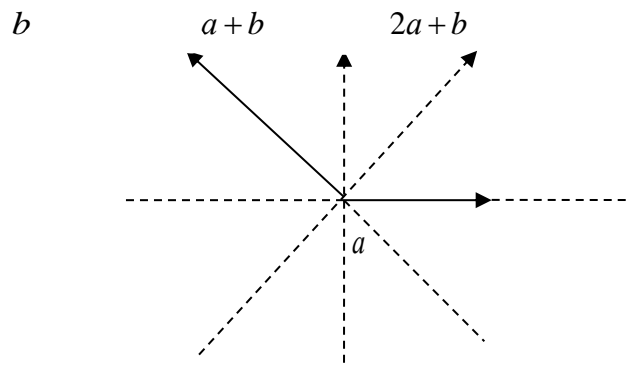


Рис. 1

Представители классов изображаются верхними треугольными 4×4 матрицами вида

$$x = hx_a(u_1)x_b(u_2)x_{a+b}(u_3)x_{2a+b}(u_4),$$

где

$$h = \begin{pmatrix} h_1 & & & \\ & h_2 & & \\ & & h_1^{-1} & \\ & & & h_2^{-1} \end{pmatrix}$$

картановский элемент, а $x_a, x_b, x_{a+b}, x_{2a+b}$ — корневые подгруппы. Аргументы y, h, x берутся в алгебраическом замыкании поля F_q и $h_1, h_2, h_1^{-1}, h_2^{-1}$ являются корнями характеристического многочлена x .

В приводимой таблице $IV - I$ [6] легко обнаруживается, что класс полупростого элемента и смешанного однозначно определяются своими характеристическими многочленами. Поскольку такой многочлен инвариантен при замене $h_1 \rightarrow h_1^{-1}$, то указанные элементы сопряжены со своими обратными.

Осталось разобрать унитарные классы. Такие представляют элементы

$$x_{2a+b}(1), x_{a+b}(1), x_{a+b}(1)x_{2a+b}(1), x_a(1)x_b(1), x_a(1)x_b(1)x_{2a+b}(\xi),$$

где $\xi \in F_q$ таково, что многочлен $x^2 + x + \xi$ неприводим над F_q . Формула [1]

$$h_\alpha(t)x_\beta(u)h_\alpha(t)^{-1} = x_\beta(t^{(\beta, \alpha)}u)$$

при подходящих t и α дает коммутирующий с $x_\beta(u)$ и сопряженный с ним элемент $x_\beta(t^{(\beta, \alpha)}u)$. Тем самым вопрос положительно решается для первых из трех классов унитарных.

Далее,

$$[x_a(1)x_b(1)]^{-1} = x_b(-1)x_a(-1) = x_b(1)x_a(1) = x_b(1)x_a(1)x_b(1)x_b(1)^{-1},$$

то есть $x_a(1)x_b(1)$ сопряжен с обратным. Оба элемента различны, так как x_a и x_b не коммутируют. Наконец, обратный элемент к $x_a(1)x_b(1)x_{2a+b}(\xi)$, не будучи инволюцией, не может лежать в рассмотренных унитарных классах, а, значит, сопряжен с $x_a(1)x_b(1)x_{2a+b}(\xi)$. Случай $q > 2$ рассмотрен.

Пусть теперь q нечетно. Здесь нужную информацию можно извлечь из работы Шринивасана [8]. Он работает с группой $\widehat{SP}_4(q)$, накрывающей группы $SP_4(q)$, и, поэтому надо соблюдать некоторую осторожность с перенесением выводов на $SP_4(q)$. Представители классов представлены 4×4 матрицами с элементами из алгебраического замыкания поля F_q , а потому характеристический многочлен класса легко определяется. Просмотр соответствующей таблицы приводит к заключению, что, как и при четном q , полупростой класс (уже в $SP_4(q)$, а не в $\widehat{SP}_4(q)$) однозначно определяется своим характеристическим многочленом. Вывод $x \sim x^{-1}$ следует из соответствующей инвариантности многочлена. Конечно, случаи $x = \pm x^{-1}$ ничего нового не дают. Их мы разберем позднее.

Смешанные элементы определяются своими характеристическими многочленами, если они имеют вид $P^2(x)$, где $P(x)$ – самосопряженный многочлен с корнями, отличными от ± 1 . Поэтому дальнейшему исследованию подлежат, кроме ранее упомянутого случая $x \sim \pm x^{-1}$, характеристические многочлены $P(x)(x \pm 1)(x^2 - 1)^2$ и унипотенты.

Случай, когда $x = \pm x^{-1}$, то есть инволюция в $SP_4(q)$, можно исключить в силу приведенного в [5] утверждения, по которому в любой простой конечной группе класс инволюций содержит коммутирующие элементы.

Обратимся к исследованию унипотентов. Имеются два класса с представителями типа

$$x = \begin{pmatrix} 1 & a & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

в стандартном базисе $e_1, e_2; e_3, e_4$ (то есть подпространства $\langle e_1, e_2 \rangle$ и $\langle e_3, e_4 \rangle$ ортогональны и симплектические произведения $(e_1, e_2), (e_3, e_4)$ равны единице) и 4 класса с представителями типа

$$x = \begin{pmatrix} 1 & a & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & b \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

В первом случае легко проверить, что x, x^{-1}, x^2 различные, а поэтому два элемента из трех должны оказаться в одном классе. Но тогда $x \sim x^{-1}, x^2$ или x^{-2} , то есть класс элемента x содержит коммутирующие элементы. Во втором случае базис можно также выбрать стандартным. Базис остается стандартным, если их заменить на

$$e'_1 = \lambda e_1, e'_2 = \lambda^{-1} e_2, e'_3 = \mu e_3, e'_4 = \mu^{-1} e_4.$$

При этом a и b в выражении для матрицы x приобретают множители, являющиеся квадратами в F_q^* . При $q > 3$ можно тогда считать a и b различными.

Симплектическое преобразование

$$s = (e_1 \leftrightarrow e_3, e_2 \leftrightarrow e_4)$$

дает

$$y = sxs^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & b & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

то есть класс x содержит коммутирующие элементы x и y . Это рассуждение не проходит при $q = 3$, так как 1 единственный квадрат в F_q^* .

В этом случае надо рассмотреть лишь

$$x = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Здесь мы полагаем

$$s = (e_1 \rightarrow e_1 + e_3, e_2 \rightarrow e_2 + e_4, e_3 \rightarrow -e_1 + e_4, e_4 \rightarrow -e_2 + e_4)$$

и

$$y = (e_1 \rightarrow e_3, e_2 \rightarrow e_3 + e_4, e_3 \rightarrow e_1, e_4 \rightarrow e_1 + e_2).$$

Проверяется, что s и y симплектичны и $sy = ys$, то есть $y \sim x$. Наконец, $xy = -yx$, т.е. x и y коммутируют в группе $SP_4(q)$.

Для смешанных элементов с характеристическим многочленом $P(x)(x \pm 1)^2$, $P(\pm 1) \neq 0$ имеем представление

$$x = \begin{pmatrix} X & 0 \\ 0 & \pm E \end{pmatrix},$$

где $X, E, 0$ 2×2 матрицы и проходит прежнее рассуждение:

$$x \sim y = \begin{pmatrix} \pm E & 0 \\ 0 & X \end{pmatrix}$$

и $xy = -yx$.

В оставшемся случае, когда характеристический многочлен равен

$$(x^2 - 1)^2 = (x - 1)^2(x + 1)^2$$

матрица x выглядит как

$$\begin{pmatrix} 1 & a & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -b \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

Вновь при $q > 3$ a и b можно считать различными.

И опять

$$x \sim y = \begin{pmatrix} -1 & -b & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

и x, y коммутируют.

При $q = 3$ остается случай $a = b = 1$. В том же базисе выберем

$$x = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}, \quad y = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad s = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 & 1/2 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 & -1/2 \end{pmatrix}.$$

Непосредственно проверяется, что все элементы симплектичны и $sx = ys$.

Библиографический список

1. Кострикин, А.И. Введение в алгебру / А. Кострикин. – М.: Наука, 1977. – 496 с.
2. Галкин, В.М. Коммутирующие элементы в классе сопряженности / В.М. Галкин, Л.Н. Ерофеева, С.В. Лещева // Изв. вузов. Математика. – 2016. – № 8. – С. 12-20.
3. Enomoto, H. The characters of the finite symplectic group $Sp(4,q)$, $q = 2^f$ / H. Enomoto // Osaka J. Math. – № 9. – 1972. – С. 75-94.
4. Серр, Ж.-П. Алгебры Ли и группы Ли / Ж.-П. Серр. – М.: Мир, 1969. – 375 с.
5. Стейнберг, Р. Лекции о группах Шевалле / Р. Стейнберг. – М.: Мир, 1975. – 263 с.
6. Горенштейн, Д. Конечные простые группы. Введение в их классификацию / Д. Горенштейн. – М.: Мир, 1985. – 352 с.
7. Дьедонне, Ж. Геометрия классических групп. – М.: Мир, 1974.
8. Srinivasan, V. The characters of the finite symplectic group $Sp(4,q)$ / V. Srinivasan // The research was supported by a National Research Council (Canada) Postdoctoral Fellowship at the University of British Columbia. – September 16. – 1966.
9. Ерофеева, Л.Н. О простой группе $P\Omega_4(q)$ / Л.Н. Ерофеева, С.В. Лещева, Н.В. Мохнина, Н.В. Юрова // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2017. – № 3 (118). – С. 24-27.
10. Галкин, В.М. Коммутирующие элементы в классах сопряженности в группе Сузуки ${}^2B_2(q)$ / В.М. Галкин, Н. В. Мохнина, Н. В. Юрова // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2017. – № 4. – С. 45-49.

Дата поступления
в редакцию: 16.10.2018

N.V. Yurova

ON CONJUGACY CLASSES IN THE SYMPLECTIC GROUP $SP_4(q)$

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alekseev

Purpose: There is the conjecture that every conjugacy class of finite simply group contains the commuting elements. The conjecture for the group $SP_4(q)$ is verified.

Design/methodology/approach: Information on the conjugacy classes of $SP_4(q)$ and $\widehat{SP}_4(q)$ is using.

Findings: This result is an stage of the testing of the general conjecture.

Research limitations/implications: Methods of this paper may be used for the investigation the other groups.

Originality/value: The result is new.

Keywords: symplectic group, conjugacy class, finite simple group, commuting elements, centralizer.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 621.039.586

В.В. Андреев¹, М.А. Берберова², Л.М. Сапаркин¹

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОЦЕНКИ УЩЕРБА, НАНЕСЕННОГО НАСЕЛЕНИЮ В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ АВАРИЯХ НА АЭС (НА ПРИМЕРЕ НОВОВОРОНЕЖСКОЙ АЭС)

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Международный Центр по ядерной безопасности²

Проблема оценок показателей риска особо опасных объектов (в частности, АЭС) является важной задачей для разработки комплекса мер предосторожности. Речь идет об оценках ущерба в результате аварий на АЭС. Представлены модель расчета ущерба, нанесенного населению при авариях на АЭС, а также сфера ее применения для аварии на энергоблоках с реакторами типа ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 Нововоронежской АЭС. Общий экономический ущерб для энергоблока с реактором типа ВВЭР-440 оценивается в 5844,73 млн руб. Общий экономический ущерб для энергоблока с реактором типа ВВЭР-1000 оценивается в 13279,1 млн руб.

Ключевые слова: оценка риска, безопасность, ущерб, население, радиоактивные вещества, АЭС.

Введение

Оценка ущерба от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера – сложная и многоуровневая проблема. Ее суть сводится к прогнозированию воздействия поражающих факторов природных и техногенных чрезвычайных ситуаций при различных сценариях. Согласно монографии «Оценка ущерба от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» [1], прямые ежегодные ущербы от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера достигают 100-300 млрд рублей с гибелью сотен и тысяч жителей. Одним из самых опасных техногенных объектов является атомная станция (АЭС). Авария на таком объекте может иметь очень серьезные последствия, примером чего служат известные аварии: АЭС Три-Майл-Айленд (1979), Чернобыльская АЭС (1986), АЭС «Фукусима-дайити» (2011).

Согласно НП-001-15 [2], авария на АЭС – это нарушение нормальной эксплуатации АС, при котором произошел выход радиоактивных веществ и (или) ионизирующего излучения за границы, предусмотренные проектной документацией АЭС для нормальной эксплуатации в количествах, превышающих установленные пределы безопасной эксплуатации. Если эти радиоактивные вещества выходят за пределы площадки АЭС, то неизбежно в результате их воздействия появляется риск нанесения ущерба здоровью населения, проживающего вблизи расположения АЭС. Он зависит от многих факторов: типа энергоблока, типа аварии, ее протекания, особенностей расположения площадки АЭС, погоды, срабатывания систем безопасности, срабатывания мер по защите населения и др. В этих условиях задача оценки нанесенного населению ущерба приобретает очень сложный вид и не имеет простого универсального решения. Однако даже грубые предварительные оценки позволяют оценить опасность и повлиять на создание дополнительных мер безопасности. Также такие оценки полезны для развития экономики, поскольку оценка ущерба является основой решения буквально всех задач, связанных

с предупреждением и ликвидацией чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, развитием экономических механизмов регулирования безопасности, разработки инвестиционных программ, возмещения ущерба от чрезвычайных ситуаций, страхования гражданской ответственности и т. д. [1].

Разработанная модель

Для оценки ущерба, нанесенного человеку из-за воздействия радиоактивных веществ, важно количественно описать риск этого воздействия. В НРБ-99/2009 [3] такое воздействие описывается понятием «годовая эффективная доза» – сумма эффективной дозы внешнего облучения, полученной за календарный год, и ожидаемой эффективной дозы внутреннего облучения, обусловленной поступлением в организм радионуклидов за этот же год. Если речь идет о дозе, полученной группой лиц, то тогда говорят о коллективной эффективной дозе. Единицей измерения эффективной дозы в Международной системе единиц – зиверт (Зв).

Согласно НРБ-99/2009 [3], облучение в коллективной эффективной дозе в 1 чел.-Зв приводит к потенциальному ущербу, равному потере примерно 1 чел.-года жизни населения. Величина денежного эквивалента потери 1 чел.-года жизни устанавливается отдельными документами федерального уровня в размере не менее 1 годового душевого национального дохода. Валовой национальный доход (англ. Gross National Income (GNI)) является одним из ключевых показателей экономического развития. GNI представляет собой текущую рыночную оценку всех конечных товаров и услуг, созданных факторами производства, находящихся в собственности резидентов, в том числе и на территории других государств. $GNI_{per\ capita}$ – годовой валовой национальный доход на душу населения. В России расчетом валового национального дохода занимается Росстат, который публикует эти данные в своих статистических сборниках [4] и на своем сайте (табл. 1).

Таблица 1

Валовой национальный доход РФ в 2011-2017 гг.

Год	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
GNI (млн. руб.)	58513728	66058370	70587364	76626148	81063035	83763577	89737892
Население (млн. чел.)	143	143,3	143,6	146,2	146,3	146,5	146,8
$GNI_{per\ capita}$ (руб.)	409187	460980	491555	524119	554088	571765	611294

Учитывая вышеизложенное, была разработана следующая формула оценки экономического ущерба, нанесенного населению, находящемуся на некоторой территории S , в результате воздействия радиоактивных веществ при аварии на АЭС:

$$L = D_E \cdot GNI_{per\ capita},$$

где, L – ущерб, нанесенный населению, находящемуся на территории S ; D_E – годовая эффективная доза облучения населения на территории S ; $GNI_{per\ capita}$ – валовой национальный доход на душу населения. Разделив выражение справа на N_Σ (общая численность населения на территории S), получим оценку экономического ущерба, нанесенного одному человеку на территории S в результате воздействия радиоактивных веществ:

$$L = \frac{D_E \cdot GNI_{per\ capita}}{N_\Sigma}$$

Просуммировав ущерб по всем территориям, получаем формулу для расчёта общего экономического ущерба населению:

$$L_\Sigma = \sum_{i=1}^k L_{S_i},$$

где L_Σ – общий ущерб, k – количество территорий, L_i – ущерб на территории S_i .

Для применения разработанной формулы оценки ущерба населению при авариях на АЭС необходима оценка радиационного риска, дающая оценку годовой эффективной дозы облучения населения, проживающего на некоторых территориях вблизи площадки АЭС. В качестве такой оценки были рассмотрены оценки, предложенные в [5]. Особенностью этих оценок является учёт частот направления ветра (розы ветров) и распределения населения в районе расположения АЭС по кольцевым сегментам румба, являющимся разбиением территории в радиусе R от АЭС по сторонам света и по отдалённости от АЭС. При равномерном распределении населения в кольцевом сегменте румба была предложена формула:

$$D_E(R) = \frac{P_W}{R} \cdot \int_0^R N_{1/8}(r) \cdot D_{E(\text{year})}(r) \cdot dr,$$

где D_E – годовая эффективная доза облучения населения в кольцевом сегменте румба, с учётом розы ветров; R , r – расстояния от АЭС, P_W – вероятность направления ветра; $N_{1/8}$ – количество людей в румбе; $D_{E(\text{year})}$ – годовая эффективная доза облучения всего населения. При дискретном распределении населения в кольцевом сегменте румба:

$$D_E(R) = P_W \cdot \sum_{i=1}^k N_{1/8(i)} \cdot D_{E(\text{year})(i)},$$

где D_E – годовая эффективная доза облучения населения в кольцевом сегменте румба, с учётом розы ветров; R – расстояние от АЭС, P_W – вероятность направления ветра; $N_{1/8}$ – количество людей в румбе; $D_{E(\text{year})}$ – годовая эффективная доза облучения всего населения. В этой же работе была предложена оценка ущерба населению с учётом частот направления ветра и распределения населения в районе расположения АЭС по кольцевым сегментам.

$$L(R) = \frac{L_\Sigma}{N_\Sigma} \cdot \frac{\sum_{i=1}^k D_{E(i)}(R)}{D_{E(\text{year})}},$$

где L – ущерб, нанесённый одному человеку, проживающему в кольцевом сегменте румба; R – расстояние от АЭС; L_Σ – общий ущерб от аварии; N_Σ – общая численность населения; D_E – годовая эффективная доза облучения населения в кольцевом сегменте румба, с учётом розы ветров; $D_{E(\text{year})}$ – годовая эффективная доза облучения всего населения. Особенностью этой формулы от существующих оценок также является учёт частот направления ветра и распределения населения в районе расположения АЭС по кольцевым сегментам румба. Однако эта оценка не отражает реальной зависимости экономического ущерба, нанесённого одному человеку вследствие аварии, от дозы, полученной одним человеком вследствие этой же аварии. Также эта оценка не учитывает динамики экономического развития. Предложенная же ранее модель оценки ущерба лишена этих недостатков.

Применение модели

В качестве объекта для применения разработанной модели была рассмотрена Нововоронежская АЭС. Строительство станции началось в конце 1960-х гг., и к началу 1980-х гг. к сети было подключено 5 энергоблоков. К 2015 году в эксплуатации оставалось три энергоблока с реакторами типа ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 (табл. 2).

Таблица 2

Энергоблоки Нововоронежской АЭС

Энергоблок	Тип реакторов	Мощность, МВт		Начало строительства	Подключение к сети	Ввод в эксплуатацию
		Чистый	Брутто			
Нововоронеж-3	ВВЭР-440/179	385	417	01.07.1967	27.12.1971	29.06.1972
Нововоронеж-4	ВВЭР-440/179	385	417	01.07.1967	28.12.1972	24.03.1973
Нововоронеж-5	ВВЭР-1000/187	950	1000	01.03.1974	31.05.1980	20.02.1981

Объектом исследования выступали только наиболее опасные аварии. В качестве таковой была рассмотрена авария «Полное осушение бассейна выдержки отработавшего топлива». Согласно [6, 7], вероятность выброса радиоактивных продуктов деления при такой аварии в окружающую среду – $3,7 \cdot 10^{-9}$ год⁻¹. Выброс радионуклидов происходит на высоте 30 м над уровнем земли, скорость ветра на высоте флюгера 2,7 м/с. Для оценки радиационных последствий аварии в [6, 7] были проведены расчеты годовых эффективных доз облучения населения для реакторов обоих типов, которые находятся в эксплуатации на Нововоронежской АЭС (табл. 3).

Таблица 3

Оценка средних суммарных эффективных годовых доз облучения населения при аварии «Полное осушение бассейна выдержки отработавшего топлива» на энергоблоках Нововоронежской АЭС с реакторами типа ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 (мЗв)

Расстояние от АЭС, км	Годовая эффективная доза облучения, мЗв	
	ВВЭР-440	ВВЭР-1000
3-5	1120	2230
5-7	525	1150
7-10	297	676
10-15	160	373
15-20	87,3	208
20-30	50,3	121
30-40	27,3	66,1
40-50	17,5	42,5
50-100	9,18	22,4

Территория Нововоронежской АЭС находится на стыке двух морфологических областей: Среднерусской возвышенности и Окско-Донской низменности. Климат засушливый, континентальный. Средняя температура января составляет $-8(-10)^{\circ}\text{C}$, средняя температура июля $+21-23^{\circ}\text{C}$. Количество атмосферных осадков в среднем составляет 400-500 мм в год. Основная часть осадков (65-75%) выпадает в весенне-летний сезон в виде кратковременных ливней. Годовая скорость ветра для района Нововоронежской АЭС 2,7 м/с, а направление ветра в течение года сильно меняется по сторонам света (табл. 4) [6, 7].

Таблица 4

Повторяемость направления ветра за год

Месяц/сезон	Румб							
	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
Год %	14	7	10	12	14	9	22	12
Средняя скорость, м/с	2,7	2,2	2,6	2,8	2,7	2,7	2,8	2,9

Площадка Нововоронежской АЭС расположена в 45 км южнее города Воронеж и в 35 км юго-западнее села Каширское в южной части России, вблизи границы с Украиной. Севернее площадки на расстоянии 5 км расположен г. Нововоронеж, и районный центр Георгиу-Деж расположен на расстоянии 45 км на юго-восток от станции. Ближайшие деревни и города расположены за пределами зоны отчуждения, на расстоянии более 3 км. Город Нововоронеж с населением 30 000 человек – единственный город вблизи площадки АЭС. Согласно переписи 2002 года, численность населения в зоне радиусом 50 км от Нововоронежской АЭС составляет примерно 1 274 000 человек. Само же население в 100 км зоне вокруг АЭС по кольцевым сегментам румба распределено неоднородно (табл. 5) [6, 7].

Таблица 5

Распределение населения в 100 км зоне вокруг Нововоронежской АЭС (чел.)

Расстояние от АЭС, км	Румб							
	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
3-5	12901	0	0	0	0	0	0	91
5-7	26029	0	340	65	0	0	1846	0
7-10	597	2066	0	1641	2830	0	0	415
10-15	1951	6934	487	543	933	45	2350	715
15-20	220	4150	1178	4148	2150	2999	506	4305
20-30	16984	8623	11785	22481	9450	6867	7500	9208
30-40	519080	8102	4568	43240	7867	5400	6650	4652
40-50	388748	7383	4553	33114	41570	12702	1753	9672
50-100	71 245	71 245	71 245	71 245	71 245	71 245	71 245	71 245

До использования разработанной модели для расчёта экономического ущерба необходимо рассчитать коллективную эффективную годовую дозу облучения. Для расчета была использована ранее описанная формула, предложенная в [5], с дискретным распределением населения. Расчет проводился для населения на расстоянии 3-100 км от АЭС. В табл. 6 и 7 приведены результаты этого расчета.

Таблица 6

Годовая коллективная эффективная доза облучения населения
с учетом розы ветров по разным направлениям в зависимости от расстояния от АЭС
для энергоблока с реактором типа ВВЭР-440 (Зв)

Расстояние от АЭС, км	Румб							
	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
3-5	2022,8	0	0	0	0	0	0	12,2
5-7	1913,1	0	17,8	4,1	0	0	213,2	0
7-10	24,8	42,9	0	58,5	117,6	0	0	14,8
10-15	43,7	77,6	7,8	10,4	20,9	0,6	82,7	13,7
15-20	2,6	25,3	10,3	43,4	26,2	23,5	9,7	45,1
20-30	119,6	30,3	59,2	135,6	66,5	31,0	83	55,5
30-40	1983,9	15,5	12,4	141,6	30,1	13,2	39,9	15,2
40-50	952,4	9	7,9	69,5	101,8	20	6,7	20,3
50-100	91,5	45,7	65,4	78,4	91,5	58,8	143,8	78,4

Таблица 7

Годовая коллективная эффективная доза облучения населения с учетом розы ветров
по разным направлениям в зависимости от расстояния от АЭС
для энергоблока с реактором типа ВВЭР-1000 (Зв)

Расстояние от АЭС, км	Румб							
	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
3-5	4027,7	0	0	0	0	0	0	24,3
5-7	4190,6	0	39,1	9	0	0	467	0
7-10	56,5	97,7	0	133,1	267,8	0	0	33,6
10-15	101,8	181,0	18,1	24,3	48,7	1,5	192,8	32
15-20	6,4	60,4	24,5	103,5	62,6	56,1	23,1	107,4
20-30	287,7	73	142,6	326,4	160	74,7	199,6	133,7
30-40	4803,5	37,5	30,2	343	72,8	32,1	96,7	36,9
40-50	2313	21,9	19,3	168,8	247,3	48,6	16,4	49,3
50-100	223,4	111,7	159,6	191,5	223,4	143,6	351,1	191,5

Для расчета ущерба по предложенной модели брались статические данные по душевому валовому национальному доходу за 2017 год. Результаты расчёта по данным за 2014 год можно просмотреть в работе [8]. Согласно данным, за 2017 год было взято GNI_{Per capita} равным 611294 руб. Результаты расчетов представлены в табл. 8-11.

Таблица 8

Оценка ущерба, нанесенного населению, по кольцевым сегментам румба при наиболее опасной аварии на энергоблоке Нововоронежской АЭС с реактором типа ВВЭР-440 (млн руб.)

Расстояние от АЭС, км	Румб							
	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
3-5	1236,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,5
5-7	1169,5	0,0	10,9	2,5	0,0	0,0	130,3	0,0
7-10	15,2	26,3	0,0	35,8	71,9	0,0	0,0	9,0
10-15	26,7	47,5	4,8	6,4	12,8	0,4	50,6	8,4
15-20	1,6	15,5	6,3	26,6	16,1	14,4	5,9	27,6
20-30	73,1	18,6	36,2	82,9	40,7	19,0	50,7	34,0
30-40	1212,8	9,5	7,6	86,6	18,4	8,1	24,4	9,3
40-50	582,2	5,5	4,9	42,5	62,3	12,2	4,1	12,4
50-100	56,0	28,0	40,0	48,0	56,0	36,0	88,0	48,0

Таблица 9

Оценка ущерба, нанесенного одному человеку, по кольцевым сегментам румба при наиболее опасной аварии на энергоблоке Нововоронежской АЭС с реактором типа ВВЭР-440 (руб.)

Расстояние от АЭС, км	Румб							
	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
3-5	95851	0	0	0	0	0	0	82158
5-7	44930	0	32093	38511	0	0	70604	0
7-10	25418	12709	0	21786	25418	0	0	21786
10-15	13693	6846	9781	11737	13693	8803	21518	11737
15-20	7471	3736	5337	6404	7471	4803	11740	6404
20-30	4305	2152	3075	3690	4305	2767	6765	3690
30-40	2336	1168	1669	2003	2336	1502	3671	2003
40-50	1498	749	1070	1284	1498	963	2353	1284
50-100	786	393	561	673	786	505	1235	673

Таблица 10

Оценка ущерба, нанесенного населению, по кольцевым сегментам румба при наиболее опасной аварии на энергоблоке Нововоронежской АЭС с реактором типа ВВЭР-1000 (млн руб.)

Расстояние от АЭС, км	Румб							
	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
3-5	2462,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	14,9
5-7	2561,7	0,0	23,9	5,5	0,0	0,0	285,5	0,0
7-10	34,5	59,8	0,0	81,4	163,7	0,0	0,0	20,6
10-15	62,3	110,7	11,1	14,9	29,8	0,9	117,9	19,6
15-20	3,9	36,9	15,0	63,3	38,3	34,3	14,2	65,7
20-30	175,9	44,6	87,2	199,5	97,9	45,7	122,0	81,7
30-40	2936,4	22,9	18,5	209,7	44,5	19,6	59,1	22,6
40-50	1414,0	13,4	11,8	103,2	151,2	29,7	10,0	30,2
50-100	136,6	68,3	97,6	117,1	136,6	87,8	214,6	117,1

Таблица 11

Оценка ущерба, нанесенного одному человеку, по кольцевым сегментам румба при наиболее опасной аварии на энергоблоке Нововоронежской АЭС с реактором типа ВВЭР-1000 (руб.)

Расстояние от АЭС, км	Руб							
	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
3-5	190846	0	0	0	0	0	0	163582
5-7	98418	0	70299	84358	0	0	154657	0
7-10	57853	28926	0	49588	57853	0	0	49588
10-15	31922	15961	22801	27361	31922	20521	50163	27361
15-20	17801	8900	12715	15258	17801	11443	27973	15258
20-30	10355	5178	7397	8876	10355	6657	16273	8876
30-40	5657	2828	4041	4849	5657	3637	8889	4849
40-50	3637	1819	2598	3118	3637	2338	5716	3118
50-100	1917	959	1369	1643	1917	1232	3012	1643

Общий экономический ущерб для энергоблока с реактором типа ВВЭР-440 оценивается в 5844,73 млн руб. Общий экономический ущерб для энергоблока с реактором типа ВВЭР-1000 оценивается в 13279,1 млн руб. На рис. 1 показана диаграмма распределения ущерба в исследованных кольцах в процентах от общего ущерба.

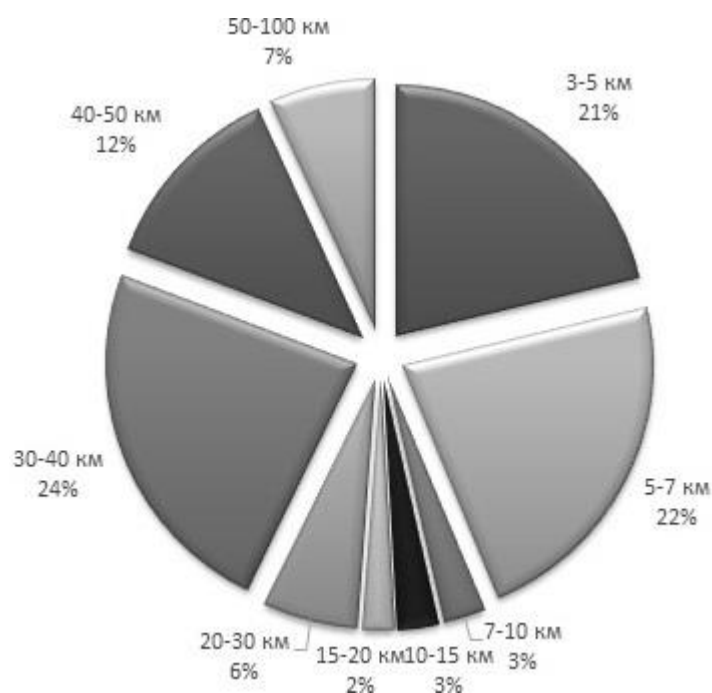


Рис. 1. Распределения ущерба в кольцевых сегментах румбах в процентах от общего ущерба

Заключение

Разработана модель оценки ущерба, нанесенного населению в результате воздействия радиоактивных веществ при аварии на АЭС. Модель была применена к наиболее опасной аварии на Нововоронежской АЭС. Получены оценки коллективного и индивидуального ущерба, нанесённого населению, проживающему в кольцевых сегментах румба, для энергоблоков Нововоронежской АЭС с реакторами типа ВВЭР-440 и ВВЭР-1000. Результаты применения отражают зависимость ущерба от полученной дозы.

Библиографический список

1. **Авдоткин, В.П.** Оценка ущерба от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера: монография / В.П. Авдоткин, М.М. Дзыбов, К.П. Самсонов. – М.: Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, 2012. – 467 с.
2. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций» (НП-001-15): [Нормы и правила НП-001-15: утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 17 декабря 2015 г. № 522]. – М., 2015. – 74 с.
3. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): [санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09: утверждены Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ № 47 от 07.07.2009]. – М., 2009. – 75 с.
4. Национальные счета России в 2011-2016 годах: Стат. сб. / НЗ5 Росстат. – М., 2017. – С. 23.
5. **Берберова, М.А.** Оценка показателей риска для вторых очередей Смоленской и Курской АЭС: дисс... канд. техн. наук: 05.14.03 / Берберова Мария Александровна. – М., 2015. – 106 с.
6. Разработка перечня мероприятий по управлению безопасностью и оценка показателей риска для блока Нововоронежской АЭС с реактором ВВЭР-1000 / Кабанов Л.П., Деревянкин А.А., Жуков И.В., Чулкова Е.В., Берберова М.А. – М.: Международный Центр по Ядерной Безопасности, 2011. – 77 с.
7. Разработка перечня мероприятий по управлению безопасностью и оценка показателей риска для энергоблоков Нововоронежской АЭС с реактором ВВЭР-440 / Жуков И.В., Чулкова Е.В., Берберова М.А., Цыкало Н.Б. – М.: Международный Центр по Ядерной Безопасности, 2013. – 80 с.
8. **Сапаркин, Л.М.** Разработка модели оценки ущерба, нанесённого населению в результате воздействия радиоактивных веществ при аварии на АЭС (на примере Нововоронежской АЭС) / М.А. Берберова, Л.М. Сапаркин // Ситуационные центры и информационно-аналитические системы класса для задач мониторинга и безопасности (SCVRT2017). Труды Международной научной конференции. – Протвино-Москва: Изд-во ИФТИ, 2017. – С. 175-183.

*Дата поступления
в редакцию: 02.10.2018*

V.V. Andreev¹, M.A. Berberova², L.M. Saparkin¹

**DEVELOPMENT OF A MODEL FOR ASSESSING DAMAGE TO THE POPULATION
AS A RESULT OF EXPOSURE TO RADIOACTIVE SUBSTANCES IN AN ACCIDENT
AT A NPP (BY THE EXAMPLE OF THE NOVOVORONEZH NPP)**

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alekseev¹,
International nuclear safety center²

Purpose: Damage assessment from emergencies in dangerous objects is necessary for correct assessment of danger level and for planning of economic activity. The purpose of the research is to develop a model for assessing damage to population from emergencies at a NPP.

Findings: In the article a model for assessing damage to population as a result of exposure to radioactive substances in an accident at a NPP is presented.

Results: This paper presents a model for calculating the damage caused to the population in case of accidents at nuclear power plants and its application for an accident at power units with VVER-440 and VVER-1000 reactors at Novovoronezh NPP. Obtained results showed that developed model reflects the depending damage from obtained doses.

Key words: risk assessment, safety, damage, population, radioactive substances, NPP.

УДК 621.3

А.А. Асабин¹, А.А. Кралин¹, Е.В. Крюков¹, Е.А. Чернов¹, Г.Б. Онищенко²**СПОСОБЫ ПЛАВНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ТИРИСТОРНОГО РЕГУЛЯТОРА ВОЛЬТОДОБАВКИ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
НПФ «Приводная техника», г. Москва²

Статья посвящена анализу алгоритмов плавного регулирования переменного напряжения, применяемых в тиристорных регуляторах напряжения. Рассмотрены принцип работы системы управления и функциональные схемы при однозонном и двухзонном способах регулирования напряжения. Установлено, что оптимальным является двухзонный поочередный способ управления, не требующий применения датчика тока и позволяющий сохранить работоспособность в режиме холостого хода трансформатора.

Ключевые слова: интеллектуальные сети, тиристорный регулятор напряжения, алгоритмы управления, импульсно-фазовое управление.

Одной из актуальных задач энергетической стратегии России является переоснащение и повышение технического уровня распределительных сетей среднего напряжения. Получение оптимального уровня напряжения, а также регулирование потоков активной и реактивной мощностей требуют внедрения новых автоматизированных интеллектуальных распределительных электрических сетей классов напряжений 6–20 кВ [1, 2]. Интеллектуальные сети могут быть реализованы путем внедрения в структуру электрической сети устройств продольной, поперечной и продольно-поперечной компенсации на основе тиристорных регуляторов вольтодобавки (ТРВД) [3, 4]. ТРВД, выполненные на основе полупроводниковых устройств силовой электроники, обладают большим ресурсом работы, лучшим быстродействием по сравнению с электромеханическими регуляторами, лучшими массогабаритными показателями по сравнению с трансформаторами с подмагничиванием и феррорезонансными регуляторами, а также большей перегрузочной способностью по сравнению с транзисторными регуляторами напряжения.

Одной из важнейших задач проектирования ТРВД является разработка алгоритмов импульсно-фазового управления, обеспечивающих плавное изменение выходного напряжения при суммарном коэффициенте гармонических составляющих, удовлетворяющем требованиям ГОСТ к качеству электроэнергии [5]. Импульсно-фазовый способ управления в разных вариантах применяется в тиристорных регуляторах переменного напряжения с расположением тиристорных коммутаторов на вторичной стороне силового трансформатора. Представляется целесообразным рассмотреть основные варианты алгоритмов импульсно-фазового управления, применимых в тиристорных регуляторах напряжения [5].

Изменение величины потока мощности производится путем плавного регулирования величины напряжения на высокой стороне трансформатора. В настоящее время известны следующие способы плавного регулирования переменного напряжения, применяемые в тиристорных регуляторах напряжения с импульсным управлением на основной частоте.

- однозонное регулирование;
- двухзонное регулирование.

При однозонном способе регулирования выходного напряжения выполнимо только в интервалах положительного знака мощности (P_+), в которых напряжение и ток нагрузки имеют одинаковые знаки. Регулирование в интервалах отрицательного знака мощности (P_-), соответствующих несовпадению знаков напряжения и тока нагрузки, при данном способе не

производится. Рассмотрим работу данного способа на примере одной фазы ТРВД при регулировании в пределах одной регулировочной ступени (рис. 1). Диаграммы импульсов управления тиристорами и формы кривых напряжения и тока для однозонного регулирования при работе ТРВД на активно-индуктивную нагрузку приведены на рис. 2. В интервалах положительных и отрицательных значений напряжения сети происходит формирование импульсов управления тиристорами $VS3$ и $VS4$ отводов пониженного напряжения соответственно. Импульсы управления на тиристоры $VS1$ и $VS2$ отводов повышенного напряжения задерживают относительно начала полупериодов на угол переключения α . Коммутация тиристоров осуществляется под действием напряжения регулировочной ступени.

Рассмотрим процессы переключения тиристоров на интервале одного периода изменения напряжения сети. В полупериоде положительных значений напряжения сети с момента времени, соответствующего фазовому углу нагрузки φ_H , во включенном состоянии находится тиристор $VS3$ отвода пониженного напряжения. При этом к нагрузке приложено напряжение низкого уровня $u_{ВН}=u_1$, равное напряжению сетевой обмотки ($u_1=u_{co}$). В момент времени, соответствующий углу переключения α , на тиристор $VS1$ подается управляющий импульс. Он включается, поскольку находится под действием прямого напряжения, и через него (под действием ЭДС ступени) встречно направлению проводимости $VS3$ начинает протекать коммутационный ток. Как только величина коммутационного тока достигнет величины нагрузочной составляющей тока, тиристор $VS3$ выключается, и во включенном состоянии остается только тиристор $VS1$. С этого момента времени к нагрузке приложено напряжение повышенного уровня $u_{ВН}=u_2$, равное сумме напряжений сетевой обмотки и регулировочной ступени ($u_2=u_{co}+u_{ст}$). Состояние схемы не изменится до тех пор, пока ток через тиристор $VS1$ не перейдет через ноль в момент времени $\omega t=\pi+\varphi_H$. При этом тиристор $VS1$ выключается и ток i_H переходит на тиристор $VS4$. Напряжение нагрузки уменьшается до уровня пониженного напряжения $u_{ВН}=u_1$. Это состояние схемы сохраняется до момента времени $\omega t=\pi+\alpha$, в который включается тиристор $VS2$ и выполняется переключение на уровень повышенного напряжения. Описанные процессы далее периодически повторяются.

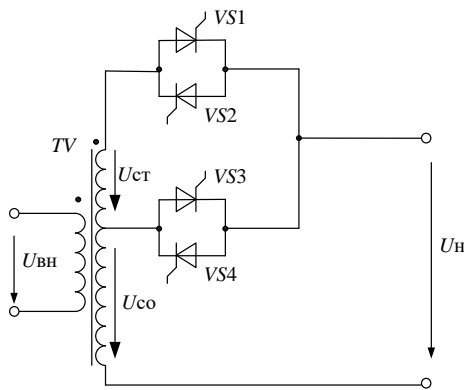


Рис. 1. Упрощенная схема одной фазы ТРВД

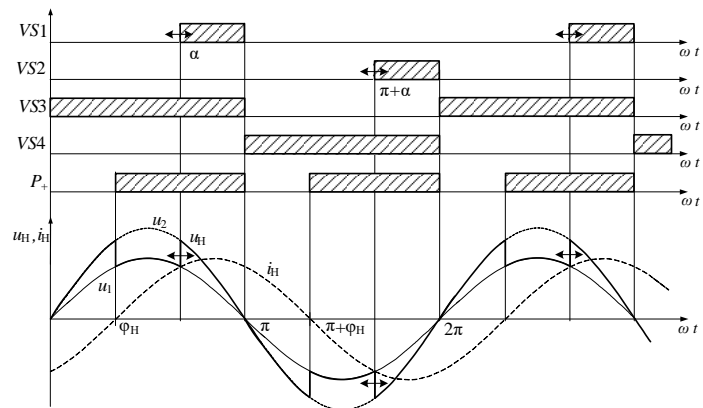


Рис. 2. Диаграммы импульсов управления тиристорами ($VS1$ - $VS4$), напряжения (u_H) и тока (i_H) нагрузки однозонного ТРВД

Плавное изменение значения угла переключения α в пределах интервалов P_+ приводит к изменению момента повышения напряжения нагрузки и, как следствие, к плавному регулированию напряжения нагрузки в пределах регулировочной ступени. Следует отметить, что при данном способе формирования импульсов управления переход на уровень пониженного напряжения осуществляется строго в моменты, соответствующие значению фазового угла нагрузки φ_H . Поэтому плавное регулирование напряжения в интервалах отрицательного знака мощности невозможно и в регулировочных характеристиках однозонных ТРВД имеются раз-

рывы первого рода. Данный недостаток устраняется при использовании двухзонного регулирования. Способы двухзонного регулирования характеризуются возможностью плавного регулирования выходного напряжения как в интервале положительного (P_+), так и в интервале отрицательного знака мощности (P_-). Причем переключения на повышение напряжения выполняют в интервалах положительного знака мощности, а на понижение – в интервалах отрицательного знака мощности. Коммутация тиристоров при выполнении переключений выполняется под действием напряжения регулировочной ступени аналогично описанному для ТРВД с однозонным регулированием. Способы двухзонного регулирования делятся на два вида:

- 1) способ двухзонного одновременного регулирования;
- 2) способ двухзонного поочередного регулирования.

Первый способ, в зависимости от используемого метода синхронизации фазосмещающего устройства (ФСУ), подразделяется на два варианта:

- а) двухзонное одновременное регулирование с синхронизацией ФСУ сигналами положительных и отрицательных интервалов знака мощности;
- в) двухзонное одновременное регулирование с синхронизацией ФСУ сигналами перехода напряжения сети через нулевые значения.

Функциональная схема ТРВД с двухзонным одновременным регулированием и синхронизацией по интервалам знака мощности изображена на рис. 3. На функциональной схеме обмотки учтены в виде источников ЭДС.

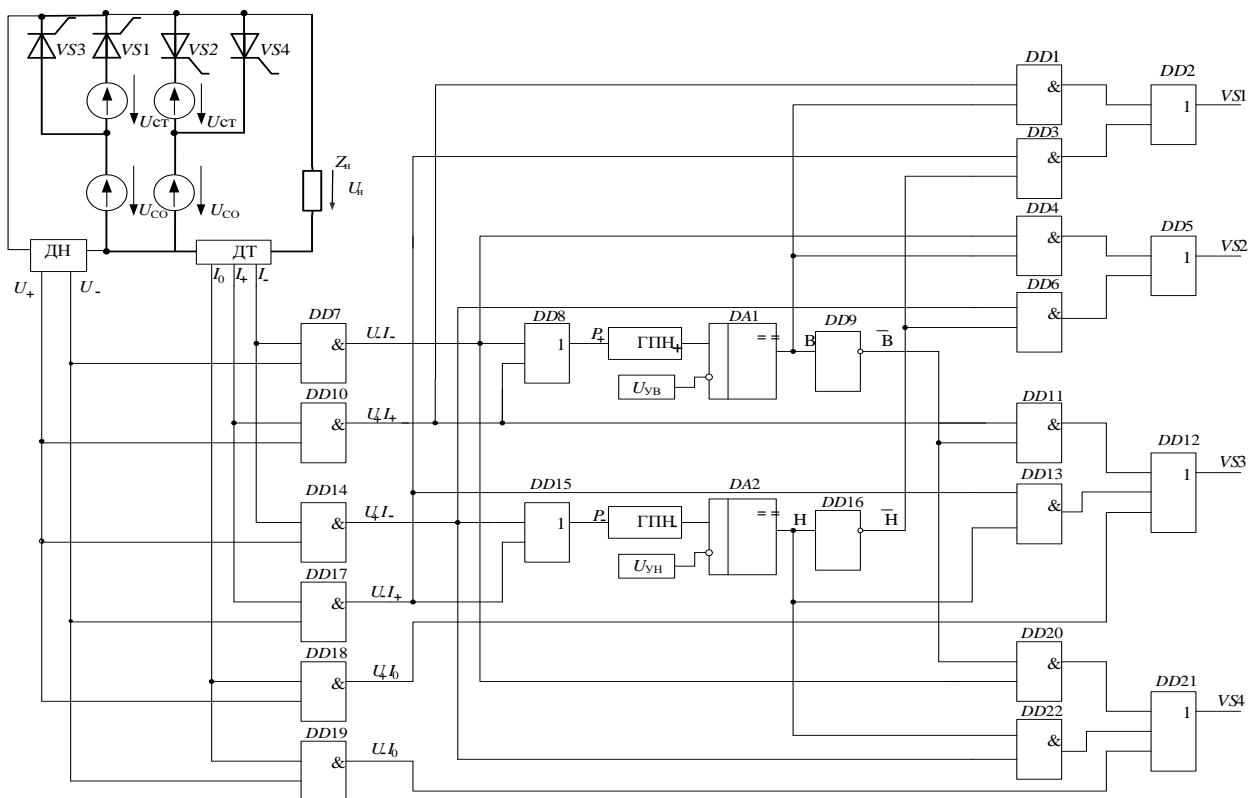


Рис. 3. Функциональная схема ТРВД с двухзонным одновременным регулированием и синхронизацией по интервалам знака мощности

Выделение интервалов положительного (P_+) и отрицательного (P_-) знаков мощности выполняется по сигналам датчика тока ДТ и датчика напряжения ДН. Датчик тока формирует сигнал логической единицы на выходе I_+ в интервалах положительных значений тока нагрузки. На выходе I_- сигнал логической единицы формируется в интервалах отрицательных значений тока нагрузки. На выходе I_0 датчика тока появляется сигнал логической единицы при переходе тока нагрузки через нулевое значение. Принцип формирования сигналов датчика

напряжения U_+ и U_- аналогичен принципу формирования сигналов I_+ и I_- , соответственно. В интервалах положительного знака мощности напряжение и ток нагрузки имеют одинаковые знаки. Поэтому сигнал P_+ определяется логическим выражением $P_+ = U_- \cdot I_+ + U_+ \cdot I_+$, реализованным на элементах $DD7, DD8, DD10$ (рис. 3). В интервалах отрицательного знака мощности напряжение и ток имеют противоположные знаки. Поэтому сигнал P_- определяется элементами $DD14, DD15, DD17$ (рис. 3) по логическому выражению $P_- = U_+ \cdot I_+ + U_- \cdot I_+$.

Сигналами P_+ и P_- синхронизируется работа генераторов пилообразного напряжения ГПН $_+$ и ГПН $_-$, соответственно. Опорное напряжение с выхода ГПН $_+$ сравнивается компаратором $DA1$ с напряжением управления $U_{ув}$, определяющим момент переключения на повышение напряжения относительно начала интервала положительного знака мощности. При превышении пилообразным сигналом, напряжения управления $U_{ув}$ формируется сигнал «выше» (В), разрешающий подачу управляющих импульсов на тиристоры $VS1$ и $VS2$ ответвления повышенного напряжения. Аналогично напряжение с выхода ГПН $_-$ сравнивается на компараторе $DA2$ с управляющим напряжением $U_{ун}$, определяющим момент переключения на понижение напряжения. При этом формируется сигнал «ниже» (Н), разрешающий подачу управляющих импульсов на тиристоры $VS3$ и $VS4$ ответвления пониженного напряжения.

Принцип распределения управляющих импульсов по тиристорам для данной схемы можно описать в виде системы логических уравнений:

$$\begin{aligned} VS1 &= B \cdot U_+ \cdot I_+ + \overline{H} \cdot U_- \cdot I_+ \\ VS2 &= B \cdot U_- \cdot I_- + \overline{H} \cdot U_+ \cdot I_- \\ VS3 &= H \cdot U_- \cdot I_+ + \overline{B} \cdot U_+ \cdot I_+ + I_0 \cdot U_+ \\ VS4 &= H \cdot U_+ \cdot I_- + \overline{B} \cdot U_- \cdot I_- + I_0 \cdot U_- \end{aligned} \quad (1)$$

Первое слагаемое в каждом выражении определяет непосредственно интервал формирования импульсов управления на повышение (для $VS1$ и $VS2$) или на понижение (для $VS3$ и $VS4$) напряжения в интервале времени, когда для соответствующего тиристора выполняются условия его безаварийного включения. Второе слагаемое в каждом выражении предотвращает самопроизвольное выключение тиристоров при значениях тока нагрузки, близких к току удержания тиристоров. Третье слагаемое в двух последних выражениях исключает выключение схемы при переходе тока нагрузки через нулевое значение.

Регулирование выходного напряжения ТРВД реализуется путем изменения уровней управляющих напряжений $U_{ув}$ и $U_{ун}$. Напряжение на выходе ТРВД будет соответствовать напряжению сетевой обмотки, если $U_{ун} \approx 0$ и $U_{ув}$ на уровне амплитуды пилообразного напряжения ГПН $_+$. Напротив, если $U_{ув} \approx 0$, а значение $U_{ун}$ превышает или равно максимальному значению пилообразного напряжения ГПН $_-$, то напряжение на нагрузке будет соответствовать сумме $U_{CO} + U_{CT}$, так как переключения на понижение будут практически отсутствовать. Таким образом можно плавно регулировать действующее значение напряжения на нагрузке в пределах ступени регулирования.

Функциональная схема ТРВД с синхронизацией по нулям напряжения представлена на рис. 4. Для реализации данного способа, как и в предыдущем случае, необходимо производить определение знаков мощности. Следовательно, необходимо определять моменты перехода через ноль тока и напряжения нагрузки. Это требует введения в схему соответствующих датчиков. Главное же отличие способа регулирования с синхронизацией по нулям напряжения от способа регулирования с синхронизацией по интервалам знака мощности заключается в том, что в данном алгоритме используется только одно опорное напряжение. Опорное напряжение пилообразной формы синхронизируется сигналами перехода через ноль (U_0) напряжения сети. С опорным напряжением сравниваются два сигнала управления на повышение $U_В$ и понижение $U_Н$ напряжения. В результате сравнения пилообразного напряжения с управляющими сигналами на повышение $U_В$ и понижение $U_Н$ напряжения вырабатываются сигналы выше (В) и ниже (Н). Благодаря членам $B \cdot U_+ \cdot I_+$ и $\overline{B} \cdot U_- \cdot I_-$ в логических уравнениях (1), переключение на

повышение напряжения не может произойти раньше, чем начнётся интервал положительного знака мощности. Аналогично благодаря членам $H \cdot U_+ \cdot I_-$ и $H \cdot U_- \cdot I_+$ переключение на понижение напряжения может происходить только в интервалах отрицательного знака мощности.

Достоинством данного алгоритма по сравнению с предыдущим является наличие только одного пилообразного напряжения. Это упрощает систему управления. Если в процессе работы происходит изменение фазового угла нагрузки φ_n , пилообразное напряжение остается неизменным, а изменяется только соотношение промежутков времени в течение которых могут происходить переключения на повышение и понижение напряжения.

Оба алгоритма могут работать с активной, активно-индуктивной, индуктивной, активно-емкостной, емкостной нагрузках и нагрузкой противофазным током. Общим недостатком данных способов является невозможность регулирования напряжения в режимах близких к холостому ходу. Это объясняется невозможностью определения знака тока вследствие ограниченной чувствительности датчика тока. В результате становится невозможным определение знаков мощности и происходит нарушение регулировочных свойств ТРВД. Данный недостаток устраняется в ТРВД с двухзонным поочередным регулированием.

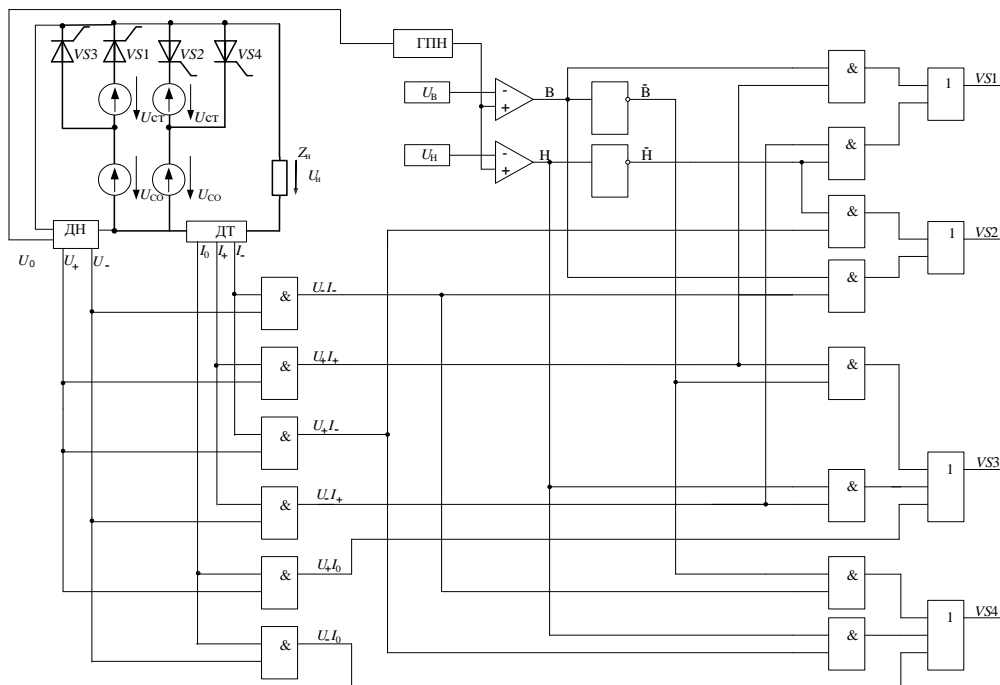


Рис. 4. Функциональная схема системы управления ТРВД с синхронизацией по нулям напряжения

Функциональная схема ТРВД с двухзонным поочередным регулированием показана на рис. 5. Схема управления содержит формирователь синхроимпульсов (ФСИ), независимое фазосмещающее устройство (НФСУ), зависимое фазосмещающее устройство (ЗФСУ) и формирователь импульсов управления тиристорами высшей степени регулирования (ФИУВС).

Формирователь синхроимпульсов ФСИ подключен к зажимам сетевой обмотки трансформатора и вырабатывает на выходе U_{0+} датчика напряжения ДН импульсный сигнал при переходе напряжения сети от отрицательного к положительному значению. На выходе U_{0-} датчика ДН формируется синхроимпульс при переходе напряжения сети от положительного к отрицательному значению. Сигналы выходов U_{0+} , U_{0-} синхронизируют работу RS-триггера DD1 и генератора пилообразных напряжений ГПИ независимого фазосмещающего устройства НФСУ. Сигнал U_+ , формируемый на прямом выходе RS-триггера, опережает положительный полупериод напряжения сети на угол θ_k . Сигнал U_- , формируемый на инверсном выходе DD1, опережает отрицательную полуволну напряжения сети на такой же угол.

Синхроимпульсами, поступающими с выходов датчика ДН, производится обнуление выходного сигнала генератора пилообразных напряжений. Поэтому на его выходе формируется линейно возрастающий сигнал на каждом полупериоде сетевого напряжения. Данный сигнал поступает на инверсные входы компараторов $DA1$ и $DA3$ фазосмещающих устройств. На прямой вход компаратора $DA1$ независимого фазосмещающего устройства поступает напряжение управления U_y . Увеличение напряжения управления от 0 до амплитудного значения пилообразного напряжения $U_{мпн}$ позволяет с помощью НФСУ изменять угол переключения тиристоров на повышение напряжения от 0 до π и обеспечивать эффективное регулирование напряжения регулятора в интервалах положительного знака мощности.

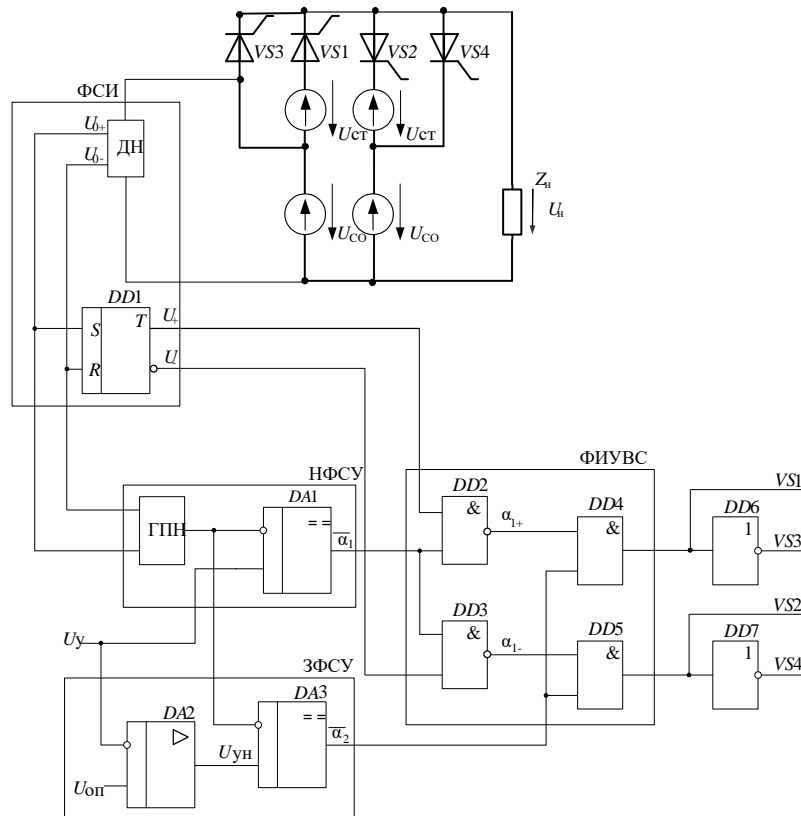


Рис. 5. Функциональная схема ТРВД с двухзонным поочередным регулированием

Увеличение напряжения управления в диапазоне $U_{мпн} \leq U_y \leq 2U_{мпн}$ позволяет с помощью ЗФСУ изменять угол переключения тиристоров на понижение напряжения от π до 0 и обеспечить эффективное регулирование напряжения в интервалах отрицательных знаков мощности. Реализация данного способа не требует применения датчика тока нагрузки. Следовательно, регулировочные свойства сохраняются и в режиме холостого хода трансформатора включительно.

Заключение

1. В ТРВД с однозонным регулированием при работе на активно-индуктивную и активно-емкостную нагрузку диапазон регулирования уменьшается на величину, пропорциональную фазовому углу нагрузки. При противофазном токе нагрузки данный способ регулирования не может быть применён ввиду отсутствия интервалов положительного знака мощности.
2. Двухзонное регулирование на основной частоте позволяет выполнять переключения тиристоров в обоих интервалах знака мощности. Следовательно, алгоритмы, реализующие двух-

зонное регулирование напряжения, могут работать на активную, активно-реактивную, реактивную нагрузки и нагрузку с противофазным током. Их диапазон регулирования определяется напряжением регулировочной ступени трансформатора.

3. ТРВД с двухзонным поочередным управлением не требуют применения датчика тока, и их работоспособность сохраняется также в режиме холостого хода трансформатора.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение №14.577.21.0242 о предоставлении субсидии от 26.09.2017, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57717X0242).

Библиографический список

1. **Соснина, Е.Н.** Основные направления развития интеллектуальных электрических сетей на основе адаптивного управления / Е.Н. Соснина, Р.Ш. Бедретдинов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2012. – № 5. – С. 25-28.
2. **Соснина, Е.Н.** Исследование твердотельного регулятора напряжения и мощности в сети 6–20 кВ. / Е.Н. Соснина, А.А. Асабин, Р.Ш. Бедретдинов, А.А. Карлин // Пром-инжиниринг. Труды трудов II Международной научно-технической конференции. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2016. – С. 322-327.
3. **Sosnina, E.N.** Power flow control device prototype tests / Sosnina E., Loskutov A., Asabin A., Bedretdinov R., Kryukov E. // IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Asia. – 2016. – P. 312-316.
4. **Соснина, Е.Н.** Тиристорный регулятор величины и фазы вольтодобавочного напряжения в распределительных электрических сетях 6-10 кВ / Е.Н. Соснина, А.А. Асабин, А.А. Карлин, Е.В. Крюков // Актуальные проблемы электроэнергетики: сборник научно-технических статей. – Нижний Новгород, 2017. – С. 132-136.
5. Пат. на изобретение RU №2398342 С1, МПК H02M5/12. Способ управления тиристорным регулятором напряжения трансформатора / Асабин А.А.; Опубл. 27.08.2010.

Дата поступления

в редакцию: 2.10.2018

A.A. Asabin¹, A.A. Kralin¹, E.V. Kryukov¹, E.A. Chernov¹, G.B. Onischenko²

OUTPUT VOLTAGE SMOOTH REGULATION METHODS OF BOOST VOLTAGE THYRISTOR REGULATOR

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alekseev¹,
NPF «Drive Technology», Moscow²

Purpose: The article is devoted to the analysis of smooth regulation algorithms of alternating voltage used in thyristor voltage regulators.

Design/methodology/approach: The principle of control system operation and functional diagrams with single-zone and two-zone voltage control methods are considered.

Findings: It is established that the optimal method is a two-zone alternate control method that does not require the use of a current sensor and allows to maintain the operation in the idling mode of the transformer.

Key words: smart grid, thyristor voltage regulator, control algorithms, pulse-phase control.

УДК 621.039

**А.В. Безносков, А.В. Львов, Н.С. Волков, Н.С. Лукичев,
П.А. Боков, Т.А. Бокова, Э.Г. Новинский**

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАВИСИМОСТЕЙ ХАРАКТЕРИСТИК ОСЕВЫХ НАСОСОВ, ПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ СВИНЦОВЫЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЬ, ОТ НАПРАВЛЕНИЯ ПОТОКА НА ВХОДЕ В МЕЖЛОПАТОЧНЫЕ КАНАЛЫ РАБОЧЕГО КОЛЕСА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты исследований зависимостей характеристик осевого насоса (подачи, напора, КПД) в свинцовом теплоносителе ядерных реакторов от направления потока на входе в рабочее колесо. Исследования проводились с целью обоснования конструктивных решений насосов применительно к условиям установок малой и средней мощности с реакторами на быстрых нейтронах, охлаждаемых свинцовым теплоносителем с горизонтальными парогенераторами (БРС ГПГ), прорабатываемыми в Нижегородском государственном техническом университете. Исследования проводились на стенде ФТ-4 НГТУ при температуре свинцового теплоносителя 440-500°C. Скорость вращения вала насоса изменялась ступенями через 100 об/мин, от 600 до 1100 об/мин. Внешний диаметр рабочего колеса составлял 212 мм, втулочное отношение – 0,43. Диаметр втулки рабочего колеса, равный 92 мм, определялся конструктивным исполнением механизма поворота лопастей колеса (механизм расположен внутри втулки рабочего колеса). Толщина плоских лопаток – 4,0 мм, материал – сталь 08Х18Н10Т. Максимальный расход свинцового теплоносителя при испытаниях составлял около 2000 т/час. Полученные результаты рекомендуются использовать при проектировании насосов, перекачивающих тяжелые жидкометаллические теплоносители реакторных установок.

Ключевые слова: реактор на быстрых нейтронах, тяжелые жидкометаллические теплоносители, осевой насос, рабочее колесо, лопатки рабочего колеса, поток свинцового теплоносителя, направление потока теплоносителя.

Введение

В настоящее время отсутствует опыт проектирования главных циркуляционных насосов проектируемых реакторных установок энергоблоков со свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителями. Свойства этих теплоносителей (плотность, кавитационные характеристики и др.), условия контактного взаимодействия с поверхностями конструкционных материалов, покрываемых несмачиваемыми теплоносителями защитными покрытиями, другие факторы, влияющие на процессы в проточной части насоса, существенно отличаются от аналогичных характеристик традиционных теплоносителей (воды натрия) [1-3]. Целесообразно проведение экспериментов, результаты которых бы позволяли обоснованно проектировать главные циркуляционные насосы РУ с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями (ТЖМТ).

Целью настоящей работы являлось экспериментальное определение зависимостей характеристик осевого насоса (подачи, напора, КПД) от направления потока свинцового теплоносителя, входящего в межлопаточные каналы рабочего колеса насоса применительно к условиям реакторных установок малой и средней мощности с ТЖМТ. Работа является продолжением экспериментальных исследований конструктивных и режимных параметров, позволяющих обосновать оптимальные проектные решения таких насосов [4, 5].

Методика экспериментов

Исследования проводились на стенде ФТ-4 НГТУ при температуре свинцового теплоносителя 440-500°C и максимальном его расходе около 2000 т/час. Внешний диаметр осевого

колеса с поворотными лопатками составлял 212 мм, втулочное отношение – 0,43. Толщина плоских лопаток из стали 12Х18Н10Т – 4,0 мм. Все элементы конструкции проточной части насоса НСО-02НГТУ, контактирующие со свинцовым теплоносителем изготавливались из стали типа 12Х18Н10Т и имели сформированные и деформируемые оксидные покрытия.

Гидравлическое сопротивление циркуляционной трассы стенда, выполненный из труб Ду 200 мм, изменялось путем изменения положения клина регулирующей задвижки, тепло, адиабатически вносимое контур циркуляционным насосом, отводилось теплообменником с воздухо-водяным капельным потоком при давлении, близком к атмосферному.

На первом этапе исследований на входе потока в выемную часть насоса последовательно устанавливались варианты конструкций устройств изменения направления (закрутки) потока (рис. 1, рис. 2). Согласно [6, 7, 8] от этого могут зависеть характеристики насоса.

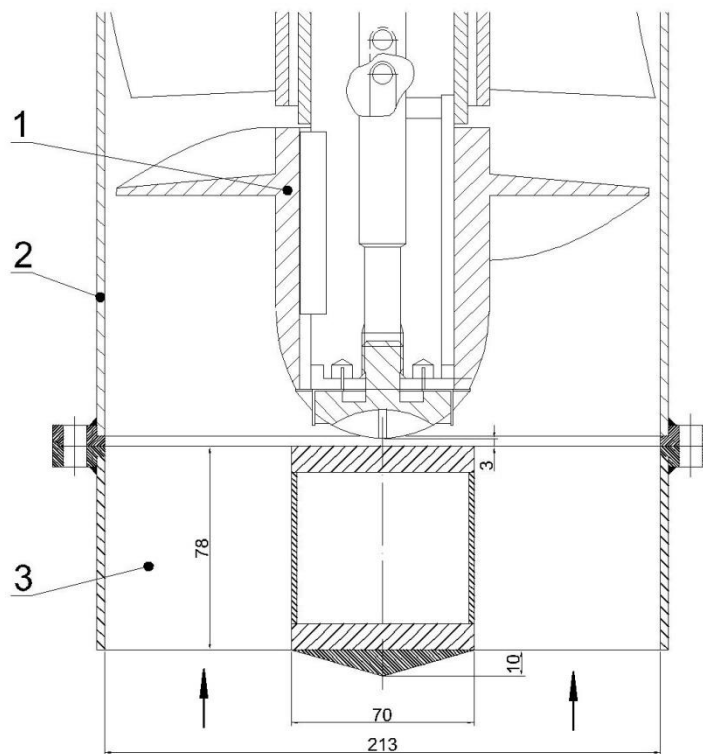


Рис. 1. Конструктивная схема установки устройства закрутки потока на входе в насос:
1 – выемная часть электронасоса НСО-02НГТУ; 2 – кольцевая обечайка устройства закрутки потока на входе в насос; 3 – лопатка устройства закрутки потока

В кольцевой обечайке устройства закрутки потока в каждом из вариантов конструкции устройства устанавливалось по пять лопаток, имеющих следующие конструктивные решения. Вариант А – лопатки устанавливались соосно с потоком на входе в рабочее колесо ($\alpha = 0^\circ$). Вариант Б – лопатки устанавливались под углом $\alpha = 18^\circ$, закручивая поток в направлении, совпадающим с направлением вращения рабочего колеса («по потоку»). Вариант В – лопатки устанавливались под углом $\alpha = 18^\circ$ закручивая поток в направлении, противоположенном направлению вращения рабочего колеса («против потока»). Для сравнения были проведены исследования варианта с демонтированным устройством закрутки потока («без аппарата»).



Рис. 2. Общий вид участка выемной части насоса НСО-02НГТУ с закрепленным устройством закрутки потока свинца на подводе к насосу

Обсуждение результатов первого этапа исследований.

Показано, что при полностью открытой задвижке в контуре циркуляции стенда подача (расход) насоса во всех вариантах испытанных конструкций (А, Б, В, Г) практически совпадает при скорости вращения вала насоса, превышающей 900 об/мин (рис. 3).

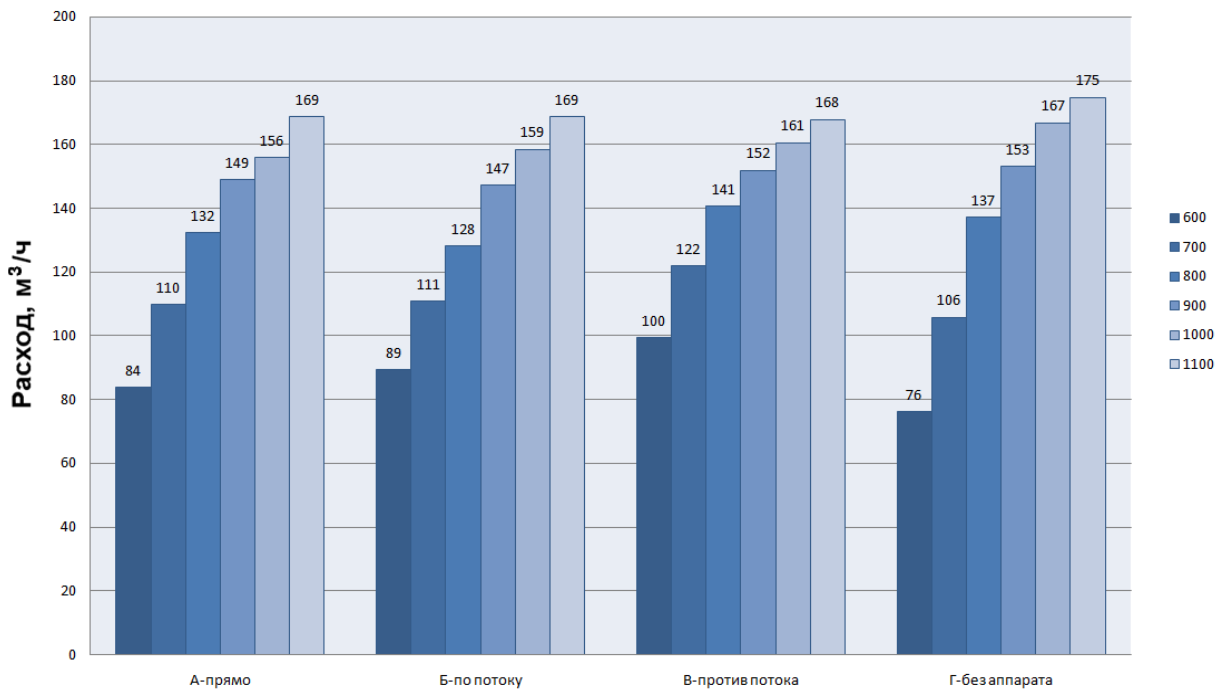


Рис. 3. Зависимость подачи (расхода) насоса от скорости вращения его вала при различных вариантах конструкции устройств закрутки потока на участке подвода

При уменьшении скорости вращения вала в варианте «В» подача насоса уменьшается заметно меньше, чем в других вариантах, что может иметь значение при анализе работы насоса и реакторной установки на пониженных режимах. При демонтированном устройстве (вариант «Г») при скоростях вращения вала насоса, превышающих 900 об/мин, подача насоса при аналогичных условиях превышает подачу при других вариантах конструкций (А, Б, В).

Напор насоса при всех вариантах конструкций (А, Б, В) примерно одинаков (в аналогичных условиях) и заметно меньше, чем напор насоса при демонтированном устройстве закрутки потока (рис. 4).

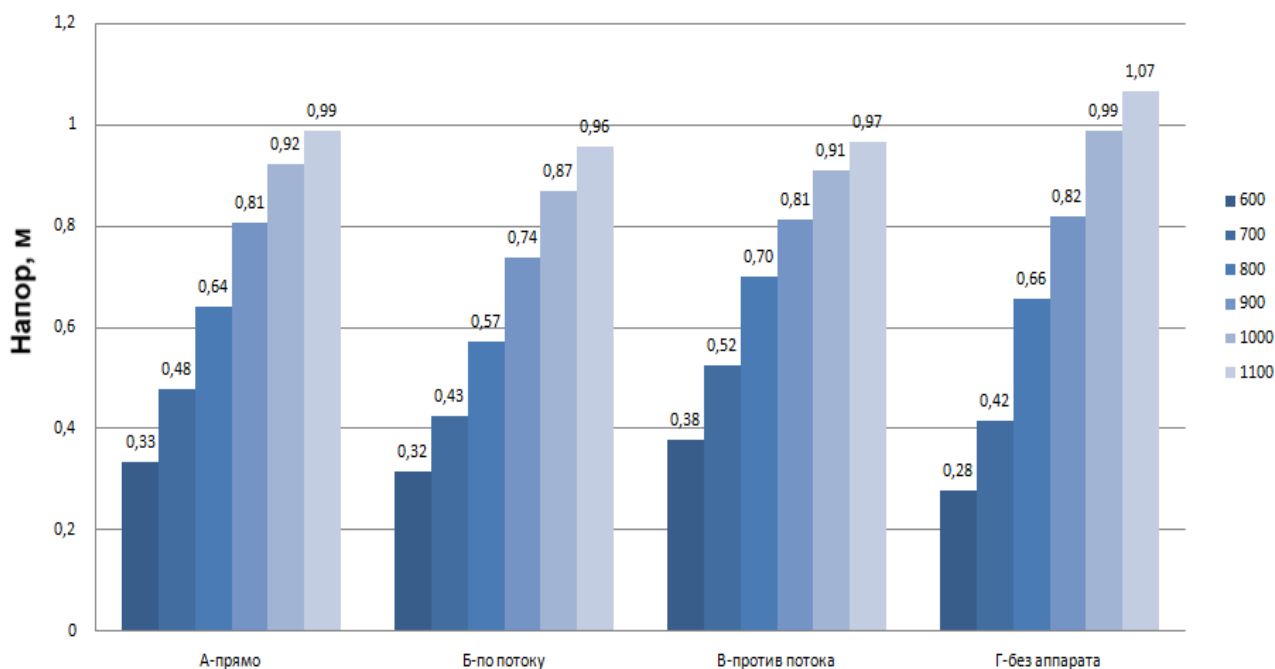


Рис. 4. Зависимость напора насоса от скорости вращения его вала при различных вариантах конструкции устройств закрутки потока на участке подвода

При увеличении гидравлического сопротивления циркуляционного контура, напор насоса при всех испытанных вариантах конструкции (А, Б, В) приблизительно одинаково существенно возрастает, тогда как при демонтированном устройстве закрутки (вариант «Г») напор насоса существенно меньше, чем в вариантах А, Б, В. Напор насоса достаточно консервативен к изменению конструкции устройства закрутки потока на входе в насос.

Результаты проведенных исследований показывают, что установка выправляющего аппарата на входе в насос в рассматриваемых условиях не целесообразна.

На втором этапе исследований на вал насоса НСО-02 НГТУ последовательно устанавливались три варианта конструкций рабочего колеса с четырьмя плоскими (непрофилированными) лопатками из листа $\delta = 4,0$ мм. Во всех конструкциях передний по ходу потока участок лопаток на протяжении одной трети хорды был отогнут в сторону уменьшения участка установки лопаток «а» рабочего колеса: в варианте а) – на $\beta = 4^\circ$ ($\alpha - 4^\circ$); в варианте б) – на $\beta = 8^\circ$ ($\alpha - 8^\circ$); в варианте в) отгиб отсутствовал ($\beta = 0$), а хорды лопаток оставался прямыми (рис. 5).

Угол установки четырех лопаток в рабочем колесе в каждом варианте угла отгиба ($\beta = 4^\circ$; $\beta = 8^\circ$; $\beta = 0^\circ$;) составлял 16° , 20° , 24° , 28° , скорость вращения вала $n = 600, 700, 800, 900, 1000, 1100$ об/мин.

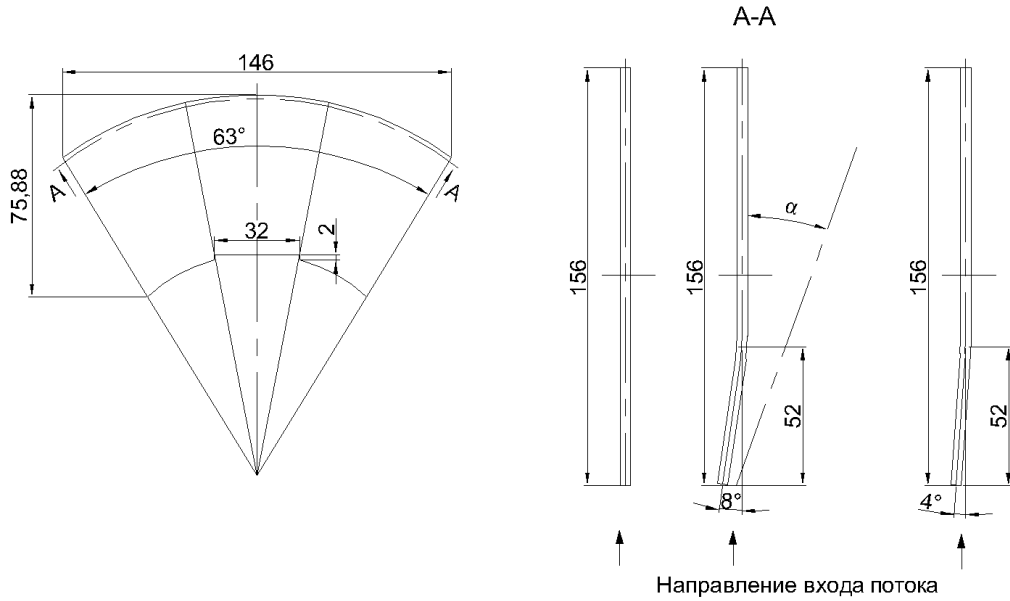


Рис. 5. Конструктивная схема лопаток рабочего колеса на втором этапе испытаний

Обсуждение результатов второго этапа испытаний.

Эксперименты показали существенное изменение характеристик насоса от угла отгиба передней трети хорды лопаток при одном и том же угле установки лопаток. При лопатках отгиба (0°) при угле установки лопаток $\alpha = 20^\circ$ подача и напор насоса при $n = 1100$ об/мин составляли $142,5 \text{ м}^3/\text{час}$ и $0,798 \text{ м.ст. Рв}$, тогда как при угле отгиба 4° ($\alpha - 4^\circ$) подача и напор насоса составляли $186,0 \text{ м}^3/\text{час}$ и $1,12 \text{ м.ст.Рв}$ соответственно (рис. 6).

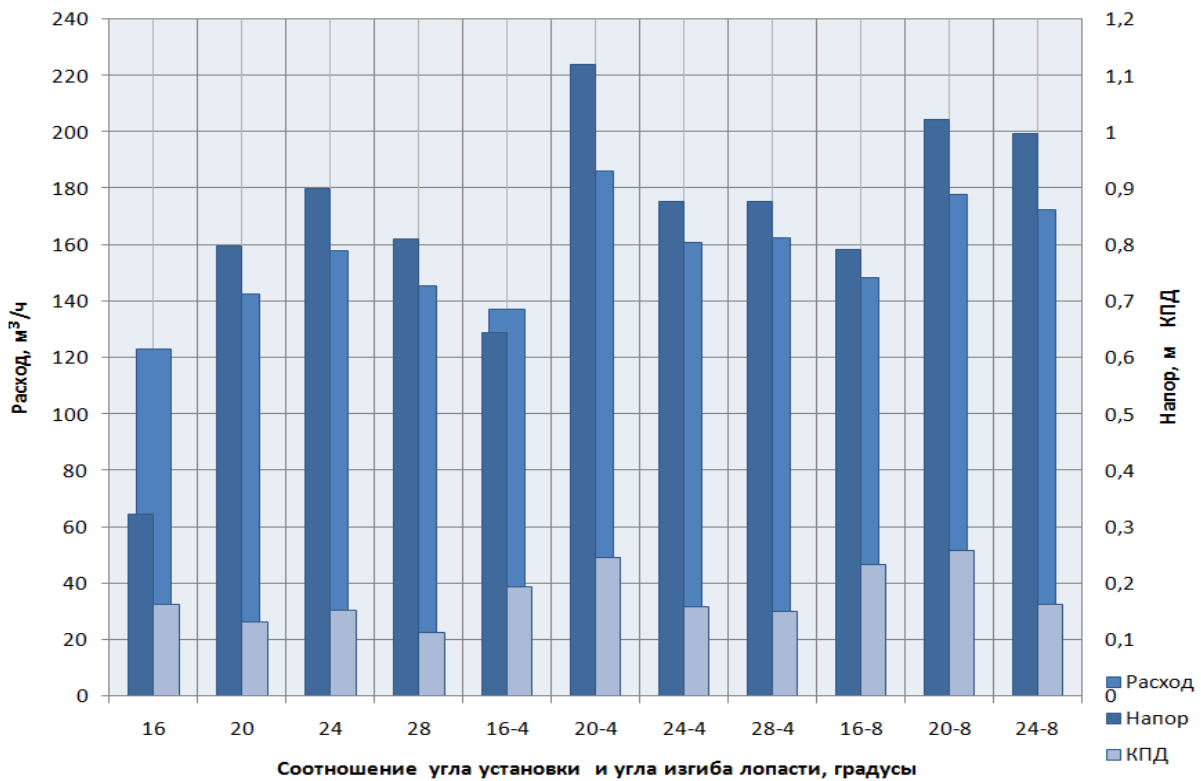


Рис. 6. Зависимость характеристик насоса от угла установки лопаток (α) при угле отгиба входной трети хорды лопаток (β)

Испытания показали, что у всех вариантов конструкции отгиба первой трети хорды рабочих колес всегда увеличивает (улучшает) характеристики насоса при всех скоростях вращения вала. Для различных углов установки лопаток (α) и различных углов отгиба участка хорды (β) положительный эффект различен. Наибольший положительный эффект зафиксирован у вариантов конструкций с углами установки и отгиба ($20^\circ - 4^\circ$), ($20^\circ - 8^\circ$), ($24^\circ - 8^\circ$).

Заключение

Напор насоса во всех вариантах исполнения приблизительно одинаков и имеет меньшее значение, чем напор насоса при демонтированном устройстве закрутки потока. Результаты проведенных исследований показывают, что установка выправляющего аппарата на входе в насос в рассматриваемых условиях не целесообразна.

Эксперименты показали изменение характеристик насоса от угла отгиба передней трети хорды лопаток при одном и том же угле установки лопаток. Оптимальные углы, оказывающие положительный эффект, показали варианты конструкции с углами установки и отгиба ($20^\circ - 4^\circ$), ($20^\circ - 8^\circ$), ($24^\circ - 8^\circ$).

Полученные экспериментальные результаты рекомендуется использовать для обоснования проектных решений главных циркуляционных насосов реакторных установок со свинцовым теплоносителем.

Библиографический список

1. **Безносков, А.В.** Тяжелые жидкометаллические теплоносители в атомной энергетике / А.В. Безносков, Ю.Г. Драгунов, В.И. Рачков. – М.: ИздАТ, 2007. – 434 с.
2. **Безносков, А.В.** Оборудование энергетических контуров с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями в атомной энергетике / А.В. Безносков, Т.А. Бокова. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет, 2012. – 536 с.
3. **Безносков, А.В.** Технологии и основное оборудование контуров реакторных установок, промышленных и исследовательских стендов со свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителями / А.В. Безносков, П.А. Боков, Т.А. Бокова. – Нижний Новгород: Литера, 2016 – 488 с.
4. **Безносков, А.В.** Экспериментальные исследования и обработка характеристик насосов на свинцовом теплоносителе / А.В. Безносков, А.В. Львов, П.А. Боков, Т.А. Бокова, Д.В. Шихов // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2005. – № 4. – С. 123-132.
5. **Безносков, А.В.** Экспериментальные исследования зависимостей характеристик осевых насосов, перекачивающих свинцовый теплоноситель от параметров решеток профилей рабочих колес / А.В. Безносков, А.В. Львов, П.А. Боков, Т.А. Бокова, В.А. Разин // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2017. – №1. – С. 138-144.
6. **Пфлейдерер, К.** Лопаточные машины для жидкости и газа / К. Пфлейдерер. – М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1960. – 685 с.
7. **Ломакин, А.А.** Центробежные и осевые насосы / А.А. Ломакин. – Л.: Машиностроение, 1966. – 366 с.
8. **Папир, А.Н.** Водометные движители малых судов / А.Н. Папир. – Л.: Судостроение, 1970. – 256 с.

*Дата поступления
в редакцию: 02.10.2018*

A.V. Beznosov, A.V. Lvov, N.S. Volkov, N.S. Lukichev,
P.A. Bokov, T.A. Bokova, E.G. Novinsky

**EXPERIMENTAL STUDIES OF THE DEPENDENCIES OF THE CHARACTERISTICS
OF AXIAL PUMPS, PUMPING LEAD COOLANT, ON THE FLOW AT THE INLET,
INTERSCAPULAR CHANNELS OF THE IMPELLER**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Purpose: The studies were carried out in the NGTU in order to substantiate the design solutions of pumps for low and medium power plants with fast neutron reactors cooled by a lead coolant with a horizontal steam generator.

Design/methodology/approach: The experiment was conducted in two stages. At the first stage, the flow direction was changed relative to the rotation of the impeller. At the second stage, the conditions for the flow entry into the impeller channels were changed. Changing the angles of the bend of flat blades (the first third of the chord) at angles 4° and 8° , in the direction of rotation of the impeller, they were compared, with the results of flat blades.

Findings: The obtained results of the experiment are recommended to be used to justify the design solutions of the main circulating pumps of installations with lead coolant.

Research limitations/implications: The results of studies of the dependences of the characteristics of an axial pump in a lead coolant of nuclear reactors, on the direction of flow at the impeller inlet showed that the installation of a rectifier at the inlet to the pump under the conditions considered is not advisable.

Originality/value: The experiment showed that all variants of the design of the impellers always improve the performance of the pump at all speeds of rotation of the shaft. For different angles of installation of the blades and different angles of the bend, the positive effect is different. The results of the conducted studies show that the installation of the rectifying device at the pump inlet under the conditions considered is not advisable.

Key words: fast neutron reactor, heavy liquid metal coolants, impeller, impeller blades, lead coolant flow, heat carrier flow direction.

УДК 539.3

Ю.А. Гагарин, С.Н. Пичков, А.А. Шумаев, Э.Г. Новинский

**ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ
ОБОЛОЧЕК С ВОДОЙ ПРИ ЕЕ ЗАМЕРЗАНИИ**

Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова

Статья посвящена исследованиям прочности цилиндрических труб (ЦТ) размером $\varnothing 16 \times 3$ мм, $\varnothing 42 \times 5$ мм, $\varnothing 102 \times 11$ мм длиной 400 мм, изготовленных из аустенитной стали типа 08X18H10T, заполненных водой в случае её замерзания при минусовых температурах, и моделируется их поведение при возможных гипотетических авариях в транспортных ЯЭУ. Исследования ЦТ проводились в термокамере (ТК) в течение 24 часов при температурах -1 °С; -5 °С; -10 °С; -15 °С. Перед установкой в ТК и после выдержки при каждой температуре измерялся наружный диаметр труб по длине в пяти сечениях. Проведенные исследования позволили определить остаточные деформации в ЦТ при замерзании в них воды. Результаты исследований могут быть полезны при эксплуатации подобных труб при низких температурах.

Ключевые слова: деформация, нержавеющие трубы, замерзание воды.

Объектом исследований являлись цилиндрические трубы размером 16×3 мм, 42×5 мм, 102×11 мм длиной 400 мм (рис. 1-3). Трубы входят в испытательные сборки.

Краткое описание методики проведения испытаний

Испытания сборок проводились в термокамере TV1000, позволяющей получать низкие температуры до -70 °С. Перед началом испытаний сборки заполнялись до отказа водой комнатной температуры, после чего плотно закрывались фланцами. Присутствие воздуха в сборках не допускалось. Испытуемые сборки помещались в термокамеру и выдерживались при температурах $t = -1$ °С, -5 °С, -10 °С и -15 °С в течение 2-х суток. Использование для управления режимами испытаний цифрового термометра D TM Pt100 позволило поддерживать заданную температуру с точностью $\pm 0, 1$ °С.

Перед установкой сборок в термокамеру и после выдержки при каждой температуре измерялся наружный диаметр труб в пяти по длине сечениях А, Б, В, Г и Д (рис. 1-3, размеры приведены в мм). Измерение в каждом сечении производилось в двух взаимно перпендикулярных направлениях 1 и 2 микрометрами МК ГОСТ 6507 – 78 (цена делений 0, 01 мм). После выдержки сборок при каждой температуре проводился тщательный визуальный осмотр наружной поверхности труб с помощью 20 - ти кратной линзы на предмет обнаружения трещин. По результатам испытаний определялись абсолютная (1) и относительная (2) деформации труб:

$$\Delta = D - D_0 \quad (1)$$

$$\delta = \frac{D - D_0}{D_0} 100\% \quad (2)$$

В формулах (1) и (2) D_0 и D являются соответственно начальным и замеренным в процессе испытаний наружными диаметрами труб.

Результаты исследований

Результаты исходных измерений и испытаний наружных диаметров труб приведены в табл. 1. Значения абсолютных и относительных деформаций, вычисленных по формулам (1) и

(2), приведены в табл. 2. Из полученных результатов следует, что труба 16×3 не имела остаточных деформаций даже после ее выдержки при температуре -15 °С (табл. 1, рис. 4). Труба 42×5 получила остаточные деформации, максимальная величина которых составляла 0,75 мм или 1,78 % (табл. 2), после испытания ее при температуре -10 °С. Снижение температуры замораживания до -15 °С способствовало увеличению значений абсолютных и относительных деформаций до 1,11 мм и 2,64 % соответственно (табл. 2, рис. 5). Раньше всех незначительные остаточные деформации ($\Delta_{\text{max}} = 0,06$ мм, $\delta_{\text{max}} = 0,06\%$) были обнаружены в трубе 102×11 после ее выдержки при $t = -5^\circ\text{C}$ (табл. 2). Однако после испытания при $t = -10^\circ\text{C}$ максимальная величина остаточных деформаций уже составляла 2,82 мм или 2,76 % (табл. 2); $t = -15^\circ\text{C}$ вызвала необратимые изменения размеров наружных диаметров трубы 102×11 максимум на величину 2,98 мм или 2,92% (табл. 2, рис. 6). Проводимый в процессе испытаний визуальный осмотр с помощью 20-кратной линзы показал отсутствие на поверхности труб трещин. Отметим, что все испытываемые трубы не имели осевых остаточных деформаций при каждой температуре испытаний.

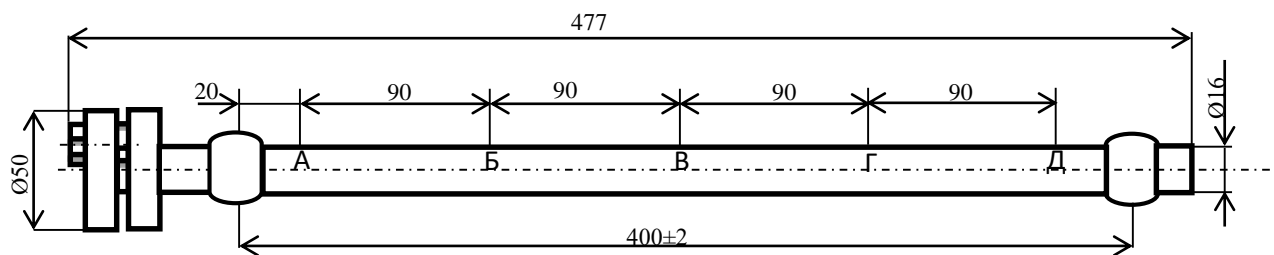


Рис. 1. Основные геометрические размеры трубы Ø16×3 мм

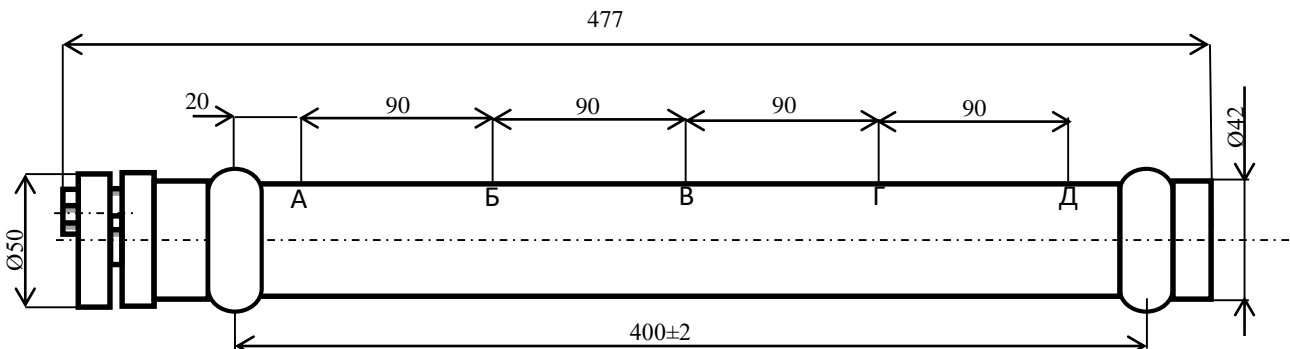


Рис. 2. Основные геометрические размеры трубы Ø42×5 мм

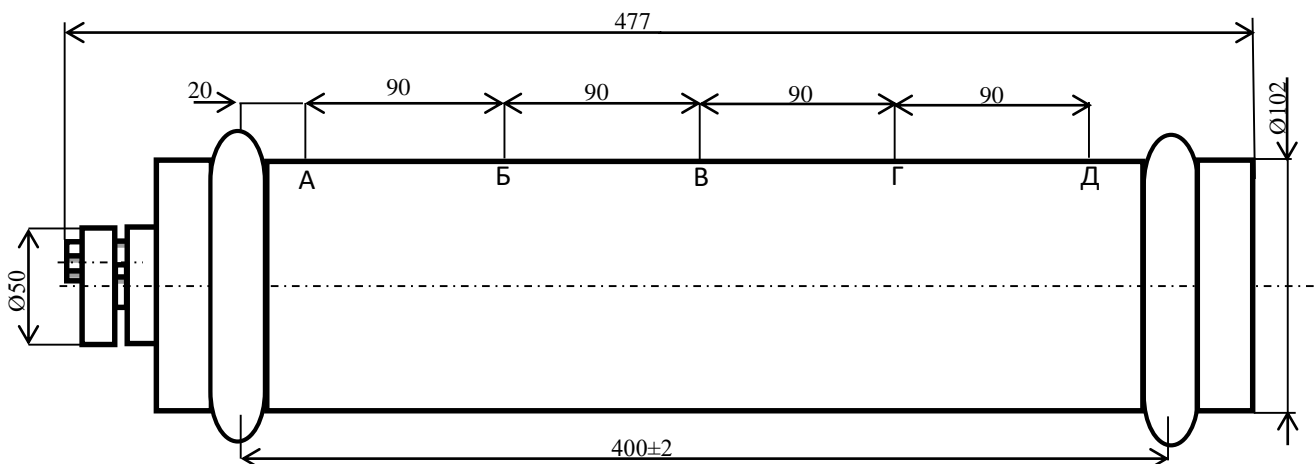


Рис. 3. Основные геометрические размеры трубы Ø102×11 мм

Таблица 1

Результаты измерения наружного диаметра (мм) труб

Наименование	Сечение	Направление 1				
		Начальный диаметр, мм	Температура испытаний, °С			
			-1	-5	-10	-15
Труба 16×3	А	16,06	16,06	16,06	16,06	16,06
	Б	16,06	16,06	16,06	16,07	16,07
	В	16,05	16,05	16,05	16,05	16,05
	Г	16,06	16,06	16,06	16,06	16,06
	Д	16,05	16,06	16,06	16,06	16,06
Труба 42×5	А	42,11	42,12	42,12	42,86	42,87
	Б	42,11	42,11	42,11	42,61	43,22
	В	42,12	42,12	42,12	42,82	43,12
	Г	42,09	42,09	42,11	42,64	42,71
	Д	42,05	42,05	42,05	42,67	42,67
Труба 102×11	А	102,22	102,22	102,24	103,20	103,21
	Б	102,18	102,18	102,21	104,59	104,61
	В	102,27	102,28	102,33	104,91	104,96
	Г	102,14	102,15	102,18	104,88	105,04
	Д	102,13	102,13	102,15	102,80	102,92
Наименование	Сечение	Направление 2				
		Начальный диаметр, мм	Температура испытаний, °С			
			-1	-5	-10	-15
Труба 16×3	А	16,06	16,06	16,06	16,06	16,07
	Б	16,06	16,06	16,06	16,06	16,07
	В	16,04	16,04	16,04	16,04	16,04
	Г	16,07	16,07	16,07	16,07	16,07
	Д	16,06	16,06	16,06	16,06	16,07
Труба 42×5	А	42,18	42,18	42,18	42,87	42,88
	Б	42,11	42,11	42,11	42,55	43,19
	В	42,23	42,23	42,23	42,74	43,07
	Г	42,13	42,13	42,13	42,62	42,71
	Д	42,12	42,12	42,12	42,72	42,73
Труба 102×11	А	102,06	102,06	102,07	102,72	102,81
	Б	102,22	102,23	102,26	104,51	104,57
	В	102,20	102,21	102,23	104,79	104,86
	Г	102,06	102,06	102,09	104,88	105,04
	Д	102,41	102,41	102,41	103,18	103,33

Таблица 2

Величина остаточных деформаций труб

Наименование	Сечение	Направление 1							
		Температура испытаний, °С							
		-1		-5		-10		-15	
		Δ , мм	δ , %	Δ , мм	δ , %	Δ , мм	δ , %	Δ , мм	δ , %
Труба 42×5	А	0,01	0,02	0,01	0,02	0,75	1,78	0,76	1,80
	Б	0	0	0	0	0,50	1,19	1,11	2,64
	В	0	0	0	0	0,70	1,66	1,00	2,37
	Г	0	0	0,02	0,05	0,55	1,31	0,62	1,47
	Д	0	0	0	0	0,62	1,47	0,62	1,47

Окончание таблицы 2

Наименование	Сечение	Направление 2							
		Температура испытаний, °С							
		-1		-5		-10		-15	
		Δ , мм	δ , %	Δ , мм	δ , %	Δ , мм	δ , %	Δ , мм	δ , %
Труба 102×11	А	0	0	0,02	0,02	0,98	0,96	0,99	0,97
	Б	0	0	0,03	0,03	2,41	2,36	2,43	2,38
	В	0,01	0,01	0,06	0,06	2,64	2,58	2,69	2,63
	Г	0,01	0,01	0,04	0,04	2,74	2,68	2,90	2,84
	Д	0	0	0,02	0,02	0,67	0,66	0,79	0,77
Труба 42×5	А	0	0	0	0	0,69	1,64	0,70	1,66
	Б	0	0	0	0	0,44	1,04	1,09	2,59
	В	0	0	0	0	0,51	1,21	0,84	1,99
	Г	0	0	0	0	0,50	1,19	0,59	1,40
	Д	0	0	0	0	0,60	1,42	0,61	1,45
Труба 102×11	А	0	0	0,01	0,01	0,66	0,65	0,75	0,73
	Б	0,01	0,01	0,04	0,04	2,29	2,24	2,35	2,30
	В	0,01	0,01	0,03	0,03	2,59	2,53	2,66	2,60
	Г	0	0	0,03	0,03	2,82	2,76	2,98	2,92
	Д	0	0	0	0	0,77	0,75	0,92	0,90

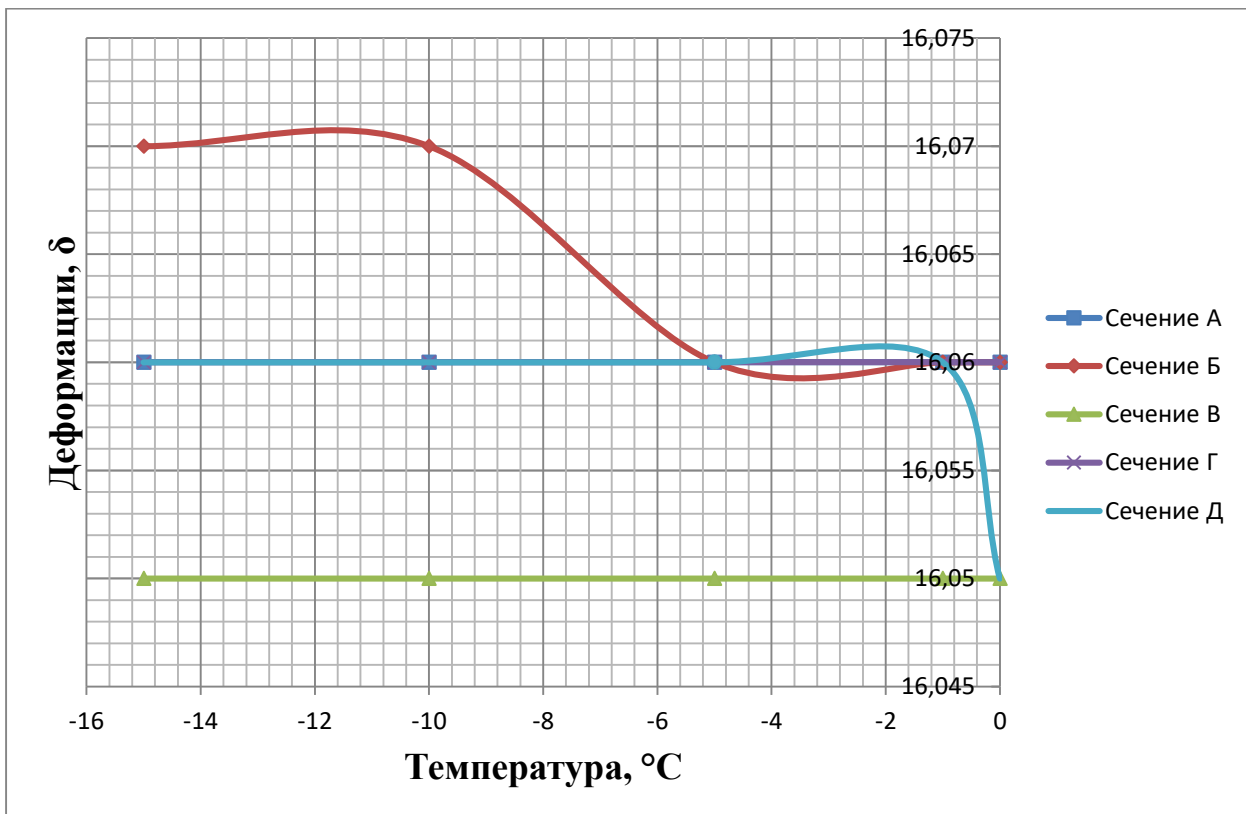


Рис. 4. Зависимость деформации от температурного воздействия на трубу Ø16×3 мм (направление 1)

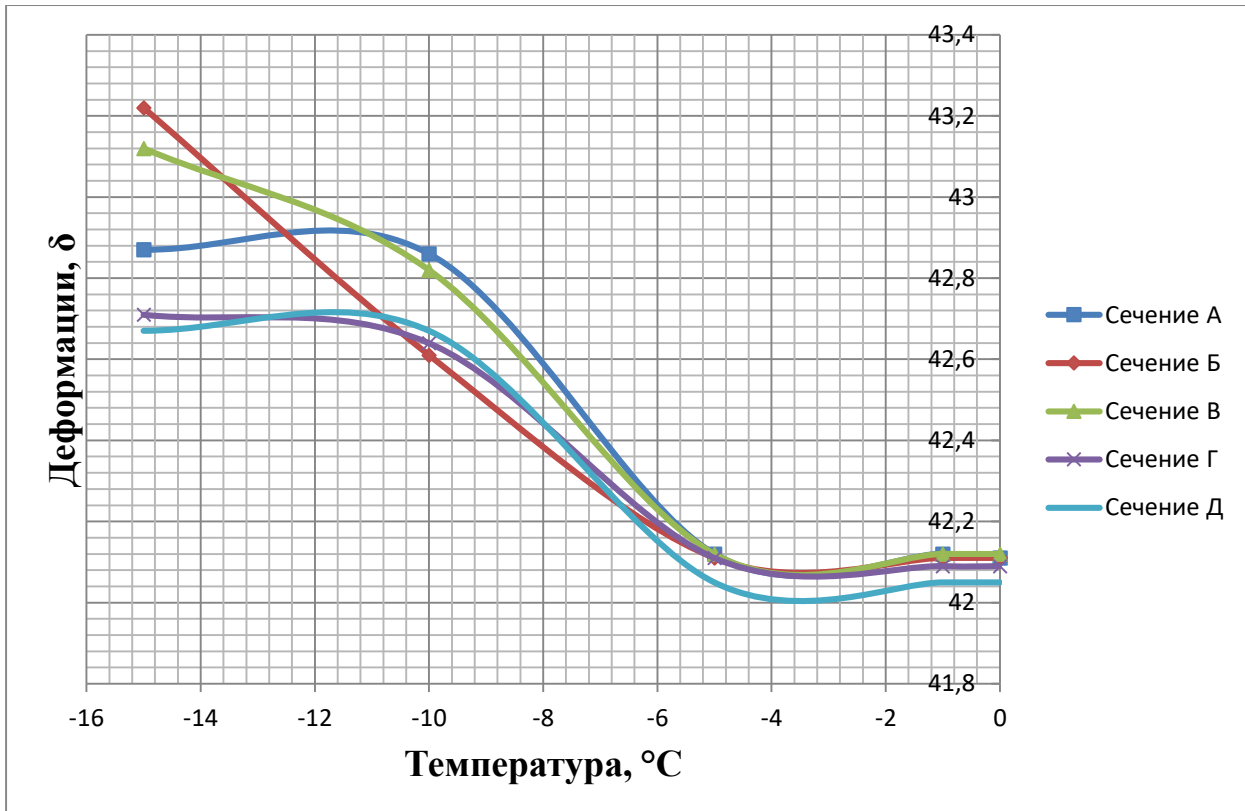


Рис. 5. Зависимость деформации от температурного воздействия на трубу Ø42×5 мм (направление 1)

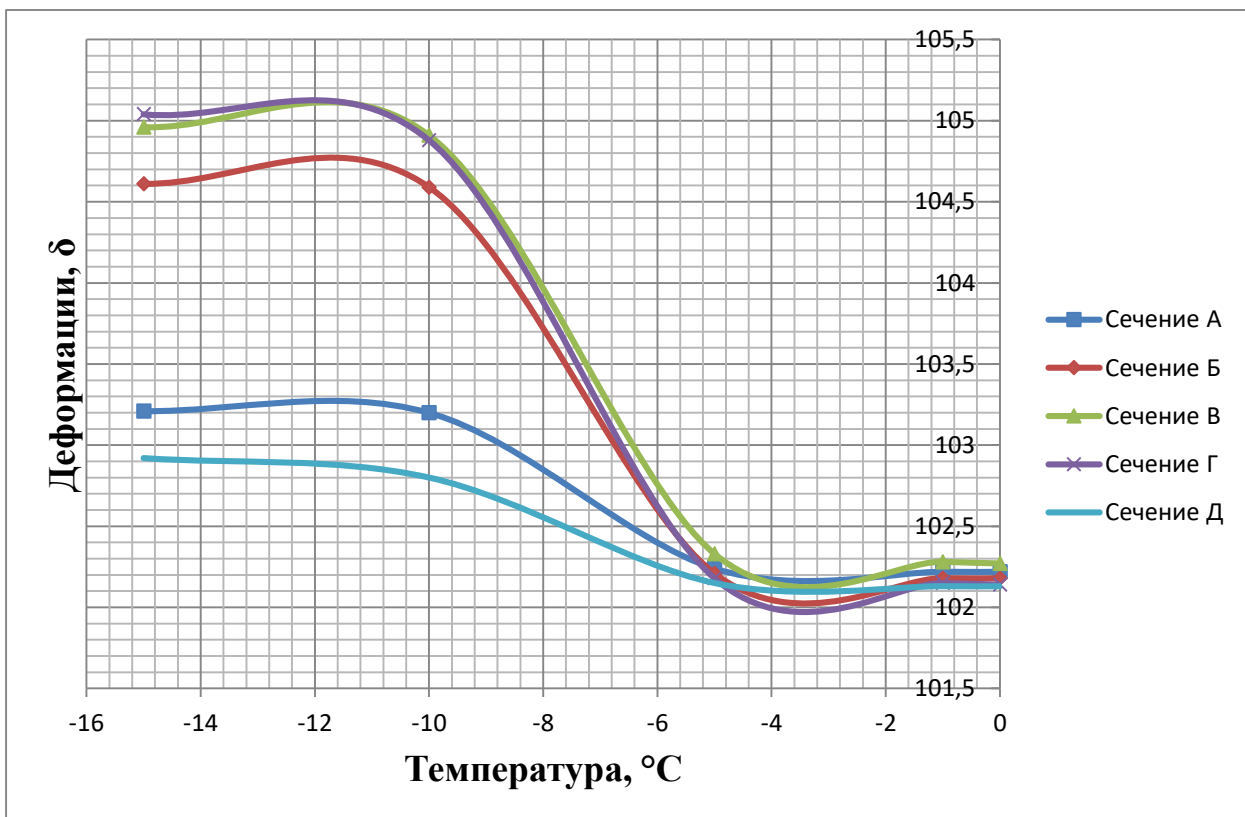


Рис. 6. Зависимость деформации от температурного воздействия на трубу Ø102×11 мм (направление 1)

Заключение

Проведенные исследования позволили определить следующие остаточные деформации в цилиндрических трубах при замерзании в них воды:

- после выдержки труб 16×3 мм, 42×5 мм, 102×11 мм при $t = -1$ °С в течение 2 суток остаточных деформаций не наблюдалось;
- остаточные деформации были обнаружены в трубах 42×5 и 102×11, начиная с $t = -10$ °С и -5 °С соответственно;
- максимальная величина остаточных деформаций в трубах 42×5 и 102×11 после выдержки их при температуре -15 °С в течение 2 суток составляла величину 1,11 мм или 2,64% и 2,98 мм или 2,92% соответственно;
- трещины на поверхности труб не наблюдались при всех температурах испытаний.

Дата поступления

в редакцию: 02.10.2018

Y. Gagarin, S. Pichkov, A. Shumaev, E. Novinskiy

DEFORMATION RESEARCH OF CYLINDRICAL SHEATH WITH WATER INSIDE WHILE FREEZING

JSC OKBM AFRICANTOV, Nizhniy Novgorod

Purpose: The article is devoted to the research of the strength of cylindrical tubes (ЦТ) of size $\varnothing 16 \times 3$ mm, $\varnothing 42 \times 5$ mm, $\varnothing 102 \times 11$ mm length 400 mm made of austenitic steel 08X18H10T and filled with water in case of its freezing at sub-zero temperatures and simulate their behavior during possible hypothetical accidents at transport NPPs.

Methodology: Cylindrical tube researches were carried out in a heat chamber, which allows to obtain low temperatures up to minus 70 °С and exposure at each temperature: $t = -1$ °С; -5 °С; -10 °С; -15 °С for 24 hours. Before installation in the TC and after exposure at each temperature, the outer diameter of the tubes was measured along the length in five sections.

Findings: The results showed:

- tube $\varnothing 16 \times 3$ mm has not residual deformations after exposure at $t = -15$ °С;
- in tube $\varnothing 42 \times 5$ mm occurred residual deformations of 1,78 % after testing at $t = -10$ °С, at $t = -15$ °С has residual deformations of 2,64 %;
- tube $\varnothing 102 \times 11$ mm at $t = -15$ °С has residual deformations of ~ 3 %.

Axial residual deformations in all tested tubes were absent.

Value: The carried out researches allowed to determine residual deformations in cylindrical tubes when water freezes inside. The research results can be useful in the operation of such tubes at low temperatures.

Key words: deformation, stainless steel ducts, water freezing

УДК 621.314.26

А.Б. Дарьенков, Е.А. Чернов, Д.М. Кочеганов, Т.Х. Абузяров

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ МАТРИЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ СО СКАЛЯРНЫМ И ПРОСТРАНСТВЕННО-ВЕКТОРНЫМ АЛГОРИТМАМИ УПРАВЛЕНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В статье рассматривается имитационное моделирование работы матричного преобразователя частоты (МПЧ) с двумя различными алгоритмами управления. В качестве инструмента моделирования применяется пакет Matlab Simulink. Приводятся результаты спектрального анализа осциллограмм потребляемого преобразователем тока и напряжения нагрузки. Имитационное моделирование показало, что пространственно-векторный алгоритм управления МПЧ при прочих равных условиях демонстрирует более высокие показатели электромагнитной совместимости и коэффициент передачи по напряжению, чем скалярный алгоритм управления МПЧ.

Ключевые слова: матричный преобразователь частоты, пространственно-векторный алгоритм управления, скалярный алгоритм управления.

Введение

Совершенствование эксплуатационных характеристик преобразователей является предметом интенсивных изысканий, в настоящее время исследовательский интерес привлекают непосредственные преобразователи частоты с матричной топологией или матричные преобразователи частоты (МПЧ). По сравнению с широко распространенными преобразователями частоты со звеном постоянного тока МПЧ обладает такими преимуществами, как:

- отсутствие элементов звена постоянного тока, подверженных старению, что повышает надежность устройства, повышает коэффициент полезного действия и уменьшает габариты;
- обеспечение двунаправленного потока передачи энергии позволяет осуществлять рекуперацию энергии в сеть и производить коррекцию входного коэффициента мощности при помощи специальных техник управления преобразователем.

Матричные преобразователи также имеют определенные недостатки:

- максимальный коэффициент передачи по напряжению ограничен величиной 0.866 при синусоидальных формах входных токов и выходных напряжений;
- используется большее количество полупроводниковых приборов, чем в преобразователях частоты со звеном постоянного тока;
- сложность алгоритмов системы управления.

Принцип работы матричного преобразователя частоты

Структура матричного преобразователя содержит девять двунаправленных ключевых элементов, которые позволяют подключить каждую фазу питающей сети с каждой фазой нагрузки, структурная схема устройства представлена на рис. 1. Из-за отсутствия в конструкции матричного преобразователя элементов накопления энергии, выходное напряжение формируется непосредственно из сегментов напряжения питания. Продолжительность включения каждого используемого сегмента кривой входного напряжения должна контролироваться таким образом, чтобы среднее значение выходного напряжения на интервале сегмента соответствовало заданному; частота модуляции должна быть выбрана значительно большей, чем ча-

стота входных и выходных напряжений. Без перехода в область сверхмодуляции максимальная амплитуда выходного напряжения матричного преобразователя составляет 0,866 от амплитуды напряжения питания. Сверхмодуляция позволяет увеличить коэффициент передачи по напряжению, однако приводит к усилению искажений выходных напряжений и потребляемых токов преобразователя.

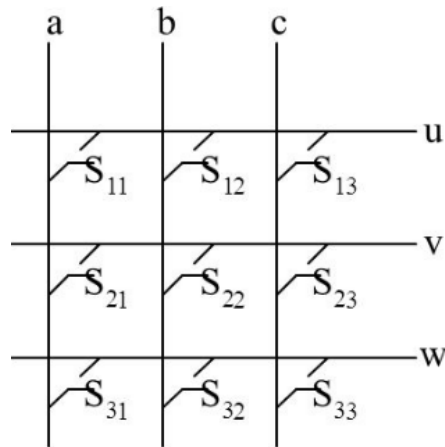


Рис. 1. Структурная схема трехфазно-трехфазного матричного преобразователя частоты

Алгоритмы управления матричным преобразователем частоты

С момента первого описания матричного преобразователя и по настоящее время способы управления являются предметом активных исследований. Стратегия управления матричным преобразователем должна удовлетворять следующим требованиям:

- формирование выходного напряжения требуемой частоты и амплитуды;
- обеспечение минимальных искажений формы потребляемых токов с возможностью регулирования фазового угла между потребляемым током и напряжением питания преобразователя;
- обеспечение максимального коэффициента передачи по напряжению;
- обеспечение минимума динамических потерь в силовых ключах;
- адаптированность к реализации с помощью цифровых средств.

В настоящей статье рассматривается скалярная техника управления П.Д. Зиогаса, С.И. Кхана и М.Х. Рашида [1, 2], а также техника прямой пространственно-векторной модуляции Д. Кэсэди, Г. Гранди, Г. Серра, А. Тани [3]. При использовании скалярной техники управления П.Д. Зиогаса, С.И. Кхана и М.Х. Рашида работа матричного преобразователя соответствует работе преобразователя частоты со звеном постоянного тока, с тем отличием, что в качестве напряжения звена постоянного тока используется входное линейное напряжение, имеющее наибольшее значение в данный момент времени. Таким образом, система управления преобразователем формирует шесть рабочих интервалов, соответствующих максимальному значению одного из входных линейных напряжений (рис. 2).

На каждом интервале работы вентили преобразователя функционируют в одном из трех режимов: постоянно включен, постоянно выключен, модуляция. Рассмотрим работу преобразователя с применением данной техники управления на интервале $S1$. На рис. 3 приведена схема силовой части преобразователя с нумерацией вентиляей [4]. На интервале $S1$ наибольшее значение имеет напряжение U_{AB} . Для формирования выходных напряжений будут использоваться вентили фаз A и B , вентили фазы C будут находиться в выключенном состоянии. Потенциал фазы A превышает потенциал фазы B , следовательно, фаза A будет подключаться к нагрузке через подводящие вентили 1, 7, 13, а фаза B – через отводящие вентили 4, 10, 16. При этом эквивалентная схема матричного преобразователя будет иметь вид схемы трехфазного мостового инвертора напряжения (рис. 4).

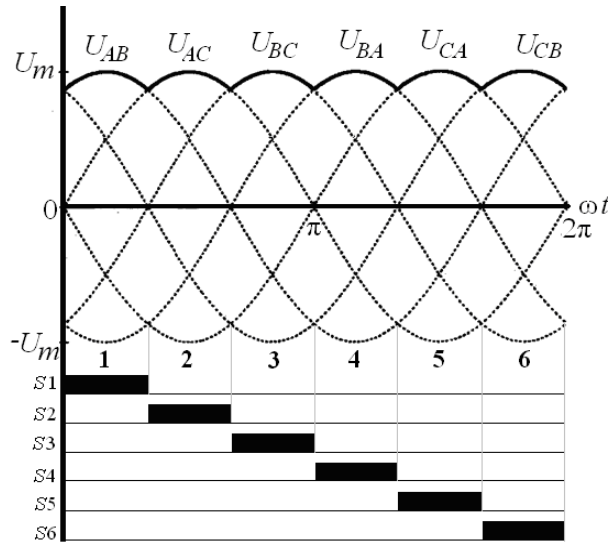


Рис. 2. Формирование интервалов работы преобразователя

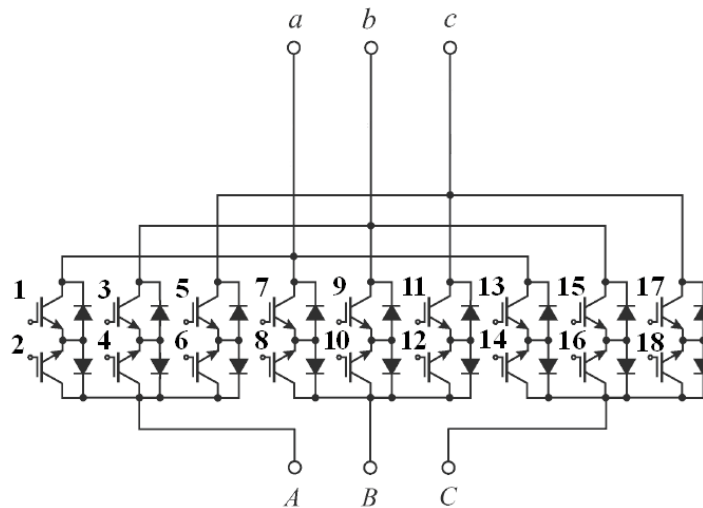


Рис. 3. Схема силовой части преобразователя с нумерацией вентилей

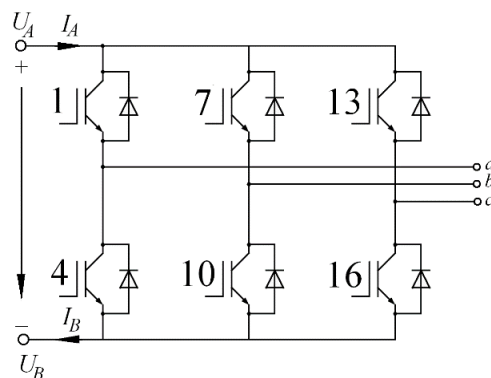


Рис. 4. Эквивалентная схема матричного преобразователя на интервале работы S1

Роль напряжения звена постоянного тока играет линейное напряжение U_{AB} . Для обеспечения протекания тока обратного направления в нагрузке вентили 2, 8, 14 фазы A и вентили

3, 9, 15 фазы B находятся в постоянно включенном состоянии. Работа преобразователя на других интервалах осуществляется аналогично. Основным преимуществом данной техники управления является простота реализации.

Система управления матричным преобразователем в среде *MatlabSimulink*, реализующая данную технику, представлена на рис. 5.

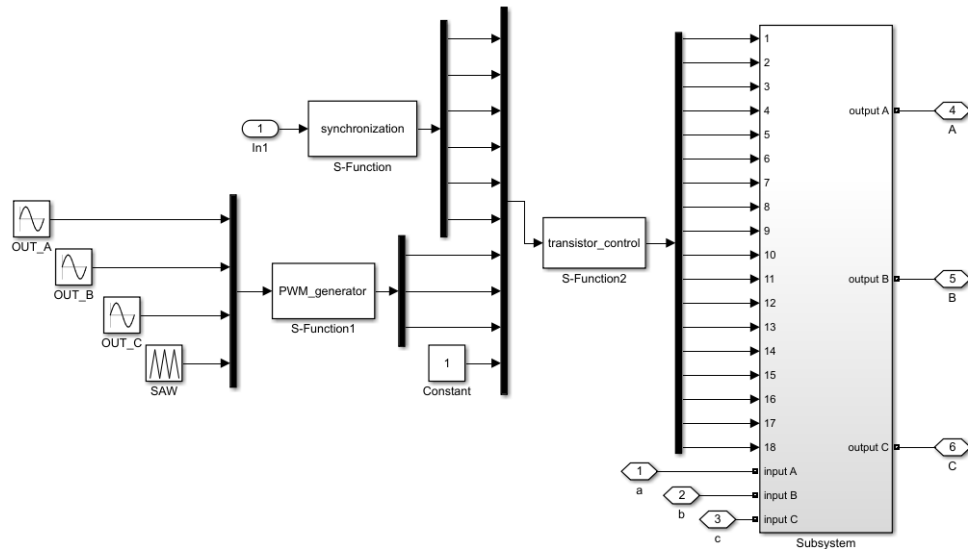


Рис. 5. Система управления МПЧ по принципу П.Д. Зиогаса, С.И. Кхана и М.Х. Рашида с блоком двунаправленных ключей

Система управления включает в себя блоки s -функций *MatlabSimulink*, осуществляющие:

- синхронизацию с сетевым напряжением, формирование интервалов работы;
- формирование сигналов ШИМ в соответствии с заданием на выходное напряжение;
- формирование сигналов управления транзисторами в соответствии с методикой мягкой коммутации.

Другая техника управления матричным преобразователем – пространственно-векторная модуляция – была предложена Д. Кэсэди, Г. Гранди, Г. Серра, А. Тани. Она основана на пространственно-векторном представлении мгновенных значений входных и выходных напряжений и токов. Из 27 доступных коммутационных конфигураций трехфазно-трехфазного матричного преобразователя, в алгоритме пространственно-векторной модуляции применяются только 21. Первые 18 конфигураций, представленных в табл. 1, определяют вектор выходного напряжения и вектор входного тока, имеющие фиксированные направления (рис. б). Модуль этих векторов зависит от мгновенных значений входного напряжения и тока. Последние три конфигурации задают нулевой входной ток и нулевое выходное напряжение. Для обозначения комбинаций работающих двунаправленных ключей также применяются буквенные обозначения, соответствующие обозначениям фаз питающей сети, подключаемым к фазам нагрузки. Так, вектор +1 имеет буквенное обозначение ABB , вектор +2 BCC и т. д.

Таблица 1

Коммутационные конфигурации матричного преобразователя

Номер вектора	Конфигурация ключей			Выходные фазные напряжения			Выходные линейные напряжения			Входные линейные токи		
				V_a	V_b	V_c	V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}	I_A	I_B	I_C
+1	S _{Aa}	S _{Bb}	S _{Bc}	V _A	V _B	V _B	V _{AB}	0	-V _{AB}	I _a	I _b +I _c	0
-1	S _{Ba}	S _{Ab}	S _{Ac}	V _B	V _A	V _A	-V _{AB}	0	V _{AB}	I _b +I _c	I _a	0
+2	S _{Ba}	S _{Cb}	S _{Cc}	V _B	V _C	V _C	V _{BC}	0	-V _{BC}	0	I _a	I _b +I _c
-2	S _{Ca}	S _{Bb}	S _{Bc}	V _C	V _B	V _B	-V _{BC}	0	V _{BC}	0	I _b +I _c	I _a
+3	S _{Ca}	S _{Ab}	S _{Ac}	V _C	V _A	V _A	V _{CA}	0	-V _{CA}	I _b +I _c	0	I _a
-3	S _{Aa}	S _{Cb}	S _{Cc}	V _A	V _C	V _C	-V _{CA}	0	V _{CA}	I _a	0	I _b +I _c
+4	S _{Ba}	S _{Ab}	S _{Bc}	V _B	V _A	V _B	-V _{AB}	V _{AB}	0	I _b	I _a +I _c	0
-4	S _{Aa}	S _{Bb}	S _{Ac}	V _A	V _B	V _A	V _{AB}	-V _{AB}	0	I _a +I _c	I _b	0
+5	S _{Ca}	S _{Bb}	S _{Cc}	V _C	V _B	V _C	-V _{BC}	V _{BC}	0	0	I _b	I _a +I _c
-5	S _{Ba}	S _{Cb}	S _{Bc}	V _B	V _C	V _B	V _{BC}	-V _{BC}	0	0	I _a +I _c	I _b
+6	S _{Aa}	S _{Cb}	S _{Ac}	V _A	V _C	V _A	-V _{CA}	V _{CA}	0	I _a +I _c	0	I _b
-6	S _{Ca}	S _{Ab}	S _{Cc}	V _C	V _A	V _C	V _{CA}	-V _{CA}	0	I _b	0	I _a +I _c
+7	S _{Ba}	S _{Bb}	S _{Ac}	V _B	V _B	V _A	0	-V _{AB}	V _{AB}	I _c	I _a +I _b	0
-7	S _{Aa}	S _{Ab}	S _{Bc}	V _A	V _A	V _B	0	V _{AB}	-V _{AB}	I _a +I _b	I _c	0
+8	S _{Ca}	S _{Cb}	S _{Bc}	V _C	V _C	V _B	0	-V _{BC}	V _{BC}	0	I _c	I _a +I _b
-8	S _{Ba}	S _{Bb}	S _{Cc}	V _B	V _B	V _C	0	V _{BC}	-V _{BC}	0	I _a +I _b	I _c
+9	S _{Aa}	S _{Ab}	S _{Cc}	V _A	V _A	V _C	0	-V _{CA}	V _{CA}	I _a +I _b	0	I _c
-9	S _{Ca}	S _{Cb}	S _{Ac}	V _C	V _C	V _A	0	V _{CA}	-V _{CA}	I _c	0	I _a +I _b

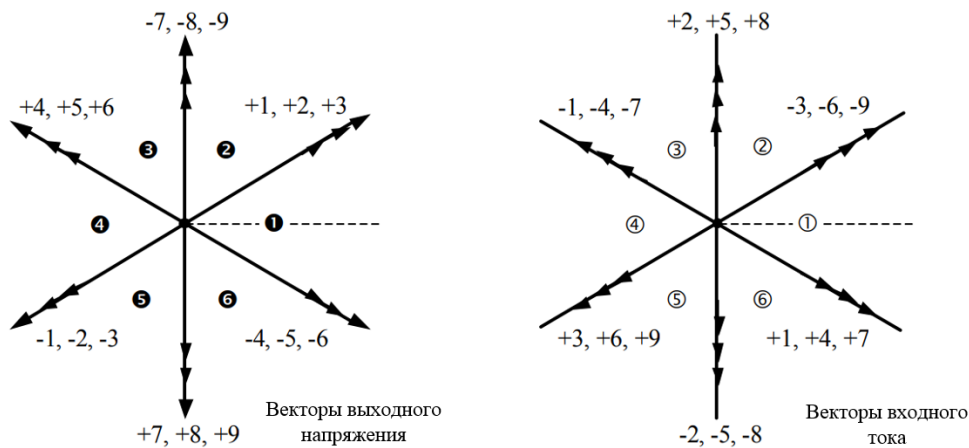


Рис. 6. Пространственные векторы матричного преобразователя

Основа алгоритма пространственно-векторной модуляции заключается в выборе четырех активных конфигураций с соответствующими продолжительностями включения, которые обеспечат требуемые параметры вектора выходного напряжения и величину фазового сдвига между входным током и входным напряжением. Так как данная топология матричного преобразователя частоты лишена элементов хранения энергии, регулировать амплитуду вектора входного тока с целью уменьшения искажений не представляется возможным. В качестве примера рассмотрим ситуацию, когда требуемый вектор выходного напряжения \vec{v}_o и вектор входного тока \vec{i}_i находятся в секторе 1 (рис. 7).

В каждый момент времени в качестве исходных данных известны вектор требуемого выходного напряжения \vec{v}_o , вектор входного напряжения \vec{e}_i и величина фазового сдвига между входным током и входным напряжением ϕ_i . Как видно из рис. 7, путем регулирования фазового угла β_i можно достичь требуемого значения угла ϕ_i .

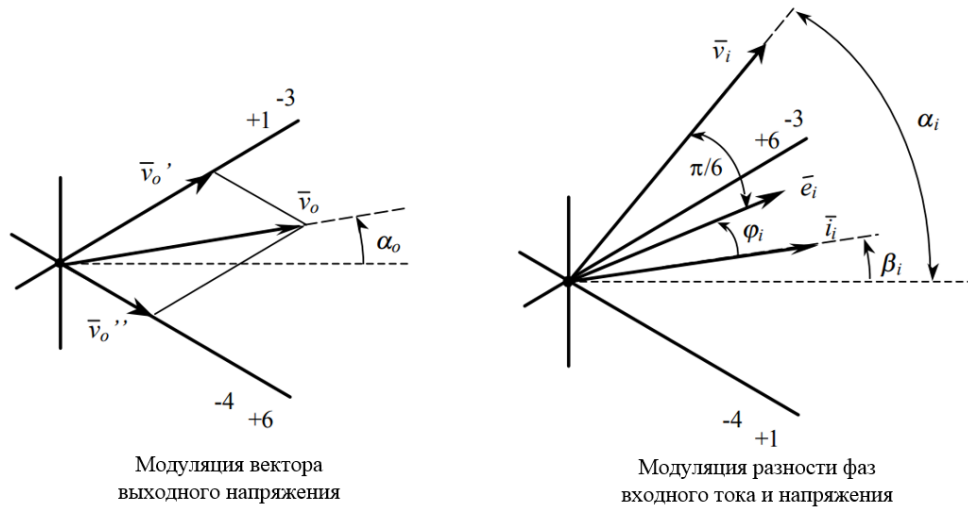


Рис. 7. Расположение векторов выходного напряжения и входного тока

Вектор выходного напряжения \vec{v}_o раскладывается на две компоненты \vec{v}'_o и \vec{v}''_o , соответствующие двум смежным пространственным векторам выходного напряжения. Компонента \vec{v}'_o может быть сформирована из коллинеарных пространственных векторов $\pm 1, \pm 2, \pm 3$. Из шести возможных векторов выбираются те, которые принимают участие в формировании вектора входного тока в текущем секторе и обладают максимальной амплитудой. Такими векторами являются +1 и -3. Аналогично для формирования компоненты \vec{v}''_o выбираются векторы +6 и -4. Соответствующие комбинации пространственных векторов для формирования векторов тока и напряжения в каждом секторе представлены в табл. 2.

Таблица 2

Конфигурации пространственных векторов для различных секторов

i_k	v_o	1	2	3	4	5	6
1		-3 +1 +6 -4	+9 -7 -3 +1	-6 +4 +9 -7	+3 -1 -6 +4	-9 +7 +3 -1	+6 -4 -9 +7
2		+2 -3 -5 +6	-8 +9 +2 -3	+5 -6 -8 +9	-2 +3 +5 -6	+8 -5 -2 +3	-5 +6 +8 -9
3		-1 +2 +4 -5	+7 -8 -1 +2	-4 +5 +7 -8	+1 -2 -4 +5	-7 +8 +1 -2	+4 -5 -7 +8
4		+3 -1 -6 +4	-9 +7 +3 -1	+6 -4 -9 +7	-3 +1 +6 -4	+9 -7 -3 +1	-6 +4 +9 -7
5		-2 +3 +5 -6	+8 -5 -2 +3	-5 +6 +8 -9	+2 -3 -5 +6	-8 +5 +2 -3	+5 -6 -8 +9
6		+1 -2 -4 +5	-7 +8 +1 -2	+4 -5 -7 +8	-1 +2 +4 -5	+7 -8 -1 +2	-4 +5 +7 -8
		I II III IV	I II III IV	I II III IV	I II III IV	I II III IV	I II III IV

В последней строке записывается порядковый номер комбинации пространственных векторов в пределах одного сектора.

В соответствии с этим, выражения, представляющие алгоритм модуляции, записываются следующим образом

$$\vec{v}'_o = \vec{v}_o^I d^I + \vec{v}_o^{II} d^{II} = \frac{2}{\sqrt{3}} v_o \cos(\tilde{\alpha}_o - \frac{\pi}{3}) e^{j[(K_v-1)\pi/3 + \pi/6]}, \tag{1}$$

$$\vec{v}''_o = \vec{v}_o^{III} d^{III} + \vec{v}_o^{IV} d^{IV} = \frac{2}{\sqrt{3}} v_o \cos(\tilde{\alpha}_o + \frac{\pi}{3}) e^{j[(K_v-1)\pi/3 + \pi/6]}, \tag{2}$$

$$(\vec{i}_i^I d^I + \vec{i}_i^{II} d^{II}) j i_i e^{j\tilde{\beta}_i} = 0, \tag{3}$$

$$(\bar{i}_i^{-III} d^{III} + \bar{i}_i^{-IV} d^{IV}) j i_i e^{j\tilde{\beta}_i} = 0. \tag{4}$$

где d^{I-IV} – относительная длительность включения соответствующей комбинации;
 K_v – номер сектора, в котором находится вектор выходного напряжения;
 \bar{v}_i^{I-IV} – составляющие вектора выходного напряжения, соответствующие комбинации пространственных векторов;
 \bar{i}_i^{I-IV} – составляющие вектора входного тока, соответствующие комбинации пространственных векторов;
 $\tilde{\alpha}_o$ – угол между вектором выходного напряжения и биссектрисой сектора, в котором в данный момент находится вектор выходного напряжения;
 $\tilde{\beta}_i$ – угол между вектором входного тока и биссектрисой сектора, в котором в данный момент находится вектор входного тока;

Относительные длительности включения будут определяться как

$$d^I = \frac{2}{\sqrt{3}} m \frac{\cos\left(\tilde{\alpha}_o - \frac{\pi}{3}\right) \cos\left(\tilde{\beta}_i - \frac{\pi}{3}\right)}{\cos(\varphi_i)}, \tag{5}$$

$$d^{II} = \frac{2}{\sqrt{3}} m \frac{\cos\left(\tilde{\alpha}_o - \frac{\pi}{3}\right) \cos\left(\tilde{\beta}_i + \frac{\pi}{3}\right)}{\cos(\varphi_i)}, \tag{6}$$

$$d^{III} = \frac{2}{\sqrt{3}} m \frac{\cos\left(\tilde{\alpha}_o + \frac{\pi}{3}\right) \cos\left(\tilde{\beta}_i - \frac{\pi}{3}\right)}{\cos(\varphi_i)}, \tag{7}$$

$$d^{IV} = \frac{2}{\sqrt{3}} m \frac{\cos\left(\tilde{\alpha}_o + \frac{\pi}{3}\right) \cos\left(\tilde{\beta}_i + \frac{\pi}{3}\right)}{\cos(\varphi_i)}. \tag{8}$$

где m – коэффициент передачи по напряжению.

Максимальный теоретический коэффициент передачи по напряжению при данной технике управления равняется 0.866 и достигается при нулевой разности фаз между входным напряжением и током преобразователя. Модель системы управления в пакете *Matlab Simulink*, реализующая данную технику управления, представлена на рис. 8.

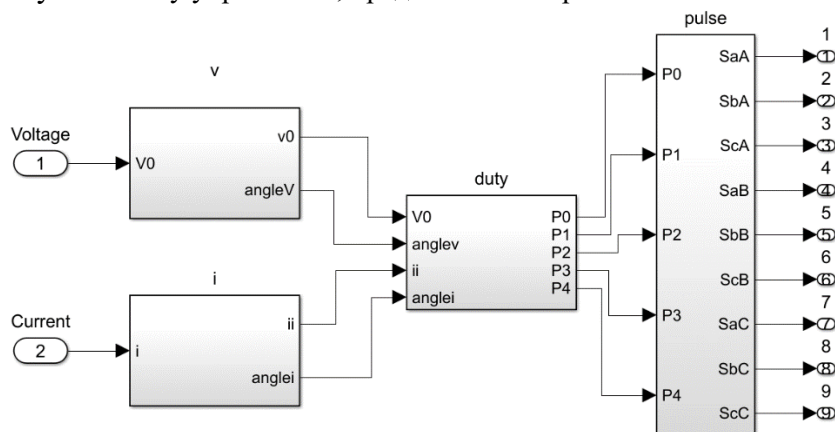


Рис. 8. Система управления по принципу пространственно-векторной модуляции

Система состоит из блоков *s*-функций *Matlab Simulink*, выполняющих следующие функции:

- определение параметров входного тока и выходного напряжения;
- определение секторов векторов входного тока и выходного напряжения;
- вычисление требуемых относительных длительностей включения соответствующих пространственных векторов;
- выработка соответствующих сигналов управления для двунаправленных ключей.

Имитационное моделирование

Исследуется работа матричного преобразователя частоты со скалярным алгоритмом управления при питании от трехфазного источника напряжения частотой 40 Гц и активной нагрузке мощностью 2 кВт без использования фильтров, частота выходного напряжения 50 Гц, частота ШИМ 5 кГц. Осциллограммы линейного напряжения AB и тока фазы A источника напряжения представлены на рис. 9. Результаты спектрального анализа осциллограммы тока фазы A источника напряжения и линейного напряжения AB нагрузки приводятся на рис. 10.

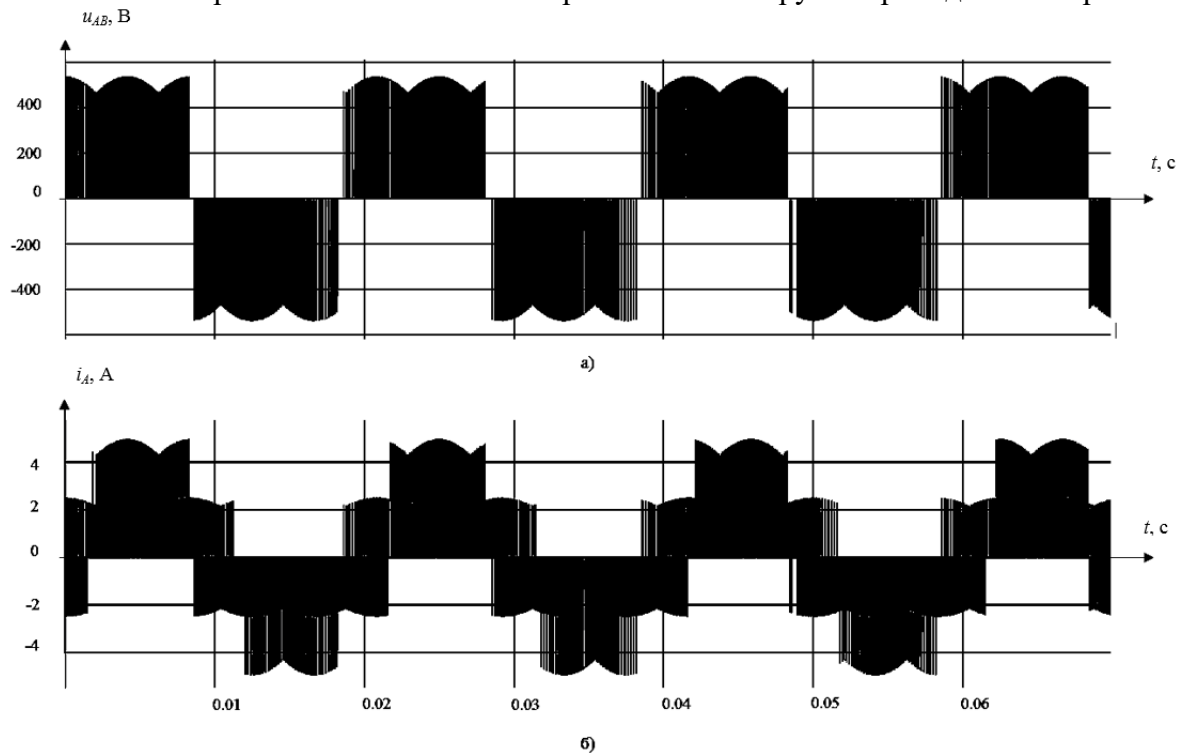


Рис. 9. Линейное напряжение нагрузки AB (а), ток фазы A нагрузки (б)

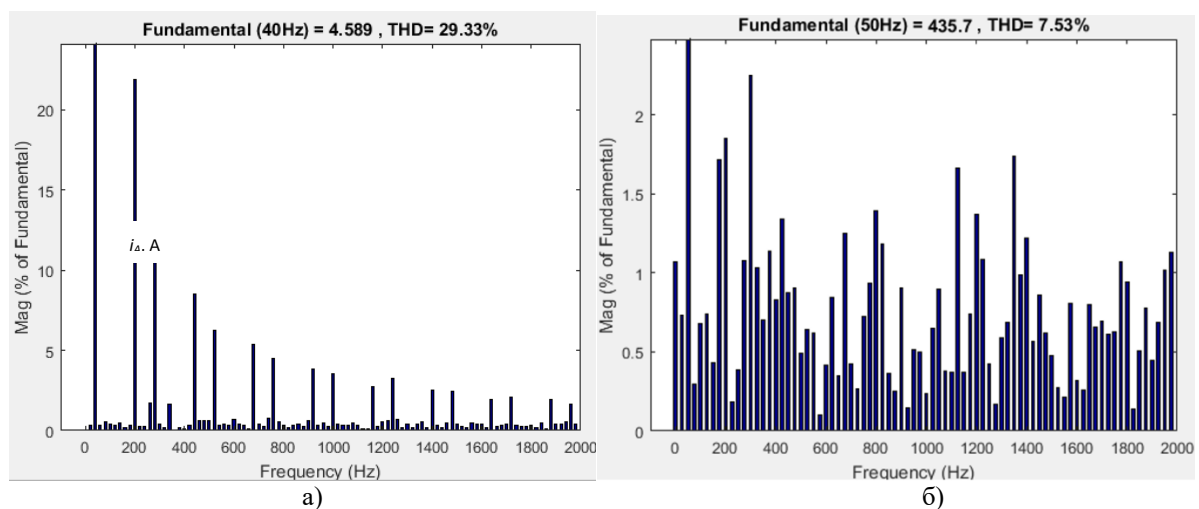


Рис. 10. Спектральный анализ потребляемого тока фазы A (а), напряжения нагрузки AB (б)

Исследование работы матричного преобразователя частоты с пространственно-векторным алгоритмом управления производится при аналогичных условиях: питание от трехфазного источника частотой 40 Гц, нагрузка – активная мощностью 2 кВт без использования

фильтров, частота выходного напряжения 50 Гц, частота ШИМ 5 кГц. Осциллограммы линейного напряжения AB и тока фазы A источника напряжения представлены на рис. 11. Результаты спектрального анализа осциллограммы тока фазы A источника напряжения и линейного напряжения AB нагрузки приводятся на рис. 12.

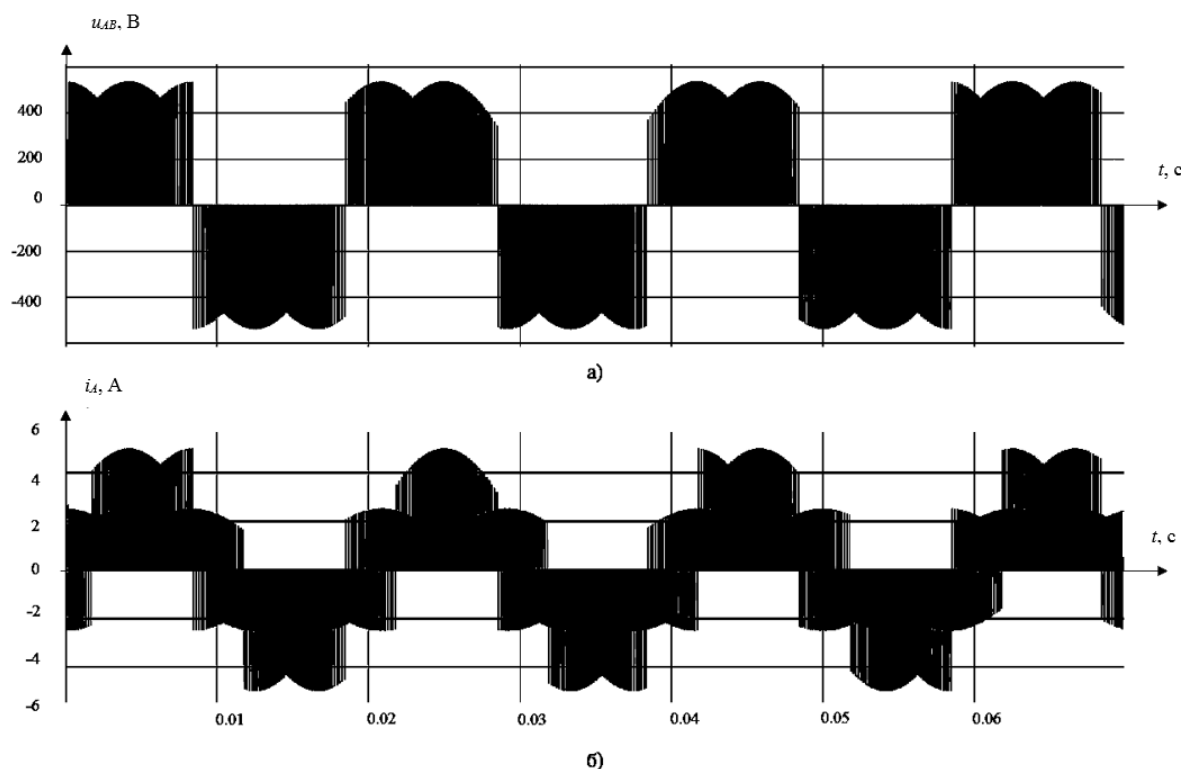


Рис. 11. Линейное напряжение нагрузки AB (а), ток фазы A нагрузки (б)

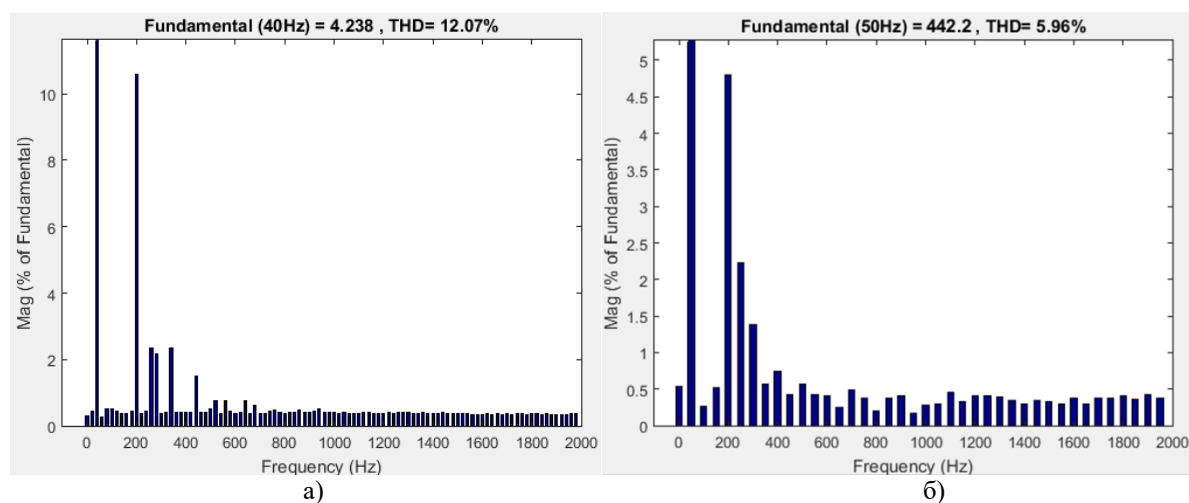


Рис. 12. Спектральный анализ потребляемого тока фазы A (а), напряжения нагрузки AB (б)

Заключение

Имитационное моделирование показало, что пространственно-векторный алгоритм управления МПЧ при прочих равных условиях демонстрирует более высокие показатели электромагнитной совместимости и коэффициент передачи по напряжению (THD потребляемого тока 12,07%, THD напряжения нагрузки 5,96%, амплитуда первой гармоники линейного напряжения 442.2 В), чем скалярный алгоритм управления МПЧ (THD потребляемого тока 29,33%, THD напряжения нагрузки 7,53%, амплитуда первой гармоники линейного напряжения 435,7

В). На основании изложенного можно сделать вывод, что векторный алгоритм управления при наличии возможности использования более сложной системы управления является более предпочтительным для применения в матричных преобразователях частоты.

Библиографический список

1. **Ziogas, P.D.** Some Improved Forced Commutated Cycloconverters Structure / P.D. Ziogas, S.I. Khan, M.H. Rashid // IEEE Transactions on Industry Application. – Vol. IA-21, № 5, Sept./Oct. 1985. – P. 1242-1253.
2. **Khan, S.I.** Forced Commutated Cycloconverters for High-Frequency Link Applications / S.I. Khan, P.D. Ziogas, M.H. Rashid // IEEE Transactions on Industry Applications. – Vol. IA-23, № 4, July/August 1987. – P. 661-672.
3. **Casadei, D.** Space vector control of matrix converters with unity input power factor and sinusoidal input/output waveforms / D. Casadei, G. Grandi, G. Serra, A. Tani // Proceedings of IEEEEPE'93. – Vol. 7. – P. 170-175, 1993.
4. **Дарьенков, А.Б.** Имитационная модель электропривода на базе матричного преобразователя частоты / А.Б. Дарьенков, И.В. Воротынцев, И.А. Варьгин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. –2014. – № 5 (107). – С. 59-64.
5. **Дарьенков, А.Б.** Имитационное моделирование электропривода на базе однокаскадного матричного преобразователя частоты / А.Б. Дарьенков, И.А. Варьгин // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2015. – № 1. – С. 97-104.
6. **Дарьенков, А.Б.** Сравнительный анализ топологий матричных преобразователей частоты / А.Б. Дарьенков, О.С. Хватов, Д.А. Корнев, И.А. Варьгин // Математические методы в технике и технологиях // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. 2013. № 9-1 (59). С. 330-331.

*Дата поступления
в редакцию: 16.10.2018*

A.B. Daryenkov, E.A. Chernov, D.M. Kocheganov, T.H. Abuzyarov

COMPARATIVE SIMULATION OF MATRIX CONVERTER WITH SCALAR AND SPACE VECTOR CONTROL ALGORITHMS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseyev

Object of probe: Matrix converter control algorithms.

Purpose: An increase of matrix converter performance and effectiveness.

Results: The article shows results of comparative simulation of matrix converter control algorithms. Matlab Simulink is used as modelling environment. Input current and output voltage diagrams are shown, THD measurement results are provided. Simulation model shows that space vector control algorithm provides higher electromagnetic capability level, higher voltage transfer coefficient of matrix converter (the source current THD is 12.07%, load voltage THD 5.96%, the linear voltage first harmonic amplitude is 442.2V) compare to scalar control algorithm (the source current THD is 29.33%, load voltage THD 7.53%, the linear voltage first harmonic amplitude is 435.7V). Based on the foregoing, we can conclude that the vector control algorithm is more preferable for use in matrix frequency converters, although it requires a more complex control system.

Key words: matrix converter, scalar control algorithm, space vector control algorithm.

УДК 537.311.3

Е.Г. Дегтерев, Г.М. Соколова, С.В. Хорьков, А.Н. Яшина, Н.Ф. Яшина

**ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА НЕЛИНЕЙНЫЕ СВОЙСТВА
УПОРЯДОЧЕННОЙ ДВУМЕРНОЙ ПРОВОДЯЩЕЙ СРЕДЫ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Проводящие двумерные среды-плёнки интенсивно изучаются в связи с широким практическим применением. Двумерные системы привлекательны и с точки зрения экспериментальной реализации, так как методы современной планарной нанотехнологии позволяют создавать плёнки с заданной текстурой и содержанием компонент с необходимыми характеристиками. В работе исследуется влияние магнитного поля на нелинейные эффективные характеристики проводящей среды с периодическими неоднородностями. Исследована симметричная часть тензора нелинейной эффективной проводимости среды и показано её аномальное поведение.

Ключевые слова: неоднородные проводящие структуры, протекание, проводимость, нелинейная проводимость.

Проводящие двумерные среды-плёнки интенсивно изучаются в связи с широким практическим применением. Двумерные системы привлекательны и с точки зрения экспериментальной реализации, так как методы современной планарной нанотехнологии позволяют создавать плёнки с заданной текстурой и содержанием компонент с необходимыми характеристиками. В данной работе рассматривается плёнка, фрагмент которой представлен на рис. 1. Проводимость тонированной ячейки обозначим σ_1 , а светлой соответственно $-\sigma_2$. Внешнее магнитное будем считать всюду однородным и направленным перпендикулярно к поверхности системы $\vec{B} = (0,0,B)$. Свойства каждой ячейки помимо проводимости σ_i характеризуется параметром Холла $\beta_i = \tau_i \omega_c$, где τ_i - среднее время свободного пробега носителей тока в i -ой ячейке между столкновениями, а $\omega = qV/mc$ - циклотронная частота. Закон Ома в двумерной

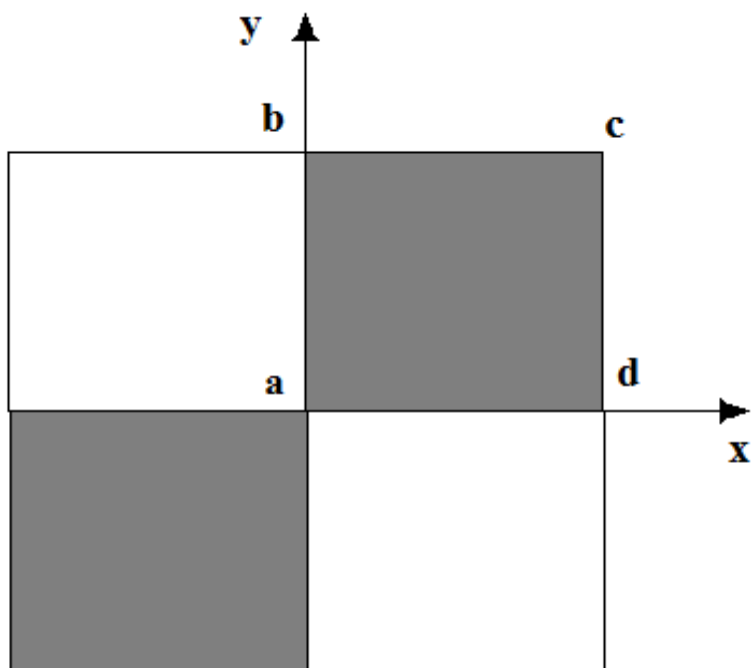


Рис. 1. Фрагмент проводящей плёнки

создавать плёнки с заданной текстурой и содержанием компонент с необходимыми характеристиками. В данной работе рассматривается плёнка, фрагмент которой представлен на рис. 1. Проводимость тонированной ячейки обозначим σ_1 , а светлой соответственно $-\sigma_2$. Внешнее магнитное будем считать всюду однородным и направленным перпендикулярно к поверхности системы $\vec{B} = (0,0,B)$. Свойства каждой ячейки помимо проводимости σ_i характеризуется параметром Холла $\beta_i = \tau_i \omega_c$, где τ_i - среднее время свободного пробега носителей тока в i -ой ячейке между столкновениями, а $\omega = qV/mc$ - циклотронная частота. Закон Ома в двумерной

системе в магнитном поле записывается в виде

$$\vec{j}_{\alpha\beta} = \sigma_{\alpha\beta} e_{\beta}, \tag{1}$$

где $\sigma_{\alpha\beta}$ - тензор второго ранга с компонентами: $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \frac{\sigma}{1 + \beta^2}$, $\sigma_{xy} = -\sigma_{yx} = \frac{\sigma\beta}{1 + \beta^2}$.

Закон можно также представить в ином виде, если ввести аналитические функции комплексного поля $e(z) = e_x - ie_y$ и комплексного тока $j(z) = j_x - ij_y$. Тогда в каждой ячейке будет справедливо соотношение

$$j(z) = \frac{\sigma}{1 + i\beta} e(z) \quad (2)$$

Как следует из структуры тензора $\sigma_{\alpha\beta}$, влияние магнитного поля приводит к анизотропии даже в однородной среде. Для неоднородной же среды закон Ома в магнитном поле имеет вид

$$J = \frac{\sigma_{eff}}{1 + i\beta_{eff}} E \quad (3)$$

где $J = \frac{1}{S} \int j ds$, $E = \frac{1}{S} \int eds$ – усредненные по площади S поверхности пленки локальные значения тока $j(z)$ и поля $e(z)$. Эффективная проводимость σ_{eff} зависит от магнитного поля [1,2]

$$\sigma_{eff} = \sigma_1 \sqrt{h} / \left[1 + (\beta_1 h - \beta_2 / h + 1)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

где $h = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \leq 1$. Параметр β_{eff} , характеризующий степень анизотропии системы в целом имеет вид [1, 2]

$$\beta_{eff} = (\beta_1 + \beta_2) / \sqrt{(h+1)^2 / h + (\beta_1 h - \beta_2 / h + 1)^2} \quad (5)$$

В целом ряде экспериментов [3-6] был обнаружен нелинейный отклик неупорядоченных пленок, находящихся в критической области, то есть в области фазового перехода металл-диэлектрик в зависимости от концентрации хорошо проводящей компоненты.

Изучим влияние магнитного поля на нелинейный отклик проводящих двумерных сред с кубической нелинейностью. С этой целью в выражении (1) добавим кубическое слагаемое в разложении плотности тока по полю

$$j_\alpha = \sigma_{\alpha\beta} e_\beta + \chi_{\alpha\beta\gamma\delta} e_\beta e_\gamma e_\delta \quad (6)$$

где $\chi_{\alpha\beta\gamma\delta}$ – локальный тензор нелинейной проводимости, который содержит симметричные и антисимметричные компоненты

$$\chi_{\alpha\beta\gamma\delta} = \chi^{(1)} \delta_{\alpha\beta} \delta_{\gamma\delta} + \chi^{(2)} (\delta_{\alpha\beta} \varepsilon_{\gamma\delta} + \varepsilon_{\alpha\beta} \delta_{\gamma\delta}) + \chi^{(3)} \varepsilon_{\alpha\beta} \varepsilon_{\gamma\delta} \quad (7)$$

где δ_{ij} – символ Кронекера, ε_{ij} – единичный антисимметричный тензор. Нетрудно показать, что для симметричной части тензора $\chi_{\alpha\beta\gamma\delta}^{eff}$ эффективной нелинейной проводимости имеет место соотношение [7],

$$\chi_{eff}^{(1)} = \frac{\langle \chi^{(1)} \bar{e}^4 \rangle}{\bar{E}^4} \quad (8)$$

Величину $\chi^{(1)}$ можно легко установить, используя приближение электронной температуры. Она определяется выражением $\chi^{(1)} = \frac{\partial \sigma(T)}{\partial T}$, где Λ – коэффициент теплопередачи от электронов в решётку. Отметим, что коррелятор четвёртой степени от электрического поля определяет также спектральную плотность $1/f$ шума [8].

Задачей данной работы является определение симметричной части нелинейной эффективной проводимости $\chi_{eff}^{(1)}$ среды, фрагмент которой представлен на рис. 1, по выражению (8). Как показано в работе [7] для этого необходимо вычислить распределение локального электрического поля в среде в линейном приближении. Такая задача была решена в работе [1].

Точное решение было получено с привлечением методов теории краевых задач аналитических функций. Приведем выражения для поля в смежных квадратах

$$\begin{aligned} e_1(z) &= (1 + i\beta_1) \{C_1 \exp[i\pi/2(1/2 - \gamma - \alpha - \delta)]X(z) + \\ &+ C_2 \exp[i\pi/2(-1/2 + \gamma - \alpha + \delta)]X^{-1}(z)\}, \\ e_2(z) &= \frac{1 + i\beta_2}{\sqrt{h}} \{C_1 \exp[i\pi/2(1/2 + \gamma + \alpha + \delta)]X(z) + \\ &+ C_2 \exp[i\pi/2(-1/2 - \gamma + \alpha + \delta)]X^{-1}(z)\}, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\operatorname{tg}\pi\alpha = (h\beta_1 - \beta_2)/(1+h)$, $\operatorname{tg}\pi\delta = (h\beta_1 - \beta_2)/(1-h)$, $X(z) = \left[\frac{\operatorname{cn}(Kz/L, k)}{\operatorname{sn}(Kz/L, k)\operatorname{dn}(Kz/L, k)} \right]^{2\gamma}$, где $\operatorname{sn}(\cdot), \operatorname{cn}(\cdot), \operatorname{dn}(\cdot)$ – эллиптические функции Якоби; K – полный эллиптический интеграл с модулем k (для квадрата $k = 1/\sqrt{2}$, $K \approx 1,8541$), L – длина стороны квадратной ячейки. Параметр γ связан с отношением проводимости ячеек h и с магнитным полем, через параметры Холла соотношением

$$\operatorname{tg}\pi\gamma = \frac{\sqrt{(1-h)^2 + (h\beta_1 - \beta_2)^2}}{2\sqrt{h}} \quad (10)$$

Постоянные C_1 и C_2 могут быть выражены через величину и направляющий угол среднего поля E .

Приступая к непосредственному вычислению $\chi_{\text{eff}}^{(1)}$ по формуле (8) мы констатируем, что, к сожалению, точного выражения для $\chi_{\text{eff}}^{(1)}$ получить не удаётся. Однако мы покажем, что существует область параметров, при которых нелинейная эффективная проводимость ведет себя критическим образом, достигая аномально больших значений. При вычислении величины $\chi_{\text{eff}}^{(1)}$, очевидно, что основной вклад в коррелятор $\langle \bar{e}^4 \rangle$ дадут области среды вблизи углов квадратных ячеек. Из вида функции $X(z)$ следует, что её асимптотика имеет степенной характер

$X(z) \propto \frac{1}{z^{2\gamma}}$. Используя её, оценим значение коррелятора $\langle |e(z)|^4 \rangle \propto \iint z^{-8\gamma} dx dy \propto \int_0^R r^{-1-8\gamma} dr$. Здесь R – размер, порядка размера ячейки структуры, то есть

L . Видно, что интеграл расходится при $\gamma \geq \gamma_c = 1/4$. Параметр γ зависит от магнитного поля, и эта зависимость определяется выражением (10). Критическое значение h , соответствующее расходимости коррелятора $\langle \bar{e}^4 \rangle$, зависит теперь от магнитного поля. Из выражения (10) при $\gamma_c = 1/4$ находим

$$h_c = \frac{(3 + \beta_1\beta_2) - \sqrt{8 + 4\beta_1\beta_2 - (\beta_1 - \beta_2)^2}}{1 + \beta_1^2} \quad (11)$$

Обсудим физический смысл полученных выражений. Если рассматриваемая периодическая среда помещена в магнитное поле, то квадратичные корреляторы поля и тока приобретают вид [2]

$$\frac{\langle |e|^2 \rangle}{\bar{E}^2} = \frac{\langle |j|^2 \rangle}{\bar{J}^2} = \frac{\sqrt{(1+h)^2 + (\beta_1 h - \beta_2)^2}}{2\sqrt{h}} \quad (12)$$

Как следует из (12), наличие магнитного поля усиливает флуктуации в неоднородной среде. В случае слабого поля $\beta \ll 1$ появляется квадратичная поправка по полю B к амплитуде флуктуаций, а в пределе сильного поля $\beta \gg 1$ – амплитуда растет пропорционально полю B . При

этом магнитное поле качественно не влияет на асимптотики эффективной линейной проводимости и квадратичных корреляторов при малых h : эффективная проводимость убывает как $\propto \sqrt{h}$, а корреляторы полей расходятся как $\propto 1/\sqrt{h}$.

Необходимо отметить, что характер формирования тока зависит от соотношения параметров материалов в смежных ячейках. Действительно, в выражениях для эффективной линейной проводимости σ_{eff} , квадратичных корреляторов токов и полей, величины h_c магнитное поле входит в комбинации $h\beta_1 - \beta_2$. В случае, если $\sigma_2\beta_1 = \sigma_1\beta_2$ магнитное поле не оказывает влияния на эффективные характеристики неоднородной среды. Последнее равенство эквивалентно тому, что коэффициенты Холла, определенные как $R_H = \beta/\sigma B$, в ячейках одинаковы.

Как показано выше, симметричная часть тензора нелинейной эффективной проводимости $\chi_{eff}^{(1)}$ и корреляторы $\langle |e|^4 \rangle_{1,2}$ расходятся при конечных значениях параметра h_c , который зависит от магнитного поля согласно (11). В слабом поле имеется квадратичный рост h_c с полем, а при сильных полях h_c приближается к единице.

Важно отметить, что для случая, когда коэффициенты Холла ячеек различны, при заданном значении $h = \sigma_2/\sigma_1$, $h > h_c$ существует такое значение магнитного поля B_c , при котором нелинейная проводимость $\chi_{eff}^{(1)}$ и корреляторы $\langle |e|^4 \rangle_{1,2}$ расходятся. Величина поля B_c определяется из выражения (10) при $\gamma_c = 1/4$

$$B_c = \frac{\sqrt{8h - (1+h)^2}}{|h\mu_1 - \mu_2|} \quad (13)$$

где μ_i - подвижность носителей тока в ячейках. Получим величину коррелятора $\langle |e|^4 \rangle$, определяющего поведение нелинейной эффективной проводимости в зависимости от магнитного поля. Разлагая параметр γ в ряд в окрестности B_c из (10) получаем $\gamma - \gamma_c = (4\pi h)^{-1} \sqrt{8h - (1+h)^2} (B - B_c)$. Это приводит к результату

$$\langle |e|^4 \rangle = \frac{A}{B_c - B}, \quad B_c - B \ll B_c \quad (14)$$

где A - константа, зависящая от внешнего поля E и от отношения проводимостей ячеек.

В заключение поясним причину усиления нелинейного отклика данной среды магнитным полем. Действие силы Лоренца на носителей тока приводит к тому, что в местах неоднородностей, то есть на границах ячеек, возникает дополнительная плотность зарядов. Вследствие этого усиливаются флуктуации поля, что приводит к росту коррелятора в выражении (8). Отметим, что благодаря изменению магнитного поля экспериментальное изучение нелинейного отклика можно осуществить на одном образце.

Библиографический список

1. **Емец, Ю.П.** Электрические характеристики композиционных материалов с регулярной структурой / Ю.П. Емец. - Киев: Наукова думка, 1986.
2. **Дыхне, А.М.** Аномальное сопротивление плазмы в сильном магнитном поле / А.М. Дыхне // Журнал экспериментальной и теоретической физики. - 1970. - Т. 59. - С. 641-647.
3. **Yagil, Y.** Electrical breakdown measurements of semicontinuous metal films / Y. Yagil, G. Deutcher, D.J. Bergman // Phys. Rev. Lett. - 1992. - Vol. 69. - P. 1423-1426.
4. **Yagil, Y.** Third-harmonic generation in semicontinuous metal films / Y. Yagil, G. Deutcher // Phys. Rev. - 1992. - Vol. B46. - P. 16115-16121.

5. **Gefen, Y.** Nonlinear behavior near the percolation metal-insulator transition / Y. Gefen, W.H. Shih, R.B. Laibowitz, J.M. Viggiano // Phys. Rev. Lett. – 1986. – Vol. 57. – P. 3097-3100.
6. **Chakrabarty, R.K.** Nonlinear $I - V$ characteristics near the percolation threshold / R.K. Chakrabarty, K.K. Bardhan, A. Basu // Phys. Rev. – 1991. – Vol. B44. – P. 6773-6779.
7. **Stroud D., Hui P.M.** Nonlinear susceptibilities of granular matter / D. Stroud, P.M. Hui // Phys.Rev. – 1988. – Vol. B37. – P. 8719-8724.
8. **Жигальский, Г.П.** Шум вида $1/f$ и нелинейные эффекты в тонких металлических пленках / Г.П. Жигальский // Успехи физических наук. – 1997. – Т. 167. No.6. – С. 623-648.

Дата поступления
в редакцию: 16.10.2018

E.G. Degtyarev, G.M. Sokolova, S.V. Khorkov, A.N. Yashina, N.F. Yashina

THE INFLUENCE OF MAGNETIC FIELD ON NONLINEAR PROPERTIES OF ORDERED TWO-DIMENSIONAL CONDUCTING MEDIUM

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alekseev

Subject: Conducting two-dimensional media-films are intensively studied in connection with a wide practical application.

Methodology: Two-dimensional systems are also attractive from the point of view of experimental implementation, since the methods of modern planar nanotechnology make it possible to create films with a given texture and content of components with the necessary characteristics.

Results: The influence of the magnetic field on the nonlinear effective characteristics of the conducting medium with periodic inhomogeneities is investigated. The symmetric part of the tensor of nonlinear effective conductivity of the medium is investigated and its anomalous behavior is shown.

Key words: inhomogeneous conducting structures, percolation, conductivity, nonlinear conductivity.

УДК 532.5

С.М. Дмитриев¹, О.Л. Крутякова², А.С. Козелков^{1,2}, А.А. Куркин¹,
В.В. Курулин², О.В. Денисова², Д.А. Уткин²

МИНИМАЛЬНЫЙ БАЗИС ЗАДАЧ ВАЛИДАЦИИ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЙ С НИЗКИМИ ЧИСЛАМИ ПРАНДТЛЯ

Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева¹,
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики –
Российский федеральный ядерный центр, г. Саров²

Процесс валидации, определяет степень точности, с которой модель отображает объективную реальность с точки зрения предполагаемого использования и является важным этапом на пути научно-промышленного внедрения разрабатываемых программ. В настоящей работе представлен минимальный базис задач валидации методов моделирования течений жидкометаллических теплоносителей, характеризующиеся низкими числами Прандтля. С точки зрения численного моделирования течений с низкими числами Прандтля основной проблемой является турбулентность. Наиболее распространенные RANS модели турбулентности основаны на идее использования турбулентной вязкости и турбулентной теплопроводности, причем турбулентная теплопроводность напрямую связывается с турбулентной вязкостью с помощью фиксированного значения турбулентного числа Прандтля. Базис задач включает внутренние течения в трубах и каналах различной формы, смешение разнотемпературных потоков, а также течение в пучке стрелы. Для каждой задачи приводится подробное описание постановки и имеющиеся для нее опорные данные. Представлены результаты численного моделирования рассматриваемых задач по пакету программ ЛОГОС в рамках RANS моделей турбулентности с применением корреляций для определения турбулентного числа Прандтля и уточнения полученного решения для задач с высокой молекулярной теплопроводностью.

Ключевые слова: численное моделирование, турбулентность, низкие числа Прандтля, турбулентный теплообмен, теплообмен в жидких металлах.

Введение

Процесс валидации выявляет границы применимости физико-математических моделей и численных схем, которые позволяют моделировать физическое явление, протекающее в естественных условиях до проведения численного эксперимента. Достоверность физико-математической модели, предназначенной для описания того или иного процесса, можно определить, оценив уровень, вносимый ею погрешности и неопределенности по сравнению с натурным экспериментом или расчетами по прямому численному моделированию. Степень точности, требуемая от результатов моделирования, зависит от предполагаемого их использования. Как правило, к каждой расчетной величине, будь то интегральная или абсолютная характеристика, предъявляются свои требования. Изложение основных принципов верификации и валидации методов CFD-моделирования представлены в [1, 2]. Процедура валидации, состоящая из стадии оценки сходимости итераций, стадии проверки решения на непротиворечивость, стадии сравнения с экспериментом, а также содержащая уровни классов задач представлена в [1, 3].

Одним из сложных и интересных классов задач вычислительной гидродинамики является моделирование турбулентного течения жидкометаллических теплоносителей (ЖМТ) [4, 5] с низкими числами Прандтля. Такие течения характеризуются зависимостью вязкости и теплопроводности от локальных свойств потока, что в существенной степени осложняет численное моделирование. Данный класс течений получил широкое применение в атомной энергетике. В настоящее время в России и за рубежом ведутся широкие исследования в области

проектирования реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями [6]. Для увеличения срока службы и повышения безопасности действующих и проектируемых реакторных установок требуется детальное исследование происходящих в них процессов тепломассопереноса. Экспериментальные исследования такого класса течений крайне затруднительны, в силу своей высокочувствительности, поэтому безальтернативным методом является применение численного моделирования [6, 7].

С точки зрения численного моделирования течений с низкими числами Прандтля основной особенностью является учет переноса тепла, как за счет конвективного перемешивания потока, так и за счет молекулярной теплопроводности самого теплоносителя. Интенсивное изменение температуры жидкости за счет большой теплопроводности может быть на том же уровне что и изменение температуры вследствие турбулентного перемешивания [8]. Этот факт определяет достаточно существенную долю тепла, переносимого за счет молекулярной теплопроводности, и обеспечивает лучшие теплоотводящие свойства жидких металлов. Вследствие чего встает вопрос правильного разрешения турбулентных характеристик [8-11].

Целью данной работы является создание валидационного базиса задач течения ЖМТ. Для относительной полноты валидационный базис должен включать задачи течения в каналах различной формы, имеющие надежные экспериментальные, либо численные данные. Существует достаточно много работ по задаче о течении в канале, ограниченном двумя плоскими поверхностями [12, 13]. В [12] представлены численные данные, полученные путем прямого численного моделирования о распределении безразмерной температуры по высоте канала. На данной задаче показано влияние применения корреляций для турбулентного числа Прандтля. Задачи о неравномерном охлаждении и нагревании труб с различного вида ЖМТ, имеющие экспериментальные данные или вычисленные аналитически, носят высокий прикладной характер [14, 15] и в достаточной степени анализируют турбулентный теплообмен в жидкометаллической среде. Представлены результаты численного моделирования эксперимента TEFLU [16], где рассматривается смешение разнотемпературных потоков натрия при различных режимах течения. На задаче перемешивания трех струй натриевого теплоносителя определяются нестационарные характеристики потока, результаты сравниваются с экспериментальными данными [17, 18]. Характерной особенностью атомных энергетических установок является теплообмен в пучках труб, в расчете эксперимента TEGENA рассматривается распределение температуры вблизи обогреваемых труб, обтекаемых потоком натриевого теплоносителя [19, 20]. Учет закрученности потока был рассмотрен в задаче о гидродинамике и теплообмене в потоке ртутного теплоносителя в кольцевом канале, имеющей экспериментальные данные [21, 22].

Для решения задач используется ЛОГОС – отечественный пакет программ инженерного анализа, предназначенный для решения сопряженных трехмерных задач конвективного тепломассопереноса, аэродинамики, гидродинамики и прочности на высокопараллельных ЭВМ. Он успешно прошел верификацию и показал достаточно хорошие результаты на серии различных гидродинамических задач [8, 9], включая распространение гравитационных волн на свободной поверхности (цунами) [28, 29] и промышленных задач [26]. Ускорение вычислений для проведения расчетов на высокопроизводительных супер-ЭВМ осуществляется многосеточным методом [27]. Для моделирования турбулентности используется модель турбулентности SST [24], а также модель турбулентности EARSM [9, 25], применяемая в случае анизотропных течений и течений вблизи двугранных углов. Для моделирования турбулентного теплообмена используется фиксированное значение турбулентного числа Прандтля. Такой подход основан на идее об аналогичности процесса переноса импульса и переноса тепла [4, 5], что вполне применимо для сред с числом Прандтля, близким к единице, но может приводить к некорректному результату для сред с низкими числами Прандтля. Значение турбулентного числа Прандтля выбиралось несколькими способами для задачи о течении в канале, где и показано его влияние. Было выбрано стандартное значение $Pr_t = 0.9$, а также турбулент-

ное число Прандтля, вычисленное с использованием существующих эмпирических корреляций Рейнольдса [10]. Результаты по остальным задачам базиса представлены с использованием корреляции Рейнольдса.

Базис задач валидации для течений жидкометаллических теплоносителей

Ключевым моментом моделирования ЖМТ является качественная и количественная оценка термодинамических параметров потока, а также учет физических свойств материалов, которые существенным образом зависят от температуры. Минимальный валидационный базис, применительно к течениям такого класса, содержит задачи, на основании решения которых описанные характеристики подтверждены эмпирически, имеют аналитическое или точное решение. Здесь следует подчеркнуть, что даже самый полный базис задач не претендует на окончательный, и на чем большем количестве задач будет проверен расчетный модуль, тем с большей уверенностью можно утверждать, что количество ошибок в нем сведено к минимуму. Для оценки физических характеристик предлагается использовать задачи валидации, представленные в табл. 1, которые примем за «минимальный» базис.

Описание задач базиса валидации

В данном разделе приводится детальное описание задач базиса валидации, представленных в табл. 1. Также здесь приводятся результаты валидации пакета программ ЛОГОС для данного класса задач. Полученное численное решение сравнивается с результатами экспериментальных и теоретических исследований.

Таблица 1

Таблица задач валидационного базиса

№	Название задачи	Оцениваемые параметры	Доступные данные
1	Развитое турбулентное течение с теплообменом в канале, ограниченном обогреваемыми параллельными плоскими пластинами	Распределение безразмерной скорости и температуры	Прямое численное моделирование [12, 13]
2	Течение ртути в трубе с неравномерным подогревом	Значение температуры в контрольных точках	Эксперимент [14];
3	Турбулентное течение натриевого теплоносителя в трубе с охлаждением	Значение температуры на выходе из трубы	Аналитическое решение [15]
4	Перемешивание разнотемпературных потоков натриевого теплоносителя на стенде TEFLU	Распределение скорости и температуры вдоль оси симметрии	Эксперимент [16];
5	Перемешивание трех разнотемпературных струй натриевого теплоносителя TripleJet	Среднее значение температуры в контрольных точках	Эксперимент [17]; Результаты численного моделирования [18]
6	Гидродинамика и теплообмен в потоке натриевого теплоносителя в пучке обогреваемых стержней (эксперимент TEGENA)	Распределение температуры между третьим и четвертым стержнями	Эксперимент [19, 20];
7	Гидродинамика и теплообмен в потоке ртутного теплоносителя в закрученном кольцевом канале	Распределение скорости и температуры в сечении зазора	Эксперимент [21, 22]

1. Развитое турбулентное течение с теплообменом в канале, ограниченном обогреваемыми параллельными плоскими пластинами

Задача о развитом турбулентном течении вязкой несжимаемой жидкости в канале, образованном двумя бесконечными параллельными плоскими пластинами, дает фундаментальное представление о природе течения и имеет подробные данные DNS-моделирования. Пластины обогреваются равномерным тепловым потоком и находятся на расстоянии h друг от друга. Число Рейнольдса, рассчитанное по средней динамической скорости u_τ и полувысоте канала $\delta = H/2$, составляет 395 и 640, что соответствует условиям DNS-расчетов [12, 13].

Расчетная область представляет собой прямоугольник толщиной в одну ячейку, высотой $h = 2$ м, длиной $L = 10$ м. Поскольку моделируется бесконечно длинный канал, на левой и правой границах задаются циклические граничные условия, со смещением на длину канала L . На боковых границах области задаются условия симметрии. Верхняя и нижняя границы расчетной области моделируются граничным условием стенки без проскальзывания. Чтобы получить возможность использовать периодические граничные условия при условии, что пластины обогреваются равномерным тепловым потоком q_w , выполняется переход к модифицированной температуре θ :

$$T = x \frac{\partial T_w}{\partial x} - \theta,$$

где T_w – температура стенки. Такая модификация позволяет обеспечить компенсацию роста температуры в направлении течения за счет равномерного теплового потока q_w продольным градиентом температуры стенки:

$$\frac{\partial T_w}{\partial x} = \frac{q_w}{\rho C_p U},$$

здесь U – средняя скорость в направлении течения.

Выполненные преобразования приводят к необходимости решения уравнения энергии относительно θ с источником энергии вида:

$$Q = \frac{2\rho C_p}{\text{Re}_\tau \text{Pr}}.$$

На стенках канала задается граничное условие постоянная температура $\theta = 0$.

Для того, чтобы обеспечить движение жидкости, в уравнение переноса продольной компоненты импульса вводится источник импульса, равный градиенту давления при установившемся течении в канале:

$$I_x = \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{2\rho u_\tau}{\delta}.$$

Теплофизические свойства жидкости заданы следующими: $\rho = 1$ кг/м³ – плотность, $C_p = 200$ Дж/(кг К) – удельная теплоёмкость, $\lambda = 40$ Вт/(м·К) коэффициент теплопроводности, $\mu = 0.005$ кг/(м·с) – коэффициент динамической вязкости, что обеспечивает значение числа $\text{Pr} = 0.025$. Данное значение числа Прандтля по порядку величины может соответствовать, например, сплаву свинец-висмут при температуре $\sim 250^\circ\text{C}$. В табл. 2 представлены значения источников импульса и энергии, которые задавались в тестовых расчетах для $\text{Re}_\tau = 395$ и $\text{Re}_\tau = 640$. Расчет выполнен на сетке, содержащей $64 \times 10 = 640$ (число ячеек по высоте и длине канала, соответственно). Сетки построены со сгущением к стенкам, размер ячеек от стенок изменялся по геометрической прогрессии с коэффициентом роста 1.15. Толщина пристеночной ячейки обеспечивает значение безразмерного расстояния до стенки $y^+ < 1$.

Таблица 2

Источники импульса и энергии

Re_τ	Источник импульса, I_x , Па/м	Источник энергии, Q , Вт/м ³
395	3,95	40,5
640	10,24	25

На рис. 1 представлены профили безразмерной температуры $\theta^+ = \frac{T_w - T}{T_\tau}$, где

$T_\tau = \frac{q_w}{\rho C_p u_\tau}$ – температура трения, полученные из расчетов по пакету программ ЛОГОС для

$Re_\tau = 395$ и $Re_\tau = 640$ с турбулентным числом Прандтля, рассчитанным по корреляции Рейнольдса:

$$Pr_t = \frac{1 + 100Pe^{-0.5}}{1 + 120Re^{-0.5}}, \quad (1)$$

которое составило $Pr_t = 3.145$ и стандартного его значения $Pr_t = 0.9$, в сравнении с данными DNS.

Из анализа представленных профилей видно, что стандартный подход с $Pr_t = 0.9$ неудовлетворительно предсказывает профиль температуры жидкости с гидродинамическим числом Прандтля $Pr = 0.025$. Безразмерная температура по высоте канала здесь существенно занижена, относительная погрешность по ее максимуму составила более 26 % для случая $Re_\tau = 395$ и 27% для случая $Re_\tau = 640$. При использовании корреляций Рейнольдса для режима течения с $Re_\tau = 395$, достигнуто хорошее согласие, погрешность около 1%, в сравнении с результатами DNS. Для режима $Re_\tau = 640$, профиль безразмерной температуры лежит чуть выше, несмотря на это, удалось снизить относительную погрешность, и она составила 7%.

2. Течение ртути в трубе с неравномерным подогревом

Задача о течении ртути в трубе с неравномерным подогревом является базовой для верификации CFD-кодов применительно к проблеме турбулентного теплообмена в жидкометаллической среде [14].

Расчетной областью является отрезок трубы длиной $1,75$ м ($92.1d$, где $d = 19$ мм – диаметр канала), при этом $50d$ – участок предварительной гидродинамической стабилизации, на котором обогрев отсутствует. Остальное расстояние $42,1d$ – обогреваемый постоянным тепловым потоком участок, на котором происходит термическая стабилизация уже при развитом турбулентном течении (рис. 2).

Рассматривается осесимметричная задача, модель представляет собой сектор с углом поворота 5° , на боковых стенках задано условие симметрии. Для расчета использовалась сеточная модель, с количеством ячеек $N_r \times N_x = 160 \times 400$ (количество ячеек в радиальном и осевом направлениях, соответственно) Размер первой пристеночной ячейки обеспечивал значение $y^+ < 1$ на участке стабилизированного течения.

Теплофизические свойства ртути заданы следующими: $\rho = 13491$ кг/м³ – плотность, $C_p = 139.07$ Дж/(кг К) – удельная теплоёмкость, $\lambda = 8.234$ Вт/(м·К) коэффициент теплопроводности, $\mu = 1.433 \cdot 10^{-3}$ Па. Режим течения соответствует числу $Pr = 0.0025$.

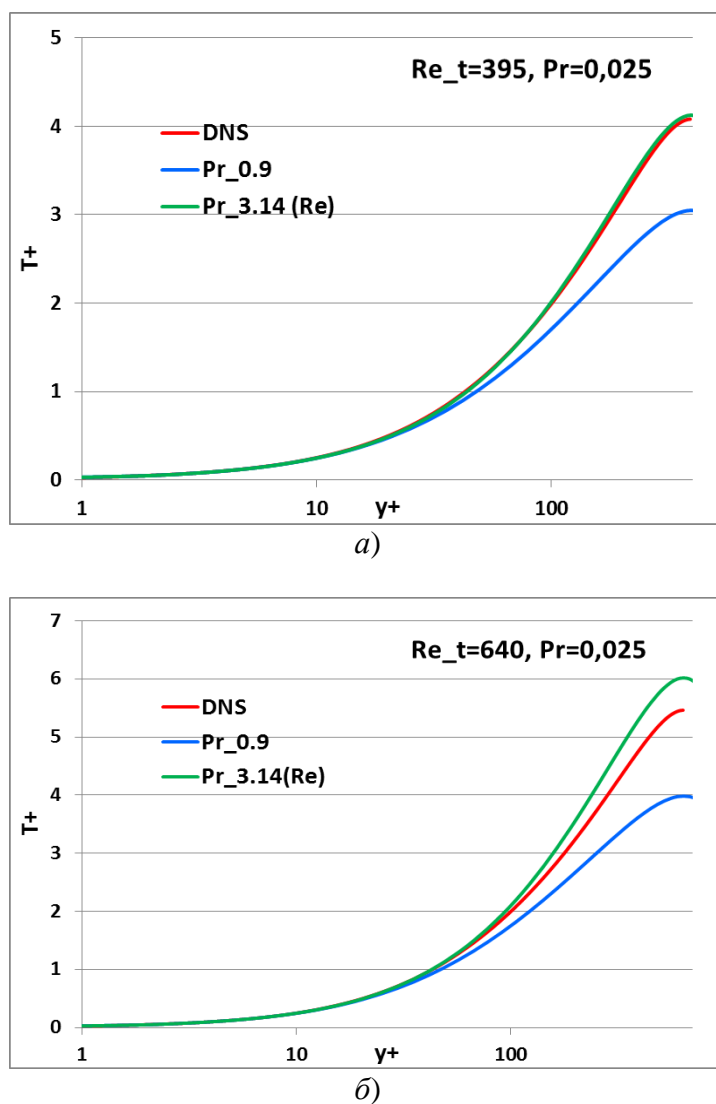


Рис. 1. Распределение безразмерной температуры для $Re = 395$ (а) и $Re = 640$ (б)

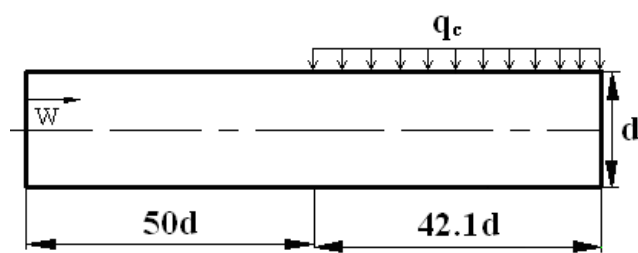


Рис. 2. Геометрия расчетной области

Во время эксперимента измерения в каждом из сечений проводились в различные моменты времени (ввиду необходимости перемещения термозонда), режимные параметры (температура, число Рейнольдса Re и тепловой поток q) соответствовали экспериментальным данным для различных сечений. На стенке задавались условия прилипания для скорости. Для температуры на обогреваемой части трубы установлено условие постоянной плотности теплового потока, остальная часть считалась адиабатической. Граничные условия на входе, а также величина плотности теплового потока заданы в соответствии с табл. 3.

Таблица 3

Параметры потока

x/d	2,0	9,0	15,0	35,0
Re	51440	49010	49180	49580
V , м/с	0,29781	0,27811	0,2782	0,2772
$T_{вх}$, К	306,46	306,05	305,52	306,22
Q , Вт/м ²	28700	28800	29500	28100

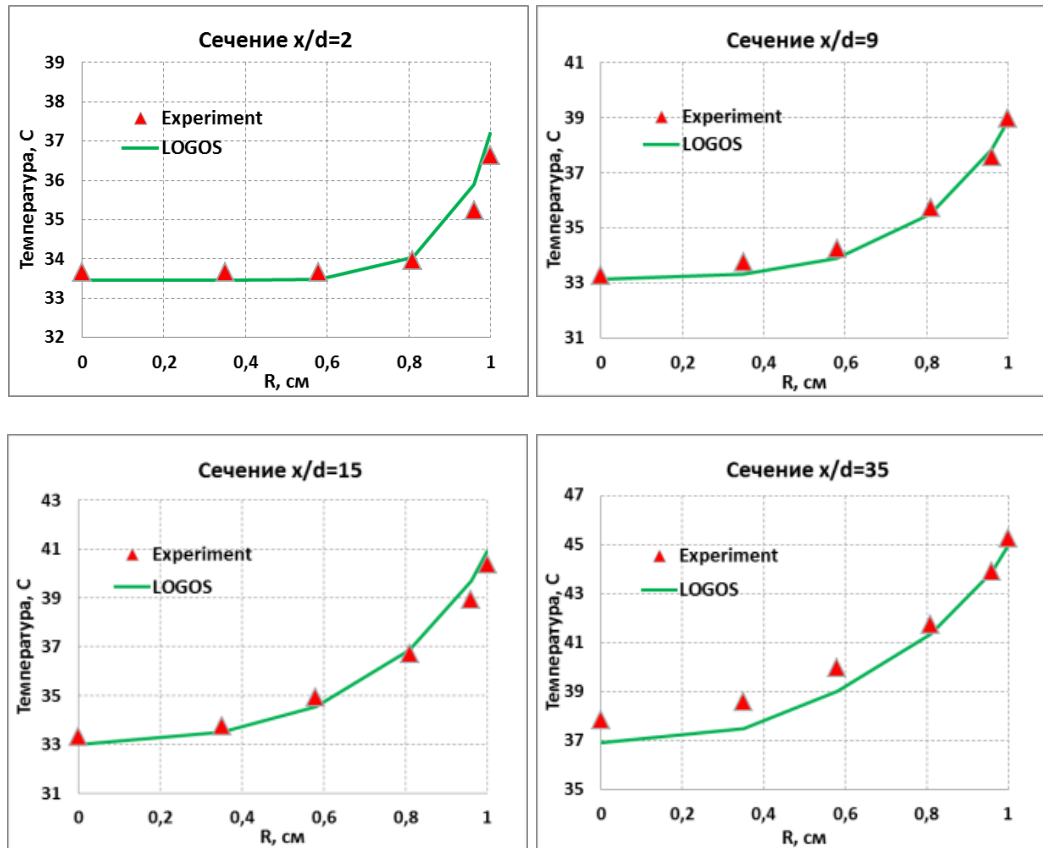


Рис. 3. Распределение температур по радиусу

Расчетная область представляет собой простую трубу постоянного сечения, поэтому для моделирования турбулентности была выбрана модель линейной вихревой вязкости SST. Турбулентное число Прандтля вычислялось с помощью корреляций Рейнольдса (1) и составило $Pr_t = 2,066$ для всех расчетных случаев. На рис. 3 приведено сопоставление данных расчета с экспериментом для четырех контрольных сечений с относительными координатами: $x/d = 2$, $x = 0,988$ м; $x/d = 9$, $x = 1,121$ м; $x/d = 15$, $x = 1,235$ м; $x/d = 35$, $x = 1,615$ м. Наибольшая разница расчетной и экспериментальной температуры видна для первых двух точек сечения $x/d = 35$, расчетные значения несколько занижены относительно экспериментальных. Максимальная относительная погрешность составила 3 %. В целом, результаты численного моделирования течения ртути в трубе с заданным потоком тепла на части поверхности в высокой степени согласуются с экспериментальными данными.

3. Турбулентное течение натриевого теплоносителя в трубе с охлаждением

Рассматривается развитое турбулентное течение натриевого теплоносителя в круглой трубе, постановка задачи и аналитическое решение описаны в [15]. Снаружи труба омывается средой с бесконечно большим расходом и бесконечно большим коэффициентом теплоотдачи.

В этом случае температуру наружной стенки трубы можно принять постоянной. В трубу подается теплоноситель с температурой T_{in} и расходом G (рис. 4). Расчетной областью является отрезок трубы длиной 2,5 м ($50d$, где $d = 0,05$ м – диаметр канала), при этом $40d$ – участок предварительной гидродинамической стабилизации, на котором обогрев отсутствует. Остальное расстояние – $10d$ – охлаждаемый участок, на котором происходит термическая стабилизация уже при развитом турбулентном течении.

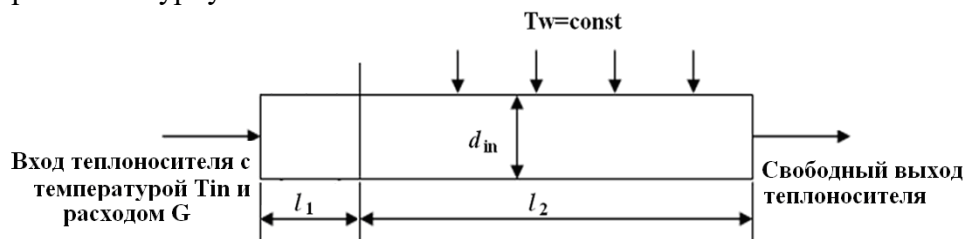


Рис. 4. Геометрия расчетной области

Расчетная модель представляет собой сектор с углом поворота 5° , на боковых стенках задано условие симметрии. Для расчета использовалась сеточная модель с количеством ячеек 32000, $N_r \times N_x = 80 \times 400$ (количество ячеек в радиальном и осевом направлениях, соответственно) Размер первой пристеночной ячейки обеспечивал значение $y^+ < 1$ на участке стабилизированного течения.

Теплофизические свойства натрия заданы следующими: $\rho = 820 \text{ кг/м}^3$ – плотность, $C_p = 1258 \text{ Дж/(кг К)}$ – удельная теплоёмкость, $\lambda = 67.3 \text{ Вт(м·К)}$ коэффициент теплопроводности, $\mu = 2,2 \cdot 10^{-4} \text{ Па}$ – коэффициент динамической вязкости, число Прандтля $Pr = 0,0041$.

Граничные условия: на входе задана среднемассовая скорость и температура, в соответствии с табл. 4. На первом участке внешней поверхности трубы задается адиабатическое условие, это сделано для получения на входе во вторую часть стабилизированного распределения скорости потока. На охлаждаемой части трубы задается граничное условие первого рода $T = 423 \text{ К}$. Рассматривается осесимметричная задача, модель представляет собой сектор с углом поворота 5 градусов, на боковых стенках задано условие симметрии.

Таблица 4

Режима расчета

№	Расход теплоносителя G^* , кг/с	Скорость на входе U , м/с	Pr_t
1	0,63	0,3913	4,7
2	1,26	0,7826	3,9
3	2,1	1,3043	3,4
4	3,151	1,9571	3
5	5,253	3,2626	2,6
6	7,353	4,5669	2,4
7	10,505	6,5246	2,2

Использовалась модель турбулентности: SST, Турбулентное число Прандтля, используемое в расчете, рассчитано с помощью корреляции Рейнольдса (1), приведено в табл. 4 в соответствии с режимом течения.

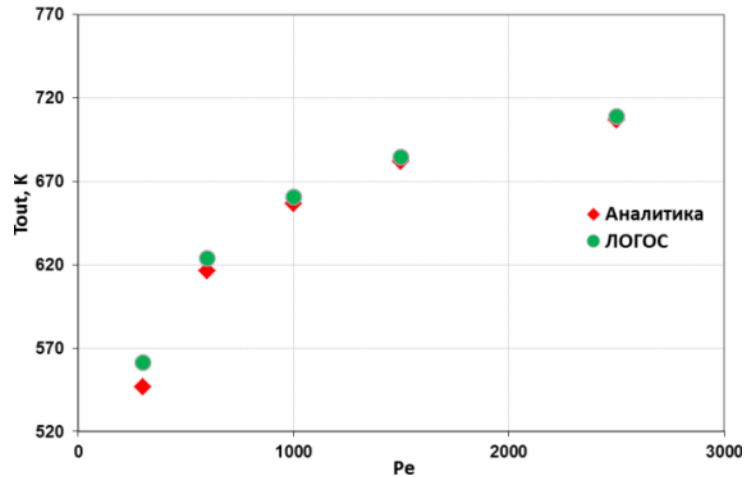


Рис. 4. Зависимость осредненной температуры на выходе от числа Пекле

Сравниваются расчетные значения температуры, усредненные по расходу на выходе из трубы с аналитическими данными (рис. 4). Результаты согласуются с аналитическим решением. Относительная погрешность уменьшается с увеличением числа Рейнольдса. Для первого расчетного случая она составила 2,7 %.

4. Перемешивание разнотемпературных потоков натриевого теплоносителя на стенде TEFLU

Стенд TEFLU [16] предназначен для моделирования процессов перемешивания разнотемпературных потоков натриевого теплоносителя. Натриевая экспериментальная установка (рис. 5) состоит из вертикальной трубы внутренним диаметром 110 мм и подвижной в продольном направлении решетки. Центральная труба является двустенной с разреженным (вакуум) кольцевым зазором. В центральное отверстие решетки подается натрий с заданным расходом и температурой. Основной поток циркулирующего в трубе натрия, проходя через решетку, смешивается со струей натрия, поступающего из центрального отверстия. Изменяя расход и температуру струй натрия, добиваются различных режимов течения.

Геометрическая модель представляет собой сектор трубы с углом 5° . Длина расчетной модели 400 мм, радиус 55 мм. Построена сетка с количеством ячеек 3200 (80×400 – количество ячеек в радиальном и осевом направлениях соответственно) с коэффициентом роста 1,15, для обеспечения требования $y^+ < 1$, с измельчением к центру трубы и ко входу. Теплофизические свойства натрия заданы зависящими от температуры [16].

Задача решается в режимах: вынужденная конвекция, переходный режим, свободная конвекция. Граничные условия: на входе задана среднемассовая скорость и температура для струи и для общего потока (табл. 5), на боковых стенках задано условие симметрии, на внешней поверхности трубы задается адиабатическое условие, стенка с прилипанием. На выходе градиенты всех величин предполагаются равными нулю. Использовалась модель турбулентности: SST, Турбулентное число Прандтля, используемое в расчете, рассчитано с помощью корреляции Рейнольдса, приведено в табл. 5 в соответствии с режимом течения, вычислено согласно (1). Сравниваются расчетные значения температуры и скорости по осевой линии трубы. На рис. 6, 7 представлены распределение скорости и температуры по оси симметрии для трех режимов течения. Расчетные профили температуры совпадают с экспериментальными значениями с высокой точностью. В распределении скорости есть отличия (в случае вынужденной конвекции), где ее разница между горячей и холодной струей максимальны, расчетные профили лежат ниже экспериментальных, погрешность составила 19%. Для переходного режима и режима свободной конвекции отличия менее заметны. Максимум относительной погрешности для распределения температуры составил 2%.

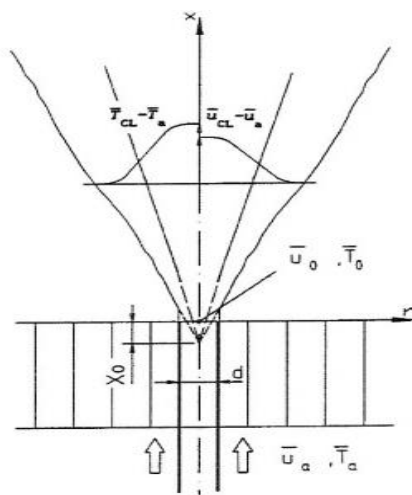


Рис. 5. Конструкция стенда TEFLU

Таблица 5

Параметры потока

Параметры потока (экспериментальный режим)	Вынужденная конвекция (forced)	Переходный режим (buoyant)	Свободная конвекция (plume)
Средняя скорость основного потока \bar{U}_α , м/с	0,05	0,1	0,1
Средняя температура основного потока \bar{T}_α , К	573	573	573
Разность скоростей между горячей и холодной струями, м/с	0,5	0,33	0,17
Разность температур между горячей и холодной струями, °С	30	25	75
Общий расход основного потока, кг/с	0,436	0,848	0,842
Турбулентное число Прандтля	6,5	6,9	7,6

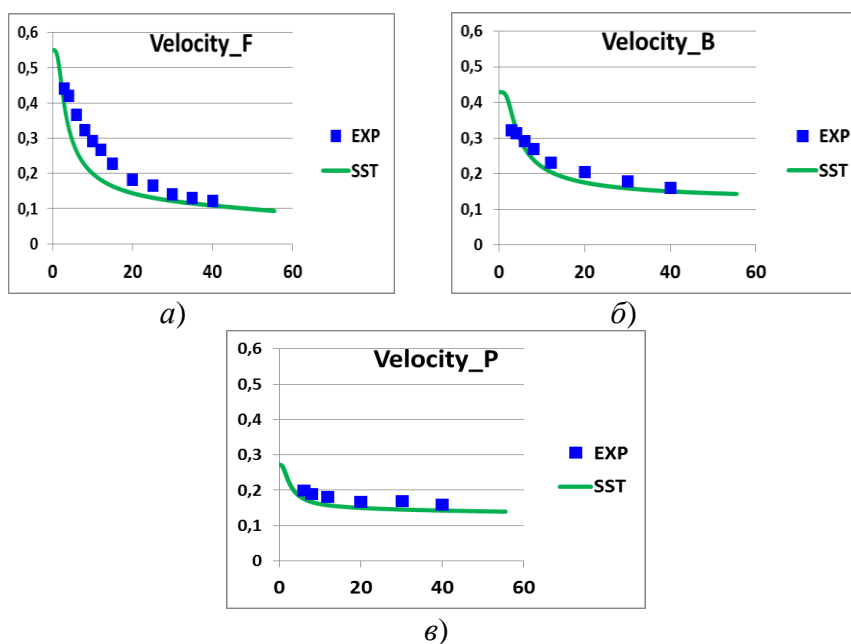


Рис. 6. Распределение скорости на оси трубы вынужденная конвекция (а), переходной режим (б) и свободная конвекция (в)

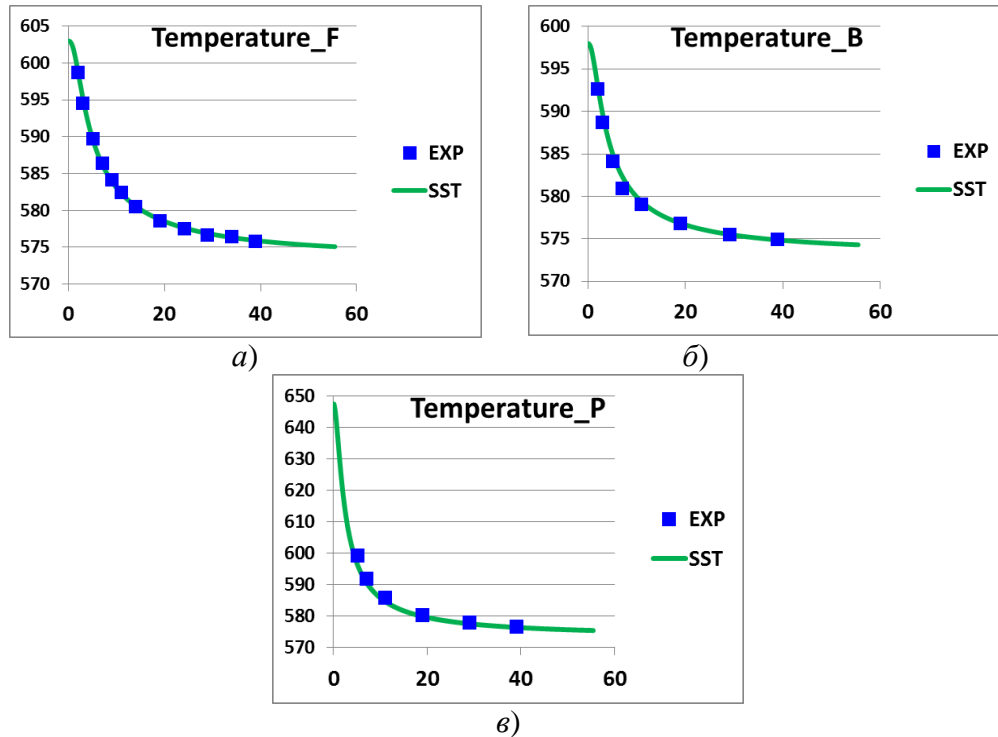


Рис. 7. Распределение температуры на оси трубы вынужденная конвекция (а), переходной режим (б) и свободная конвекция (в)

5. Перемешивание трех разнотемпературных струй натриевого теплоносителя

Задача моделирует проведение эксперимента смешения трех разнотемпературных струй натриевого теплоносителя [17, 18]. В ходе экспериментального исследования установлен турбулентный характер течения, определена амплитуда и частота температурных колебаний, определены средние значения нормированной температуры в контрольных точках.

Через три прямоугольных параллельных отверстия толщиной 20 мм и длиной 180 мм проходят разнотемпературные потоки натрия. Входные отверстия и область смешения потоков заключены между пластинами из нержавеющей стали толщиной 12 мм. На рис. 8 представлена геометрическая модель расчетной области, которая соответствует упрощенной конфигурации выхода из активной зоны реактора. Моделировалась симметричная половина области, ее высота составляла 400 мм.

Для расчета была построена неструктурированная сетка из усеченных шестигранников с характерным размером ячеек в области течения 1,2 мм, толщиной первого пристеночного слоя 0,01 мм и коэффициентом роста 1,25. Как выяснилось, сеточная модель очень сильно влияет как на характер колебаний, так и на среднее значение температуры в исследуемых точках. Известно, что свободно-струйные течения достаточно сложны и особую роль при их моделировании играет высокое сеточное разрешение вблизи входных отверстий. В данном случае были поставлены дополнительные блоки измельчения по направлению движения и смешения струй и в области пластины, характерный размер ячеек в этой области составил 0,3 мм, общее количество ячеек ~ 9.3 млн (рис. 8а). Решается задача сопряженного теплообмена, теплофизические свойства натрия заданы таблично [16], пластина, используемая в эксперименте, выполнена из нержавеющей стали, маркировкой JISSUS316, плотность $\rho = 8000$ (кг/м³), температуропроводность $\lambda = 15$ (Вт·м/К), теплоемкость $C_p = 500$ Дж/(кг·К).

Граничные условия: на входах задана среднemasсовая скорость и температура, в центре холодная струя (V_x, T_x), по бокам – горячие (V_z, T_z), табл. 6. На боковой границе установлено условие симметрии. На выходе градиенты всех величин предполагаются равными нулю.

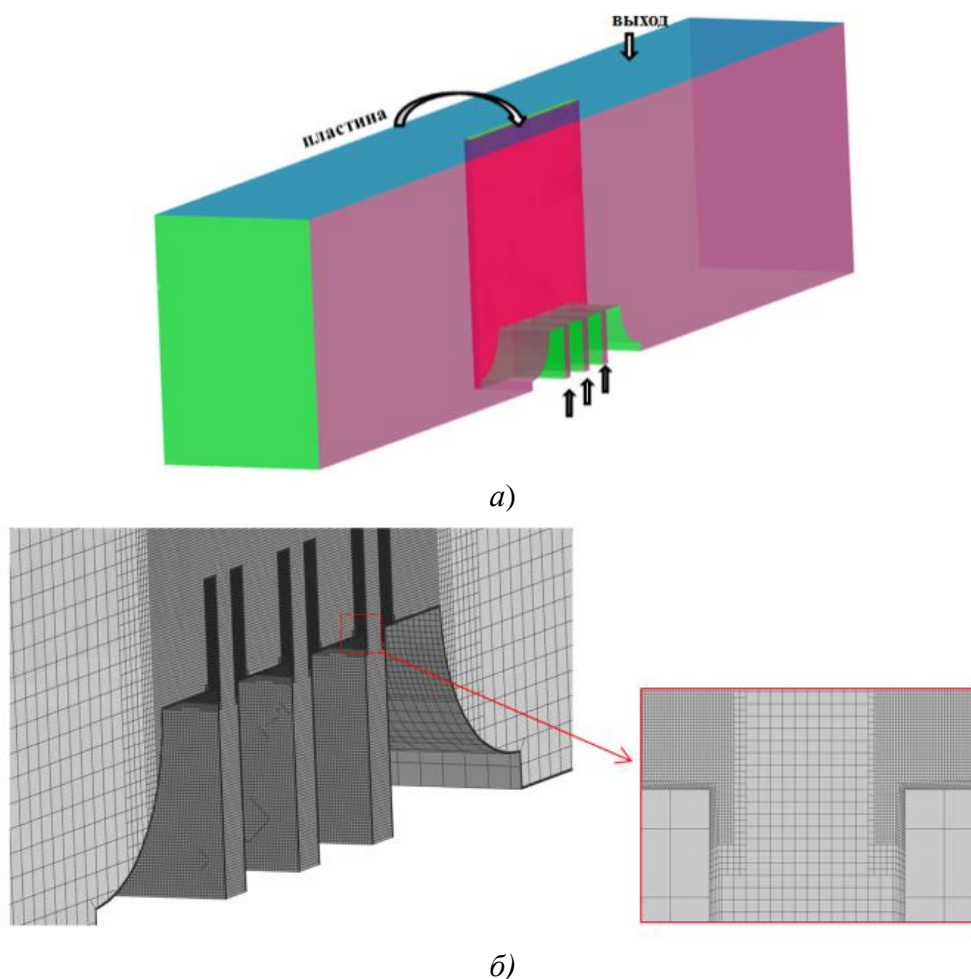


Рис. 8. Геометрия расчетной области (а) и фрагмент сеточной модели (б)

Таблица 6

Скорость и температура потока

Параметры горячего натрия		Параметры холодного натрия		ΔT, С
V _г , м/с	T _г , С	V _х , м/с	T _х , С	
0,51	347,7	0,51	304,5	43,2

Необходимо отметить, что данные о фоновой температуре отсутствуют, ее начальное значение установлено средним между температурой холодного и горячего потоков для всех расчетных вариантов. Во всех расчетах учитывалась естественно-конвективная составляющая течения, сила тяжести была направлена в противоположную сторону к направлению течений струй. Процесс перемешивания разнотемпературных струй является нестационарным. Расчет проводился с шагом по времени $\Delta t = 0.005$ с, что обеспечивало значение числа Куранта, равное 1. Для расчетной области характерно наличие двугранных углов в области истечения струй, поэтому для моделирования турбулентности была выбрана алгебраическая модель напряжений Рейнольдса EARSM. Турбулентное число Прандтля вычислялось с помощью корреляций Рейнольдса (1) и составило $Pr_t = 5.4$.

Исследуются временные зависимости температуры, а также проводится сравнение средней температуры в контрольных точках (КТ). Контрольная точка 1 располагается в центре расчетной области ($x = -15$ мм, $y = 90$ мм, $z = 100$ мм), КТ2 находится вблизи стальной пластины ($x = -15$ мм, $y = 0.5$ мм, $z = 100$ мм), ось z совпадает с плоскостью выхода струй из направляющих каналов. Сравнение проводится по величине безразмерной температуры, которая определяется по формуле из [1]:

$$T^* = \frac{T - T_x}{\Delta T}, \text{ где } \Delta T = T_z - T_x.$$

На рис. 9 представлены временные зависимости безразмерной температуры в контрольных точках в сравнении с экспериментальными колебаниями температуры. Как видно из рисунка, максимум амплитуды колебаний совпадает с экспериментальными значениями как для КТ1, так и для КТ2.

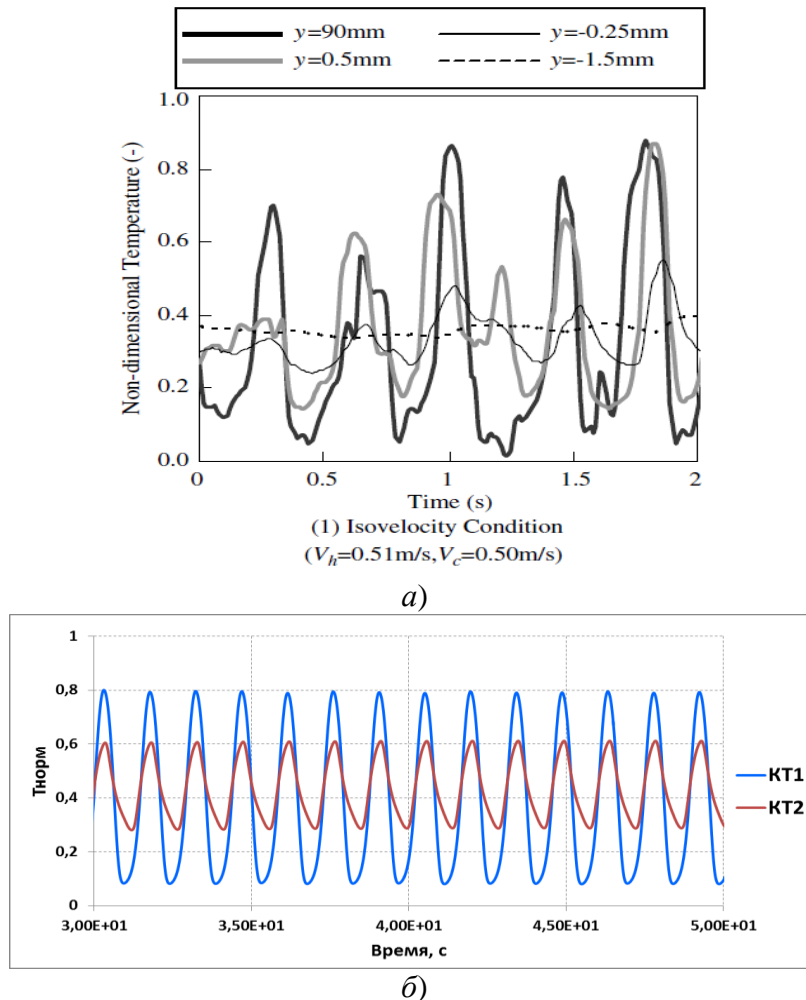


Рис. 9. Колебания температуры в контрольных точках, эксперимент (а) расчет (б)

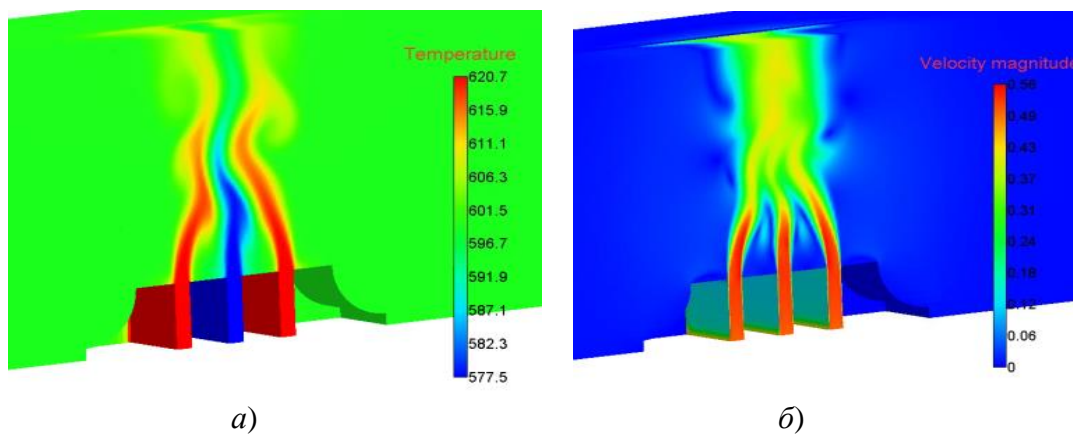


Рис. 10. Мгновенное поле температуры (а) и скорости (б)

На рис. 10 представлен процесс перемешивания трех разнотемпературных струй натриевого теплоносителя, истекающих с одинаковой скоростью, также изображены поля температуры (слева) и скорости (справа), виден нестационарный, волнообразный характер течения. В табл. 7 приведены средние значения нормированной температуры за момент времени, равный 0-60 с.

Таблица 7

Среднее значение температуры в сенсорах

	Среднее значение температуры		Относительная погрешность	
	$Y = 90$ мм	$Y = 0.5$ мм	$Y = 90$ мм	$Y = 0.5$ мм
Эксперимент	0.33	0.417	-	-
Расчет	0,34	0,422	3,4%	1 %

Максимальная относительная погрешность составила 3,5% для находящейся в центре контрольной точки, для КТ2 ее значение не превышает 1%.

6. Гидродинамика и теплообмен в потоке натриевого теплоносителя в пучке обогреваемых стержней (эксперимент TEGENA)

В эксперименте TEGENA [19, 20] исследуется температурное распределение при течении натрия вдоль четырех электрообогреваемых стержней, тем самым моделируется обтекание теплоносителем пучка стержней в атомных реакторах.

Стержни установлены вертикально в канале прямоугольной формы. Через каждые 550 мм расположена решетка с шагом 3,7 мм. Стержни имеют диаметр 25 мм. Длины обогреваемого и необогреваемого участков составляют 2456 мм и 1288 мм, соответственно, средний гидравлический диаметр составляет 201 мм. Необогреваемый участок необходим для предварительной гидродинамической стабилизации течения. Геометрия, используемая для моделирования эксперимента TEGENA, представлена на рис. 11а, там же отмечено положение термомониторинга, включающего термопары TE21-TE24, который использовался для измерения температуры около плоскости выхода. Расчетная модель представляет собой область с исключенными отверстиями для стержней, на стенках которых будут заданы соответствующие тепловые характеристики течения. Она включает в себя все 4 стержня без учета дистанционирующих решеток.

Расчетная сетка имеет блочную структуру и состоит из 9,8 млн. гексагональных элементов. Общий вид расчетной сетки представлен на рис. 11б.

На входе заданы постоянная скорость и температура, значение теплового потока на каждом из стержней имеют разную величину, приведены в табл. 8. Данные параметры соответствуют значению числа Пекле $Pe = 352.52$. Для инициализации на входе задается интенсивность турбулентности 5%. На выходной границе задается свободный выход. Все стенки приняты адиабатическими. Теплофизические свойства натрия определялись функциональными зависимостями от температуры [19].

Поскольку расчетная область, как и в прошлой задаче, содержит угловатые элементы, моделирование турбулентности производилось с помощью алгебраической модели напряжений Рейнольдса EARSM. Турбулентное число Прандтля, вычисленное с помощью корреляций Рейнольдса (1), составило $Prt = 4/3$.

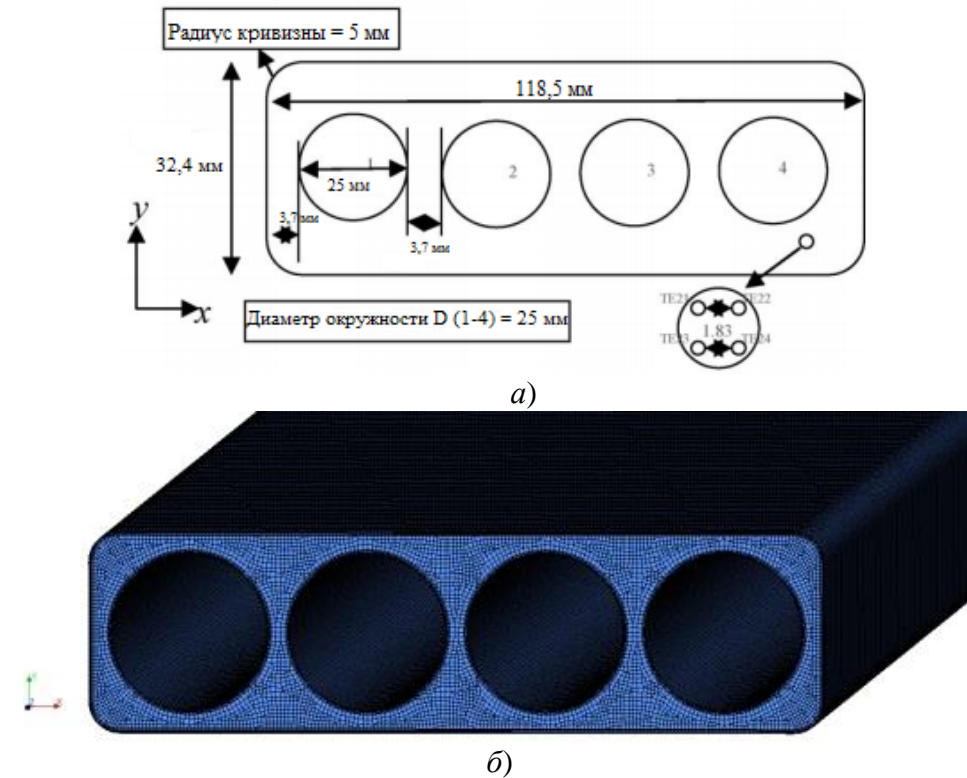


Рис. 11. Геометрия, используемая для моделирования эксперимента TEGENA, сечение с термопарами (а), сеточная модель (б)

Таблица 8

Параметры течения

Число Рейнольдса	Массовый поток, кг/с	Температура на входе, °С	Поток тепла на стержне 1, Вт/см ²	Поток тепла на стержне 2, Вт/см ²	Поток тепла на стержне 3, Вт/см ²	Поток тепла на стержне 4, Вт/см ²
60100	3,12	257,98	49,38	49	48,42	49,74

На рис. 12 приведен график сравнения распределения температуры между третьим и четвертым стержнем по высоте канала для двух экспериментов.

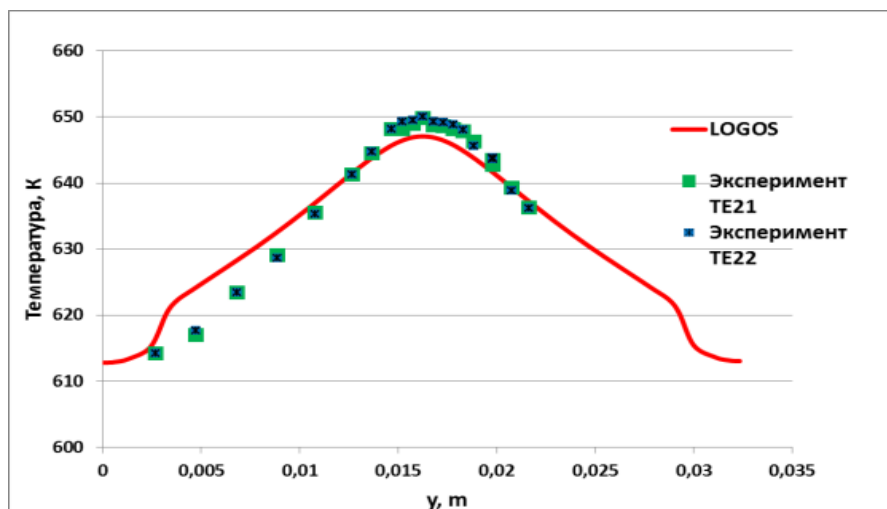


Рис. 12. Распределение температуры между третьим и четвертым стержнем

На рис. 12 представлено распределение температуры по высоте канала между третьим и четвертым стержнями в установке TEGENA. Отличие наблюдается вблизи одной из стенок, где происходит завышение температуры, с противоположной стороны экспериментальные данные отсутствуют. Температура по центру канала оказалась несколько занижена, относительная погрешность по ее максимуму не более 2%, данное значение входит в допустимый диапазон экспериментальных погрешностей и может быть ей обусловлена.

7. Гидродинамика и теплообмен в потоке ртутного теплоносителя в закрученном кольцевом канале

Экспериментальный стенд [21, 22] представляет собой герметизированный контур циркуляции теплоносителя. Рабочим участком является кольцевой канал, расположенный вертикально, образованный двумя трубами длиной 1000 мм. К наружной поверхности внутренней трубы приварено ребро. Во внутренней трубе располагается электрический нагреватель, изготовленный из нихромовой проволоки диаметром 1,0 мм. Теплоноситель поступает через входной патрубок в нижней камере, затем проходит через рабочий участок и выходит через выходной патрубок в верхней камере.

В качестве расчетной модели кольцевого канала рассматривается канал длиной 1000 мм, включающий в себя внутреннюю и наружную трубы, а также витое ребро, состоящие из стали. Основные геометрические характеристики кольцевого канала приведены в табл. 9.

Расчетная сетка имеет блочную структуру и состоит из гексагональных элементов. Общий вид расчетной сетки представлен на рис. 13б. Суммарное количество контрольных объемов расчетной сетки составило 3,9 млн. ячеек. Величина безразмерного расстояния до стенки $y^+ < 1$.

Теплофизические свойства ртути заданы следующими: $\rho = 13518.7 \text{ кг/м}^3$ – плотность, $C_p = 139.2 \text{ Дж/(кг К)}$ – удельная теплоёмкость, $\lambda = 8.59 \text{ Вт/(м·К)}$ коэффициент теплопроводности, $\mu = 0.0015 \text{ Па}$ – коэффициент динамической вязкости, для стали: $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$ – плотность, $C_p = 420 \text{ Дж/(кг К)}$ – удельная теплоёмкость, $\lambda = 15.1 \text{ Вт/(м·К)}$ – коэффициент теплопроводности. Движение потока ртутного теплоносителя осуществляется снизу-вверх, задан учет силы тяжести.

Граничные условия: на входе задана среднемассовая скорость $V = 0.12 \text{ м/с}$ и температура $T = 290.15 \text{ К}$, на выходе градиенты всех величин предполагаются равными нулю. На твердой стенке (внутренний цилиндр) задан поверхностный тепловой поток, $q_w = 50465.38 \text{ Вт/м}^2$ (погрешность экспериментального определения энерговыделения составляет 5 %). На всех твердых, необогреваемых поверхностях задано адиабатическое условие.

Таблица 9

Геометрические характеристики канала

Параметр	Значение
Наружный диаметр внешней трубы, $D_{\text{нар.}}$, мм	30
Внутренний диаметр внешней трубы, $d_{\text{нар.}}$, мм	27
Наружный диаметр внутренней трубы, $D_{\text{внутр.}}$, мм	12
Внутренний диаметр внешней трубы, $d_{\text{внутр.}}$, мм	10
Высота ребра, h , мм	7,5
Толщина ребра, δ , мм	2,0
Гидравлический диаметр, d_z , мм	13,31
Шаг навивки ребра, t , мм	425,1
Длина канала, L , мм	1000

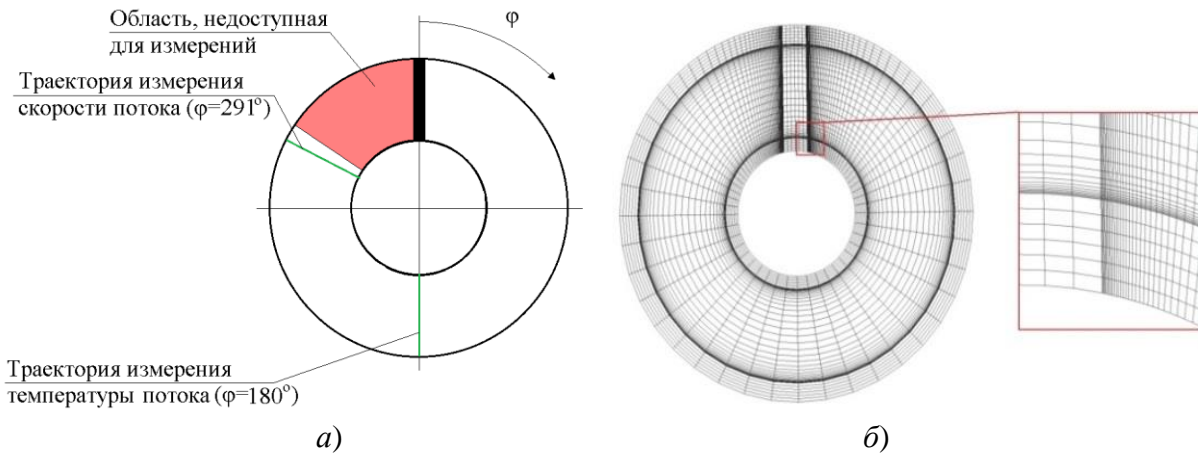


Рис. 13. Схема измерений параметров потока (а), сеточная модель (б)

Ввиду наличия закрутки потока имеет место несимметричность распределения скорости относительно ребра, поэтому моделирование турбулентности производилось с помощью алгебраической модели напряжений Рейнольдса EARSM. Турбулентное число Прандтля, вычисленное с помощью корреляций Рейнольдса (1), составило $Pr_t = 2.5$.

На рис. 14 представлены поля скорости и температуры в сечении $z = 900$ мм, недалеко от выхода из расчетной области. Наличие витого ребра, по аналогии с распределением скорости, приводит к деформации поля температуры потока теплоносителя в поперечном сечении модели. Температурный максимум на внутренней, обогреваемой трубе смещается в сторону направления тангенциальной компоненты скорости. Большие значения скорости наблюдаются по направлению навивки ребра. На рис. 15 показаны экспериментальное и расчетное распределения безразмерной температуры по радиусу кольцевого канала:

$$\theta = \frac{\lambda(T_w - T_{mn})}{q_w d_z},$$

где T_w и T_{mn} – температура стенки и теплоносителя, К, соответственно; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); d_z – гидравлический диаметр канала, м; q_w – поверхностный тепловой поток, Вт/м². Наибольшее отклонение наблюдается при измерении температуры в окрестности внутренней трубы и составляет порядка 13 %, допустимая погрешность измерений при проведении эксперимента 5%.

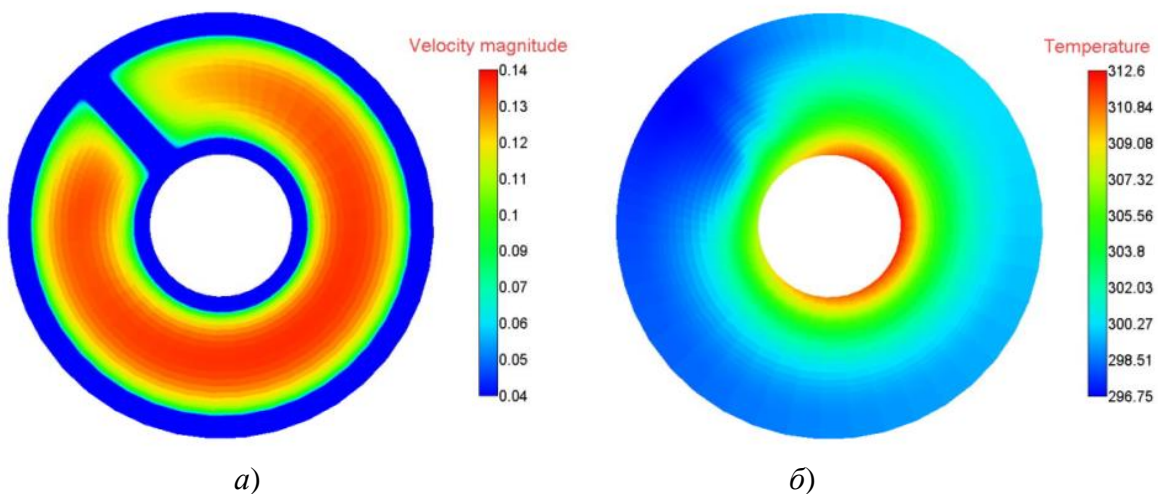


Рис. 14. Поля распределения амплитуды скорости (а) и температуры (б) в сечении $z = 900$ мм

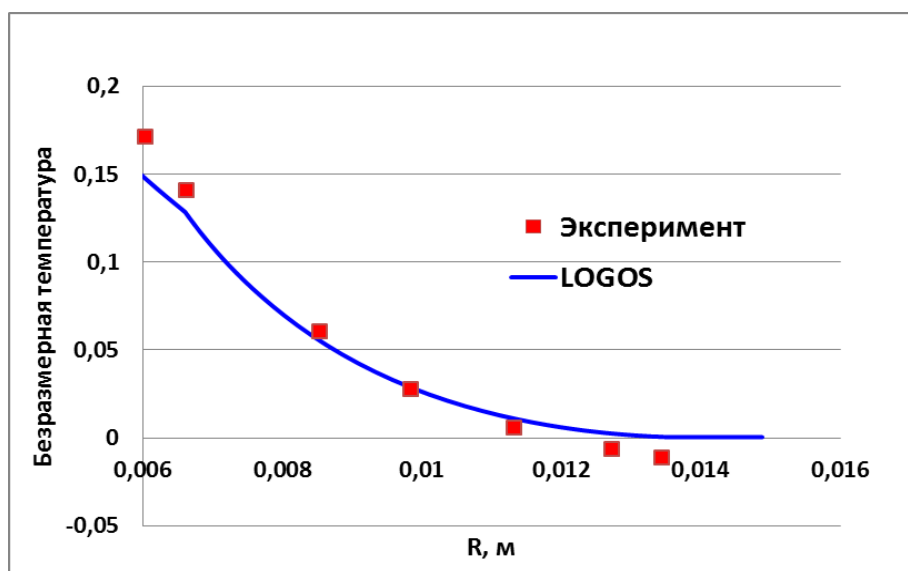


Рис. 15. Распределение безразмерной температуры по радиусу канала в сечении $z = 900$ мм, угол 291

Заключение

В статье был собран минимальный базис задач валидации методов моделирования течений жидкометаллических теплоносителей, характеризующихся низкими числами Прандтля. В базис задач вошли наиболее известные тесты, имеющие надежные экспериментальные либо численные данные. Были рассмотрены задачи о внутренних течениях в трубах и каналах различной формы, смешении разнотемпературных потоков, а также течениях в пучке стрелы. Для каждой задачи приведено подробное описание постановки и имеющиеся для нее опорные данные. Также представлены результаты численного моделирования рассматриваемых задач по пакету программ ЛОГОС в рамках RANS моделей турбулентности. Затронут вопрос об уточнении решения путем использования корреляций для определения турбулентного числа Прандтля.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов Президента Российской Федерации по государственной поддержке научных исследований молодых российских ученых-докторов наук МД-4874.2018.9 и государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации НШ-2685.2018.5, а также при частичной финансовой поддержке РФФИ – проект № 16-01-00267.

Библиографический список

1. **Козелков, А.С.** Минимальный базис задач для валидации методов численного моделирования турбулентных течений вязкой несжимаемой жидкости / А.С. Козелков, Ю.Н. Дерюгин, Ю.А. Циберева, А.В. Корнев [и др.] // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. – 2014. – № 4. – С. 21-69.
2. AIAA, Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations // AIAA, 1998, G-077.
3. **Deryugin, Yu.** Validation results for the LOGOS multifunction software package in solving problems of aerodynamics and gas dynamics for the lift-off and injection of launch vehicles / Yu. Deryugin, R. Zhuchkov, D. Zelenskiy, A. Kozelkov [et al.] // Mathematical Models and Computer Simulations. – 2015. – Vol. 7, Issue 2. – P. 144–153.
4. **Menghini, F.** Advanced Computational Fluid Dynamics models for liquid metal flows / F. Menghini // Esame finale anno accademico, 2014-2015. – P. 218.

5. **Grotzbach, G.** Challenges in simulation and modeling of heat transfer in low-Prandtl number fluids / G. Grotzbach // The 14 th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, NURETH-14, 2011, Toronto, Canada. – P. 33.
6. Best Practice Guidelines for the Use of CFD in Nuclear Reactor Safety Applications // Revision. Nuclear Safety NEA/CSNI/R, (2014)11, 2015.
7. Assessment of CFD Codes for Nuclear Reactor Safety Problems, Revision 2, Nuclear Safety NEA/CSNI/R (2014)12, 2015.
8. **Козелков, А.С.** Исследование применения RANS моделей турбулентности для расчета неизотермических течений с низкими числами Прандтля / А.С. Козелков, А.А. Куркин, В.В. Курулин [и др.] // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2015. – № 4. – С. 44-58.
9. **Козелков, А.С.** RANS–LES подход на основе алгебраической модели рейнольдсовых напряжений / А.С. Козелков, А.А. Куркин, О.Л. Крутякова [и др.] // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2015. – № 5. – С. 24-33.
10. **Bricteux, L.** Numerical prediction of turbulent heat transfer at low Prandtl number / L. Bricteux, M. Duponcheel, M. Manconi, Y. Bartosiewicz // Proc. 6th European Thermal Sciences Conference (Eurotherm 2012), France, 2012.
11. **Vodret, S.** Numerical simulation of turbulent forced convection in liquid metals / S. Vodret, D. Vitale Di Maio, G. Caruso // 32nd UIT (Italian Union of Thermo-fluid-dynamics) Heat Transfer Conference, Journal of Physics: Conference, 2014, Series 547.
12. **Abe, H.** A study of turbulence thermal structure in a channel flow through DNS up to $Re_{\tau} = 640$ with $Pr = 0.025$ and 0.71 / H. Abe, H. Kawamura // Proc. of 9th European Turbulence Conference, 2002. – P. 399-402.
13. **Abe, H.** DNS of turbulent heat transfer in a channel flow up to $Re_{\tau}=640$ (With respect to Reynolds- and Prandtl-number effects) / H. Abe, H. Kawamura // Transactions of the JSME (B), Japan. – 2003. Vol. 69. – P. 2291-2298.
14. **Ковалев, С.И.** Влияние продольного магнитного поля и термогравитационной конвекции на теплоотдачу при течении жидкого металла: (Эксперимент и расчет. рекомендации): дис... канд. тех. наук / Сергей Иванович Ковалев. – М., 1988.
15. **Исаченко, В.П.** Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергоиздат, 1981.
16. **Carteciano, L.** Validation of turbulence models in the computer code FLUTAN for a free hot sodium jet in different buoyancy flow regimes / L. Carteciano, G. Grotzbach // FZKA 6600, 2003.
17. **Kimura, N.** Experimental investigation on transfer characteristics of temperature fluctuation from liquid sodium to wall in parallel triple-jet / N. Kimura, H. Miyakoshi, H. Kamide // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2007. – Vol. 50. – P. 2024-2036.
18. **Рогожкин, С.А.** Использование URANS подхода для определения пульсаций температуры при перемешивании трех разнотемпературных струй натрия / С.А. Рогожкин, А.А. Аксёнов, С.В. Жлуктов [и др.] // Компьютерные исследования и моделирование. – 2014. – № 6. – С. 923–935.
19. **Möller, R.** TEGENA: Detaillierte experimentelle untersuchungen der temperatur- und geschwindigkeitsverteilungen in stabbündel-geometrien mit turbulenter natriumströmung / R. Möller // KfK 4491, Karlsruhe, Germany, 1989.
20. **Laltu, C.** CFD analyses of liquid metal flow in sub-channels for Gen IV reactors / C. Laltu, R. Ferry // Nuclear Engineering and Design. – 2011. – Vol. 241. – P. 4391-4403.
21. **Генин, Л.Г.** Исследование полей скорости и температуры при турбулентном течении ртути в кольцевом канале с закрученной лентой / Л.Г. Генин, А.Г. Захаров, С.Г. Крылов, Я.И. Листратов // Тезисы доклада XV Минского международного форума по теплообмену. Т. 1. – Минск, 2016. – С. 52-55.
22. **Генин, Л.Г.** Исследование полей скорости и температуры в кольцевом канале с винтовым оребрением применительно к созданию тепловыделяющей сборки реактора БРЕСТ-ОД-300 / Л.Г. Генин, С.Г. Крылов, Я.И. Листратов, А.Г. Захаров // Инновации в атомной энергетике. Сб. докладов конференции молодых специалистов. – М.: Изд-во АО «НИКИЭТ», 2015. – С. 300-311.
23. **Козелков, А.С.** Исследование потенциала суперкомпьютеров для масштабируемого численного моделирования задач гидродинамики в промышленных приложениях / А.С. Козелков, Р.М. Шагалиев, В.В. Курулин [и др.] // Вычислительная математика и математическая физика. – 2016. – Т. 56, № 8. – С. 1524-1535.

24. **Козелков, А.С.** Применение численных схем с выделением пограничного слоя для расчета турбулентных течений с использованием вихреразрешающих подходов на неструктурированных расчетных сетках / А.С. Козелков, О.Л. Крутякова, В.В. Курулин [и др.] // Вычислительная математика и математическая физика. – 2017. – Т. 57, № 6. – С. 1048-1060.
25. **Козелков, А.С.** Моделирование турбулентных течений с использованием алгебраической модели рейнольдсовых напряжений с универсальными пристеночными функциями / А.С. Козелков, В.В. Курулин, О.Л. Пучкова, С.В. Лашкин // Вычислительная механика сплошных сред. – 2014. – Т. 7, № 1. – С. 40-51.
26. **Погосян, М.А.** Использование отечественных суперкомпьютерных технологий при проектировании новых образцов авиационной техники / М.А. Погосян, Е.П. Савельевских, Д.Ю. Стрелец [и др.] // Авиационная промышленность. – 2013. – № 3. – С. 3-7.
27. **Волков, К.Н.** Методы ускорения газодинамических расчетов на неструктурированных сетках / К.Н. Волков, Ю.Н. Дерюгин, В.Н. Емельянов [и др.]. – М.: Физматлит, 2013. – С. 536 с.
28. **Козелков, А.С.** Моделирование возмущений в озере Чебаркуль при падении метеорита в 2013 году / А.С. Козелков, А.А. Куркин, Е.Н. Пелиновский [и др.] // Известия РАН Механика жидкости и газа. – 2015. – № 6. – С. 134-143.
29. **Козелков, А.С.** Методика численного моделирования цунами оползневой типа на основе уравнений Навье-Стокса / А.С. Козелков // Вычислительная механика сплошных сред. – 2016. – Т. 9, № 2. – С. 218-236.

*Дата поступления
в редакцию: 02.10.2018*

**S.M. Dmitriev¹, O.L. Krutyakova², A.S. Kozelkov^{1,2}, A.A. Kurkin¹,
V.V. Kurulin², O.V. Denisova², D.A. Utkin²**

MINIMUM BASIS OF TASKS OF THE VALIDATION OF METHODS OF FLOW MODELING WITH LOW PRANDT NUMBERS

Nizhniy Novgorod State Technical University n.a. R. Alekseev¹,
Russian federal nuclear center – All-Russian research institute of experimental physics,
Sarov, Nizhny Novgorod region²

Purpose: development of a minimum basis of tasks of the validation of modeling methods of liquid metal coolants flows, characterized by low Prandtl numbers.

Design/methodology/approach: in the studied flows, heat transfer occurs both due to convective mixing of the flow, and due to the molecular thermal conductivity of the heat transfer agents itself, which has a much better thermal conductivity of this type compared to other heat transfer agents. An intensive change in the temperature of the liquid due to the high thermal conductivity can be at the same level as the change in temperature due to turbulent mixing. Turbulence is the main problem of the numerical modeling of flows with low Prandtl numbers. The most common RANS models of turbulence are based on the idea of using turbulent viscosity and turbulent thermal conductivity, and the turbulent thermal conductivity is directly related to the turbulent viscosity using a fixed value of the turbulent Prandtl number.

Findings: the basis of tasks includes internal flows in pipes and channels of different forms, mixing of different-temperature flows, as well as flow in a bundle of rods. A detailed description of the statement and the available reference data for each task are provided.

Research limitations/implications: the results of numerical modeling of the considered problems on the LOGOS software package in the framework of the RANS turbulence models using correlations for determining of the turbulent Prandtl number and refine the resulting solution for tasks with high molecular thermal conductivity are presented.

Key words: numerical simulation, turbulence, low Prandtl numbers, turbulent heat transfer, heat transfer in liquid metals.

УДК 621.314

Е.В. Калинин, Е.А. Чернов

**ПОТЕРИ В СТЫКАХ ШИХТОВАННЫХ СЕРДЕЧНИКОВ.
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СНИЖЕНИЯ ПРИРОСТА ПОТЕРЬ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Целью исследования является анализ влияния различных факторов на прирост потерь в косых стыках шихтованных сердечников из холоднокатаной электротехнической стали мощных силовых трансформаторов с целью снижения прироста потерь. Проведено экспериментальное исследование прироста удельных потерь в стыках $\Delta P_{уд}$ как разницы удельных потерь: сначала сплошного кольцевого шихтованного сердечника (без стыков) $P_{уд}$, а потом этого сердечника со стыками $P_{уд.ст}$, при различных значениях амплитуды магнитной индукции B_m на двух частотах $f = 50$ и 100 Гц. Используются нетрадиционные структурные составляющие прироста удельных потерь: $\Delta P_{уд.гв}$ – на гистерезис и вихревые токи от перераспределения основного (тангенциального) магнитного потока и $P_{уд.вп}$ – на вихревые токи от нормальной составляющей магнитного потока в стыке. В статье подтверждается правильность использования выбранной структуры прироста потерь в косых стыках. Выявлено, что для сердечников из текстурованных сталей основная часть прироста удельных потерь ($> 85\%$) приходится на составляющую $P_{уд.вп}$. Предлагаются мероприятия по снижению прироста потерь в стыках. Показано, что динамика энергетических процессов, связанных с формированием $P_{уд.вп}$, соответствует резкому поверхностному эффекту. Экспериментально получено значительное уменьшение $P_{уд.вп}$ путем нанесения на пластины сердечника в зоне стыков специальных разрезов. Новизна работы заключается в предложении структуры прироста удельных потерь в косых стыках шихтованных сердечников и определены особенности характера зависимостей, составляющих $\Delta P_{уд.гв}$ и $P_{уд.вп}$ от B_m и f . Даются практические рекомендации существенного снижения $\Delta P_{уд}$ в мощных силовых трансформаторах.

Ключевые слова: шихтованный сердечник трансформатора, холоднокатаная электротехническая сталь, косые стыки, структура прироста потерь, экспериментальное исследование, снижение потерь, специальные разрезы.

Введение

Электромагнитные потери (далее потери) P силовых трансформаторов являются важной характеристикой энергетических потерь. Стоимость полных потерь трансформатора за период эксплуатации (капитализированная стоимость) соизмерима с его ценой, при этом стоимость потерь холостого хода в несколько раз выше стоимости потерь короткого замыкания [1, 2]. Суммарная установленная мощность всех трансформаторов многократно (в 7-8 раз) превышает общую генерируемую, а на потери в них расходуется более 6 % всей вырабатываемой электроэнергии [1]. Внедрение современных текстурованных холоднокатаных электротехнических сталей существенно улучшило энергетические показатели за счет низких значений удельных магнитных потерь и повышенного уровня рабочей индукции в направлении прокатки (НП) [1-8]. Потребовался переход на магнитные системы (МС) с косыми стыками [1, 2]. Созданы новые дорогостоящие типы текстурованных холоднокатаных сталей: Ni-B, ZDKH, с магнитоактивным покрытием, лазерной обработкой поверхности, уменьшенной толщиной прокатки пластин, новая группа материалов – аморфные стали [1, 6-8]. Однако, указывается и на необходимость в дальнейшем совершенствовании конструкций стыков МС мощных энергоустройств. [1-3, 9, 10].

Исследования прироста потерь в шихтованных сердечниках, связанных с наличием стыков, затрудняются их зависимостью от технологических и конструктивных особенностей изготовления МС [1-3, 11]. К этому добавляется высокая чувствительность крупной полосовой доменной структуры (ДС) текстурованных сталей к механическим воздействиям и динамике перемагничивания [12, 13], сложность измерения потерь при низком коэффициенте мощности, который для современных сталей может принимать значения $\cos\varphi < 0,01$ [1]. Поэтому важным

становится решение проблемы структуры прироста потерь, определения характера зависимостей, составляющих прироста от параметров косых стыков и условий перемагничивания.

Сравнительный анализ результатов экспериментального исследования структуры прироста удельных потерь в стыках сердечника С№ 1 на частотах $f = 50$ и 100 Гц

В первой части работы [4] на основе экспериментального исследования потерь, на частоте $f = 50$ Гц в шихтованных сердечниках №1 (С№ 1) кольцевой формы из стали 2412 и №2 (С№ 2) П-образной формы из стали 3406 изучено влияние основных параметров косых стыков на увеличение удельных потерь в сердечнике со стыками $P_{уд.ст}$ по отношению к удельным потерям сердечника без стыков $P_{уд}$ при различных значениях амплитуды магнитной индукции B_m :

$$P_{уд.ст}(B_m) = P_{уд}(B_m) + \Delta P_{уд}(B_m) \quad (1)$$

Для С№ 1 определены структура и количественные значения составляющих прироста удельных потерь в стыках $\Delta P_{уд}$, а также характер их зависимости от B_m (рис. 1б; табл. 1):

$$\Delta P_{уд}(B_m) = \Delta P_{уд.гв}(B_m) + P_{уд.вп}(B_m) \quad (2)$$

где $\Delta P_{уд.гв} = \Delta P_{уд.г} + \Delta P_{уд.в}$ – прирост удельных потерь в стыках на гистерезис и вихревые токи; $P_{уд.вп}$ – удельные потери на вихревые токи от нормальной составляющей магнитного потока Φ_n . На частоте $f = 50$ Гц для С№ 1 из стали 2412 установлены процентные соотношения структурных составляющих прироста потерь при различных B_m и числе пластин в шихтовке $m = 8$ (рис. 1в).

На основе полученных результатов для С№ 2 из стали 3406 при $B_m = 1,5$ Тл и $m = 1$; 2 произведен расчет составляющих прироста удельных потерь в стыках и прироста удельных потерь $\Delta P_{уд}$, соответствующих экспериментальным значениям [4]. На примере С№ 2 показано, что составляющая $P_{уд.вп}$ в стыках при $B_m > 1,5$ Тл более, чем в 5, 6 раз превышает $\Delta P_{уд.гв}$. Фактически установлено доминирование составляющей $P_{уд.вп}$ в стыках шихтованных сердечников из текстурованных холоднокатаных сталей.

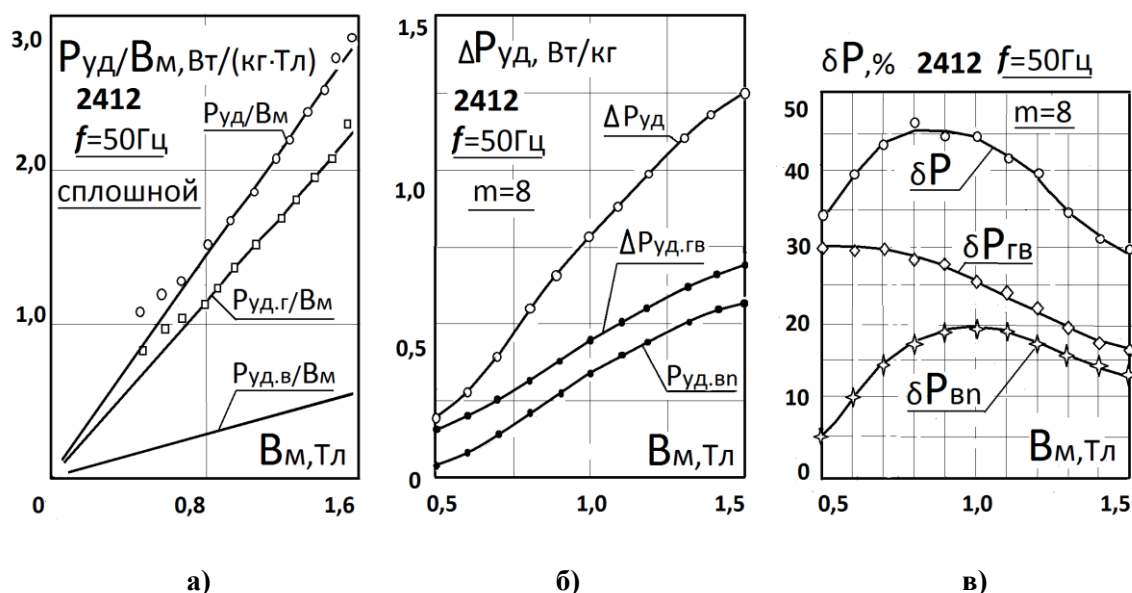


Рис. 1. а – Зависимости структурных составляющих удельных потерь $P_{уд}/B_m$ от B_m в сплошном С№ 1 из стали 2412 при $f = 50$ Гц; б – зависимости структурных составляющих прироста удельных потерь $\Delta P_{уд}(B_m)$ в С№ 1 со стыками при $f = 50$ Гц и $m = 8$ (табл.1); в – зависимости относительного прироста потерь $\delta P(B_m)$ в С№ 1 со стыками при $f = 50$ Гц и $m = 8$ (табл.1) и структурных составляющих $\delta P_{гв}(B_m)$ и $\delta P_{вп}(B_m)$

С целью дополнительного изучения особенностей формирования прироста потерь в стыках проведены измерения удельных потерь на повышенной частоте $f = 100$ Гц сначала сплошного сердечника С№1 - $P_{уд}(B_m)$, потом С№1 со стыками – $P_{уд.ст}(B_m)$ при числе пластин в шихтовке $m = 8$, также связанные равенствами (1), (2). Результаты для различных B_m сведены в табл.1 (графы 3; 10). В графах 2; 6 аналогичным образом представлены удельные потери С№1 при $f = 50$ Гц по результатам [4].

На рис. 1,а представлены зависимости удельных потерь от B_m сплошного С№1 при $f = 50$ Гц для удобства в виде отношений полных удельных потерь $P_{уд}/B_m$ и их структурных составляющих $P_{уд.г}/B_m$; $P_{уд.в}/B_m$ к индукции B_m . Как видно из графиков на рис. 1а и ранее использовано в [4], отношение составляющих потерь на гистерезис и вихревые токи $P_{уд.г}$ и $P_{уд.в}$ для стали 2412 с мелкокристаллической структурой практически не меняется от B_m и при $f = 50$ Гц равно: $P_{уд.г}/P_{уд.в} = 4,2$. Учитывая также, что $P_{уд} = P_{уд.г} + P_{уд.в}$, для $f = 50$ Гц имеем

$$P_{уд.г} = 0,81 P_{уд}; P_{уд.в} = 0,19 P_{уд} \quad (3)$$

Для С№1 со стыками при $f = 50$ Гц и количестве пластин в шихтовке $m = 8$ по результатам экспериментов в первой части работы [4] определены и представлены на рис. 1б. зависимости прироста удельных потерь $\Delta P_{уд}(B_m)$ и структурных составляющих прироста $\Delta P_{уд.гв}(B_m)$ и $P_{уд.вп}(B_m)$, значения последних занесены жирным шрифтом в табл.1 (графы 4;5). На рис. 1в приведены эти же зависимости от B_m (при $f = 50$ Гц и $m = 8$) структурных составляющих прироста потерь в стыках С№1 в относительном виде:

$$\delta P_{гв}(B_m) = \Delta P_{уд.гв}(B_m) / P_{уд}(B_m) \cdot 100\%; \delta P_{вп}(B_m) = P_{уд.вп}(B_m) / P_{уд}(B_m) \cdot 100\%.$$

и зависимости относительного прироста потерь:

$$\delta P(B_m) = P_{уд.ст}(B_m) / P_{уд}(B_m) \cdot 100\%,$$

значения, которых при различных B_m размещены также в графе 7 табл.1.

Таблица 1

Экспериментальные данные удельных потерь $P_{уд}(B_m)$ в сплошном С№1 и со стыками при $m = 8$ для $f = 50$ и 100 Гц и расчетные значения прироста $P_{вп}$ при пересчете результатов измерения по формулам (5), (6) с $f = 50$ Гц на $f = 100$ Гц

	Потери в сплошном С№1		Потери в сердечнике С№1 со стыками, Вт/кг при числе пластин в шихтовке $m=8$								n
	$f=50$ Гц	$f=100$ Гц	$f=50$ Гц				$f=100$ Гц				
	Эксперимент		Эксперимент (рис.1.а, б)				Расчет по (5); (6)		Эксперимент		
B_m , Тл	$P_{уд}$, Вт/кг		$\Delta P_{уд.гв}$	$P_{уд.вп}$	$P_{уд.ст}$	$\delta P, \%$	$\Delta P_{уд.гв}$	$P_{уд.вп}$	$P_{уд.ст}$	$\delta P, \%$	
0,5	0,55	1,31	0,16	0,03	0,74	34,5	0,38	0,07	1,76	34,6	1,25
0,7	0,94	2,24	0,27	0,14	1,35	42,6	0,64	0,37	3,25	45,1	1,41
0,9	1,46	3,47	0,39	0,26	2,11	44,5	0,93	0,79	5,19	49,6	1,60
1,0	1,76	4,19	0,46	0,33	2,55	44,9	1,09	0,98	6,26	49,4	1,57
1,1	2,12	5,05	0,51	0,38	3,01	42,0	1,21	1,19	7,45	47,5	1,64
1,2	2,52	6,00	0,56	0,44	3,52	39,7	1,33	1,37	8,70	45,0	1,64
1,3	2,97	7,07	0,60	0,48	4,03	34,8	1,43	1,60	10,1	42,8	1,74
1,4	3,59	8,54	0,65	0,52	4,72	31,5	1,55	1,81	11,9	39,3	1,80
1,5	4,22	10,0	0,70	0,57	5,49	30,1	1,67	1,93	13,6	36,0	1,76

Анализ зависимости удельных потерь за один цикл перемагничивания $P_{уд}/f$ сплошного сердечника С№1 от частоты в диапазоне $f = (0 \div 100)$ Гц при различных B_m по точкам: $f = 0$ (измеренным на установке ВНС – 40С [4]) и $f = 50$ и 100 Гц (расчитанным по значениям в графах 2; 3 табл.1) показывает что они имеют строгий линейный характер.

Подтверждается правильность выводов для сталей с мелкокристаллической структурой [14], что: $P_{уд.г}(f) \equiv f$, а $P_{уд.в}(f) \equiv f^2$. Исходя из этого и с учетом долевых соотношений (3) получены выражения для потерь $P_{уд}$ в сплошном сердечнике из стали 2412 и прироста потерь

$\Delta P_{уд.гв}$ в сердечнике со стыками, позволяющие пересчитать экспериментальные значения $P_{уд}$ и $\Delta P_{уд.гв}$ для $f_1 = 50$ Гц при различных $B_m = const$ на повышенную частоту $f_2 = 100$ Гц:

$$P_{уд}(f_2) = P_{уд}(f_1) \cdot [0,81 \left(\frac{f_2}{f_1}\right) + 0,19 \left(\frac{f_2}{f_1}\right)^2] = 2,38 P_{уд}(f_1) \quad (4)$$

$$\Delta P_{уд.гв}(f_2) = \Delta P_{уд.гв}(f_1) \cdot [0,81 \left(\frac{f_2}{f_1}\right) + 0,19 \left(\frac{f_2}{f_1}\right)^2] = 2,38 \Delta P_{уд.гв}(f_1) \quad (5)$$

Результаты пересчета для $f = 100$ Гц также сведены в табл.1: значения $\Delta P_{уд.гв}$ с использованием равенства (5) размещены в графе 8; значения $P_{уд}$, рассчитанные по выражению (4), совпадают с экспериментальными – в графе 3, доказывая правомерность применения формул (4), (5).

Экспериментальные величины $P_{уд}$ в графе 8 для С№ 1 со стыками позволили определить значения составляющей $P_{уд.вп}$ на $f = 100$ Гц. Выражение для расчета удельных потерь $P_{уд.вп}$ при различных $B_m = const$ для повышенной частоты f_2 следует из равенств (1), (2)

$$P_{уд.вп}(f_2) = P_{уд.ст}(f_2) - P_{уд}(f_2) - \Delta P_{уд.гв}(f_2) \quad (6)$$

Рассчитанные по (6) значения $P_{уд.вп}$ находятся в графе 9 (жирным шрифтом). В графе 11 расположены значения относительного прироста потерь $\delta P(B_m)$ С№ 1 со стыками при $m = 8$ и $f = 100$ Гц, имеющие тот же характер зависимости от B_m , что и при $f = 50$ Гц [4] (графа 7), но с увеличением максимума с 45% до 50% за счет возрастания доли, составляющей $P_{уд.вп}$.

Особенности формирования удельных потерь $P_{уд.вп}$ в стыках С№ 1 и возможности их снижения

С использованием логарифмирования значений $P_{уд.вп}$ и f при различных B_m в табл. 1 на границах интервала $f \in [50-100]$ Гц определены значения показателя степени n (графа 12 и рис. 3а) зависимости

$$P_{уд.вп}(f) \equiv (f)^n \quad (7)$$

которые соответствуют результатам [15] для резкого поверхностного эффекта (РПЭ).

В монографии Ламмеранера Й. и Штафля М. [15] для переменного магнитного потока в бесконечной проводящей пластине (при условии $l \gg b$) с удельной электропроводностью γ , плотностью σ , шириной b и длиной l и постоянной магнитной проницаемостью $\mu = const$ сформулировано условие РПЭ - $\xi > 4$, где ξ – коэффициент динамики, равный

$$\xi = b \sqrt{\pi f \mu \gamma} \quad (8)$$

На основании результатов [15] удельные потери в бесконечной пластине при РПЭ определяются по формуле

$$P_{уд.вп} = \pi^{1,5} / (2\sigma) \cdot B_m^2 \cdot b \cdot (f)^{1,5} \cdot \sqrt{\gamma / \mu} \quad (9)$$

В зонах, прилегающих к стыкам сердечника С№ 1, для составляющей потока Φ_n также наблюдается РПЭ: даже при низких значениях $\mu \leq 0,001$ Гн/м ($\mu' \leq 800$) для $b_1 = \Delta R = 0,0606$ м; $\gamma = 2 \cdot 10^6$ См/м и $f = 50$ Гц значения коэффициента динамики $\xi > 30$. В графе 12 при малых индукциях, где $\mu \approx const - B_m = (0,5-0,7)$ Тл $n \approx 1,5$, то есть $P_{уд.вп} \equiv (f)^{1,5}$, как в формуле (8). С ростом насыщения (нелинейности μ), при $B_m = (1,0 - 1,5)$ Тл значения показателя n зависимости (7) возрастают до $n = 1,6 - 1,8$ (рис. 3а).

Согласно формуле (9), при РПЭ для бесконечной пластины справедливо $P_{уд.вп} \equiv b$. Однако, необходимо учитывать, что в [15] рассматривается РПЭ с равномерным магнитным потоком в бесконечной пластине. В отличие от задачи Ламмеранера [15] в косом стыке поток Φ_n сосредоточен в узкой области на краю пластин сердечника, прилегающей к зоне их перекрытия. Рис. 2 поясняет картину перераспределения магнитного потока и вихревых токов от нормальной составляющей магнитного потока Φ_n в узкой области, непосредственно прилегающей к стыку (между вертикальными пунктирными линиями), для одного элемента позиции шихтовки «спрямленного» косого стыка толщиной ($m \cdot d$), шириной b , где d и b – толщина и ширина пластин сердечника. Своей наибольшей величины, меньше или равной основного потока зоны стыка:

$$\Phi_n \leq B_m \cdot m \cdot d \cdot b \quad (10)$$

магнитный поток Φ_n достигает в зоне перекрытия пластин t , а за её пределами в зоне стыка – вдвое меньше $\approx \frac{1}{2}\Phi_n$ (на рис. 2а силовые линии магнитной индукции сплошными линиями со стрелками). Знак неравенства в (10) обусловлен тем, что часть силовых линий магнитной индукции, возрастающая с падением μ при насыщении, проходит через воздушный зазор в стыке (на рис. 2а пунктирные силовые линии со стрелками). Пластины, находящиеся в перекрытии (на рис. 2б, справа), испытывают одновременное воздействие двух противоположно направленных потоков: Φ_n и $\frac{1}{2}\Phi_n$. В итоге, вихревые токи в каждой пластине в зоне стыка являются результатом воздействия только половинных потоков $\frac{1}{2}\Phi_n$ (рис. 2б). Из-за развития РПЭ контуры вихревых токов вытесняются за пределы действия потоков $\frac{1}{2}\Phi_n$ к наружным границам пластин (рис. 2б).

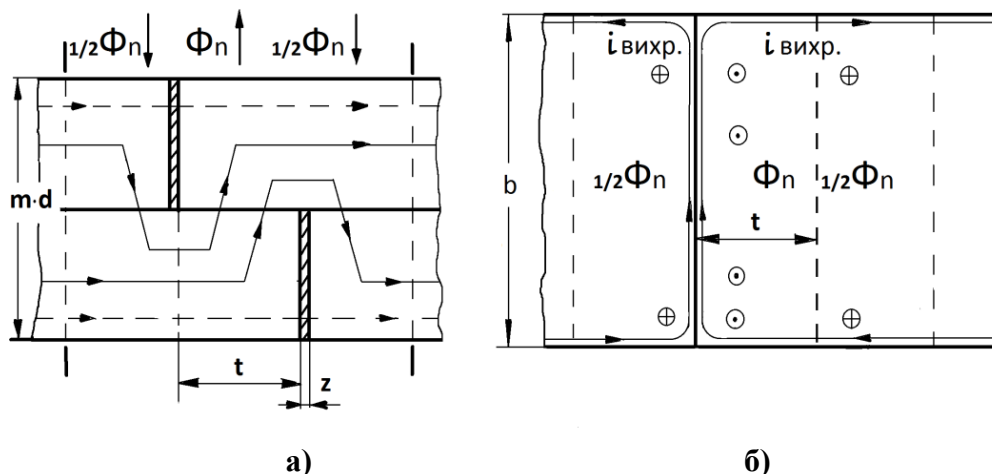


Рис. 2. а – Перераспределение магнитного потока в зоне стыка (b – ширина пластин сердечника, d – толщина, m – количество пластин в шихтовке и t – величина перекрытия); б – контуры вихревых токов $i_{\text{вихр.}}$ в зоне стыка от нормальной составляющей магнитного потока Φ_n

Как было отмечено в [3], среди многочисленных подходов к вопросу снижения потерь в стыках путем совершенствования их конструкции основное внимание уделено снижению индукции в зоне стыков и уменьшению длин участков, в которых индукция отклоняется от НП, варьированию числом пластин в шихтовке, минимизации числа стыков. Имеются решения по сокращению объема угловых участков и улучшению условий теплоотдачи за счет выполнения МС многорамными [2, 3]. Авторами не преследовалась цель снижения именно составляющей $P_{\text{уд.вл}}$ в стыках, хотя при этом происходило уменьшение ширины пластин МС. Известны также технические решения по снижению добавочных потерь от потоков рассеяния путем продольного расщепления наружной части пакета пластин МС мощных трансформаторов на несколько полос [16] или их перфорации по всей длине параллельными рядами продольных пунктирных прорезей [17], приводящие к уменьшению эквивалентной ширины пластин $b_{\text{э}}$, но только в наружной части пакета.

Для определения характера зависимости потерь $P_{\text{уд.вл}}$ в стыках от ширины пластин – b_1 сердечника С№ 1 проведены дополнительные исследования с изменением условий развития РПЭ. С этой целью в зоне стыков каждой пластины С№ 1 с учетом результатов исследования распределения магнитного поля в кольцевом анизотропном сердечнике из стали 2412 [18] установлены направления и размеры 5 специальных прорезей по ширине пластин b_1 с определенной шириной интервалов, условно показанные на рис. 3в. При этом эквивалентная ширина пластин сердечника в зоне стыков $b_{\text{э}}$, влияющая на развитие РПЭ и величину $P_{\text{уд.вл}}$ в соответствии с (8), (9), уменьшается: $b_{\text{э}} \approx b_1/6 = 0,01$ м.

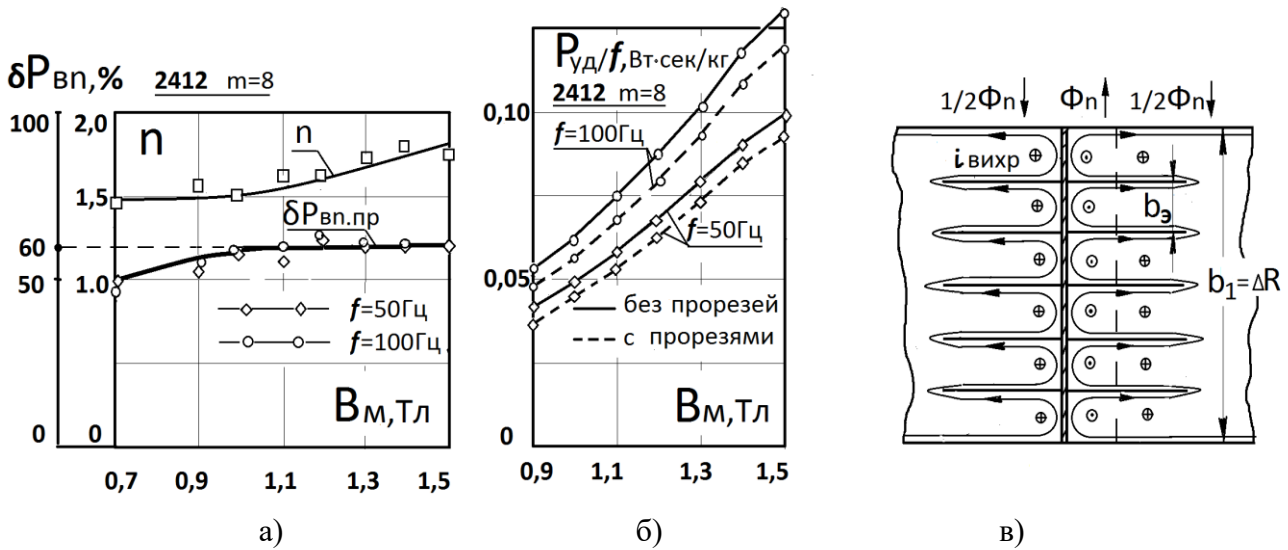


Рис. 3. а – Значения показателя степени n зависимости $P_{уд.вп}(f)$ (7) (табл. 1) и процента снижения потерь $\delta P_{вп.пр}$ в С№ 1 из стали 2412 с прорезями в зоне стыков при $m = 8$ и различных V_m (табл. 2); б – кривые удельных потерь за один цикл $P_{уд}/f$ от V_m в С№ 1 со стыками при $m = 8, f = 50$ и 100 Гц до и после нанесения прорезей (табл. 2); в – конфигурация контуров вихревых токов от потока Φ_n в зоне стыка со специальными прорезями

С целью исключения какого-либо влияния механического воздействия на магнитные свойства стали прорези выполнены электроэрозионным способом (латунной проволокой диаметром 0,1 мм). После сборки С№ 1 с прорезями в зоне стыков при $m = 8$ произведены измерения $P_{уд.пр}$ (V_m) на частотах $f = 50$ и 100 Гц. Результаты измерения до и после нанесения прорезей сведены в табл. 2.

Таблица 2

Снижение удельных потерь на вихревые токи $\delta P_{вп}(V_m)$ от нормальной составляющей магнитного потока в стыках С№ 1 при $m = 8$ на частотах $f = 50$ и 100 Гц после нанесения специальных прорезей в зоне стыков

V_m , Тл	Удельные потери, Вт/кг при $f=50$ Гц						Удельные потери, Вт/кг при $f=100$ Гц					
	$P_{уд ст}$	$P_{уд пр}$	$P_{уд вл}$	$\Delta P_{уд пр}$	$P_{уд вл.пр}$	$\delta P_{вп пр, \%}$	$P_{уд ст}$	$P_{уд пр}$	$P_{уд вл}$	$\Delta P_{уд пр}$	$P_{уд вл.пр}$	$\delta P_{вп пр, \%}$
0,9	2,11	1,97	0,26	0,14	0,12	53,8	5,19	4,75	0,79	0,44	0,35	55,7
1,0	2,55	2,36	0,33	0,19	0,14	57,6	6,26	5,69	0,98	0,57	0,41	58,2
1,1	3,01	2,79	0,38	0,22	0,16	57,9	7,45	6,70	1,19	0,75	0,44	63,0
1,2	3,52	3,25	0,44	0,27	0,17	61,4	8,70	7,82	1,37	0,88	0,49	64,1
1,3	4,03	3,74	0,48	0,29	0,19	60,4	10,1	9,14	1,60	0,96	0,64	60,0
1,4	4,72	4,41	0,52	0,31	0,21	59,6	11,9	10,8	1,81	1,10	0,71	60,7
1,5	5,49	4,92	0,57	0,35	0,22	61,4	13,6	12,4	1,93	1,18	0,75	61,1

На рис. 3б для сравнения представлены зависимости удельных потерь за один цикл перемещения $P_{уд}/f$ (V_m) на двух частотах до и после нанесения прорезей.

Снижение удельных потерь в С№ 1 с прорезями $\Delta P_{уд.пр}$ при различных V_m :

$$\Delta P_{уд.пр} = P_{уд.ст} - P_{уд.пр} \tag{11}$$

связано с уменьшением только одной составляющей – удельных потерь на вихревые токи в стыках с прорезями: $P_{уд.вл.пр}$ от потока Φ_n :

$$P_{уд.вл.пр} = P_{уд.вл} - \Delta P_{уд.пр} \tag{12}$$

На рис. 3а для $f = 50$ и 100 Гц представлены кривые, а в табл. 2 значения относительного снижения прироста потерь в стыках с прорезями $\delta P_{вп.пр}(V_m)$ при различных V_m , равные:

$$\delta P_{\text{вп.пр}}(B_m) = \Delta P_{\text{уд.пр}}(B_m) / P_{\text{уд.вп}}(B_m) \cdot 100\% \quad (13)$$

Таким образом на обеих частотах относительное снижение потерь на вихревые токи в стыках от потока Φ_n при значениях индукции $B_m = (1,0 - 1,5)$ Тл составляет – $\delta P_{\text{вп.пр}} \approx 60\%$. При этом отношения значений удельных потерь на вихревые токи в стыках $P_{\text{уд.вп}}$ до и после нанесения прорезей при различных B_m равны:

$$P_{\text{уд.вп}} / P_{\text{уд.вп.пр}} \approx 2,5 \approx \sqrt{6} = \sqrt{b_1/b_э} \quad (14)$$

Значит потери $P_{\text{уд.вп}}$ в косых стыках пропорциональны:

$$P_{\text{уд.вп}} \equiv \sqrt{b} \quad (15)$$

Распространение результатов разделения прироста удельных потерь в стыках сердечника С№ 1 на сердечник С№ 2

Для корректного переноса результатов разделения прироста потерь в стыках кольцевого сердечника С№ 1 из мелкокристаллической динамной стали с мелкой ДС на П-образный сердечник С№ 2 из текстурованной стали с крупной полосовой ДС, необходимо учесть следующие рекомендации, касающиеся материала и конструкции магнитопроводов.

1. Дробление полосовой ДС текстурованных сталей с ростом частоты [12] приводит к нелинейному характеру зависимости от частоты удельных потерь за один цикл перемагничивания $P_{\text{уд}}/f$ и росту гистерезисных потерь за цикл $P_{\text{уд.г}}/f$ при $B_m = \text{const}$ и [13,14]. Наиболее значительное изменение ДС в соответствии с данными [14] (рис.4а) происходит на малых частотах – в диапазоне $f = (0 \div 5)$ Гц. С учетом результатов исследования особенностей динамического перемагничивания полосовой ДС [12] использование для гистерезисной составляющей удельных потерь $P_{\text{уд.г}}$ текстурованных сталей экспериментальных данных на основе статических петель дает заниженные результаты. Определение $P_{\text{уд.г}}$ в динамике (например, при $f = 50$ Гц) необходимо производить по методике, предложенной в [13]. На рис.4б приведены кривые удельных потерь $P_{\text{уд}}(B_m)$ и структурных составляющих $P_{\text{уд.г}}$ и $P_{\text{уд.в}}$ стали 3406, рассчитанные с использованием рекомендаций [13]. Для удобства анализа, как и в случае стали 2412(рис. 1а), последние представлены в виде зависимостей $P_{\text{уд}}/B_m$ (B_m). Здесь также с незначительным допущением можно принять условие неизменности отношения $P_{\text{уд.г}} / P_{\text{уд.в}}$ от индукции B_m , позволяющее объединять прирост удельных потерь в стыках от этих структурных составляющих в виде – $\Delta P_{\text{уд.гв}}$.

2. Как показано в первой части [4], насыщение магнитной характеристики $B_m(H_m)$ текстурованной стали 3406 наступает при больших значениях B_m , чем у динамной стали 2412 с разницей индукций $\Delta B \approx 0,35$ Тл, что и необходимо учитывать при пересчете относительных значений, составляющих прироста потерь в стыках $\delta P_{\text{вп}}$ и $\delta P_{\text{гв}}$ (табл. 3).

3. В соответствии с формулой (9), имеется зависимость составляющей прироста удельных потерь $P_{\text{уд.вп}}$ от параметров стали γ и μ . При этом для сталей 2412 и 3406 с одинаковым содержанием % Si удельная электропроводность γ остается неизменной [14]. Магнитная проницаемость μ в направлении, перпендикулярном плоскости прокатки пластин, для холоднокатаных сталей принимает наименьшие значения независимо от степени текстуры [12]. Поэтому принимаем допущение, что зависимости $\mu(B_m)$ при намагничивании в направлении, перпендикулярном плоскости прокатки, для холоднокатаных сталей с 3% Si одинаковые.

4. Значения составляющей прироста удельных потерь в стыках $\Delta P_{\text{уд.гв}}$ пропорциональны уровню удельных потерь в стали $\Delta P_{\text{уд.гв}} \equiv P_{\text{уд}}$. Это соответствует и физическим представлениям, и экспериментальным результатам [4], где уровень $\Delta P_{\text{уд}}$ при $m = 1$ для С№ 1 составляет от $P_{\text{уд}} \leq 10,8\%$; а для С№ 2 – $\leq 13\%$ (из-за большей доли составляющей $P_{\text{уд.вп}}$ в $\Delta P_{\text{уд}}$). С учетом близкого к линейному характеру зависимостей $P_{\text{уд}}/B_m(B_m)$ для обеих сталей: 2412 (рис.1а) и 3406 (рис.4б) принимаем величину отношения их удельных потерь в рабочем диапазоне индукций B_m неизменной.

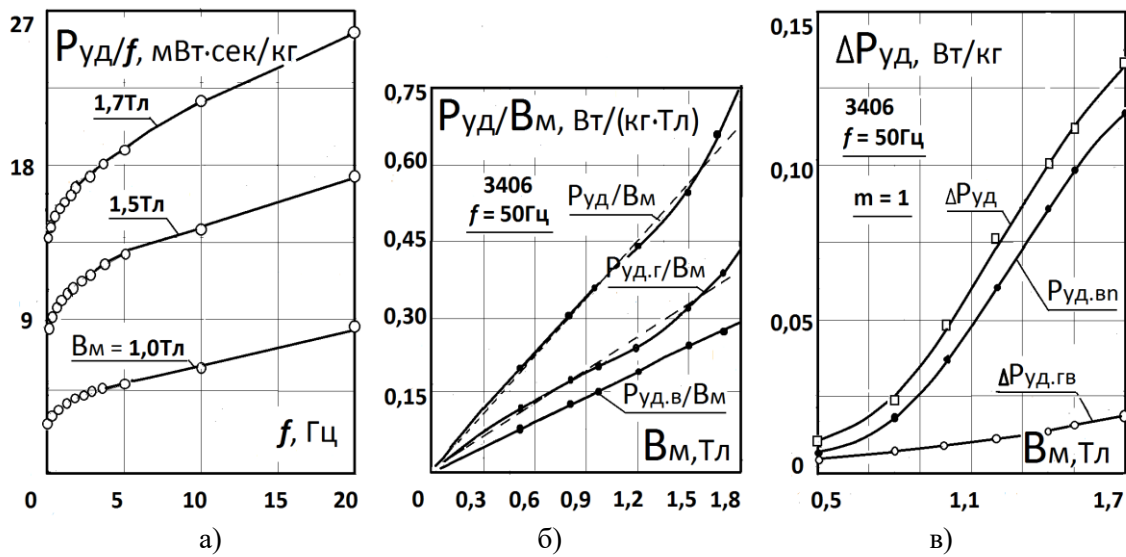


Рис. 4. а – зависимости удельных потерь за один цикл перемагничивания $P_{уд}/f$ от f при различных V_m текстурованной холоднокатаной стали в диапазоне частот $f = (0 \div 20)$ Гц по данным [14]; б – зависимости структурных составляющих удельных потерь $P_{уд}/V_m$ от V_m при $f = 50$ Гц в текстурованной стали 3406 с учетом влияния динамического дробления ДС; в – зависимости относительного прироста потерь $\delta P(V_m)$ в С.№ 2 из стали 3406 со стыками при $f = 50$ Гц и $m = 1$ и структурных составляющих $\delta P_{гв}(V_m)$ и $\delta P_{вп}(V_m)$

5. Из-за отличия конструкций МС степень влияния стыков на прирост удельных потерь $\Delta P_{уд}$ в разных сердечниках различна. Для сопоставления степени влияния стыков на прирост потерь в [4] введена величина q -кратность доли стыков в МС, как отношение объема стали зоны стыков $G_{ст}$ к общему объему стали сердечника G , которую удобно принять равной отношению суммарной длины стыков сердечника $L_{ст}$ к общей длине средней силовой линии $L_{ср}$:

$$q = L_{ст} / L_{ср} \tag{16}$$

6. При анализе результатов экспериментальных исследований сердечников С.№ 1 и С.№ 2 [4] была установлена зависимость прироста удельных потерь и их составляющих в стыке от толщины позиции шихтовки:

$$\Delta P_{уд} \equiv \Delta P_{уд.гв} \equiv P_{уд.вп} \equiv (m \cdot d)^{0,72} \tag{17}$$

7. И, наконец, настоящими исследованиями экспериментально определено наличие зависимости (15) прироста удельных потерь $P_{уд.вп}$ от ширины пластин сердечника b .

В соответствии с перечисленными рекомендациями получаем следующие формулы для пересчета относительных значений составляющих прироста удельных потерь $\delta P_{вп}$ и $\delta P_{гв}$ в сердечнике С.№ 2 по значениям сердечнике С.№ 2 при различных значениях V_m :

$$\delta P_{вп2} = \delta P_{вп1} \cdot K_p / (K_q \cdot K_m \cdot K_d \cdot K_b); \delta P_{гв2} = \delta P_{гв1} / (K_q \cdot K_m \cdot K_d) \tag{18}$$

$$\text{где } K_q = q_1 / q_2 = 1,68; K_m = \left(\frac{m_1}{m_2}\right)^{0,72} = 4,47; K_d = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{0,72} = 1,44;$$

$$K_b = \sqrt{b_1/b_2} = 0,71; K_p = P_{уд.1} / P_{уд.2} = 5,11 \tag{19}$$

коэффициенты пересчета, значения которых для условий С.№ 1 и С.№ 2 определены в [4]. Результаты расчета прироста удельных потерь в стыках для $f = 50$ Гц и различных V_m в сердечнике С.№ 2 из стали 3406 при $m = 1$ на основе имеющихся данных о приросте потерь в стыках сердечника С.№ 1 из стали 2412 при $m = 8$ (табл. 1 и рис. 1а,б) и использования коэффициентов пересчета (18) и формул (17) сведены в табл. 3. Значения $\Delta P_{уд.гв.2}(V_m)$ и $P_{уд.вп.2}(V_m)$ выделены жирным шрифтом. Полученные зависимости прироста удельных потерь в стыках С.№ 2 проиллюстрированы графиками на рис.4в. Из табл. 3 следует увеличение значений отношения составляющих потерь $P_{уд.вп} / \Delta P_{уд.гв}$ с ростом V_m .

Таблица 3

Пересчет значений составляющих прироста удельных потерь с сердечника С№ 1 из стали 2412 ($m = 8$) на сердечник С№ 2 из стали 3406 ($m = 1$) при $f=50$ Гц и различных $Вм$

Вм	$\Delta В$	$\delta P_{Гв1}$	$\delta P_{Вн1}$	$\delta P_{Гв2}$	$\delta P_{Вн2}$	Руд.2	$\Delta P_{Руд.гв.2}$	$P_{Руд.вн.2}$	$\Delta P_{Руд.2}$	$P_{Руд.вн} / \Delta P_{Руд.гв}$
Тл		%		%		Вт/кг				
0,5	≈ 0	29	5,5	2,68	3,68	0,098	0,0026	0,0036	0,0062	1,4
0,8	- 0,20	29	11	2,68	7,33	0,235	0,0063	0,0172	0,0235	2,7
1,0	- 0,25	29	16	2,68	10,7	0,360	0,0097	0,0385	0,0482	4,0
1,2	- 0,30	26,7	17,8	2,42	11,9	0,531	0,0131	0,0632	0,0763	4,8
1,4	- 0,35	24	18	2,22	12,0	0,716	0,0159	0,0859	0,102	5,4
1,5	- 0,35	22,6	17,3	2,06	11,5	0,826	0,0170	0,0952	0,112	5,6
1,7	- 0,35	19	15,2	1,76	10,1	1,14	0,0201	0,115	0,135	5,7

Заключение о возможных вариантах снижения прироста потерь в стыках шихтованных сердечников

Таким образом, для снижения прироста удельных потерь $\Delta P_{Руд}$ в сердечнике со стыками необходимо использовать шихтовку с наименьшим значением m , применять сталь с наиболее низким уровнем удельных потерь $P_{1,7/50}$ ($P_{Руд}$ при $Вм = 1,7$ Тл и $f = 50$ Гц) и минимальных толщин d . При этом необходимо учитывать доминирующий уровень $P_{Руд.вн}$ в приросте удельных потерь в стыках $\Delta P_{Руд}$ (рис.4в). При ширине пластин $b_2 = 0,12$ м П-образного сердечника С№ 2 из текстурованной стали 3406 с отношением составляющих прироста потерь при $Вм = 1,7$ Тл $P_{Руд.вн}/\Delta P_{Руд.гв} = 5,7$ (табл. 3) доля $P_{Руд.вн}$ в приросте удельных потерь в стыках (2) составляет $\delta P_{Руд.вн} = 0,115/0,135 \cdot 100\% = 85\%$.

Если вместо стали 3406 с $d = 0,3$ мм и $P_{1,7/50} = 1,14$ Вт/кг в сердечнике С№ 2 при $m = 1$ взять лучшую по свойствам текстурованную сталь, например, с $P_{1,7/50} = 0,57$ Вт/кг при $d = 0,15$ мм (Япония) [8], то доля $P_{Руд.вн}$ в приросте удельных потерь $\Delta P_{Руд}$ еще более возрастет. Пример расчета составляющих прироста удельных потерь для такого варианта представлен в табл. 4. В случае использования формул (19), (20) с новыми значениями коэффициентов пересчета (18) при общем снижении $\Delta P_{Руд}$ в 1,78 раза получаем отношение $P_{Руд.вн}/\Delta P_{Руд.гв} = 11,4$, то есть с долей в приросте $\delta P_{Руд.вн} = 0,0697/0,0757 \cdot 100\% = 92\%$ (табл. 4).

Таблица 4

Пересчет значений составляющих прироста удельных потерь в С№ 2 для $m=1$ со стали 3406 на перспективную японскую сталь [8] при $f=50$ Гц и $Вм=1,7$ Тл

	q	m	$d, \text{мм}$	$P_{Руд}, \text{Вт/кг}$	$\Delta P_{Гв}, \text{Вт/кг}$	$P_{Вн}, \text{Вт/кг}$	$\Delta P_{Руд}, \text{Вт/кг}$
(1) - сталь 3406	1/3,7	1	0,3	1,14	0,0201	0,115	0,135
$Kq = 1$ $Km = 1$ $Kd = \left(\frac{0,3}{0,15}\right)^{0,72} = 1,65$ $Kb = 1$ $Kp = 1,14/0,57 = 2$	$P_{Вн(2)} = P_{Вн(1)}/(Kq \cdot Km \cdot Kd \cdot Kb) = 0,115/1,65 = 0,0697 [\text{Вт/кг}]$ (19) $\Delta P_{Гв(2)} = \Delta P_{Гв(1)}/(Kq \cdot Km \cdot Kd \cdot Kp) = 0,0201/3,3 = 0,00609 [\text{Вт/кг}]$ (20) $\Delta P_{Руд} (2) = \Delta P_{Гв(2)} + P_{Вн(2)} = 0,00609 + 0,0697 = 0,0758 [\text{Вт/кг}]$ Отношение: $P_{Вн(2)}/\Delta P_{Гв(2)} = 0,0697/0,00609 = 11,4$						
(2) - сталь Япон. [8]	1/3,7	1	0,15	0,57	0,00609	0,0697	0,0757

С увеличением ширины пластин b магнитопроводов (например, с ростом мощности трансформаторов) величина удельных потерь в стыках на вихревые токи $P_{Руд.вн}$ также возрастает в \sqrt{b} раз, тем самым обеспечивая общий прирост потерь $\Delta P_{Руд}$ в сердечниках. Для существенного снижения $P_{Руд.вн}$ в соответствии с (14), (15) по результатам расчета распределения

магнитного поля и проведенных экспериментов с С№ 1 можно рекомендовать определенным образом наносить прорезы на пластинах сердечников в зоне стыков.

Использование кольцевого шихтованного сердечника С№ 1 из холоднокатаной динамной стали 2412 и П-образного – С№ 2 из текстурованной стали 3406 с применением специальной методики эксперимента [4] позволили произвести разделение прироста потерь в косых стыках на структурные составляющие $\Delta P_{уд.гв}$ и $P_{уд.вл}$ (2), определить характер зависимости каждой составляющей от внутренних факторов (параметров стыка: перекрытия пластин t , технологического воздушного зазора z , ширины b и толщины пластин d и их числа в шихтовке m) и внешних (степени насыщения стали, связанной с величиной индукции B_m и уровня динамики, зависящего от частоты перемагничивания f). Фактически доказано, что основную часть прироста удельных потерь в стыках сердечников трансформаторов представляют потери $P_{уд.вл}$. Причем чем выше уровень магнитных свойств текстурованной стали, тем больше доля потерь $P_{уд.вл}$, зависящих практически только от параметров: d , m , b и удельной электропроводности стали γ (при заданных рабочих значениях B_m и f). Показана возможность контролируемого снижения $P_{уд.вл}$ в стыках путем нанесения в зоне стыков прорезей определенным образом на основании результатов расчета распределения магнитного поля.

В следующей части работы на основе результатов дополнительных исследований будут представлены материалы о возможности прогнозирования прироста удельных потерь в стыках шихтованных сердечников.

Библиографический список

1. **Лизунов, С.Д.** Итоги Сессии СИГРЭ 1988 г. Трансформаторостроение / С.Д. Лизунов // Электричество. – 1989. – №8. – С. 37 – 45.
2. **Тихомиров, П.М.** Расчет трансформаторов / П.М Тихомиров. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
3. **Кравченко, А.Н.** Анализ эффективности мероприятий по снижению добавочных потерь в мощных силовых трансформаторах / А.Н. Кравченко // Соврем. пробл. энерг. Электроэнерг. Оборуд.: Тезисы докладов Четвертой респ. научн.-техн. конф. – Киев, 1985. – С. 88-89.
4. **Калинин, Е.В.** Потери в стыках шихтованных сердечников. Часть 1. Экспериментальное исследование основных влияющих факторов прироста электромагнитных потерь / Е.В. Калинин // Актуальные проблемы электроэнергетики: сборник статей. – Нижний Новгород, 2018. – С. 53-61.
5. **Калинин, Е.В.** Исследование влияния стыков на потери в шихтованных сердечниках / Е.В. Калинин, О.А. Любарский // Электропривод и автоматизация промышленных установок. Межвуз. сборник научных трудов – Нижний Новгород, 1987. – С. 51-55.
6. **Bavay, J.C.** Les tôles magnétiques á orientés. L'amélioration des performances / J.C. Bavay // Rev. Gen. Elec. – 1989. – № 11. – P. 32 – 36, VII.
7. **Takahashi, N.** Production of very low core loss grain-oriented silicon steel / N. Takahashi, Y. Ushigami // IEEE Trans. Magn. – 1986. – 22, № 5. – P. 490-495.
8. **Nosawa, T.** Magnetic properties and domain structures in domain refined grain-oriented silicon steel / T. Nosawa, Y. Matsuo // J. Appl. Phys. – 1988. – 63, № 8, Pt. 2A. – P.2966-2970.
9. **Černý, V.** Příspěvek k problematice vířivých proudů ve spojích transformátorových plechů / V. Černý // Elektrotechnický obzor, SV72. – 1983. – № 11. – S. 651-652.
10. **Nakata, T.** Магнитные характеристики стыков сегментов сердечника статора / T. Nakata, Y. Kawase, S. Moriyasa // Дэнки гаккай ромбунси, Trans. Inst. Elec. Eng. Jap. – 1987. – D 107, № 1. – P. 109-114.
11. **Qader, A.A.** Building factor of a 100 kVA 3 phase distribution transformer core / A.A. Qader, A. Basak // IEEE Trans. Magn. – 1982. – 18, № 6. – P. 1487-1489.
12. **Зайкова, В.А.** Доменная структура и магнитные свойства электротехнических сталей / В.А. Зайкова, И.Е. Старцева, Б.Н. Филиппов. – М.: Наука, 1992. – 272с.
13. **Калинин, Е.В.** Магнитное поле в анизотропном шихтованном сердечнике. Часть 1. Рекомендации к определению степени магнитной анизотропии холоднокатаных электротехнических сталей / Е.В. Калинин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2018. – № 2 (121). – С. 96-105.
14. **Дружинин, В.В.** Магнитные свойства электротехнических сталей / В.В. Дружинин. – М.: Энергия, 1974. – 240 с.

15. Ламмеранер, Й. Вихревые токи / Й. Ламмеранер, М. Штафль. – М.: Энергия, 1967. – 208 с.
16. Sharples, K.O. A study of the effect of core slitting on the power loss density in the limbs of generator transformers / K.O. Sharples // Proc. Int. Conf. Elec.Mach., Budapest, 5-9 Sept., 1982. Pt. 2. – Budapest, 1982. – P. 700-702.
17. Čech, D. Kovový pás pro magnetické obvody elektrických strojů a přístrojů a způsob jeho výroby / D. Čech, V. Havlíček, // А.с. 239285. ЧССР. Заявл. 02.09.83, № PV6403-83, опубл. 16.02.87. МКИ Н 01 F 3/4.
18. Калинин, Е.В. Магнитное поле в анизотропном шихтованном сердечнике. Часть 2. Экспериментальное обоснование применения при расчетах магнитного поля векторных характеристик намагничивания холоднокатаных электротехнических сталей / Е.В. Калинин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2018. – № 3 (122). – С.71-80.

*Дата поступления
в редакцию 27.09.2018 г.*

E.V. Kalinin, E.A. Chernov

LOSSES AT THE JOINTS OF LAMINATED CORES. INVESTIGATION OF THE POSSIBILITIES OF REDUCING THE INCREASE OF LOSSES

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alekseev

Purpose: To analyze the influence of various factors on the increase in losses in the oblique joints to reduce losses in the laminated cores of powerful power transformers from cold-rolled electrical steel.

Methodology: Experimental study of the increase in specific losses $\Delta P_{уд}$ as the difference in specific losses: first, a continuous ring-shaped laminated core (without joints) - $P_{уд}$, and then this core with the joints - $P_{уд.ст}$, at different values of the amplitude of the magnetic induction B_m at two frequencies $f=50$ and 400Hz . Used unconventional structural components of the growth of specific losses: $\Delta P_{уд.гв}$ – on hysteresis and eddy currents from redistribution of the main (tangential) magnetic flux and $\Delta P_{уд.вн}$ – on eddy currents from normal component of the magnetic flux in the joint.

Results: The correctness of the use of the selected structure of the increase in losses in oblique joints is confirmed. It is revealed that for cores made of textured steels the main part of the increase in specific losses (>85%) falls on the component of $\Delta P_{уд.вн}$. Measures are proposed to reduce the increase in losses at the joints.

The value of research: It is shown that the dynamics of energy processes associated with the formation of $\Delta P_{уд.вн}$ consistent with a sharp surface effect. A significant reduction of $\Delta P_{уд.вн}$ was experimentally obtained by drawing on a core of the plate in the joint zone of the special slits.

Novelty / value: Proposed structure of the growth of specific losses in the oblique joints of laminated cores and the feature of the character of the dependence of the components of $\Delta P_{уд.гв}$ and $\Delta P_{уд.вн}$ from B_m and f . Practical recommendations for significant reduction of $\Delta P_{уд}$ in powerful power transformers are given.

Keywords: laminated transformer cores, cold-rolled electrical steel, oblique joints, experimental study, reduce losses, special slits.

УДК 681.5

Н.М. Кузнецов¹, И.Н. Морозов²**ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ
В УПРАВЛЕНИИ ВОДООТЛИВНЫМИ УСТАНОВКАМИ**Кольский научный центр РАН, г. Апатиты¹,
Мурманский арктический государственный университет²

В статье рассмотрена возможность применения нейросетевого регулирования при создании автоматизированной системы регулирования процесса водоотлива. Для достижения поставленной цели была разработана и детально описана процедура настройки системы регулирования водоотливной установки с использованием нейросетевого регулятора. Для определения адекватности предлагаемой системы регулирования было произведено имитационное моделирование в среде Matlab приложении Simulink. По полученным переходным процессам определялись качественные показатели системы регулирования: величина перерегулирования, время регулирования, статическая ошибка. Анализ показателей качества регулирования позволил сделать вывод о том, что автоматическая система регулирования с нейросетевым регулятором обладает требуемым запасом устойчивости и удовлетворяет требованиям к системе регулирования водоотливной установки.

Ключевые слова: имитационное моделирование, Matlab, нейрорегулирование, система автоматического регулирования.

Введение

Технико-экономическая проработка вариантов электроснабжения предприятий и внедрения нового технологического оборудования с целью повышения энергоэффективности обретает в наши дни огромную актуальность [1-4]. Для повышения точности прогнозирования электропотребления в горной промышленности [5-8] и управление режимами работы электроприводов [9-11] осуществляются с применением математических методов моделирования. Искусственные нейронные сети в настоящее время нашли широкое применение в робототехнике [12] в процессе создания систем управления электроприводами [13-15]. Целью данной работы является изучение действующей системы электропривода водоотливной установки рудника и оценка возможности применения нейросетевого регулирования. При отсутствии системы автоматизации (ручное управление) на таком ответственном объекте насосное оборудование используется неэффективно: слишком велико влияние на производственный процесс человеческого фактора (работа водоотливной установки во многом зависит от квалификации дежурного персонала, от скорости приема и передачи распоряжений). Тем самым затрудняется производство горных работ и приводит к временному прекращению добычи руды с подтопленных горизонтов. Безотказная и экономичная работа водоотлива возможна при использовании совершенной системы автоматики, которая позволит сократить число аварийных отключений, обеспечить бесперебойность откачки воды, экономии электроэнергии, сократить затраты на ремонт оборудования и сократить число обслуживающего персонала, то есть обеспечить надежную и безопасную работу водоотливной установки. Оценка возможности применения нейросетевого регулирования в системе управления водоотливными установками проводилась на примере водоотливной установки горизонта +310 м Расвумчоррского рудника АО «Апатит».

Расчет и моделирование существующей системы регулирования

Структурная схема регулирования скорости асинхронного двигателя водоотливной установки при питании его от преобразователя частоты на основе автономного инвертора напряжения, с управлением по вектору потокосцепления статора представлена на рис 1.

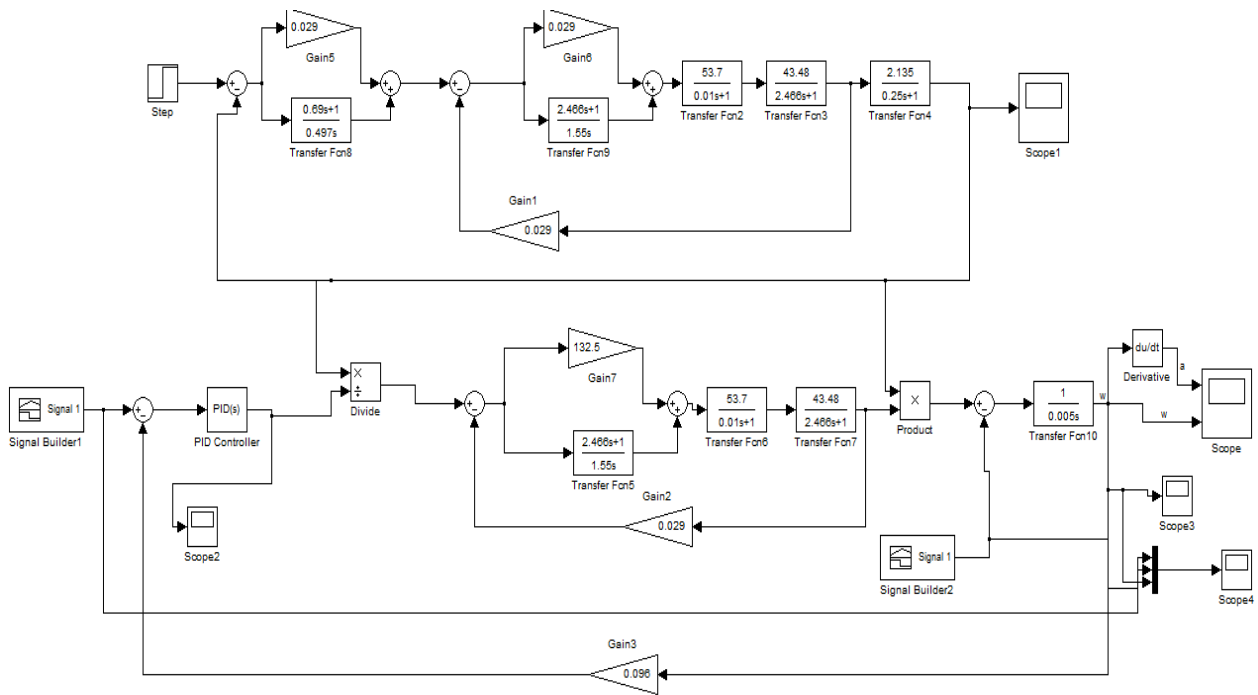


Рис. 2. Имитационная модель электропривода водоотливной установки

Результат моделирования представлен на рис. 3.

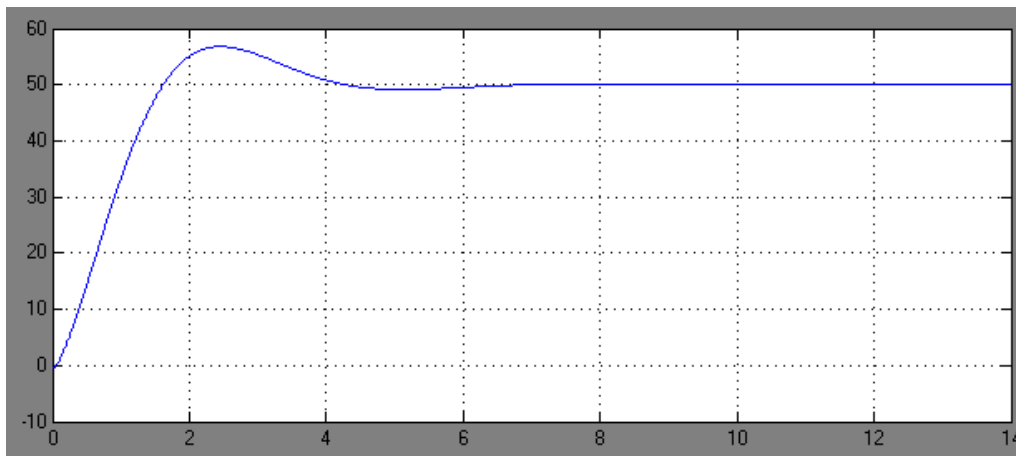


Рис. 3. Результат моделирования

По результату моделирования (рис. 3) определяли качественные показатели системы регулирования давления насосной установки при использовании ПИ-регулятора давления:

- перерегулирование при пуске:

$$\gamma_n^{III} = \frac{h_{\max} - h_{уст}}{h_{уст}} \cdot 100\% = \frac{56,8 - 50}{50} \cdot 100\% = 13,6\%$$

- время переходного процесса при пуске: $t_n^{III} = 6,4$ сек.;
- статическая ошибка отсутствует.

Настройка и моделирование системы регулирования с нейросетевым регулятором

Для оценки возможности применения нейросетевого регулирования в работе предлагается использовать нейрорегулятор NN Predictive Controller. Модель системы автоматического

регулирования давления насосной установки с использованием нейросетевого регулятора NN Predictive Controller показана на рис. 4.

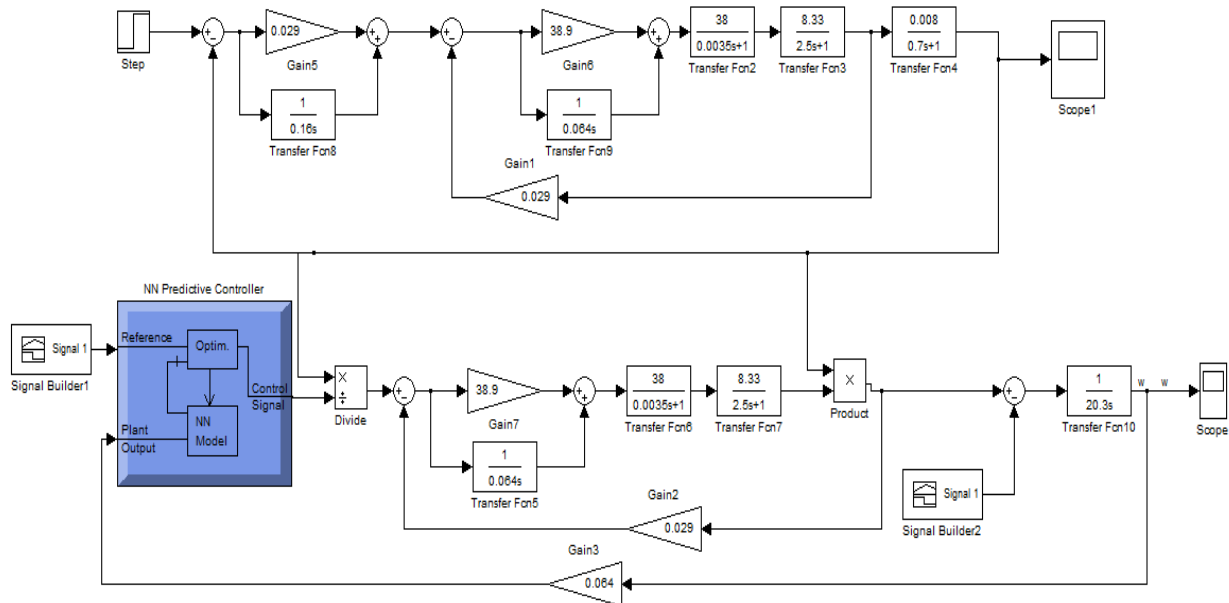


Рис. 4. Имитационная модель электропривода водоотливной установки с применением нейросетевого регулятора NN Predictive Controller

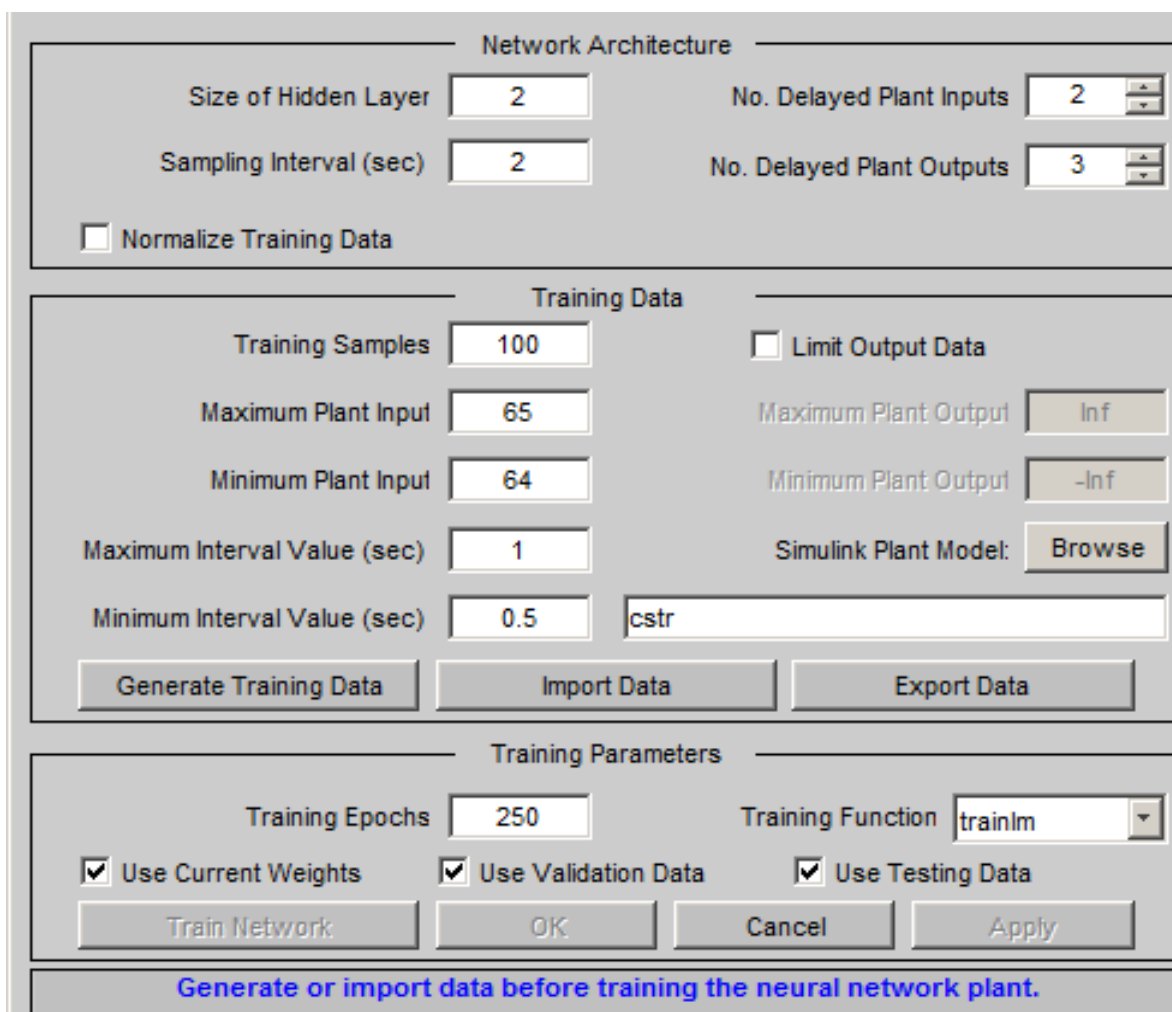
Для настройки блока NN Predictive Controller использовалось первичное окно настройки нейросети, которую данный блок реализует (рис. 5).

Neural Network Predictive Control

Cost Horizon (N2) <input style="width: 80%;" type="text" value="2"/>	Control Weighting Factor (ρ) <input style="width: 80%;" type="text" value="2"/>
Control Horizon (Nu) <input style="width: 80%;" type="text" value="2"/>	Search Parameter (α) <input style="width: 80%;" type="text" value="2"/>
Minimization Routine <input style="width: 80%;" type="text" value="csrchbac"/>	Iterations Per Sample Time <input style="width: 80%;" type="text" value="70"/>
<input type="button" value="Plant Identification"/>	<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancel"/> <input type="button" value="Apply"/>
Perform plant identification before controller configuration.	

Рис. 5. Настройки NN Predictive Controller

В данном окне указывались параметры структуры сети и параметры минимизации. Затем необходимо нажатием клавиши PlantIdentification вызвать окно, показанное на рис. 6.



Network Architecture

Size of Hidden Layer: 2

Sampling Interval (sec): 2

No. Delayed Plant Inputs: 2

No. Delayed Plant Outputs: 3

Normalize Training Data

Training Data

Training Samples: 100

Maximum Plant Input: 65

Minimum Plant Input: 64

Maximum Interval Value (sec): 1

Minimum Interval Value (sec): 0.5

Limit Output Data

Maximum Plant Output: Inf

Minimum Plant Output: -Inf

Simulink Plant Model: Browse

cstr

Generate Training Data Import Data Export Data

Training Parameters

Training Epochs: 250

Training Function: trainlm

Use Current Weights Use Validation Data Use Testing Data

Train Network OK Cancel Apply

Generate or import data before training the neural network plant.

Рис. 6. Параметры управляющего воздействия на объект регулирования

В окнах Maximum и MinimumPlantInput указывались параметры управляющего воздействия на объект регулирования. В окнах Maximum и MinimumIntervalValue указывался временной промежуток, с которого начнется процесс регулирования. После чего с помощью обучающей последовательности данных производилась настройка весовых коэффициентов регулятора. Результаты обучения представлены на рис. 7.

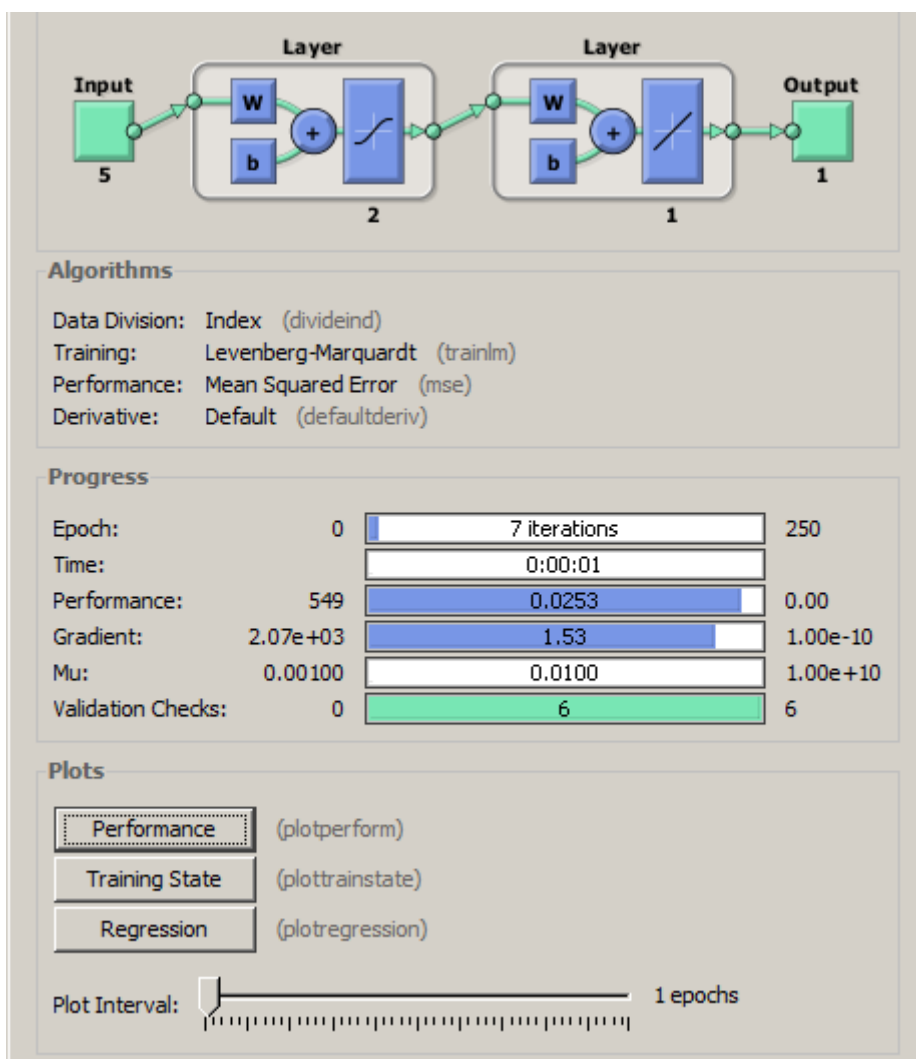


Рис. 7. Результаты обучения нейросетевого регулятора

Результат моделирования системы регулирования с нейросетевым регулятором представлен на рис. 8.

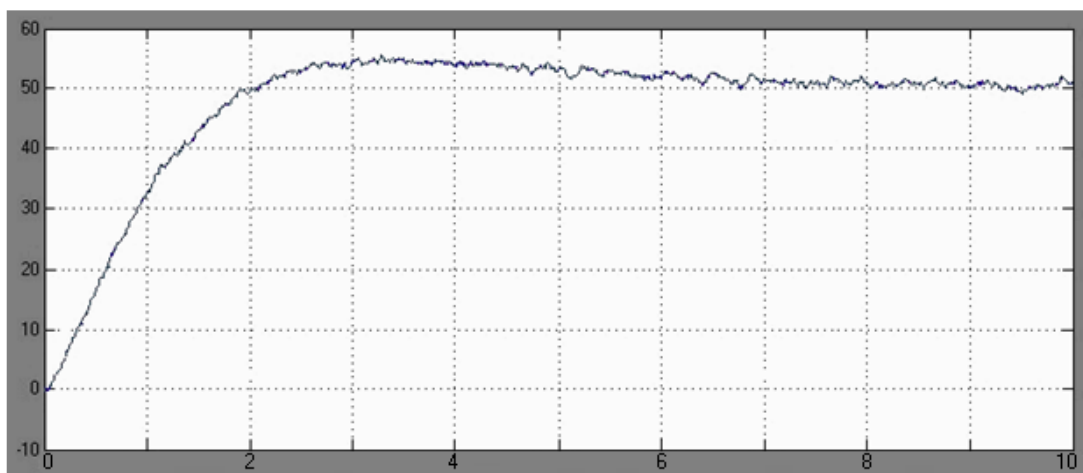


Рис. 8. Результат моделирования с применением нейросетевого регулятора NN Predictive Controller

По полученному результату моделирования (рис. 8) определяли качественные показатели системы регулирования давления насосной установки при использовании нейросетевого регулятора давления:

- перерегулирование при пуске:

$$\gamma_n^{\text{ПДД}} = \frac{h_{\text{max}} - h_{\text{уст}}}{h_{\text{уст}}} \cdot 100\% = \frac{55,7 - 50}{50} \cdot 100\% = 11,4\%$$

- время переходного процесса при пуске: $t_n^{\text{ПДД}} = 8 \text{ сек}$;

Заключение

При применении нейросетевого регулятора в переходном процессе появляются незначительные колебания, наблюдается снижение величины перерегулирования и увеличение времени переходного процесса. Тем не менее, данные отклонения работы системы с нейрорегулятором удовлетворяют требованиям к системе регулирования водоотливной установки и позволяют незначительно снизить скачок давления при пуске установки. Наблюдения показывают, что на результаты работы системы с нейрорегулятором значительно влияет объем обучающих выборок для настройки и обучения нейросетевой структуры регулятора. При наличии больших объемов обучающих последовательностей возможна более точная настройка весовых коэффициентов нейросети, что позволит добиться лучших показателей качества регулирования.

Библиографический список

1. **Голубцов, Н.В.** Инновации в энергетике / Н.В. Голубцов. – М.: ИНФРА-М, 2010. – 250 с.
2. **Федоров, О.В.** Энергосберегающая политика / О.В. Федоров, А.Б. Дарьенков. – М.: КноРус, 2015. – 294 с.
3. **Федоров, О.В.** Инвестиции в электроснабжение предприятий: учебное пособие / О.В. Федоров, Н.М. Кузнецов. – Новосибирск: Наука, 2010. – 120 с.
4. **Федоров, О.В.** Оценка эффективности частотно-регулируемых электроприводов / О.В. Федоров. – М.: Инфра-М, 2011. – 144 с.
5. **Абрамович, Б.Н.** Система прогнозирования энергопотребления с применением искусственной нейронной сети / Б.Н. Абрамович, И.С. Бабанова // Горные науки и технологии. – 2016. – № 2. – С. 66-77.
6. **Кузнецов, Н.М.** Рациональное электропотребление на горнодобывающих и горно-обогатительных предприятиях / Н.М., Кузнецов, В.И. Щуцкий. – Апатиты: Кольский научный центр РАН, 1997. – 211 с.
7. **Кузнецов, Н.М.** Моделирование потребляемой мощности шаровой мельницы / Н.М. Кузнецов, И.Н. Морозов // Горные науки и технологии. – 2016. – № 4. – С. 50-58.
8. Кузнецов, Н.М. Эффективность потребления электроэнергии на горных предприятиях / Н.М. Кузнецов // Актуальные проблемы электроэнергетики: сборник статей. – Нижний Новгород, 2018. – С. 267-272.
9. **Фащиленко, В.Н.** Регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок горных предприятий: учеб. пособие / В.Н. Фащиленко. – М.: Горная книга, 2011. – 260 с.
10. **Федоров, О.В.** Частотно-регулируемый электропривод в экономике страны / О.В. Федоров. – М.: Издательский Дом «Инфра-М», 2011. – 142 с.
11. **Кузнецов, Н.М.** Применение частотно-регулируемого электропривода на насосных станциях / Н.М. Кузнецов, А.А. Колмаков // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. – 2008. – Т. 70. – С. 112-115.
12. **Theodoridis, D.C.** A new adaptive neuro-fuzzy controller for trajectory tracking of robot manipulators / D.C. Theodoridis, Y.S. Boutalis, M.A. Christodoulou // International Journal of Robotics and Automation. – 2011. – Vol. 26, № 1. – P. 64-75.
13. **Masood, M.K.** Review of anfis-based control of induction motors / M.K. Masood, W.P. Hew, N.A. Rahim // Journal of Intelligent and Fuzzy Systems. – 2012. – Vol. 23, № 4. – P. 143-158.

14. **Jeong, S.** Neuro-robotics study on integrative learning of proactive visual attention and motor behaviors / S. Jeong, M. Lee, H. Arie, J. Tani // *Cognitive Neurodynamics*. – 2012. – Vol. 6, № 1. – P. 43-59.
15. Douiri M.R., Belghazi O., Cherkaoui M. Recurrent self-tuning neuro-fuzzy for speed induction motor drive / M.R. Douiri, O. Belghazi, M. Cherkaoui // *Journal of Circuits, Systems, and Computers*. – 2015. – Vol. 24, № 9. – P. 1550131.

Дата поступления

в редакцию: 16.10. 2018

N.M. Kuznetsov¹, I.N. Morozov²
APPLICATION OF NEURAL NETWORK CONTROLLER
IN THE CONTROL OF PUMP PLANT

Northern energetics research centre – Branch of the federal research centre
«Kola science centre of the Russian academy of sciences», Apatity¹,
Murmansk arctic state university, Murmansk²

Purpose: The purpose of the research in this work is to create a system of neural network regulation for the control of pump plant.

Design/methodology/approach: Methods of analysis include theoretical studies of technical documentation of systems for regulating pumping plants, mathematical modeling of systems using the MatLab software package using the Simulink application.

Findings: As a result of the research, theoretical studies were conducted on the feasibility of applying a neural network approach to the control of pump plant. A mathematical model with neural network control is developed, a comparison with existing and calculated data is carried out.

Originality/value: Development of a model of a water drainage system using a neural network controller, which allows reducing the amount of pressure overshoot in the pipeline.

Research limitations/implications: The obtained results can be applied at enterprises, the technological map of which requires the use of pumping plants to ensure the optimality of the technological process.

Conclusions: When a neural network controller is used in the transient process, slight oscillations appear, a decrease in the overshoot value and an increase in the transient time are observed. Nevertheless, these deviations of the operation of the system with the neural regulator satisfy the requirements for the regulation system of the drainage system and allow a slight reduction in the pressure drop at the start-up of the plant.

Key words: simulation modeling, Matlab, neural network control, automatic control system.

УДК 621.311

О.В. Маслеева, Р.Ш. Бедретдинов, Н.И. Эрдили

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ
ПРИ ОБСЛУЖИВАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДСТАНЦИЙ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В статье приводятся результаты исследования воздействия электромагнитного поля на оперативный персонал при обслуживании ПС напряжением 110, 220, 330 кВ с силовыми трансформаторами мощностью 6,3-1000 МВА. Приведена методика расчета напряженности электрического поля и допустимые нормы. Получены кривые распределения напряженности электрического поля при различной высоте ошиновки. Определены опасные зоны на территории электрических подстанций с повышенной величиной напряженности электрического поля для обслуживающего персонала.

Ключевые слова: электрическая подстанция, электромагнитное поле, оперативный персонал, допустимые нормы, санитарная зона.

Единая электроэнергетическая система (ЕЭС) России является уникальным организационно-техническим объектом, который обеспечивает сбалансированное единство генерации, передачи, распределения и потребления электрической энергии, гарантируя энергетическую безопасность регионов и страны в целом. Основными структурными элементами ЕЭС России являются линии электропередачи (ЛЭП) и электрические подстанции (ПС).

ПС предназначены для приема, преобразования и распределения электроэнергии и состоят из силовых трансформаторов, распределительных устройств, систем телемеханики, телеуправления и телесигнализации. ПС выполняются на напряжения 35, 110, 220 кВ и выше до 1150 кВ. На рис. 1 показано распределение ПС по классам напряжения.

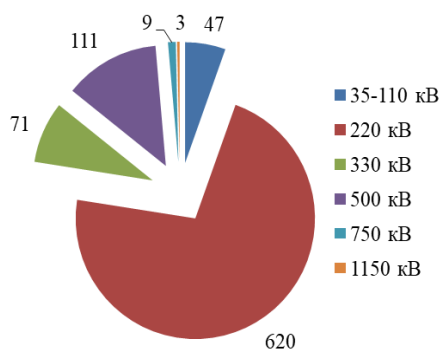


Рис. 1. Структура ПС ПАО «Россети» по классам напряжения

Одной из важнейших задач электроэнергетики является обеспечение безопасности эксплуатации объектов электросетевого комплекса. Ввиду того, что более половины ЛЭП и ПС относятся к напряжениям 110-330 кВ оценка электромагнитного поля (ЭМП), воздействующего на персонал, проводилась именно для данных классов напряжения. Оценка опасных и вредных производственных факторов на рабочих местах электротехнического персонала, обслуживающего высоковольтные установки, производится по ГОСТ 12.0.003-2015. Одним из основных производственных факторов физической природы являются ЭМП промышленной частоты. Согласно ПУЭ [8], безопасность обслуживающего персонала должна обеспечиваться выполнением мер защиты от поражения электрическим током и снижением напряженности

электрических и магнитных полей до допустимых значений. Эксплуатация систем электрообеспечения также должна соответствовать нормативным требованиям по охране окружающей среды.

Целью исследований является оценка показателей интенсивности воздействия ЭМП на ПС для определения наиболее безопасных зон на территории ОРУ с точки зрения минимального воздействия ЭМП. В дальнейшем это позволит составить наиболее оптимальные безопасные пути обхода территории ПС обслуживающим персоналом с учетом величины напряженности ЭМП.

Источники электромагнитного поля на ПС

Источниками ЭМП промышленной частоты на ПС являются силовые трансформаторы, высоковольтные разъединители, выключатели, гибкая и жесткая ошиновка, воздушные линии (рис. 2). При обходе территории ОРУ в процессе эксплуатации высоковольтного оборудования основным источником ЭМП является ошиновка, проходящая по территории ОРУ до силовых трансформаторов.



Рис. 2. Источники ЭМП на ПС

Воздействие ЭМП промышленной частоты на человека

ЭМП наносит вред человеку и окружающей природной среде – этот факт подтвержден Всемирной организацией здравоохранения, министерствами здравоохранения всех развитых стран, многочисленными научными исследованиями. Международный электромагнитный проект Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) был создан для научного разъяснения потенциальных последствий воздействия электрических и магнитных полей на здоровье населения [1]. ЭМП всех частот представляют собой одно из наиболее распространенных и быстро растущих воздействий на окружающую среду и все группы населения мира. Была выражена озабоченность в связи с тем, что воздействие магнитных полей на частотах (50/60 Гц) может привести к увеличению заболеваемости лейкемии и другим неблагоприятным последствиям для здоровья. Проект поощряет целенаправленные исследования для заполнения важных пробелов в знаниях и содействия разработке приемлемых стандартов международного уровня, ограничивающих воздействие ЭМП и включить результаты исследований в критерии экологического здоровья, в которых будут проводиться официальные оценки риска для здоровья от воздействия ЭМП.

Согласно отчету ВОЗ об ультранизкочастотных полях, анализ исследований показал влияние ЭМП на нейроповедение, нейроэндокринную систему, нейродегенеративные расстройства, сердечно-сосудистые расстройства, иммунологию и гематологию, воспроизводство и развитие, онкологические заболевания; была проведена оценка риска для здоровья и были выделены острые и хронические биологические эффекты действия электрических и магнитных полей на человека. Согласно [2], ЭМП оказывает неблагоприятное влияние на организм и при определенных условиях может послужить предпосылкой к формированию патологических состояний среди населения, подвергающегося хроническому воздействию этого излучения. При обследовании персонала, обслуживающего ПС и воздушных линий напряжением 220, 330, 400 и 500 кВ, были отмечены изменения в здоровье [3]. При напряжении 500 кВ у персонала жалобы носили неврологический характер (утомляемость, раздражительность, головная боль, снижение памяти и внимания, тремор век и пальцев рук), а также жалобы были на сердечно-сосудистую систему (тахикардия, артериальная гипертензия или гипотония, нарушение ритма и частоты сердечных сокращений, нерезко выраженные изменения состава крови) и желудочно-кишечный тракт.

Результаты периодических медицинских осмотров работников, работающих в условиях ЭМП промышленной частоты (110 и 220 кВ), выявили отсутствие профессиональных заболеваний, но показали, что наибольший удельный вес занимают болезни системы кровообращения, затем болезни глаз, далее заболевания органов пищеварения [4].

Биологическое воздействие электрического поля проявляется при длительном систематическом пребывании человека в электрическом поле. Реакция человеческого организма проявляется через сравнительно большой период (2-3 месяца) и имеет выраженный кумулятивный эффект, сильную зависимость от индивидуальных особенностей организма [5]. Оно приводит к функциональным изменениям центральной нервной и сердечно-сосудистой систем, изменению состава крови и другим патологическим изменениям.

Проведенные исследования [6] показали, что напряженность магнитного поля на территории ОРУ 500 практически в 2 раза ниже предельно-допустимого уровня (ПДУ). Анализ показал, что площадь зоны, напряженность которой превышает 5 кВ/м, составляет не более 40 % от всей территории ОРУ. Отмечено, что напряженность электрического поля возрастает между оборудованием и уменьшается при приближении к нему. В виду того, что на территории ПС напряженность магнитного поля имеет малые значения, основным фактором влияния ЭМП является воздействие напряженности электрического поля.

Нормирование напряженности электрического поля

В СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах» приводятся допустимые величины электрического поля промышленной частоты (50 Гц) [7].

Допустимые нормы электрических полей частотой 50 Гц установлены по величине напряженности электрического поля и составляют на рабочем месте в течение всей смены 5 кВ/м. При напряженности электрического поля свыше 25 кВ/м работать необходимо с применением средств индивидуальной защиты. ПДУ электрических полей промышленной частоты в условиях населенных мест составляет:

- в населенной местности вне зоны жилой застройки – 5 кВ/м;
- в ненаселенной местности – 15 кВ/м.

На открытых распределительных устройствах (ОРУ) ПС в зонах пребывания обслуживающего персонала напряженность электрического поля должна быть в пределах допустимых уровней, установленных государственными стандартами.

Методика расчета электрического поля на территории ПС

В зоне действия высоковольтных установок потенциал человека относительно земли, а также ток, протекающий через человека, определяются вертикальной составляющей напряженности электрического поля [9]. Для расчета напряженности электрического поля на территории ПС использовали методику, изложенную в работах [10, 11]. Исходными данными для расчета являются: напряжение на высокой стороне ПС, расстояние между фазами, расстояние между осями блоков линия-трансформатор, высота от ошиновки до поверхности земли, марка провода.

Высота от расчетной точки до ошиновки рассчитывается по формуле:

$$h = H - H_{ч}$$

где H – высота подвеса ошиновки, м;

$H_{ч} = 1,7$ м (высота человека).

В качестве объекта исследований выбраны наиболее часто встречающиеся в эксплуатации двухтрансформаторные ПС 110-330 кВ мощностью 6,3-1000 МВА. Ошиновка ПС выполнена гибким проводом марки АС. Расчет выполнен с учетом минимальной высоты подвеса проводов и над дорогой. Начало координат и направление оси X показаны на плане ПС. Исходные данные представлены в табл. 1. Разрез ПС показан на рис. 3.

Таблица 1

Исходные данные для расчета

Напряжение, кВ	Мощность, МВА	Расстояние			Высота		Марка провода
		между осями блоков, м	межфазное, D , м	от оси блока до забора, м	min высота	над дорогой	
110	6,3	13	2,5	10	6	11	АС-70
110	10		2,5	10	6	11	АС-70
110	16		2,5	10	6	11	АС-70
110	25	14	2,5	10	6	11	АС-95
110	32		2,5	10	6	11	АС-120
110	40		2,5	10	6	11	АС-150
110	63	16	2,5	10	6	11	АС-240
110	80		2,5	10	6	11	АС-300
220	63	23	3	10	7	14	АС-240
220	80		3	10	7	14	АС-240
220	100		3	10	7	14	АС-240
220	125		3	10	7	14	АС-240
220	160	24	3	10	7	14	АС-400
220	200		3	10	7	14	АС-400
220	250		3	10	7	14	АС-2x240
220	400	26	3	10	7	14	АС-2x240
220	630	29	3	10	7	14	АС-2x400
220	1000	30	3	10	7	14	АС-2x400
330	125	25	4	10	8	16	АС-240
330	200		4	10	8	16	АС-400
330	250	26	4	10	8	16	АС-2x240
330	400		4	10	8	16	АС-2x240
330	630	27	4	10	8	16	АС-2x400
330	1000	30	4	10	8	16	АС-2x400

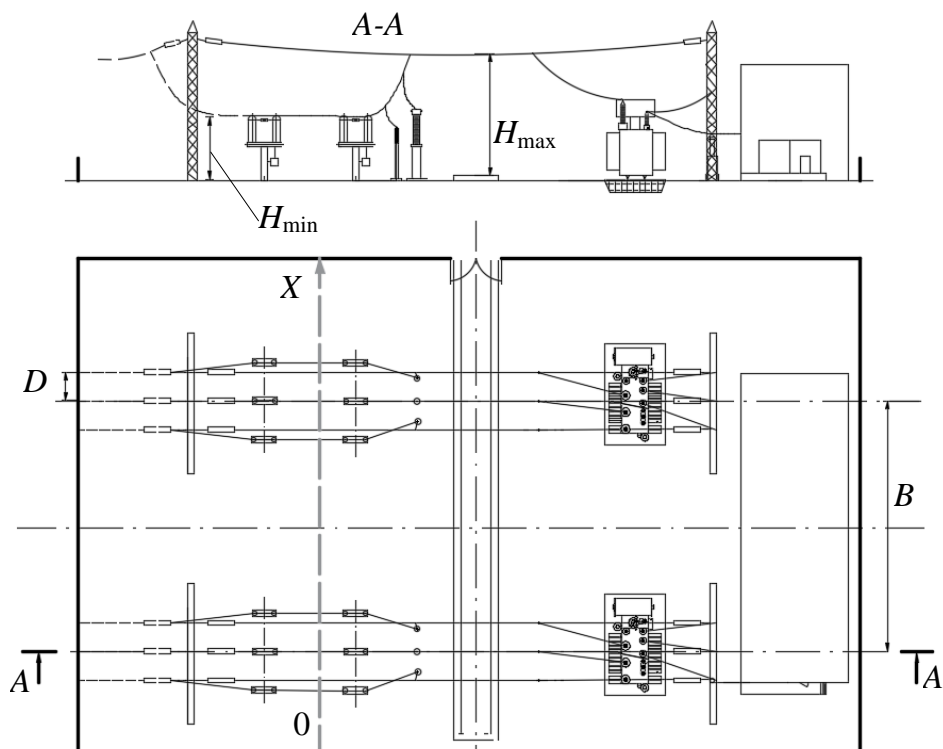


Рис. 3. План и разрез ПС

Ниже приведен расчет для ПС с напряжением 330 кВ. На подстанции установлены два силовых трансформатора мощностью по 1000 МВА. Расстояние между фазами – 4 м. Минимальная высота подвеса 8 м. Высота над дорогой 16 м. Ошиновка выполнена проводом АС 2х400. Расстояние между осями блоков 30 м.

Результаты расчета напряженности электрического поля приведены на рис. 4 для минимальной высоты подвеса провода, на рис. 5 – над дорогой.

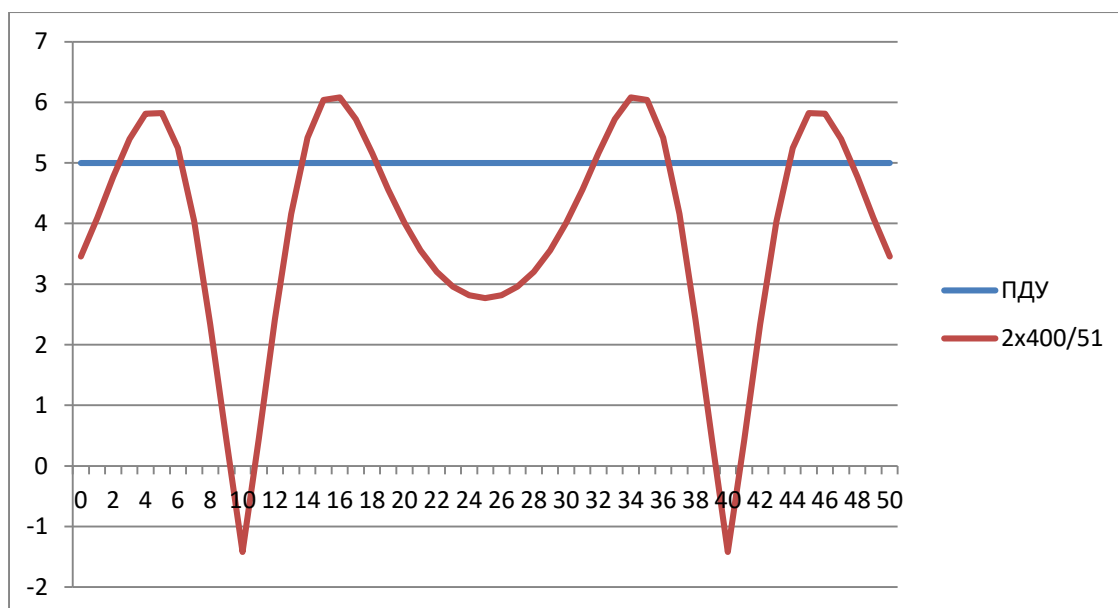


Рис. 4. Результаты расчета напряженности электрического поля для минимальной высоты подвеса

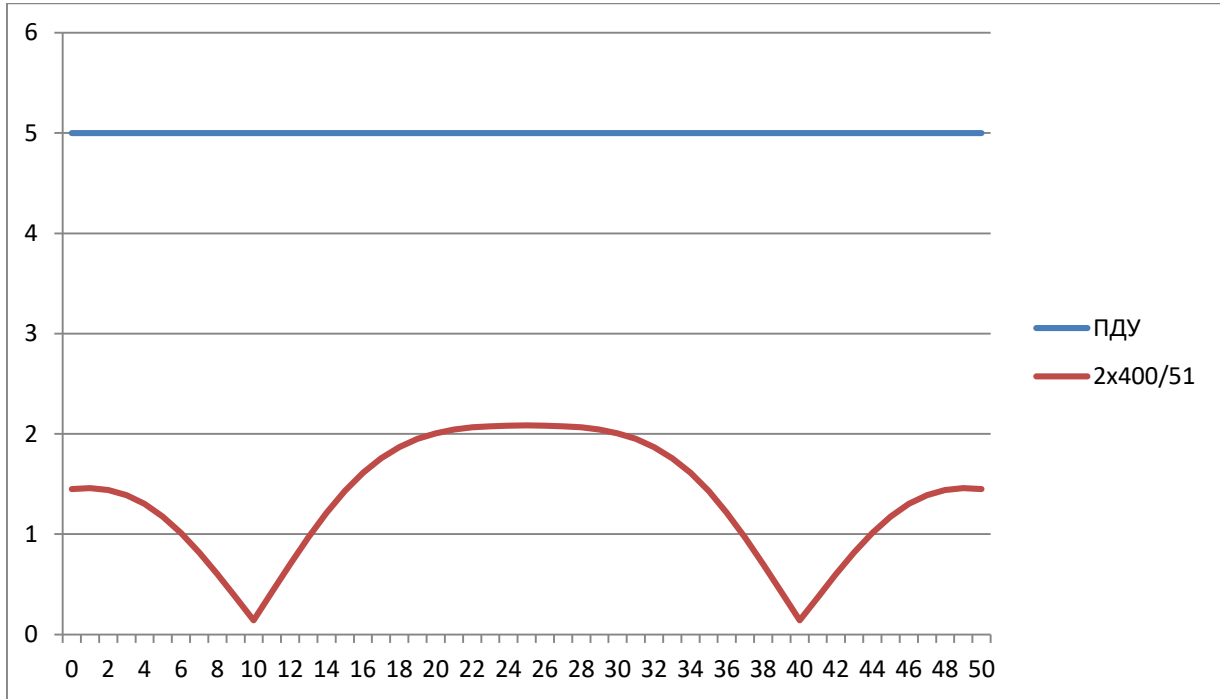


Рис. 5. Результаты расчета напряженности электрического поля над дорогой

В точках с координатами 10 и 40 находятся оси блоков линия-трансформатор.

Результаты расчета напряженности электрического поля в зависимости от мощности трансформаторов для напряжения 110, 220, 330 кВ приведены на рис. 6 для минимальной высоты подвеса провода, на рис.7 – над дорогой.

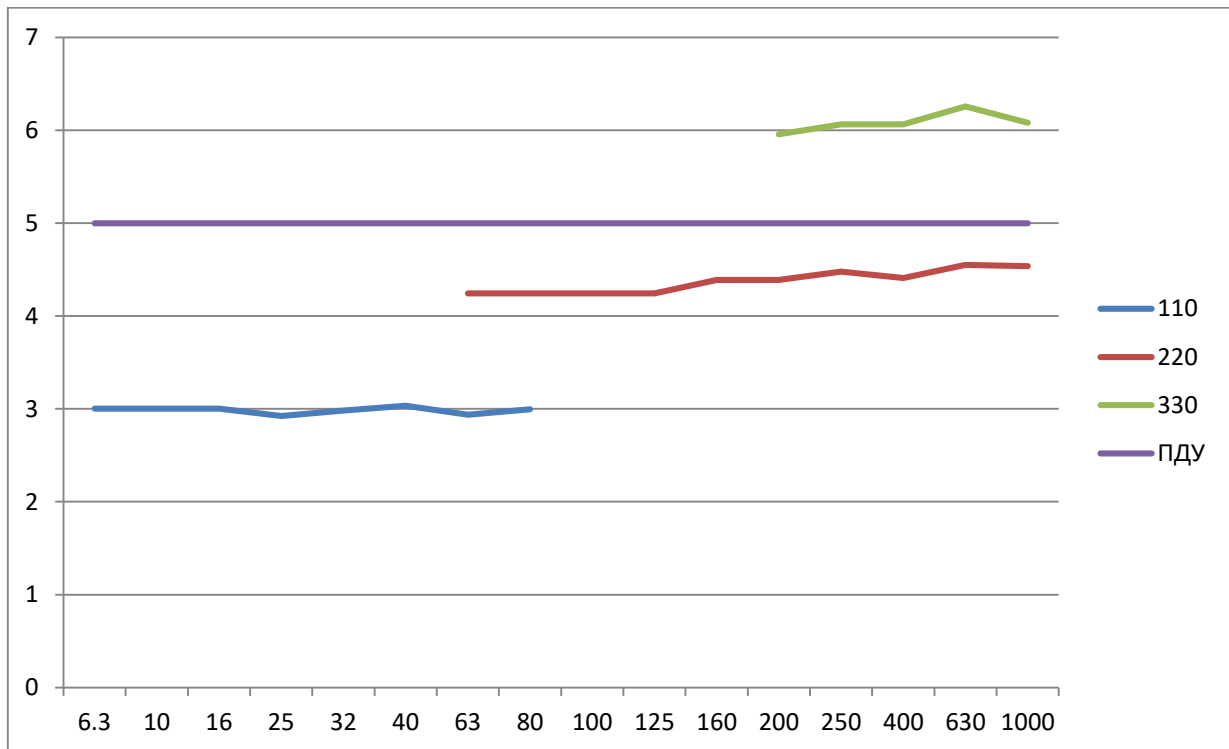


Рис. 6. Результаты расчета напряженности электрического поля в зависимости от мощности трансформаторов для напряжения 110, 220, 330 кВ для минимальной высоты подвеса

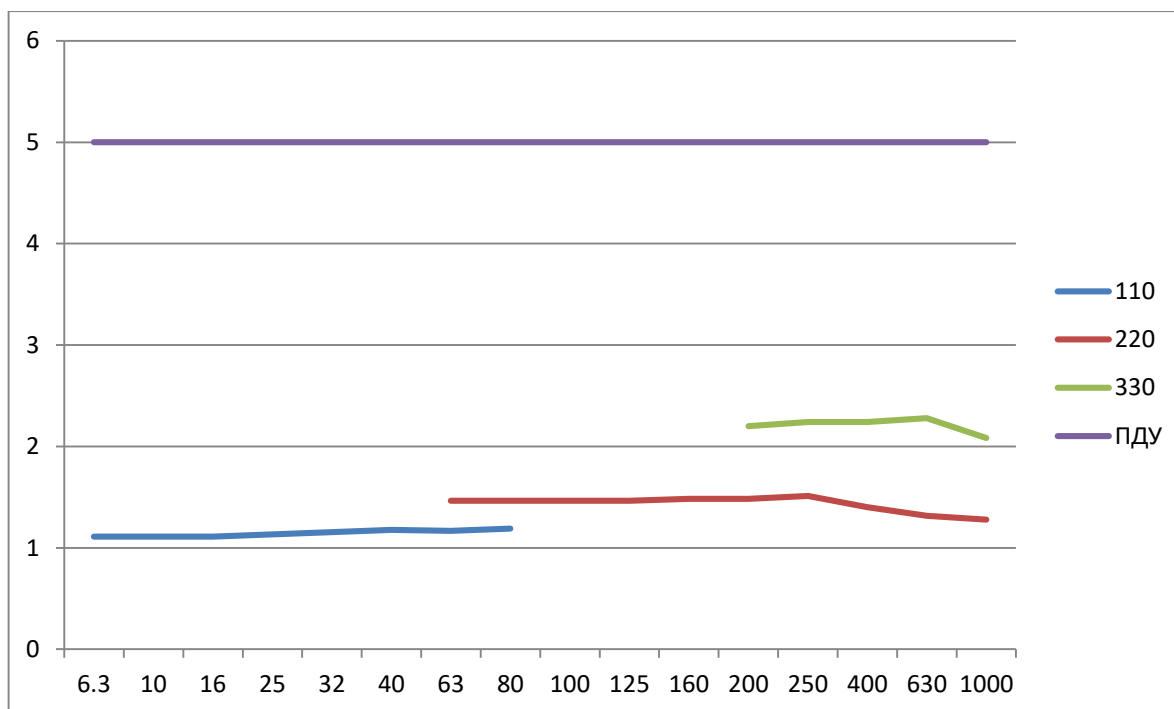


Рис. 7. Результаты расчета напряженности электрического поля в зависимости от мощности трансформаторов для напряжения 110, 220, 330 кВ над дорогой

Выводы:

- при напряжении 110 и 220 кВ напряженность электрического поля на всей территории ПС не превышает ПДУ, что обеспечивает безопасные условия труда;
- при напряжении 330 кВ для обеспечения безопасных условий труда по напряженности электрического поля допускается приближение на расстояние 4 м от крайней фазы, при меньшем расстоянии необходимо применение средств защиты;
- над дорогой при всех напряжениях обеспечена безопасность;
- напряженность электрического поля за внешним забором ПС не превышает ПДУ для населенной местности вне зоны жилой застройки, поэтому при расчете размера санитарной зоны этот параметр можно не учитывать.

Библиографический список

1. World Health Organization / Electromagnetic fields (EMF). – URL: http://www.who.int/peh-emf/project/EMF_Project/en/ (дата обращения 04.09.2018).
2. Довгуша, В. В. Влияние естественных и техногенных электромагнитных полей на безопасность жизнедеятельности / В.В. Довгуша // Экология человека. – 2009. – № 12. – С.64.
3. Гигиена труда: учебник / под ред. Н.Ф. Измерова, В.Ф. Кириллова. – М., 2010. – 592 с.
4. Панков, В.А. Оценка профессионального риска работников гидроэлектростанций, подвергающихся воздействию электромагнитного поля промышленной частоты / В.А. Панков, М.В. Кулешова // Бюллетень ВСНХ СО РАМН. – 2005. – № 8. – С. 148-150.
5. Электромагнитные поля в биосфере. В 2-х томах. Т. 1. Электромагнитные поля в атмосфере Земли и их биологические значение / под ред. Н.В. Красногорской. – М.: Наука, 1984. – 376 с.
6. Шаврина, Н. А. Электромагнитная обстановка вблизи электроустановок сверхвысокого напряжения: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук / Н.А. Шаврина. – Челябинск, 2007. – 216 с.

7. СанПиН 2.2.4.3359-16. Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах. – Новосибирск: Норматика, 2017. – 68 с.
8. Правила устройства электроустановок. – М.: КНОРУС, 2015. – 491 с.
9. Долин, П.А. Основы техники безопасности в электроустановках: учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 488 с.
10. Александров, Г.Н. Передача электрической энергии / Г.Н. Александров. – 2-е изд. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 412 с.
11. Александров, Г.Н. Установки сверхвысокого напряжения и охрана окружающей среды / Г.Н. Александров. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 357 с.

*Дата поступления
в редакцию: 16.10.2018*

O.V. Masleeva, R.Sh. Bedretdinov, N.I. Erdili

THE RESEARCH OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD INFLUENCE DURING THE ELECTRICAL SUBSTATIONS MAINTENANCE

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alekseev

Purpose: The article deals with the problem of the safety of service personnel of 110, 220, 330 kV electrical substations according to one of the main harmful production factors of a physical nature. This includes the electromagnetic field of industrial frequency.

Design/methodology/approach: The authors have developed a method for calculating the electric field strength across the substation. The location of the power equipment, the height of the busbar suspension and the power of a capacity transformers are taken into account.

Findings: it was found that at the 110 and 220 kV substations the electric field strength throughout the substation does not exceed the remote control. This ensures safe working conditions. At a voltage of 330 kV, an approximation of 4 m from the extreme phase is allowed. With a smaller distance is necessary to use protective equipment. The electric field strength beyond the external fence of the substation does not exceed the remote control for a populated area outside the residential area. Therefore, when calculating the size of the sanitary zone, this parameter can be ignored.

Research limitations/implications: The present study was conducted for 110, 220, 330 kV substations with two power transformers with a capacity from 6.3 to 1000 MVA as the most frequently used in operation.

Originality/value: The work devoted to the research of changes in the electric field strength depending on the power of a capacity transformers and the voltage on the high side. The results of this study can be used to identify hazardous areas in the territory of the substation and to choose safe bypass routes for the operating personnel.

Key words: electrical substation, electromagnetic field, operating personnel, permissible norms, sanitary zone.

УДК 621.039

О.О. Новожилова, М.А. Егошин, А.Г. Мелузов, А.В. Безносков

УСКОРИТЕЛЬНО-УПРАВЛЯЕМАЯ СИСТЕМА КАК ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Проанализированы принципиальные возможности использования в медицинской практике ускорительно-управляемой системы как специализированного инструмента для организации нейтронозахватной терапии (НЗТ). Генерация нейтронного потока с помощью «стандартного» ускорителя электронов может стать альтернативой реакторным пучкам, с возможностью размещения подобной установки непосредственно в медицинской клинике. В качестве материала мишени и теплоносителя выбран жидкий галлий как обладающий необходимыми параметрами безопасности и термогидравлическими характеристиками. Принцип работы подобной системы заключается в следующем. При взаимодействии ускоренных электронов с галлиевой мишенью возникающее тормозное гамма-излучение инициирует реакцию фоторождения нейтронов в области гигантского дипольного резонанса $^{69,71}\text{Ga}$ (γ , n). В данных условиях вероятность захвата нейтронов в галлии подавлена и общий выход с поверхности мишени практически равен 100%. Таким образом, использование фотоядерных процессов, инициируемых электронным пучком в жидкометаллической галлиевой мишени, позволит получить высокоинтенсивный источник нейтронов для целей НЗТ без использования делящихся материалов.

Ключевые слова: нейтронозахватная терапия, фотонейтроны, галлий, жидкометаллическая мишень, электронный ускоритель.

Введение

Достижения науки и техники в области физики атомного ядра оказали значительное влияние на развитие многих отраслей человеческого знания, что позволило разработать новые средства и способы научного исследования не только в сферах, непосредственно связанных с физикой. В современную медицинскую практику многие идеи и технические средства для предупреждения болезней и борьбы с ними пришли именно из физики. Ядерная физика предоставила новые, весьма ценные методы изучения процессов, происходящих на клеточном уровне, диагностики и лечения заболеваний на самых ранних стадиях.

Одним из направлений медицины, которое сейчас бурно развивается благодаря достижениям современной ядерной физики и промышленности, является ядерная медицина, к которой можно отнести и лучевую терапию. Среди всех видов опухолевых образований более 30% не поддаются лечению уже ставшим традиционным фотонным излучением [1]. В таких случаях вариантом воздействия может стать нейтронная терапия. Для иллюстрации возможности применения ускорительно-управляемой системы для медицинских приложений рассмотрим один из вариантов нейтронной терапии – нейтронозахватный (НЗТ). Эффективность НЗТ заключается в бинарности данной методики, которая использует два отдельных компонента для создания терапевтического эффекта. Каждый компонент в отдельности не обладает противоопухолевыми свойствами, но их комбинация производит высокий летальный эффект. Первый компонент – нетоксичный, нерадиоактивный изотоп, обладающий большим сечением поглощения нейтронов (сотни тысячи барн), который селективно накапливается или вводится в опухолевые ткани (^{10}B , ^{64}Ga , ^{113}Cd). Второй – пучок плотноионизирующего излучения необходимой геометрической формы и спектрального состава. Таким образом, достигается прицельное (таргетное) уничтожение опухолевых и сохранение здоровых клеток [2].

В современном мире нейтронная терапия проводится на пучках исследовательских ядерных установок [3-6, 15], которые в силу своей специфики (массогабаритные показатели, требования радиационной безопасности, медицинской и экономической приемлемости) не мо-

гут быть размещены непосредственно в клинике. Альтернативой может стать технология генерации нейтронного потока с помощью «стандартного» ускорителя электронов на специально разработанной ускорительно-управляемой системе.

Промышленные электронные ускорители обладают необходимыми характеристиками для создания нейтронных полей: большие токи пучков миллиамперного диапазона, долговременная стабильная работа, компактные конфигурации (рис. 1). Но возрастают требования непосредственно к мишенным устройствам, что связано с высокой плотностью энерговыделения (сотни кВт) и проблемой обеспечения стабильного теплоотвода от материала мишени.

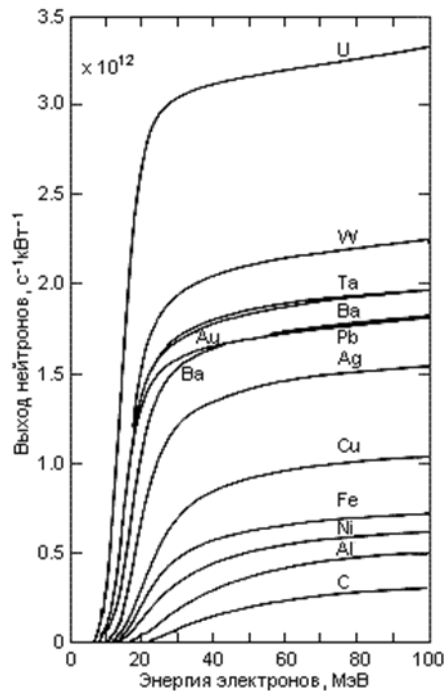


Рис. 1. Выход нейтронов в фотоядерных реакциях

Качество нейтронных пучков для НЗТ

Допустимый набор основных характеристик терапевтических пучков нейтронов определен для нормированного содержания ¹⁰B в здоровой ткани (18 ppm) и опухоли (65 ppm) и формулируется следующим образом [8].

- плотность потока эпитепловых нейтронов: $\Phi_{epi} > 2 \cdot 10^9$, н/см²·с;
- отношение мощности поглощенной дозы быстрых нейтронов к плотности потока эпитепловых нейтронов: $D_{fast}/\Phi_{epi} < (2 \div 5) \cdot 10^{-13}$, Гр·см²;
- отношение мощности поглощенной дозы гамма-излучения к плотности потока эпитепловых нейтронов: $D_{\gamma}/\Phi_{epi} < (2 \div 5) \cdot 10^{-13}$, Гр·см²;
- отношение аксиального тока эпитепловых нейтронов к потоку: $J_{epi}/\Phi_{epi} > 0,7$.

В табл. 1 представлены характеристики нейтронных пучков существующих и проектируемого реакторов:

- «эталонный» для НЗТ пучок FCB (Fission Converter Based) MIT [9];
- пучок эпитепловой колонны реактора TAPIRO [9, 10], ориентированный на применение в НЗТ;
- пучок специализированного медицинского реактора MAPC [11].

Таблица 1

Характеристики «in air» пучков нейтронов, предназначенных для НЗТ

	Φ_{tot}/Φ_{epi} $\times 10^9$, $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$	«Загрязнение» пучка				J_{epi}/Φ_{epi}	Средняя энергия, МэВ
		Φ_{fast}/Φ_{tot} , % $\times 100$	Φ_{th}/Φ_{tot} , % $\times 100$	D_{γ}/Φ_{epi} , $\text{сГр}\cdot\text{см}^2$ $\times 10^{-11}$	D_{fast}/Φ_{epi} , $\text{сГр}\cdot\text{см}^2$ $\times 10^{-11}$		
Парадигма НЗТ	≥ 1	$\rightarrow 0$	$\rightarrow 0$	$< (2 - 5)$	$< (2 - 5)$	$\geq 0,7$	
MITR (США)	4,2/?			1,3	4,3	0,84	
ТАПИРО (Италия)	1,1/0,80	6	20	6,74	4,25	0,81	0,0087
МАРС (Россия)	1,5/1,0	13	6	6,14	11,8	0,75	0,036

Важно, чтобы разрабатываемая ускорительно-управляемая система позволяла по возможности получать универсальный пучок нейтронов, способный проводить лечение опухолевых образований, расположенных на разных глубинах, а также соблюдалось основополагающее требование любой лучевой терапии: непревышение предела дозы для здоровой ткани и разумное время облучения пациента.

Конструктивная схема ускорительно-управляемой системы для медицинских приложений

Схема ускорительно-управляемой системы для медицинских приложений в своей основе должна содержать следующие основные блоки: ускоритель частиц (электронов), мишень, канал вывода пучка нейтронов, коллимационную систему. В качестве вспомогательных необходимы системы: поддержания рабочих параметров, защиты пациентов и персонала и др. (рис.2).

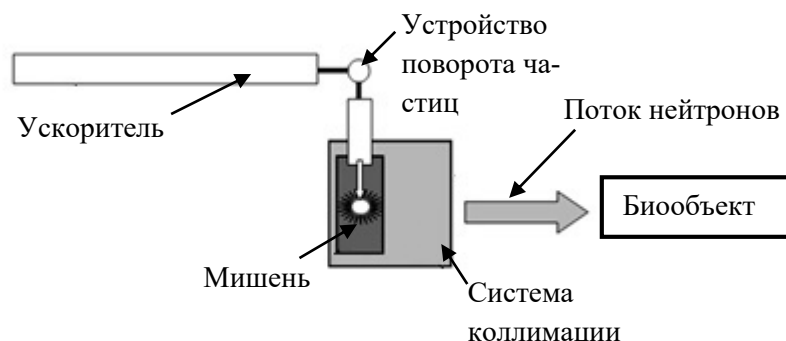


Рис. 2. Принципиальная схема ускорительно-управляемой системы для медицинских приложений

Конструкция мишени, исходя из функционального назначения, должна удовлетворять следующим основным требованиям:

- обеспечивать эффективное размножение нейтронов в результате нейтронно-физических реакций;
- обеспечивать температурное поле в мишени, исключающее недопустимые значения температур.

Выбор материала мишени ускорительно-управляемой системы

Традиционно в качестве материала мишени рассматриваются металлы с большим атомным номером (W , Va , Mo и др.). Преимуществом твердых мишеней является то, что радиоактивные нуклиды, возникающие в результате ядерных реакций, остаются, в основном, в металлической матрице и практически не выходят наружу и в теплоноситель, в результате в контуре

охлаждения мишени накапливается меньше наведенной активности, что облегчает его обслуживание и эксплуатацию. Основным недостаток твердых мишеней – необходимость создания принудительной циркуляции теплоносителя для обеспечения интенсивного теплоотвода и высокие термоциклические нагрузки в теле мишени.

В качестве перспективных мишенных материалов рассматриваются жидкие металлы, которые могут совмещать в себе несколько функций и обладают рядом преимуществ [12]:

- не испытывают радиационных повреждений как твердые тела;
- способны отводить высокотемпературное тепло при высокой удельной энергонапряженности и низком давлении;
- сравнительно малое сечение поглощения нейтронов;
- позволяют совместить в себе функцию теплоносителя и размножающего нейтроны вещества;
- выдерживают ударные нагрузки, возникающие в процессе работы ускорителя.

В проектах промышленных нейтроногенерирующих мишеней рассматривалось применение свинцового теплоносителя – доступного и технологичного материала. Его главным недостатком является высокая температура плавления (327°C), что требует создания мощных систем поддержания рабочей температуры теплоносителя в моменты вывода ускорителя из работы (пуск, нерабочее время и т.д.). Более предпочтительным считаются мишени с эвтектическим расплавом свинца-висмута ($T_{\text{пл}} = 125^{\circ}\text{C}$), но генерация альфа-активного полония из висмута, входящего в состав эвтектики, делает неприемлемым ее применение в ускорительно-управляемой системе для медицинских приложений.

Оптимальным теплоносителем для сферы ядерной медицины может стать галлий. Природный галлий состоит из двух стабильных изотопов: ^{69}Ga (60,1%) + ^{71}Ga (39,9%). Это легкоплавкий металл ($T_{\text{пл}} = 29,8^{\circ}\text{C}$) плотностью $5,904 \text{ г/см}^3$ в твердом и $6,095 \text{ г/см}^3$ в жидком состоянии. Галлий очень склонен переохлаждению и может длительное время сохраняться в жидком состоянии, будучи расплавленным и вновь охлажденным [13], что гарантирует возможность ввода в мишень пучка практически любой мощности. Важным с точки зрения безопасной эксплуатации является низкая активность галлия по отношению к кислороду и воде. Чистый и сухой кислород не оказывает заметного воздействия на галлий при температурах до 250°C , а при более высоких галлий окисляется незначительно. Во влажном воздухе (особенно в жидком состоянии) галлий менее стоек и быстро тускнеет. С водородом и азотом галлий непосредственно не соединяется, вода в обычных условиях также не вступает в реакцию с галлием (при отсутствии в ней растворенного кислорода).

Основным недостатком галлия как теплоносителя является его высокая коррозионная агрессивность по отношению к конструкционным материалам. Максимальная температура в галлиевом контуре при использовании аустенитных сталей без наличия на их поверхностях защитных покрытий не должна превышать 350°C . При условии формирования и наличия защитных оксидных покрытий на поверхностях конструкционных материалов данная температура может быть увеличена [12]. При взаимодействии ускоренных электронов с массивной мишенью галлия основным каналом потери энергии является тормозное излучение, энергетический спектр которого имеет непрерывный характер, возникающее тормозное гамма-излучение инициирует реакцию фоторождения нейтронов в области гигантского дипольного резонанса $^{69,71}\text{Ga} (\gamma, xn)$. В этой энергетической области среднее сечение реакции $\text{Ga} (\gamma, n)$ равно 65 мбарн (для сравнения: в данном энергетическом интервале сечения $\text{Pb}(\gamma, n) \sim 280$ мбарн, $\text{Fe}(\gamma, n) \sim 40$ мбарн). Энергия генерируемых нейтронов имеет среднее значение в районе 1 МэВ, поэтому вероятность их захвата в галлии подавлена, и полная утечка с поверхности мишени практически равна 100%. Спектр фотонейтронов достаточно близок к спектру нейтронов деления урана. Активация галлиевого теплоносителя происходит под действием собственных нейтронов и за счет фотореакций [14], что приводит к рождению короткоживущих продуктов ($T_{1/2}$ до 15 час).

Ускорительно-управляемая система с жидкометаллической галлиевой мишенью

В Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева разрабатывается концепция применения подобной ускорительно-управляемой системы с жидкометаллической галлиевой мишенью как источника нейтронов для медицинских приложений, принципиальная схема которой изображена на рис. 3.

В состав ускорительно-управляемой системы входит «стандартный» ускоритель электронов. Через патрубок подвода частиц в мишень ускоренные электроны поступают в рабочую камеру. Полость ускорителя отделяется от рабочей камеры мишени прозрачной для ускоренных электронов перегородкой, которая исключает поступление парогазообразных продуктов взаимодействия ядер теплоносителя и частиц в полость ускорителя.

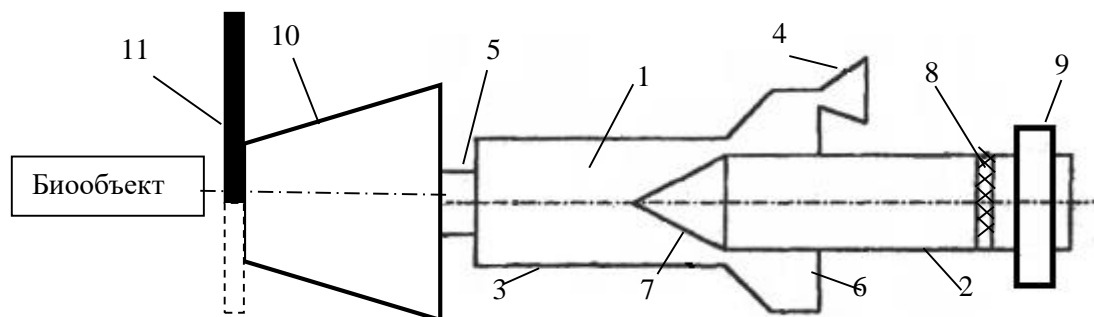


Рис. 3. Принципиальная схема ускорительно-управляемой системы с жидкометаллической галлиевой мишенью

- 1 – рабочая камера (объем мишени, где протекает ядерная реакция размножения нейтронов);
 2 – патрубок подвода частиц от ускорителя; 3 – корпус мишени; 4 – патрубок подвода теплоносителя в рабочую камеру; 5 – патрубок отвода частиц от ускорителя;
 6 – участок отвода теплоносителя, 7 – прочноплотная заглушка («окно»); 8 – перегородка из материала «прозрачного» для частиц, не контактирующая с теплоносителем;
 9 – устройство «запирания» теплоносителя при нештатных ситуациях; 10 – коллимационная система; 11 – подвижный защитный шиббер

Проточная часть жидкометаллической мишени и применение галлия исключает вскипание теплоносителя в объеме мишени. Вскипание недопустимо с точки зрения последующего «схлопывания» образующихся пузырей как на поверхности конструкционных материалов, что может привести к кавитационно-эрозионному разрушению, так и в объеме теплоносителя, вследствие возникновения сопутствующих импульсов давления. В состав коллимационной системы входят следующие элементы: модификатор спектра, «сдвигающий» быстрые нейтроны в эпитепловую область, собственно, коллиматор, собирающий рассеянные в модификаторе или в воздухе нейтроны и направляющий их в канал вывода пучка и нейтронные, а также γ -фильтры, поглощающие тепловые нейтроны и γ -излучение.

В состав системы, обеспечивающей безопасность эксплуатации, входят элементы защиты от случайного переоблучения (подвижный шиббер), устройство «запирания» теплоносителя при нештатных ситуациях (задвижка), а также система разогрева и поддержания (при необходимости) температуры теплоносителя в соответствии с требованиями условий эксплуатации в течение всего срока службы. Принципиально возможно построение ускорительно-управляемой системы, в которой мишень генерирует нейтроны трех диапазонов энергий: теплового, промежуточного и быстрого, а требуемый спектр нейтронов выбирается исходя из целевого применения ускорительно-управляемой системы.

Заключение

Таким образом, использование фотоядерных процессов, инициируемых электронным пучком в жидкометаллической галлиевой мишени, позволит получить высокоинтенсивный источник нейтронов для целей нейтронно-захватной терапии без использования делящихся материалов, обладающий важными для медицинского учреждения свойствами: простота, безопасность эксплуатации, отсутствие долгосрочной активности рабочего тела, минимальное количество требуемого инженерного персонала и специальных систем обеспечения работоспособности установки, а ускорительно-управляемая система построенная на данных принципах может стать универсальным инструментом для применения в лучевой терапии, который возможно будет эксплуатировать непосредственно в крупном региональном медицинском центре.

Библиографический список

1. **Довбня, А.Н.** Нейтроны против рака / А.Н. Довбня, Э.Л. Купленников, С.С. Кандыбей, В.В. Красильников // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2014. – Т. 45, вып. 5-6. – С. 1750-1786.
2. Current Status of Neutron Capture Therapy. Report of International Atomic Energy Agency, TECDOC – 1223 // VIENNA, 2001, IAEA – May 2001.
3. **Кураченко, Ю.А.** МАРС и ТАПИРО: реакторы малой мощности для нейтронзахватной терапии / Ю.А. Кураченко, Д.Н. Моисеенко // Ядерная энергетик. – 2010. – № 1. – С. 153-163.
4. **Harling, O.K.** Fission reactor based epithermal neutron irradiation facilities for routine clinical application in BNCT – Hatanaka memorial lecture / O.K. Harling // Applied Radiation and Isotopes. 67 (7–8): S7–11.
5. **Мусабаева, Л.И.** Нейтронная терапия на циклотроне У-120. К 30-летию применений нейтронной терапии – обзор результатов научных исследований / Л.И. Мусабаева [и др.] // Медицинская радиология и радиационная безопасность. – 2013. – Т. 58, № 2. – С. 67-71.
6. **Баянов, Б.Ф.** Нейтроногенерирующая мишень ускорительного источника нейтронов для нейтронзахватной терапии / Б.Ф. Баянов, В.П. Белов, С. Ю. Таскаев. – Новосибирск: СО РАН, 2005.
7. **Борисов, Г.И.** Теоретические и экспериментальные физические методы нейтронно-захватной терапии / Г.И. Борисов // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2011. – Т. 42, вып. 5. – С. 1371-1479.
8. The Basics of Boron Neutron Capture Therapy. – URL: <http://web.mit.edu/nrl/bnct/facilities/facilities.html>.
9. Reattore ТАПИРО: ENEA Internal Document, DISP/TAP/85-1, 1985 // Design of neutron beams for boron neutron capture therapy in a fast reactor/Current status of neutron capture therapy, IAEA-TECDOC-1223, 2001
10. **Rosi, G.** Role of the tapiro fast research reactor in neutron capture therapy in Italy. Calculations and measurements / G. Rosi [et al.] // IAEA-CN-100/97. In: Research Reactor Utilization, Safety, Decommissioning, Fuel and Waste Management. Proc. of an Internat. Conf., 10–14 Nov. 2003, Santiago, Chile. – P. 325-338.
11. **Кураченко, Ю.А.** Оптимизация блока вывода пучка медицинского реактора МАРС / Ю.А. Кураченко // Альманах клинической медицины. – М., 2008. – Т. 17, ч. 1.
12. **Безносков, А.В.** Тяжелые жидкометаллические теплоносители в атомной энергетике / А.В. Безносков, Ю.Г. Драгунов, В.И. Рачков. М.: ИздАТ, 2006.
13. **Иванова, Р.Е.** Химия и технология галлия / Р.Е. Иванова. – М.: Металлургия, 1973.
14. **Кураченко, Ю.А.** Новый интенсивный источник нейтронов для медицинских приложений / Ю.А. Кураченко, Н.К. Вознесенский, А.А. Говердовский, В.И. Рачков // Медицинская физика. – 2012. – № 2. – С. 29-38.
15. **Новожилова, О.О.** Анализ применения ядерных реакторов в медицинской практике / О.О. Новожилова, А.Г. Мелузов, Н.Л. Иванова, М.А. Егошин // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. – 2017. – № 4 (119). – С. 108-113.

*Дата поступления
в редакцию: 02.10.2018*

O.O. Novozhilova, M.A. Egoshin, A.G. Meluzov, A.V. Beznosov

**ACCELERATOR-DRIVEN SYSTEM AS THE NEUTRON SOURCE
FOR MEDICAL APPLICATION**

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alekseev

Purpose: analysis of the possibility of using an accelerated-driven system (ADS) for medical applications.

Results: the main possibilities of using the ADS as a specialized tool for the neutron capture therapy (NST) organization in medical practice are determined. Liquid gallium selected as the target and the heat exchange material that possesses the necessary safety parameters and thermohydraulic characteristics. The operation principle of such system is as follows. Electrons from the accelerator having the energy of 20 – 100 MeV decelerated in the gallium. The incipient deceleration gamma radiation initiates a neutron photoproduction reaction in the area of giant dipole resonance $^{69,71}\text{Ga}(\gamma, xn)$. The energy of generated neutrons is average in the area of 1 MeV, so suppressed the probability of their capture in the gallium, and the total target surface is virtually equal to 100%.

Conclusion: consequently, the use of photonuclear processes initiated by an electron beam in a liquid metal gallium target will make it possible to obtain a high-intensity neutron source for the purposes of neutron-capture therapy without the use of fissile materials.

Key words: neutron capture therapy, photoneutrons, gallium, liquid metal target, electron accelerator.

УДК 532.528

С.Н. Пичков, Д.А. Захаров, Э.Г. Новинский

**ИССЛЕДОВАНИЯ КАВИТАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ
В НАСОСНОМ ОБОРУДОВАНИИ АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова

Статья посвящена исследованиям кавитационных процессов в насосном оборудовании с использованием акустического метода. Несмотря на то, что кавитационные явления в лопастных насосах известны давно и достаточно изучены, борьба с проявлением кавитации остается одной из актуальных задач. Проведенные постановочные исследования показали возможность определять порог возникновения кавитации, контролировать устойчивость стационарного процесса в циркуляционных контурах и проточных частях насосов методом акустической эмиссии. Полученные результаты представляют интерес, так как дополняют используемые методы исследования кавитационных явлений новыми возможностями. Метод требует своего дальнейшего развития. Статья может положить начало заинтересованному обсуждению среди специалистов, исследующих кавитационные явления в динамических насосах.

Ключевые слова: насосное оборудование, кавитация, акустический метод.

Одним из направлений работ АО «ОКБМ Африкантов» является разработка и создание насосного оборудования для атомных энергетических установок. Номенклатура разрабатываемых лопастных насосов для разных носителей достаточно широка: от герметичных насосов со встроенным электродвигателем до насосов с уплотнением вращающегося вала. Проектирование таких насосов имеет целью создание надежных, конструктивно простых машин, которые оптимальным образом вписывались бы в компоновку реакторной установки. Положительного результата можно достичь, в основном, правильным выбором геометрии проточной части насоса, которая напрямую зависит от частоты вращения вала. Высокая частота вращения вала насоса позволяет снизить габариты, массу и затраты на изготовление. Однако, при этом необходимо исключить кавитационное разрушение элементов проточной части, прежде всего рабочего колеса. Именно эта опасность ограничивает возможности проектантов в создании высокооборотных, малогабаритных насосов. Насосное оборудование АЭС и ЯЭУ, особенно для первого контура, должно удовлетворять высоким требованиям по безотказности и надежности. Поэтому предупреждение явлений кавитации во вновь создаваемых насосах для ядерных реакторов является актуальнейшей задачей [1].

Явление кавитации в движущейся жидкости возникает в тех случаях, когда статическое давление в какой-либо области потока падает ниже давления насыщенного пара жидкости. Реальная жидкость, как правило, не может воспринимать растягивающих усилий, которые возникают при падении давления в ней ниже давления насыщенного пара, поэтому в указанных областях происходит ее вскипание и нарушается сплошность потока с образованием многочисленных паровых пузырьков и устойчивых каверн, примыкающих к стенкам. Как только паровые пузырьки, движущиеся вместе с потоком жидкости, попадают в область, где статическое давление выше давления насыщенного пара, пар конденсируется и пузырьки исчезают [2]. В зависимости от происхождения различают два вида кавитации. Если понижение давления происходит вследствие больших местных скоростей в потоке движущейся капельной жидкости, то кавитация называется гидродинамической, а если вследствие прохождения акустических волн большой амплитуды – акустической. В дальнейшем будет рассматриваться гидродинамическая кавитация. Наряду с существующими методами контроля кавитационных процессов [2] представляет интерес и внедрение новых методов, в частности, акустических.

Методика исследований

Схема экспериментального стенда для кавитационных исследований приведена на рис. 1. На стенде установлена модель насоса (1), приводимого во вращение электродвигателем (2). Теплоноситель (вода) из насоса поступает в коллектор (3) и далее через задвижку (4) в бак (5), из которого через задвижку (6) поступает на всасывание насоса. Верхняя часть бака заполняется газом, давление газа в баке, а, следовательно, и на всасывании насоса может изменяться путем подачи или стравливания газа через задвижку (7).

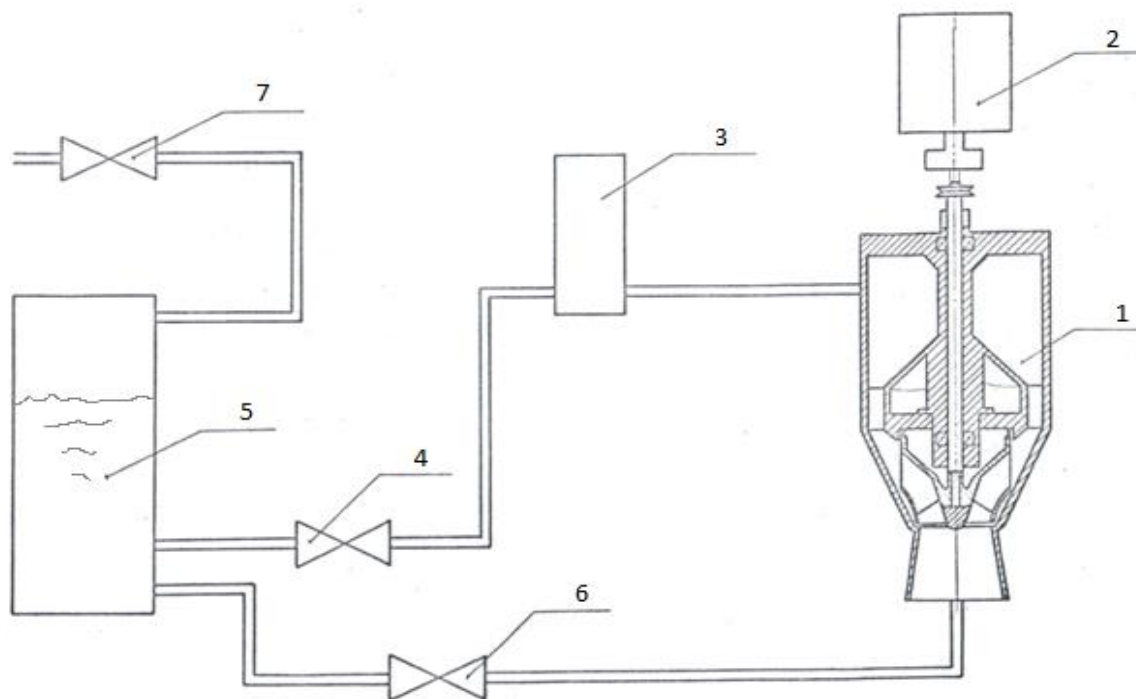


Рис. 1. Схема экспериментального стенда

В исследованиях использовался метод акустической эмиссии (АЭ) [3, 4]. Сигналы АЭ регистрировались пьезоэлектрическим преобразователем, укрепленным на насосе. Обработка сигналов проводилась измерительным комплексом Spartan300. Исследования проводились путем регистрации изменений акустических характеристик (интенсивности сигнала \dot{N} , с^{-1} ; пиковой амплитуды A , мВ; общего уровня сигнала ОУ, мВ) в зависимости от давления на всасывании насоса.

Проведено 4 серии экспериментов. Кроме того, выяснялась степень влияния акустических сигналов с других элементов стенда на проводимые измерения.

Результаты исследований и их анализ

Первые две серии экспериментов имели целью установить характер развития и затухания кавитации в насосе в зависимости от давления на всасывании и, таким образом, определить степень пригодности акустического метода для контроля кавитационных явлений. В качестве акустико-эмиссионных характеристик использовались интенсивность и пиковая амплитуда сигнала. Зависимости их от давления приведены на рис. 2, 3. В первой серии экспериментов точки определялись при уменьшении давления. Первоначально кавитация отсутствовала, но начиная с давления $\sim 0,14$ МПа наблюдался рост акустических характеристик, постепенно выходящих на уровень насыщения. Насыщение можно объяснить двумя причинами: во-первых, истощением числа зародышей кавитации, еще не вовлеченных в этот процесс, во-вторых,

эффектом экранирования распространяющихся сферических звуковых волн еще не замкнувшимися пузырьками.

Вторая серия экспериментов проводилась при повышении давления. Первоначально уровень развития кавитации был высоким, а затем величина акустических характеристик снижается, причем это наступает при больших давлениях, чем возрастание в первой серии экспериментов. В результате получили петлю гистерезисного типа. Ширина ее составляет 0,03 – 0,04 МПа.

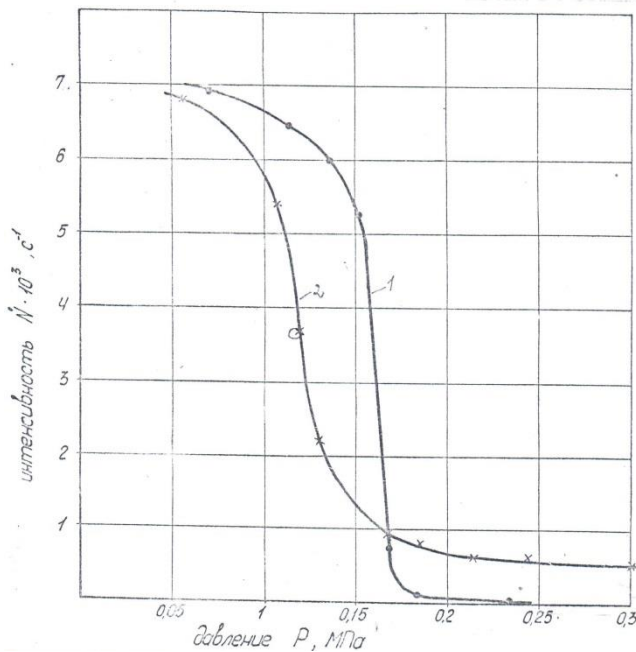


Рис. 2. Зависимость интенсивности сигналов акустической эмиссии от давления

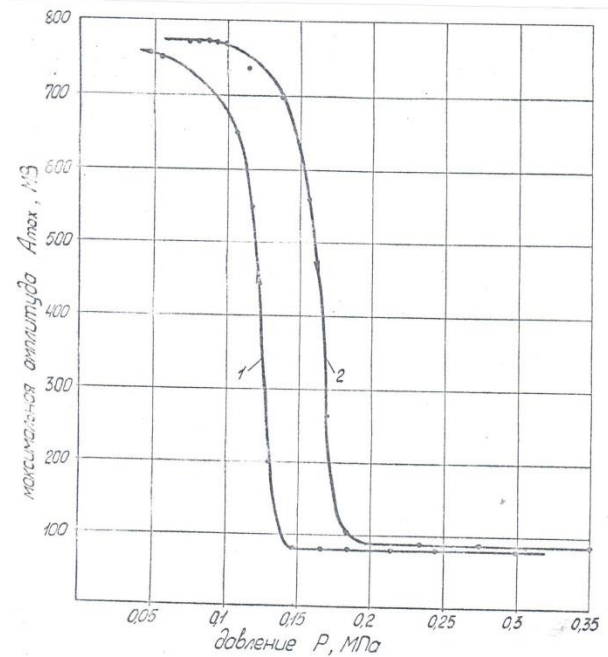


Рис. 3. Зависимость пиковой амплитуды сигналов акустической эмиссии от давления

Третья серия экспериментов частично повторяла первые две. Опять было замечено, что при повышении давления кривая акустической характеристики рис. 4 (изменение пиковой амплитуды) идет выше, чем при снижении давления. Кроме того, в третьей серии проводилось измерение общего уровня акустического сигнала в частотных диапазонах 400-1200 кГц и 750-1200 кГц. Эта величина в обоих случаях подтверждала выше описанные закономерности (рис. 5). В четвертой серии экспериментов было выполнено следующее (рис. 6): первоначально давление на входе в насос было поднято до 0,098 МПа – точка 1; при этом же давлении в течение 30 минут выдерживался режим работы, и общий уровень акустического сигнала снизился – точка 2. Далее проводилось понижение давления до 0,06 МПа – точки 3-7, после чего начали его повышать – точки 8-14. Снижение давления привело к увеличению акустического сигнала – точка 15. Таким образом, вновь была получена гистерезисная петля.

Образование гистерезиса можно объяснить тем, что стационарный режим кавитации не успевает установиться. Следующий этап испытаний содержал измерения скорости установления режима кавитации. На рис. 7 отражено постепенное снижение интенсивности акустического сигнала после повышения давления на входе насоса с 0,1 МПа до 0,15 МПа. Аналогичное измерение было проведено при снижении давления с 0,15 МПа до нулевого значения (рис. 8). Таким образом, можно сделать вывод, что реальная кривая стационарного режима кавитации лежит внутри гистерезисной петли. После проведения описанных выше экспериментов пьезоэлектрический преобразователь устанавливался на напорном и всасывающем трубопроводах (на задвижках 4 и 6 рис.1) с целью выявления возможности влияния процессов в этих

элементах на снимаемые в ходе испытаний акустические характеристики. Получено, что в выбранном частотном диапазоне 400 – 1200 кГц внешние помехи не влияют на полученные результаты. При анализе более низких частот получено, что аппаратура регистрирует производственные шумы, которые могут повлиять на результаты измерений.

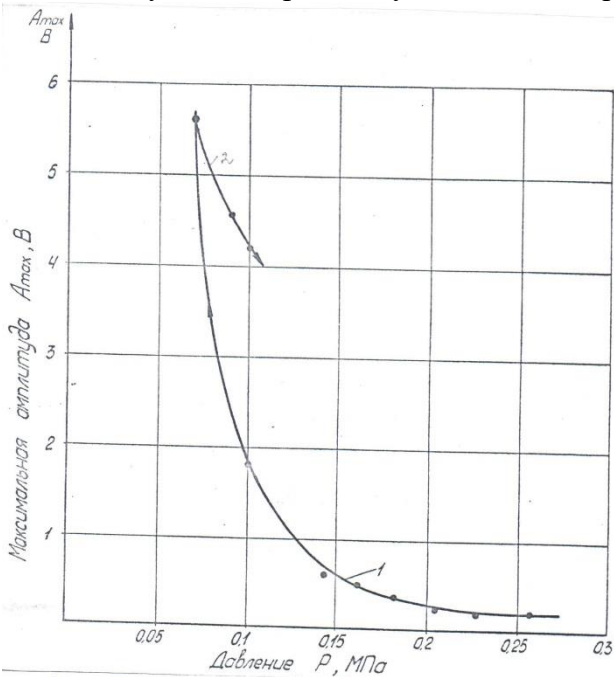


Рис. 4. Зависимость пиковой амплитуды сигналов акустической эмиссии от давления:
 1 – кривая получена при понижении давления; 2 – кривая получена при повышении давления

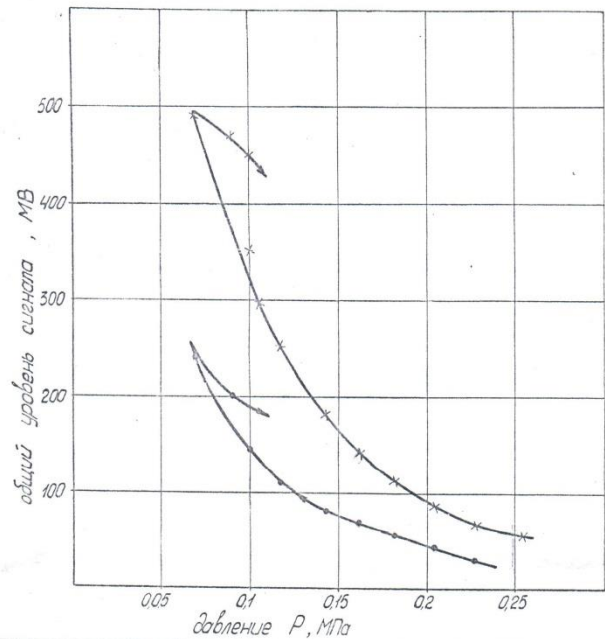


Рис. 5. Зависимость общего уровня сигналов акустической эмиссии от давления:
 о – диапазон частот 750 – 1200 кГц
 х – диапазон частот 400 – 1200 кГц

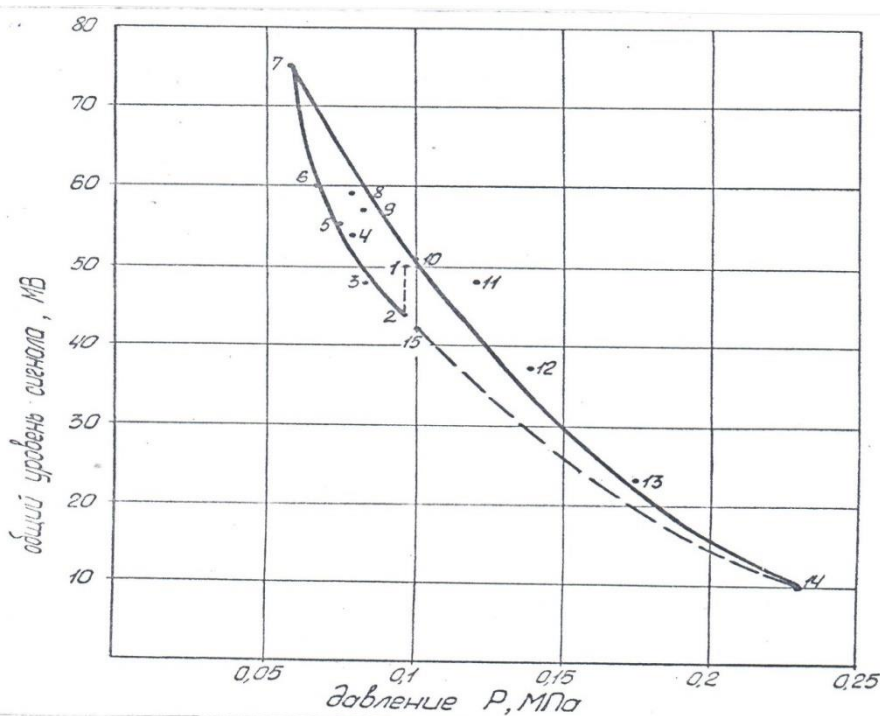


Рис. 6. Зависимость общего уровня сигнала акустической эмиссии от давления

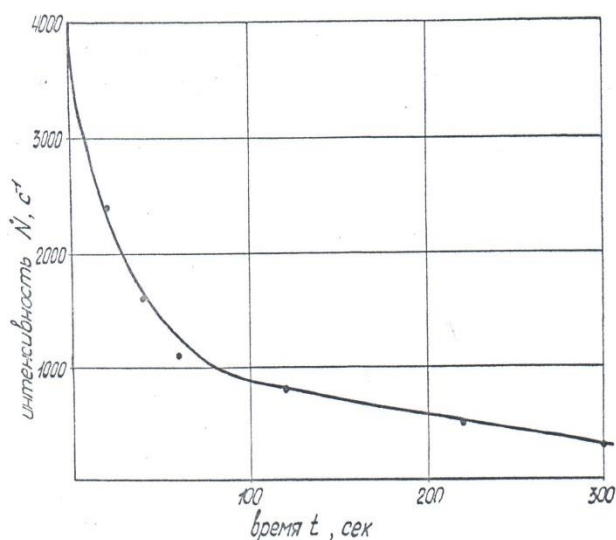


Рис. 7. Зависимость интенсивности сигналов акустической эмиссии при увеличении давления на входе насоса с 0,1 МПа до 0,15 МПа

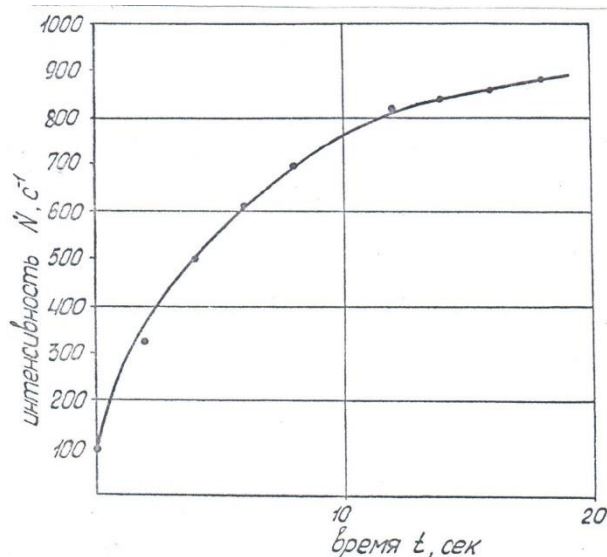


Рис. 8. Зависимость интенсивности сигналов акустической эмиссии при уменьшении давления на входе насоса с 0,15 МПа до нуля

Заключение

В статье приведены результаты использования метода акустической эмиссии для контроля степени развития кавитационных явлений в динамических насосах. Исследования показали возможность определять порог возникновения кавитации, контролировать устойчивость стационарности процесса в циркуляционных контурах. Метод требует своего дальнейшего развития.

Библиографический список

1. Митенков, Ф.М. Главные циркуляционные насосы АЭС / Ф.М. Митенков, Э.Г. Новинский, В.М. Будов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 325 с.
2. Перник, Д.Д. Проблемы кавитации / Д.Д. Перник. – Л.: Судостроение, 1966. – 439 с.
3. Акустическая эмиссия и ее применение для неразрушающего контроля в ядерной энергетике / под ред. К.Б. Вакара. – М.: Атомиздат, 1980. – 216 с.
4. Прочность и акустическая эмиссия материалов и элементов конструкций / В.А. Стрижало, Ю.В. Добровольский, В.А. Стрельченко [и др.]; отв. ред. Г.С. Писаренко. – Киев: Наук. думка, 1990. – 232 с.

Дата поступления
в редакцию: 02.10.2018

S.N. Pichkov, D.A. Zakharov, E.G. Novinskiy

**RESEARCH OF CAVITATION PROCESSES IN PUMPING EQUIPMENT
BY ACOUSTIC METHOD**

JSC OKBM AFRICANTOV, Nizhny Novgorod

Purpose: the article is devoted to the research of cavitation processes in pumping equipment using the acoustic method. Notwithstanding that cavitation phenomena are well known for a long time and are sufficiently studied, cavitation suppression remains one of urgent problems.

Methodology: the performed prearranged research demonstrated that it was possible to identify cavitation limit, to control stability of the steady-state process in circulation circuits and flow parts of pumps using the acoustic method.

Findings: the obtained results are of interest because they complete applied research methods of cavitation phenomena with new opportunities. The acoustic method requires further development.

Value: the article may initiate a motivated discussion among specialists who research cavitation phenomena in rotodynamic pumps.

Key words: pumping equipment, cavitation, acoustic method, research.

УДК 621.039.534...24

А.Н. Соколов², В.И. Полуничев², В.В. Андреев¹, А.А. Баринов¹, С.А. Михай¹**МЕТОД ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКИ ИННОВАЦИОННЫХ СИСТЕМ
АВАРИЙНОГО РАСХОЛАЖИВАНИЯ**Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева¹,
Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова²

Статья посвящена разработке методики экспресс-оценки инновационных систем аварийного расхолаживания реакторных установок (РУ) с водо-водяными реакторами. В статье предложена оригинальная схема комбинированного теплоотвода остаточных тепловыделений к запасу воды через теплообменник конденсатор-испаритель (ТКИ) и атмосферному воздуху, через воздушный теплообменник-конденсатор (ВТК). Представлены основные положения методики оценки мощностных характеристик ВТК и ТКИ. Выполнена кроссверификация методики экспресс-оценки с теплогидравлическим расчетом САР одного из проектов РУ и показано хорошее количественное и качественное соответствие. Определены пути дальнейшего совершенствования методики с целью оптимизации конструкций и снижения консерватизма расчетов

Ключевые слова: система аварийного расхолаживания, теплообменник аварийного расхолаживания, парогенератор, обесточивание, цистерна аварийного расхолаживания, водо-водяной реактор.

Повышение уровня безопасности является одной из приоритетных задач при создании ядерных энергетических установок. Важным для безопасности фактором является надежный аварийный отвод остаточных тепловыделений от активной зоны в условиях невозможности использования систем нормальной эксплуатации и аварийных систем активного принципа действия (например, при полном длительном обесточивании установки). Основным направлением решения данной задачи в мировой практике является использование систем пассивного теплоотвода, не требующих внешних источников энергии. В настоящее время для реакторных установок (РУ) водо-водяного типа разработано множество вариантов систем пассивного отвода остаточных тепловыделений [1].

Наибольшее распространение получили два варианта пассивных систем, отличающихся способом передачи тепла к конечному поглотителю:

- с отводом тепла от а.з. через ПГ с испарением запаса воды в аварийной цистерне [2];
- с отводом тепла от а.з. через ПГ к атмосферному воздуху [3].

Каждый из вариантов имеет свои недостатки. Так, например, вариант с теплоотводом к запасу воды при относительно небольшом объеме имеет малое время функционирования. Вариант с теплоотводом к атмосферному воздуху при возможности неограниченного функционирования имеет существенные массо-габаритные характеристики вследствие того, что при атмосферных параметрах плотность воздуха ниже в 1000 раз, теплоемкость ниже в 4 раза, теплопроводность в 10 раз.

Принимая во внимание, что мощность остаточных тепловыделений убывает во времени по показательной функции [4], отвод тепла условно делим на два периода:

- первоначальный период высокоэффективного теплоотвода, имеющий ограниченную продолжительность, в течение которого в качестве конечного поглотителя используется запас испаряемой воды и атмосферный воздух;
- последующий период дорасхолаживания до конечного состояния с теплоотводом только к атмосферному воздуху.

Данное решение позволяет совместить достоинства двух вышеописанных вариантов теплоотвода.

В патенте на полезную модель RU № 109898 от 06.07.2011 описана система аварийного расхолаживания (САР), реализующая один из вариантов комбинированного теплоотода, который позволяет обеспечить расхолаживание РУ до конечного безопасного состояния с уменьшенными массо-габаритными характеристиками системы [5]. На рис. 1 представлена схема САР для РУ типа ВВР выполненной по «судовой» технологии.

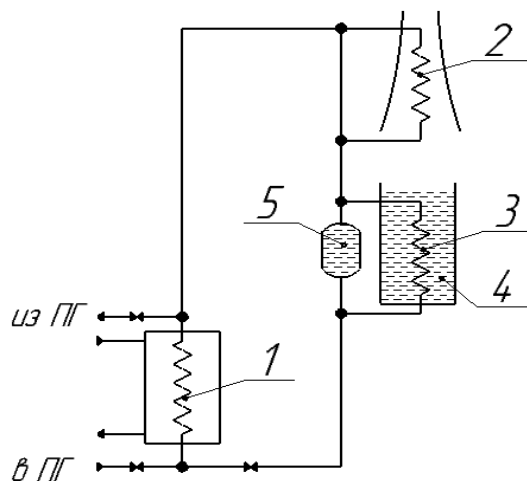


Рис. 1. Схема САР:

1 – парогенератор (ПГ); 2 – воздушный теплообменник-конденсатор (ВТК);
3 – теплообменник конденсатор-испаритель (ТКИ); 4 - цистерна аварийного расхолаживания (ЦАР)

При работе системы устанавливается естественная циркуляция теплоносителя по первому контуру и промежуточному контуру САР, образованному с помощью трубопроводов, соединяющих ПГ по пару и питательной воде с ВТК и ТКИ, что обеспечивает отвод остаточных тепловыделений от активной зоны к конечному поглотителю. Пар из ПГ поступает в ВТК, где частично конденсируется, отдавая тепло атмосферному воздуху. В ТКИ за счет передачи тепла воде цистерны аварийного расхолаживания (ЦАР) происходит конденсация оставшегося пара и доохлаждение конденсата. Затем конденсат стекает в ПГ. Тепло, отводимое ТКИ, аккумулируется в объеме воды ЦАР, а затем отводится за счет испарения воды ЦАР в атмосферу. После исчерпания воды в ЦАР теплоотвод осуществляется только через ВТК.

Одним из основополагающих вопросов при проектировании САР по данной схеме является определение оптимального сочетания параметров теплоотода через ВТК и ТКИ. В зависимости от назначения (электростанция или энергетическая установка судна) и исполнения (наземная станция и плавучий энергоблок) набор условий, определяющий сочетания параметров теплоотода ВТК и ТКИ будет отличаться, поэтому основная проблема заключается в выявлении критериев оптимальности теплоотода и их взаимосвязи для САР данного вида.

Ниже приводится обоснование методики экспресс-оценки параметров комбинированной САР на основе ограниченного объема исходных данных.

При расчетах приняты следующие допущения:

- 1) коэффициенты гидравлического сопротивления не зависят от параметров среды;
- 2) коэффициенты теплоотдачи не меняются от изменения температуры и расходов сред;
- 3) при расчетах теплопередачи в САР принимается постоянная температура воды в ЦАР (точка кипения) и атмосферного воздуха;
- 4) ВТК и ТКИ работают по противоточной схеме с конденсацией пара теплоносителя промежуточного контура;
- 5) площадь ПГ многократно превышает требуемую для аварийного теплоотода.

При приведенных допущениях мощность САР принимает вид линейной функции от температуры теплоносителя первого контура, как показано на рис. 2 и определяется по формуле (1):

$$N_{\text{САР}} = AT_{1\text{к}} - B, \quad (1)$$

где A, B – коэффициенты линейного уравнения для $N_{\text{САР}}$, $T_{1к}$ – температура 1 контура. На рис. 2 представлены следующие обозначения: $T_{\text{НОМ}}$ – температура 1 контура при которой достигается номинальное значение мощности системы аварийного расхолаживания $N_{\text{САР}}^{\text{НОМ}}$, которая, в свою очередь, традиционно определяется, как

$$N_{\text{САР}}^{\text{НОМ}} \approx kN_{\text{НОМ}}$$

где k – нормировочный множитель, отношения номинальной мощности САР к номинальной мощности реакторной установки. По опыту предыдущего проектирования известно, что зависимости от исполнения и назначения установки k находится в диапазоне 1 – 2%.

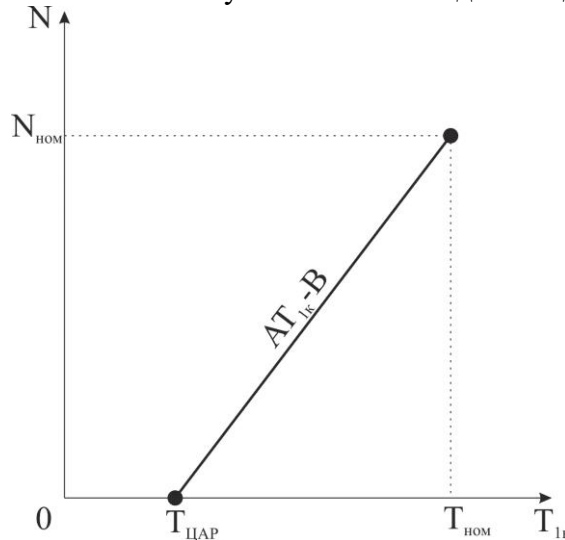


Рис. 2. Функция изменения мощности САР

В соответствии с [6, с. 260] мощность противоточного теплообменника с конденсацией пара равна:

$$Q = Cp_2 \cdot G_2 (T_S - t_2) \cdot \left(1 - e^{-\frac{k \cdot F}{Cp_2 \cdot G_2}} \right) (*)$$

где Cp_2 – теплоемкость охлаждающей среды, G_2 – массовый расход охлаждающей среды, T_S температура пара на выходе из ПГ, t_2 – температура охлаждающей среды на входе в теплообменник, k – коэффициент теплопередачи, F поверхность теплообмена.

мощность противоточного теплообменника с конденсацией с одной стороны и кипением с другой равна:

$$Q = k \cdot F (T_S - t_S)$$

где t_S температура на линии насыщения охлаждающей среды.

мощность противоточного теплообменника с кипением равна

$$Q = Cp_1 \cdot G_1 (T_1 - t_S) \cdot \left(1 - e^{-\frac{k \cdot F}{Cp_1 \cdot G_1}} \right)$$

Cp_2 – теплоемкость охлаждающей среды, G_2 – массовый расход охлаждающей среды, t_S – температура греющей среды.

С учетом допущения, что площадь ПГ многократно превышает требуемую для аварийного теплоотвода, а компенсация давления в промежуточном контуре паровая, $T_S \approx T_{1к}$. Принимая во внимание, что мощность системы в первоначальный период равна сумме мощностей слагаемых участков ВТК и ТКИ, а вода в ЦАР находится на линии насыщения, запишем уравнение для вычисления мощности САР.

$$N_{\text{САР}} = Cp_{\text{ВОЗ}} \cdot G_{\text{ВОЗ}} (T_{1к} - t_{\text{ВОЗ}}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{k_{\text{ВТК}} \cdot F_{\text{ВТК}}}{Cp_{\text{ВОЗ}} \cdot G_{\text{ВОЗ}}}} \right) + k_{\text{ТКИ}} \cdot F_{\text{ТКИ}} \cdot (1 - a) \cdot (T_{1к} - t_S) + Cp_{\text{ПК}} \cdot G_{\text{ПК}} (T_{1к} - t_S) \cdot \left(1 - e^{-\frac{k_{\text{ТКИ}} \cdot F_{\text{ТКИ}} \cdot a}{Cp_{\text{ВОЗ}} \cdot G_{\text{ВОЗ}}}} \right)$$

$$N_{\text{САР}} = N_{\text{ВТК}} + N_{\text{ТКИконд.}} + N_{\text{ТКИдоохл.}}$$

С учетом ранее принятых допущений № 1-3 все параметры, кроме $T_{1\text{к}}$, являются постоянными, сгруппируем постоянную и переменную часть уравнения:

$$N_{\text{САР}} = \left[C p_{\text{воз}} \cdot G_{\text{воз}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{k_{\text{ВТК}} \cdot F_{\text{ВТК}}}{C p_{\text{воз}} \cdot G_{\text{воз}}}} \right) + k_{\text{ТКИ}} \cdot F_{\text{ТКИ}} \cdot (1 - a) + C p_{\text{ПК}} \cdot G_{\text{ПК}} \right. \\ \left. \cdot \left(1 - e^{-\frac{k_{\text{ТКИ}} \cdot F_{\text{ТКИ}}}{C p_{\text{воз}}}} \right) \right] \cdot T_{1\text{к}} \\ - \left[C p_{\text{воз}} \cdot G_{\text{воз}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{k_{\text{ВТК}} \cdot F_{\text{ВТК}}}{C p_{\text{воз}} \cdot G_{\text{воз}}}} \right) \cdot t_{\text{воз}} + k_{\text{ТКИ}} \cdot F_{\text{ТКИ}} \cdot (1 - a) \cdot t_{\text{с}} + C p_{\text{ПК}} \right. \\ \left. \cdot G_{\text{ПК}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{k_{\text{ТКИ}} \cdot F_{\text{ТКИ}} \cdot a}{C p_{\text{ПК}} \cdot G_{\text{ПК}}}} \right) \cdot t_{\text{с}} \right]$$

Принимая условные обозначения

$$A = C p_{\text{воз}} \cdot G_{\text{воз}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{k_{\text{ВТК}} \cdot F_{\text{ВТК}}}{C p_{\text{воз}} \cdot G_{\text{воз}}}} \right) + k_{\text{ТКИ}} \cdot F_{\text{ТКИ}} \cdot (1 - a) + C p_{\text{ПК}} \cdot G_{\text{ПК}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{k_{\text{ТКИ}} \cdot F_{\text{ТКИ}} \cdot a}{C p_{\text{воз}}}} \right) \\ B = C p_{\text{воз}} \cdot G_{\text{воз}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{k_{\text{ВТК}} \cdot F_{\text{ВТК}}}{C p_{\text{воз}} \cdot G_{\text{воз}}}} \right) \cdot t_{\text{воз}} + k_{\text{ТКИ}} \cdot F_{\text{ТКИ}} \cdot (1 - a) \cdot t_{\text{с}} + C p_{\text{ПК}} \cdot G_{\text{ПК}} \\ \cdot \left(1 - e^{-\frac{k_{\text{ТКИ}} \cdot F_{\text{ТКИ}} \cdot a}{C p_{\text{ПК}} \cdot G_{\text{ПК}}}} \right) \cdot t_{\text{с}}$$

Получим $N_{\text{САР}} = A T_{1\text{к}} - B$, что полностью соответствует уравнению (1)

Задаваясь необходимой мощностью САР, и номинальной температурой первого контура можно определить значения коэффициентов А и В уравнения (1).

Определение зависимости мощности САР от температуры 1 контура недостаточно для оптимального распределения теплоотвода между теплообменниками системы. Проведем данные вычисления для ВТК.

Для получения мощностных характеристик ВТК примем допущение, что мощность ВТК должна быть равна остаточным тепловыделениям в момент осушения ЦАР. Данное равенство гарантирует неперевышение (или соблюдение) проектных пределов по давлению первого контура.

$$N_{\text{ост}}(\tau') = N_{\text{ВТК}}(T_{1\text{к}}) \quad (2)$$

где τ' – время осушения ЦАР, $T_{1\text{к}}$ – температура 1 контура.

С учетом принятых допущений принимаем, что мощностная характеристика ВТК в зависимости от температуры является линейной функцией с коэффициентами линейного уравнения A' , B' (см. рис. 3).

$$N_{\text{ВТК}}(T_{1\text{к}}) = A' T_{1\text{к}} - B' \quad (3)$$

Определение коэффициентов линейного уравнения A' , B' , позволит в совокупности с известной мощностной характеристикой САР получить оптимальное сочетание характеристик ВТК и ТКИ.

В уравнении (3) кроме коэффициентов A' и B' неизвестным является и время осушения ЦАР, которое, в свою очередь, зависит от мощности ВТК.

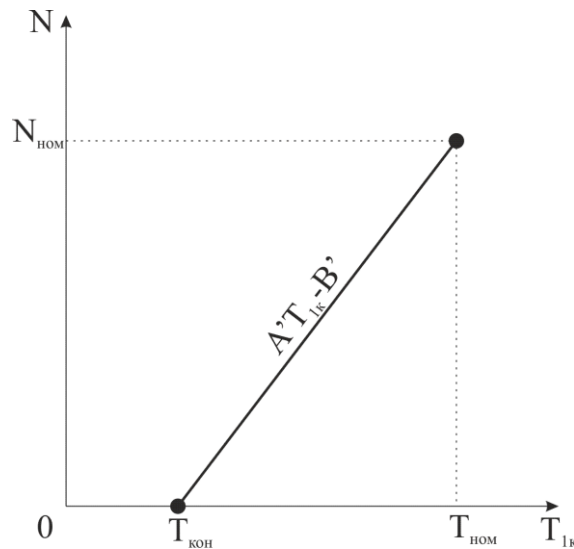


Рис. 3. Функция изменения мощности ВТК

Время осушения ЦАР – τ' , определим из уравнения баланса тепловой энергии, которое для данного вида САР выглядит следующим образом:

$$E_{\text{ЦАР}} = E_{\text{ост}}(\tau') - \int_0^{\tau'} N_{\text{ВТК}} d\tau, \quad (4)$$

где $E_{\text{ЦАР}}$ – энергия, переданная в ЦАР к моменту ее осушения, определяется формулой:

$$E_{\text{ЦАР}} = M_{\text{ЦАР}} \cdot (I'' - I_{\text{н}}),$$

$M_{\text{ЦАР}}$ – масса воды в ЦАР, I'' – удельная энтальпия пара в ЦАР, $I_{\text{н}}$ – удельная энтальпия воды в ЦАР.

Подставляя под интегральное выражение уравнения (4) в соотношение для мощности ВТК приведенное в (3), получим:

$$\int_0^{\tau'} N_{\text{ВТК}} d\tau = \int_0^{\tau'} [A'T(\tau) - B'] d\tau = A' \int_0^{\tau'} T(\tau) d\tau - B'\tau',$$

Дополняя (3) и (4) математической формулировкой

$$0 = A' \cdot t_{\text{воз}} - B',$$

Получим систему уравнений:

$$\begin{cases} N_{\text{ост}}(\tau') = A' \cdot T(\tau') - B', \\ E_{\text{цар}} = E_{\text{ост}}(\tau') - A' \int_0^{\tau'} T(\tau) d\tau - B' \cdot \tau' \\ B' = t_{\text{воз}} \cdot A', \end{cases} \quad (5)$$

где $T(\tau)$ – функция изменения температуры первого контура в процессе аварии.

Для определения B' , A' и τ' необходимо определить значение функции $T(\tau)$, для чего в экспресс-методике используется следующая модель процесса, имеющая следующие допущения:

- 1) температура по участкам первого контура меняется незначительно;
- 2) масса воды в реакторе меняется незначительно;
- 3) отсутствуют дополнительные стоки и источники тепла, кроме мощности САР и остаточных тепловыделений соответственно.

Тогда уравнение сохранения энергии для первого контура с приведенными допущениями запишем в виде:

$$mC_p \frac{dT}{d\tau} = N_{\text{ост}}(\tau) - N_{\text{САР}}(T),$$

где m – масса воды первого контура, C_p – теплоемкость воды первого контура или с учетом (1):

$$mC_p \frac{dT}{d\tau} = N_{\text{ост}}(\tau) - AT + B;$$

после дополнительных преобразований получим дифференциальное уравнение;

$$\frac{dT}{dt} + \frac{A}{mC_p} T = \frac{1}{mC_p} N_{\text{ост}}(\tau) + \frac{B}{mC_p} \quad (6)$$

Обозначим: $\frac{A}{mC_p} = P$,

Уравнение (6) является линейным ДУ 1 порядка, для решения, которого применим метод Лагранжа.

В результате получим:

$$T(\tau) = C_1 e^{-P\tau} \quad (7)$$

где $C_1(\tau) = \frac{1}{mC_p} \int_0^\tau N_{\text{ост}}(\tau) e^{P\tau} d\tau + \frac{B}{mC_p} \int_0^\tau e^{P\tau} d\tau$;

$N_{\text{ост}}(\tau)$ определим по формуле, приведенной в [4, с. 47]:

$$N_{\text{ост}}(\tau) = \left[\frac{0.1}{(\tau + 10)^{0.2}} - \frac{0.087}{(\tau + 2 \cdot 10^7)^{0.2}} - \frac{0.01}{(\tau + 10^6)^{0.2}} - \frac{0.0023}{\left(1 - e^{\frac{-\Delta\tau}{2.9 \cdot 10^5}}\right)} e^{-\frac{\tau}{2.9 \cdot 10^5}} \right] N_{\text{ном}}$$

Для получения аналитического решения аппроксимируем данную функцию показательной зависимостью вида

$$\int_0^\tau N_{\text{ост}}(\tau) \cdot e^{P\tau} d\tau = C \cdot (1 - e^{-\alpha\tau}) \cdot N_{\text{ном}} \quad (8)$$

Подставляя приближенную функцию 8 в 7 и определяя постоянный член получаем функцию $T(\tau)$:

$$T(\tau) = \frac{N_{\text{ном}}}{mC_p} C (e^{-P\tau} - e^{-(\alpha+P)\tau}) + \frac{B}{A} (1 - e^{-P\tau}) + T_{\text{ном}} e^{-P\tau} \quad (9)$$

Значение интеграла:

$$\int_0^\tau T(\tau) d\tau = \left[\frac{N_{\text{ном}} C}{A} - \frac{B}{AP} + \frac{T_{\text{ном}}}{P} \right] (1 - e^{-P\tau}) - \frac{N_{\text{ном}} C}{mC_p(\alpha+P)} (1 - e^{-(\alpha+P)\tau}) + \frac{B}{A} \tau \quad (10)$$

Подставляя значения интеграла $\int_0^\tau T(\tau) d\tau$ из (10) в (5) получим окончательную систему уравнений:

$$\begin{cases} N_{\text{ост}}(\tau') = A' \cdot T_{\text{ном}} - B'; \\ M_{\text{ЦАР}} \cdot (I'' - I_{\text{н}}) = E_{\text{ост}}(\tau') - A' \cdot \left(\left[\frac{N_{\text{ном}} C}{A} - \frac{B}{AP} + \frac{T_{\text{ном}}}{P} \right] (1 - e^{-P\tau'}) - \frac{N_{\text{ном}} C}{mC_p(\alpha+P)} \cdot (1 - e^{-(\alpha+P)\tau'}) + \frac{B}{A} \cdot \tau' \right) + B' \cdot \tau' \\ 0 = A' \cdot t_{\text{воз}} - B' \end{cases} \quad (11)$$

Решая систему уравнений (11), можно получить значения коэффициентов уравнения для ВТК (3) и время работы ТКИ (выпаривания ЦАР). Зная общую мощностную характеристику САР и характеристику ВТК, мощностная характеристика ТКИ получается как их разность

$$N_{\text{ТКИ}}(T_{1\text{к}}) = (A - A') \cdot T_{1\text{к}} - B + B'$$

На рис. 4 представлены мощностные характеристики САР с комбинированным теплоотводом, полученные по описанной экспресс-методике в сравнении с характеристиками, полученными прямым теплогидравлическим расчетом для РУ.

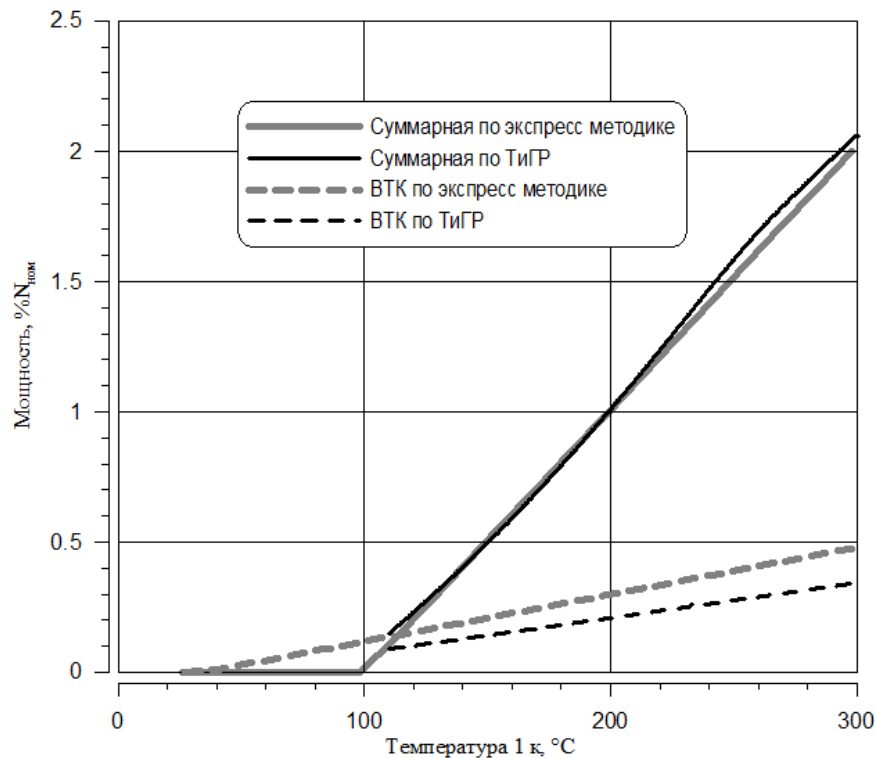


Рис. 4. Мощностная характеристика ВТК и САР в целом

Из рис. 4 видно, что характеристики, определенные по экспресс-методике и полученные в ходе прямого теплогидравлического расчета, совпадают качественно и количественно. Имеющиеся различия в мощности ВТК связаны с рядом допущений:

- проектный предел по давлению первого контура реально достигается при более высокой температуре по сравнению с принятой в методике;
- после осушения ЦАР установка находится в расхоложенном состоянии при температуре ниже номинальной температуры первого контура.

Для снижения консерватизма экспресс-оценок можно принять следующие меры:

- отказ от «традиционного выбора» номинальной мощности САР на уровне $\approx 2\% N_{ном}$ реактора и уточнение данного значения в соответствии с критериями безопасности, выявленными при анализе.
- учет влияния пассивного рассеяния тепла от реакторной установки в окружающую среду;
- разработка обобщенных критериев оптимизации конструкции САР на основе технико-экономических расчетов.

Заключение

В статье предложен оригинальный вариант САР с комбинированным теплоотводом к запасу воды и атмосферному воздуху. Разработана методика экспресс-оценки мощностных характеристик оборудования САР. Методика дает качественное описание процесса аварийного теплоотвода и позволяет получить количественные оценки с приемлемой точностью.

Проведено сравнение результатов экспресс оценок и теплогидравлического расчета САР, которые показывают хорошее качественное и количественное соответствие полученных результатов. Экспресс-методика дает более консервативные результаты. Приведены соображения о дальнейшем развитии данной методики.

Библиографический список

1. Advances in small modular reactor technology developments. 2016 Edition. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS). – URL: <http://aris.iaea.org>.
2. Пат. № 78600 Российская федерация, МКП G21C15/18. Система аварийного отвода тепла / М.А. Большухин, В.И. Полуничев, В.И. Печенкин, А.Н. Соколов; заявитель и патентообладатель ОАО «ОКБМ Африкантов» - № 2008129286; заявл. 16.07.2008 опубл. 27.11.2008, Бюл. № 33.
3. Пат. 2002320 Российская Федерация МПК G21C15/18. Система пассивного отвода тепла водо-водяных энергетических реакторов / В.А. Голонцов, М.А. Смирнов, М.В. Скорлыгин; заявитель и патентообладатель Опытное конструкторское бюро «Гидропресс» - № 2002320; заявл. 16.05.91; опубл. 30.10.93, Бюл. № 39 – 40 с.
4. Федоров, Н.Д. Краткий справочник инженера-физика. Ядерная физика. Атомная физика / Н.Д. Федоров. – М.: Госатомиздат, 1961. – 508 с.
5. Пат. 109898 Российская Федерация, МПК G21C15/18. Система аварийного расхолаживания / Д.Л. Зверев, А.Н. Соколов, А.Н. Пахомов, А.М. Хизбуллин; заявитель и патентообладатель ОАО «ОКБМ Африкантов» - № 2011128179/07; заявл. 06.07.2001; опубл. 27.10.2011, Бюл. № 30.
6. Михеев, М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – Изд. 2-е, стереотип. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.

Дата поступления
в редакцию: 02.10.2018

A.N. Sokolov², V.I. Polunichiev², V.V. Andreev¹, A.A. Barinov¹, S.A. Mikhay¹

THE METHOD OF RAPID ASSESSMENT
OF INNOVATIVE EMERGENCY COOLING SYSTEMS

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alekseev¹,
JSC OKBM AFRICANTOV, Nizhny Novgorod²

Purpose: Authors developed the methodology of rapid assessment of innovative passive heat removal system for pressurized water reactors. The work presents the original system of combined residual heat removal to the water-supply (with the use of condenser-boiler heat exchanger) and to ambient air (through the condenser-convective heat exchanger).

Design/methodology/approach: A theoretical framework integrates basic models for heat exchangers, approximation of system thermal capacity in the frame of proposed assumptions and analytical integration of simplified equations.

Findings: The analytical solution obtained shows good agreement with more complicated calculations with the use of numerical tool. The proposed method of simplified estimation is effective for general design needs.

Research limitations/implications: The study provides assumptions and simplifications that are acceptable in the postulated scenario. The method developed is applicable for rough estimations and optimization procedures. Approaches of further methodology development are defined for decreasing of conservative margins.

Keywords: passive heat removal system, emergency cooling heat exchanger, steam generator, blackout, emergency cooling tank, pressurized water reactor.

УДК 621.039.52

Ю.П. Фадеев, А.Н. Пахомов, В.И. Полуничев, А.Ю. Турусов

ПЛАВУЧИЕ И БЛОЧНО-ТРАНСПОРТАБЕЛЬНЫЕ АТОМНЫЕ СТАНЦИИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова

Приведены результаты разработки технического проекта атомной станции малой мощности для энергообеспечения удаленных труднодоступных регионов, в том числе в Арктической зоне. Рассмотрено два варианта исполнения станции: с использованием плавучего энергоблока и береговой инфраструктуры, включающей защитную дамбу, и наземный вариант с размещением атомной энергетической установки на суше. В обоих вариантах используется реакторная установка интегрального типа АБВ-6Э тепловой мощностью 38 МВт, позволяющая вырабатывать до 9 МВт электрической энергии. Перегрузка и ремонт реакторной установки производятся через 10-12 лет на специализированном заводе, куда плавучий блок с реактором перемещается буксирами, а реакторный блок наземной станции – специальными транспортными средствами. Активная зона имеет энергоресурс, обеспечивающий указанный срок между перегрузками топлива. После вывода станции из эксплуатации на площадке реализуется концепция «зеленая лужайка». Экономические оценки показали, что в Арктической зоне себестоимость энергии, вырабатываемой АСММ, на 10-15 % ниже генерируемой дизельными электростанциями аналогичной мощности.

Ключевые слова: атомная станция малой мощности, энергоблок, реакторная установка, защитная оболочка, активная зона, энергоресурс, себестоимость.

Введение

Экономически эффективное обеспечение объектов Арктической зоны электрической и тепловой энергией для устойчивого промышленного развития и удовлетворения социальных нужд населения, а также решения геополитических задач Российской Федерации в данном регионе является актуальной задачей. Для этой цели наряду с традиционными установками на органическом топливе рассматриваются варианты использования атомных энергоисточников, которые имеют принципиальные преимущества по длительности работы без перегрузки топлива, высокой надежности, подтвержденной многолетней успешной эксплуатацией прототипов на атомных судах и кораблях, маневренности, высокому уровню экологической безопасности.

Строительство атомных станций малой мощности (АСММ) в Арктических регионах трудно осуществить по схеме, принятой для АЭС типа ВВЭР. Решением данной проблемы может быть поставка на подготовленную площадку готового к эксплуатации плавучего энергоблока или крупногабаритных транспортабельных блоков для станций берегового размещения с переносом большей части строительно-монтажных, перегрузочных и ремонтных работ на специализированные предприятия. Это обеспечивает ускоренные темпы сооружения АСММ в сложных климатических условиях, высокое качество изготовления и приемлемые технико-экономические характеристики [1].

В рамках федеральной целевой программы «Развитие гражданской морской техники» АО «ОКБМ Африкантов» в кооперации со смежными предприятиями разработало технический проект перспективного атомного источника энергии малой мощности со следующими основными потребительскими характеристиками:

Электрическая мощность	6 МВт
Тепловая мощность.....	12 Гкал/ч
Электрическая мощность в конденсационном режиме без выработки тепловой энергии	9 МВт

Срок службы.....	40 лет
Период между перегрузками топлива.....	10-12 лет
Время работы до заводского ремонта.....	20 лет
Назначенный коэффициент использования установленной мощности (КИУМ).....	0,7

Уровни тепловой и электрической мощности определены исходя из маркетинговых исследований энергетической потребности прибрежных регионов Арктической зоны.

При проектировании АСММ выполнялись следующие основные требования к станции:

- минимальные масса и габариты;
- повышенные ресурсные характеристики;
- высокие технико-экономические показатели.

АСММ выполнена в двух вариантах:

- на базе плавучего энергетического блока (ПЭБ) по аналогии со строящимся блоком «Академик Ломоносов» для АС в городе Певек Чукотского АО;
- в наземном исполнении с блочно-транспортным энергоблоком (БТЭБ), включающим реакторную установку (РУ), монтируемым на прибрежной территории.

Станции такого типа обладают следующими преимуществами по сравнению со стационарными станциями традиционного исполнения:

- изготовление энергоблоков в сборе на заводе-строителе с высоким качеством и в сжатые сроки;
- снижение количества строительно-монтажных работ на площадке базирования;
- выполнение перегрузки топлива, ремонтов и технического обслуживания транспортируемых реакторных блоков на специализированном предприятии;
- возможность реализации концепции «зеленая лужайка» после вывода АСММ из эксплуатации.

Плавучая АСММ

Основой станции является плавучий энергоблок (ПЭБ), который представляет собой несамоходное стоечное судно, транспортируемое к месту базирования водным путем посредством буксировки. На месте базирования ПЭБ подключается к береговым сооружениям, обеспечивающим передачу тепла и электроэнергии потребителям. С целью минимизации массогабаритных характеристик и стоимости строительства на ПЭБ установлена одна РУ. После выработки топлива через 10-12 лет ПЭБ транспортируется на специализированное предприятие для перегрузки, докового ремонта.

ПЭБ имеет следующие характеристики:

Длина.....	91,6 м
Ширина.....	26 м
Осадка.....	3,6 м
Водоизмещение.....	8 100 т

В качестве основного источника энергии для выработки пара требуемых параметров в проекте применяется реакторная установка (РУ) АБВ-6Э тепловой мощностью 38 МВт (рис. 1). Основным элементом РУ является парогенерирующий блок (ПГБ) интегрального типа с естественной циркуляцией теплоносителя первого контура. В корпусе парогенерирующего блока установлены активная зона, 12 кассет прямотрубных парогенераторов, внутрикорпусные устройства. Приводы системы управления и защиты находятся на крышке блока. Оборудование и системы РУ имеет высокую степень унификации с оборудованием РУ КЛТ-40С строящейся плавучей атомной теплоэлектростанции и РУ РИТМ-200 универсального атомного ледокола, что существенно сокращает затраты на опытно-конструкторские работы, время строительства и стоимость. В проекте принята активная зона, состоящая из 121 ТВС кассет-

ного типа, аналогичных по конструкции примененным в РУ КЛТ-40С. Для обеспечения экспортного потенциала применено металлокерамическое топливо с обогащением по урану-235 19,7%. В рамках проекта рассмотрен вариант защитной оболочки (ЗО) реакторной установки цилиндрической формы, которая является нетрадиционной для атомных судов, использующих оболочки коробчатого исполнения. Достоинством такой оболочки является способность выдерживать большее избыточное давление, что совместно с комплексом пассивных систем безопасности обеспечивает лучшее прохождение всех типов аварий, в том числе с разгерметизацией первого контура (ЛОСА), в условиях полного обесточивания. В рамках проектирования большое внимание уделено безопасности разрабатываемого энергоблока с учетом близости его размещения к населенным пунктам. Отсутствие операций с радиоактивными веществами на площадке базирования и осуществление перегрузки и плановых ремонтов на специализированном предприятии снижает радиационное воздействие на персонал и окружающую среду.

В проекте применены системы активного и пассивного принципа действия, надежно обеспечивающие требования нормативных документов по безопасности. Комплекс пассивных систем обеспечивает безопасность РУ во всех проектных теплоотводных авариях в течение более трех суток. С этой целью в проекте используется инновационная для судовых РУ комбинированная пассивная система аварийного расхолаживания, оснащенная водным и воздушным каналами с отводом тепла к воде, запасенной в цистерне, и атмосферному воздуху соответственно.

Наземная АСММ

Наземная АСММ – источник энергии, оснащенный блочно-транспортабельными энергоблоками (БТЭБ) наземного размещения и средствами погрузки и выгрузки блоков. БТЭБ выполнен в двух вариантах:

- с отдельными модулями РУ и паротурбинной установки (ПТУ) (рис. 2);
- моноблочный вариант, включающий РУ и ПТУ (рис. 3).

Характеристики реакторных модулей БТЭБ представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики реакторных модулей БТЭБ

Наименование характеристики	Реакторный модуль БТЭБ раздельного типа	Реакторный модуль моноблочного БТЭБ
Состав модуля	РУ	РУ + ПТУ
Длина, м	8	28,2
Диаметр, м	10,5	9,6
Масса с учетом БЗ, т	820	2500

Транспортабельные модули БТЭБ изготавливаются на специализированном предприятии и транспортируются к площадке АСММ с помощью специальных грузовых средств. На участке маршрута по акваториям северных морей транспортирование может быть осуществлено доковым полупогружным судном типа «Transshelf», на речном участке – баржами-площадками. Помимо этого, рассматриваются варианты доставки транспортабельных блоков вглубь материка при помощи наземных грузовых средств. После установки блоков на фундамент осуществляется монтаж навесной биологической защиты.

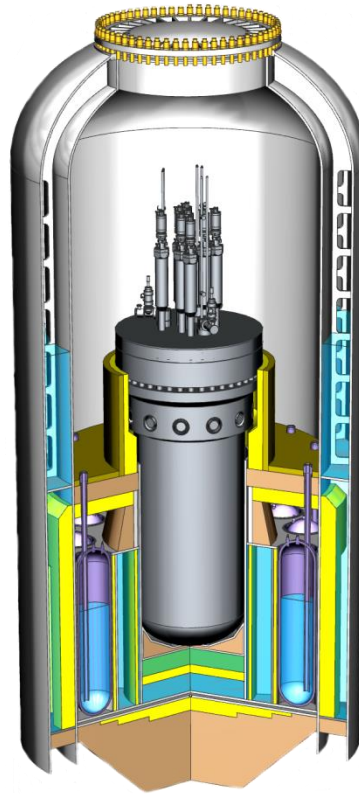


Рис. 1. РУ АБВ-6Э в защитной оболочке

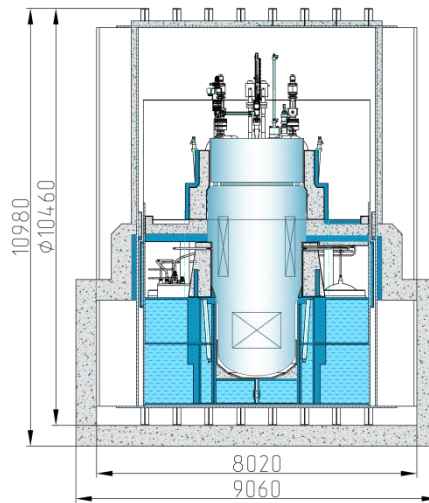


Рис. 2. Общий вид реакторного модуля БТЭБ раздельного типа

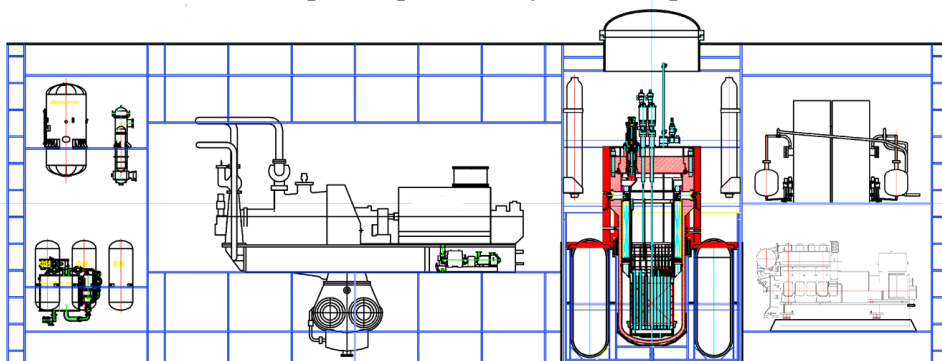


Рис. 3. Общий вид реакторного модуля моноблочного БТЭБ

По сравнению с плавучей АСММ, наземный вариант исполнения имеет следующие достоинства:

- исключение защитных гидротехнических сооружений и специальных устройств передачи энергии на берег при колебаниях уровня воды;
- возможность размещения АСММ в удалении от источников воды (в состав АСММ входит воздушно-конденсационная установка);
- исключение защиты от ледового воздействия и цунами;
- малые габариты и масса БТЭБ по сравнению с ПЭБ, что позволяет транспортировать его по малым рекам на баржах-площадках с малой осадкой, а также наземным способом с помощью специальных грузовых средств.

Недостатки:

- необходимость применения специализированных грузовых средств для доставки блоков БТЭБ на площадку базирования;
- выполнение большего объема работ по монтажу систем главного энергетического оборудования АС на площадке базирования;
- необходимость выдержки транспортабельного реакторного блока перед отправкой на специализированное предприятие для перегрузки и ремонтов.

Экономическая эффективность АСММ

В проекте проведена оценка себестоимости, вырабатываемой АСММ электроэнергии и сравнение с себестоимостью электроэнергии, производимой источниками, использующими органическое топливо. Согласно оценкам, в ряде регионов Арктической зоны себестоимость электроэнергии, производимой атомными теплоэлектростанциями на базе РУ АБВ-6Э на 10-15 % ниже себестоимости энергии, генерируемой дизельными электростанциями аналогичной мощности при меньшем воздействии на окружающую среду.

Заключение

1. Выполненные проекты АСММ на базе энергоблоков плавучего и блочно-транспортабельного исполнения с реакторной установкой АБВ-6Э показали, что основные принятые технические решения проверены опытом эксплуатации атомных судов, надежны и реализуемы отечественной промышленностью.
2. Атомные источники такого типа могут использоваться для обеспечения электроэнергией и теплом объектов Арктической зоны и других удаленных регионов.
3. Для дальнейшего повышения технико-экономической привлекательности станций представляется целесообразной дальнейшая оптимизация технических решений.

Библиографический список

1. **Фадеев, Ю.П.** АСММ для обеспечения регионов арктической зоны / Ю.П. Фадеев, А.Н. Пахомов, В.И. Полуничев, А.Ю. Турусов [и др.] // Труды Международной выставки – конференции по судостроению и разработке высокотехнологичного оборудования для освоения континентального шельфа. Санкт-Петербург, Россия, 7-10 октября 2014 г.

*Дата поступления
в редакцию: 02.10.2018*

Yu.P. Fadeev, A.N. Pakhomov, V.I. Polunichev, A.Yu. Turusov

FLOATING AND MODULAR TRANSPORTABLE SMALL POWER NPP

JSC OKBM AFRICANTOV, Nizhny Novgorod

Purpose: Presentation of potential nuclear energy sources for power supply of distant difficult to access regions, including the ones in the arctic zone.

Design: Two variants of design are examined: with the use of a floating power unit and shore infrastructure, including a seawall, and shore variant with a nuclear power plant located on the shore. In both the cases there is used an integral reactor plant ABV-6E, with thermal power 38 MW, and which permits to produce 9 MW of electrical power. Refueling and repair of the reactor plant are executed in 10-12 years at a special factory, where the floating unit with a reactor is shifted with towing hawsers, and a reactor unit of the shore plant is shifted with special transports. The core has the sufficient power life time to ensure the specified time duration between refueling. After decommissioning of the plant, the concept «Green lawn» is realized at site.

Findings: Completed designs of small power NPPs demonstrate that main accepted engineering solutions are proved by nuclear-powered ships operation, reliable and feasible.

Research limitations: The present study provides basis for further enhancement of small power NPPs technical and economic features.

Originality: The study provides innovational design solutions for small power NPPs development.

Key words: small nuclear power plant, power unit, reactor plant, containment, core, power life time, production cost.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

УДК 629.113.012.5

П.Е. Дмитриев, В.Н. Кравец, П.И. Бажан, Л.А. Захаров, Ю.П. Кузнецов,
Ю.И. Палутин, А.С. Слюсарев, А.В. Согин

ПОТЕРИ ПРИ КАЧЕНИИ ЭЛАСТИЧНОГО КОЛЕСА ПО ТВЕРДОЙ ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В статье приведено формальное представление потерь мощности при качении эластичного колеса по недеформируемой опорной поверхности, обусловленных силовыми и скоростными потерями. Предложена методика расчета силовых и скоростных потерь при работе колеса в стационарном режиме по аналогии с потерями мощности в гидродинамической передаче. Целью данной статьи является разработка методики расчета силовых и скоростных потерь при стационарном качении эластичного колеса по твердой опорной поверхности на основе феноменологического представления потерь мощности. На основе феноменологического представления потерь мощности получены выражения для расчета силовых и скоростных потерь, возникающих при качении эластичного колеса в составе колесного движителя по твердой опорной поверхности.

Ключевые слова: эластичное колесо, колесный движитель, теория качения колеса, потеря мощности при качении колеса, силовые потери, скоростные потери.

Теории качения эластичного колеса в составе колесного движителя посвящено большое количество работ [1-12]. В них достаточно полно рассмотрена методика определения общих потерь мощности при качении эластичного колеса по твердой недеформируемой опорной поверхности. В гораздо меньшей мере освещен вопрос разделения общих потерь в колесе на силовую и скоростную составляющие и установления зависимостей между ними. В то же время вывод основополагающих уравнений силового и мощностного балансов эластичного колеса базируется на исходных предположениях, непосредственно связанных с представлениями о силовых и скоростных потерях.

Целью данной статьи является разработка методики расчёта силовых и скоростных потерь при стационарном качении эластичного колеса по твердой опорной поверхности на основе феноменологического представления потерь мощности [13]. Феноменологическое представление потерь мощности при качении эластичного колеса выполнено по аналогии с моделированием силовых и объемных потерь в комплексном гидродинамическом трансформаторе [14]. Модель «черного ящика» для колесного движителя представлена на рис. 1.

Наиболее общей характеристикой любого передаточного механизма, в том числе – колесного движителя, является коэффициент полезного действия (КПД). Общее определение КПД базируется на законе сохранения энергии и поэтому справедливо для всех видов передач [1] механических, гидравлических, электрических. Для колесного движителя:

$$\eta = \frac{F_x V_x}{T_1 \omega_1} = k\eta, \quad (1)$$

где: k – коэффициент трансформации, представляющий величину, обратную динамическому радиусу колеса; i – передаточное отношение, т.е. кинематический радиус (радиус качения) колеса.

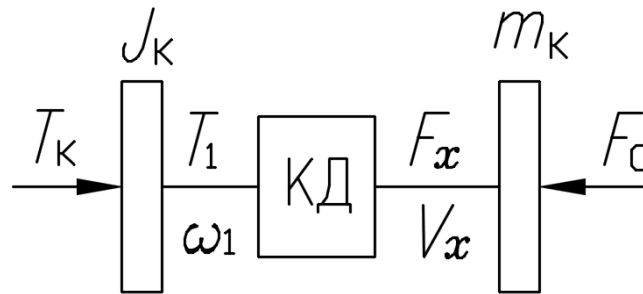


Рис. 1. Входные и выходные переменные колёсного движителя:

$\{T_1, \omega_1\}$ – входные переменные; T_1 – крутящий момент, подводимый к движителю; ω_1 – угловая скорость движителя; $\{F_x, V_x\}$ – выходные переменные; F_x – тяговая сила движителя; V_x – поступательная скорость оси колеса; КД – колесный движитель; T_K – крутящий момент, подводимый к колесу; J_K – момент инерции колеса; m_K – приведённая поступательно движущаяся масса, связанная с колесом; F_C – сила сопротивления движению колеса

Выражение (1) на рис. 2а представлено пространственным графиком в виде гиперболической поверхности.

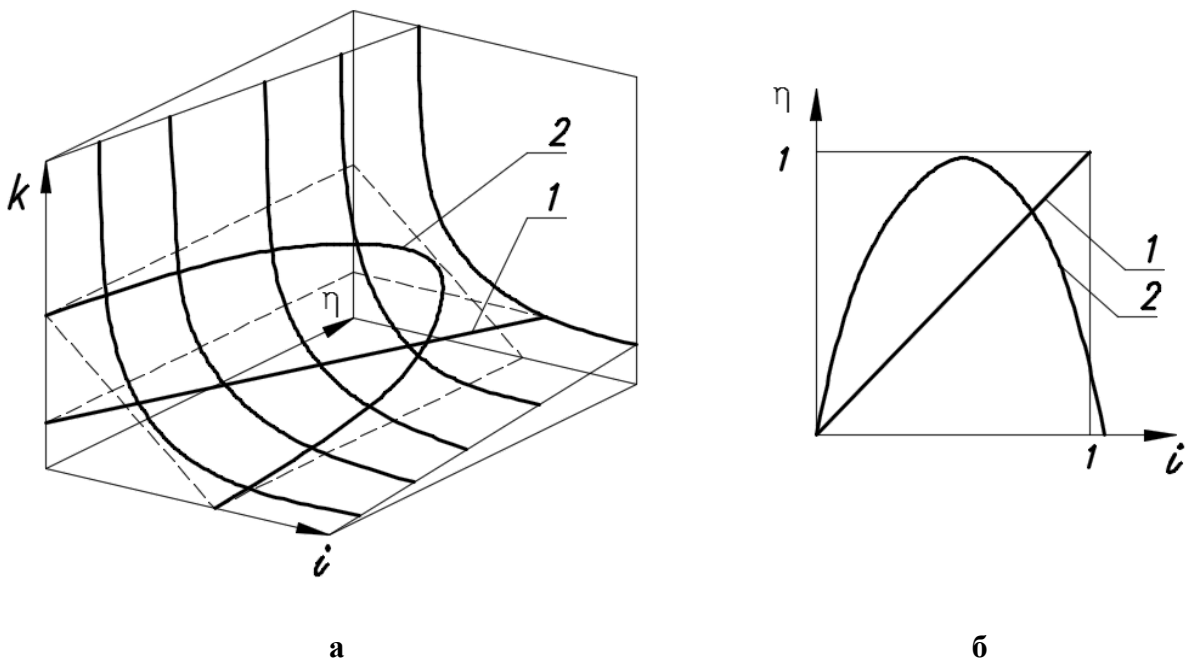


Рис. 2. Обобщенный график КПД:

а – пространственный график; б – сечение поверхности графика плоскостью; k – коэффициент трансформации; i – передаточное отношение; η – коэффициент полезного действия; 1 – зависимость $\eta = \eta(i)$ гидромурфты; 2 – зависимость $\eta = \eta(i)$ гидротрансформатора

Сечения названной гиперболической поверхности плоскостями, различно ориентированными в пространстве, определяют графики КПД конкретных механизмов в зависимости от

величин параметров k и i . Например, для муфт скольжения различной конструкции справедливо равенство $k = 1$. Согласно рис. 2а КПД муфт скольжения определяется как проекция линии пересечения гиперболической поверхности с плоскостью $k = 1$ на ту или иную координатную плоскость (линия 1). Для гидротрансформатора зависимость $k = k(i)$ имеет более сложный характер и находится на линии пересечения гиперболической поверхности с поверхностью $k = k(i)$ (кривая 2). Для построения графика КПД колёсного движителя следует определить аналогичную зависимость коэффициента трансформации k от передаточного отношения (i , т.е. радиуса качения r_k).

Формализация колёсного движителя предполагает однозначную зависимость входных и выходных величин. В этом случае имеется возможность рассматривать любую пару из четырёх величин $\{T_1, \omega_1, F_x, V_x\}$ в качестве входных, а другую пару – в качестве выходных.

Система уравнений входных переменных:

$$\begin{cases} T_1 = T_1(F_x, V_x); \\ \omega_1 = \omega_1(F_x, V_x). \end{cases}$$

Система уравнений скоростных переменных:

$$\begin{cases} T_1 = T_1(\omega_1, V_x); \\ F_x = F_x(\omega_1, V_x). \end{cases}$$

Система уравнений силовых переменных:

$$\begin{cases} V_x = V_x(F_x, T_1); \\ \omega_1 = \omega_1(F_x, T_1). \end{cases}$$

По определению, радиус качения:

$$r_k = \frac{V_x}{\omega_1} = \frac{V_x(F_x, T_1)}{\omega_1(F_x, T_1)}.$$

Зависимости радиуса качения r_k от двух силовых переменных F_x и T_1 $r_k = r_k(F_x, T_1)$ могут быть получены только на основании опытных данных. На рис. 3 представлены экспериментальные зависимости радиуса качения колеса от силовых факторов.

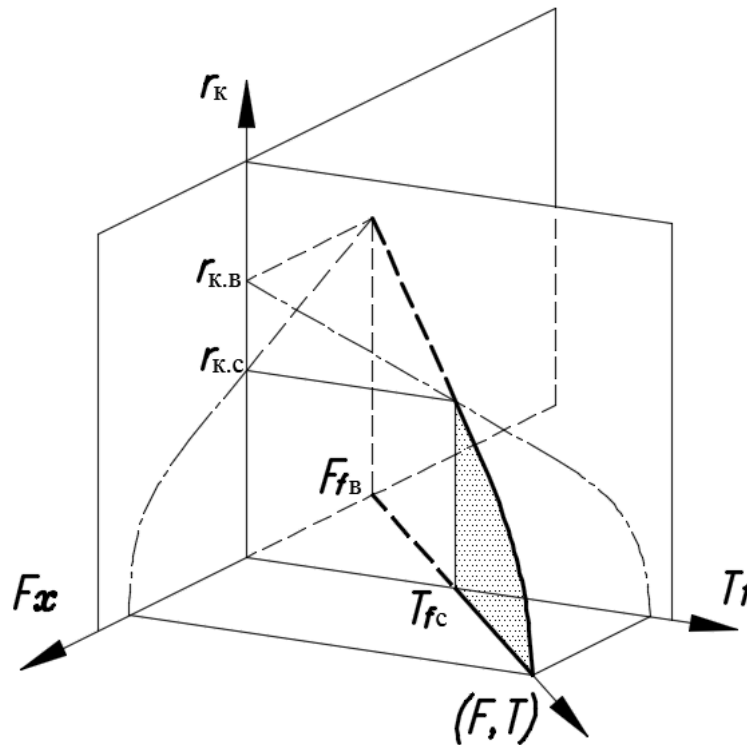


Рис. 3. Зависимость радиуса качения от продольной силы и подводимого крутящего момента:

$r_{k,c}$ – радиус качения в свободном режиме; $r_{k,b}$ – радиус качения в ведомом режиме; $T_{f,c}$ – момент сопротивления качению в свободном режиме; $F_{f,b}$ – сила сопротивления качению в ведомом режиме

Из рисунка следует, что между силовыми факторами, действующими на колёсный движитель, имеет место устойчивая линейная связь:

$$T_1 = T_K - J_K \varepsilon_K = (F_x + f R_Z) r_d,$$

где ε_K – угловое ускорение колеса; f – коэффициент сопротивления качению колеса; R_Z – нормальная реакция опорной поверхности на колесо; r_d – динамический радиус колеса.

Из рис. 3 видно, что зависимость $r_k = r_k(F_x, T_1)$ представляет собой пространственную кривую.

Рассмотрим формальную структуру выражений для описания некоторой относительной величины. Примерами таких величин могут быть различные относительные потери, коэффициенты полезного действия, коэффициенты скольжения и др. Обобщая всё многообразие конкретных физических примеров, можно выделить две схемы описания, которые исходят из мультипликативного и аддитивного представлений.

Введем следующие обозначения: x – текущее значение величины; x_0 – отсчетное значение величины; Δx – отклонение текущего значения величины от отсчетного.

1. Мультипликативное представление:

$$\begin{aligned} x &= x_0 - \Delta x; \\ \lambda &= \frac{x}{x_0} = \frac{x_0 - \Delta x}{x_0} = 1 - \frac{\Delta x}{x_0} = 1 - \Delta \lambda = 1 - \prod_{i=1}^n \Delta \lambda_i; \\ \lambda &= 1 - \frac{x_1 - x_2}{x_1} \frac{x_2 - x_3}{x_2} \frac{x_3 - x_4}{x_3} \dots \frac{x_i - x_{i+1}}{x_i} \dots \frac{x_n - x_{n+1}}{x_n}; \\ \lambda &= 1 - (1 - \xi_1)(1 - \xi_2) \dots (1 - \xi_n). \end{aligned}$$

2. Аддитивное представление:

$$\begin{aligned} x &= x_0 - \Delta x; \\ \lambda &= \frac{x}{x_0} = \frac{x_0 - \Delta x}{x_0} = 1 - \frac{\Delta x}{x_0} = 1 - \Delta \lambda = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i}{x_0}; \end{aligned}$$

$$\Delta x_1 = x_0 - x_0 \eta_1;$$

$$\Delta x_2 = x_0 \eta_1 - x_0 \eta_1 \eta_2;$$

$$\Delta x_3 = x_0 \eta_1 \eta_2 - x_0 \eta_1 \eta_2 \eta_3;$$

⋮

$$\Delta x_i = x_0 \prod_{k=1}^{i-1} \eta_k - x_0 \prod_{k=1}^i \eta_k;$$

$$\lambda = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_0 \prod_{k=1}^{i-1} \eta_k - x_0 \prod_{k=1}^i \eta_k)}{x_0} = \prod_{k=1}^n \eta_k;$$

или

$$\begin{aligned} x &= x_0 - \Delta x; \\ \lambda &= \frac{x}{x_0} = \frac{x_0 - \Delta x}{x_0} = 1 - \frac{\Delta x}{x_0} = 1 - \Delta \lambda = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i}{x_0}; \end{aligned}$$

$$\Delta x_1 = x_0 - x_1 = x_0(1 - s_1);$$

$$\Delta x_2 = x_1 - x_2 = x_0(1 - s_1) - x_0(1 - s_1)(1 - s_2);$$

$$\Delta x_3 = x_2 - x_3 = x_0(1 - s_1)(1 - s_2) - x_0(1 - s_1)(1 - s_2)(1 - s_3);$$

⋮

$$\Delta x_j = x_{j-1} - x_j = x_0 \prod_{i=1}^{j-1} (1 - s_i) - x_0 \prod_{i=1}^j (1 - s_i);$$

$$\lambda = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n \Delta x_j}{x_0} = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n [x_0 \prod_{i=1}^{j-1} (1 - s_i) - x_0 \prod_{i=1}^j (1 - s_i)]}{x_0} = 1 - \prod_{j=1}^n (1 - s_j).$$

Приведенные выше формальные выражения применим для определения силовых и скоростных (кинематических) потерь в колесном движителе.

Будем считать колёсный движитель, схема которого приведена на рис. 1, пассивной безынерционной системой, обладающей следующими свойствами: 1) при передаче через нее механической энергии она не накапливается в системе; 2) в системе отсутствуют внутренние источники энергии; 3) передача механической энергии через систему происходит с бесконечно большой скоростью.

Величина общих потерь мощности в системе определяется по выражению:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = T_1 \omega_1 - T_2 \omega_2, \quad (2)$$

где $P_1 = T_1 \omega_1$ – мощность, подводимая на вход системы; $P_2 = T_2 \omega_2$ – мощность, отводимая с выхода системы; T_1 – силовой фактор потока мощности на входе; ω_1 – скоростной фактор потока мощности на входе; T_2 – силовой фактор потока мощности на выходе; ω_2 – скоростной фактор потока мощности на выходе.

Перепишем выражение (2) с учётом определений коэффициента трансформации и передаточного отношения:

$$\Delta P = T_1 \omega_1 - T_2 \omega_2 = T_1 \omega_1 (1 - ki), \quad (3)$$

где $k = \frac{T_2}{T_1}$ – коэффициент трансформации силового фактора потока мощности;

$i = \frac{\omega_2}{\omega_1}$ – передаточное отношение скоростного фактора потока мощности.

В отличие от идеальной системы без потерь, где выполняется соотношение $ki = 1$ или $k = i$, в реальной системе имеют место необратимые потери, которые делятся на скоростные и силовые. При наличии потерь $ki < 1$ и $k \neq i$.

Представим выражения для коэффициента трансформации k и передаточного отношения i системы с потерями в виде:

$$k = \tilde{k} - \Delta k; \quad i = \tilde{i} - \Delta i, \quad (4)$$

где \tilde{k} – теоретический коэффициент трансформации идеальной системы; Δk – величина уменьшения коэффициента трансформации из-за силовых потерь; \tilde{i} – теоретическое передаточное отношение идеальной системы; Δi – величина уменьшения передаточного отношения из-за скоростных потерь.

По определению, величины \tilde{k} и \tilde{i} в системе без потерь должны удовлетворять соотношению $\tilde{k}\tilde{i} = 1$.

После подстановки выражений (4) в выражение (3), получим:

$$\begin{aligned} \Delta P &= T_1 \omega_1 [1 - (\tilde{k} - \Delta k)(\tilde{i} - \Delta i)] = T_1 \omega_1 (1 - \tilde{k}\tilde{i} + \Delta k\tilde{i} + \tilde{k}\Delta i - \Delta k\Delta i) = \\ &= T_1 \omega_1 (\Delta k\tilde{i} + \tilde{k}\Delta i - \Delta k\Delta i) = T_1 \omega_1 \tilde{k}\tilde{i} \left(\frac{\Delta k}{\tilde{k}} + \frac{\Delta i}{\tilde{i}} - \frac{\Delta k}{\tilde{k}} \frac{\Delta i}{\tilde{i}} \right) = \\ &= T_1 \omega_1 \left(\frac{\Delta k}{\tilde{k}} + \frac{\Delta i}{\tilde{i}} - \frac{\Delta k}{\tilde{k}} \frac{\Delta i}{\tilde{i}} \right) = T_1 \omega_1 (\lambda_k + \lambda_i - \lambda_k \lambda_i), \end{aligned} \quad (5)$$

где $\lambda_k = \frac{\Delta k}{\tilde{k}}$ – коэффициент относительных силовых потерь; $\lambda_i = \frac{\Delta i}{\tilde{i}}$ – коэффициент относительных скоростных потерь.

Для колёсного движителя (рис. 1) формула (5) принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} \Delta P &= T_1 \omega_1 (\lambda_k + \lambda_i - \lambda_k \lambda_i) = T_1 \omega_1 \left(\frac{T_1/r_d - F_x}{T_1/r_d} + \frac{V_T - V_D}{V_T} - \frac{T_1/r_d - F_x}{T_1/r_d} \frac{V_T - V_D}{V_T} \right) = \\ &= T_1 \omega_1 \left(\frac{T_1 - F_x r_d}{T_1} + s - \frac{T_1 - F_x r_d}{T_1} s \right) = T_1 \omega_1 s - F_x r_d \omega_1 + T_1 \omega_1 - T_1 \omega_1 s + F_x r_d \omega_1 s = \\ &= T_1 \omega_1 - F_x r_d \omega_1 + F_x r_d \omega_1 s; \\ \Delta P &= T_1 \omega_1 - F_x r_d \omega_1 (1 - s) = T_1 \omega_1 - F_x r_d \omega_1 \left(1 - \frac{V_T - V_D}{V_T} \right) = T_1 \omega_1 - F_x V_D, \end{aligned}$$

где T_1 – крутящий момент, подводимый к движителю от трансмиссии; ω_1 – угловая скорость колесного движителя; r_d – динамический радиус колес; F_x – продольная тяговая сила колесного движителя; V_T – теоретическая скорость колёсного движителя без потерь; V_D – действительная скорость колесного движителя с потерями; $s = \frac{V_T - V_D}{V_T}$ – коэффициент скольжения колес.

Рассмотрим более детально скоростные, или кинематические, потери колёсного движителя с использованием приведённых выше формальных выражений. Радиус качения колеса

$r_k = r_k(F_x, T_1)$ является нелинейной функцией двух силовых переменных. Приведенная зависимость учитывает два явления: упругое проскальзывание (псевдоскольжение или крип) и внешнее скольжение. На рис. 4 показан качественный вид зависимости $r_k = r_k(F_x, T_1)$ и отдельные составляющие кинематических потерь.

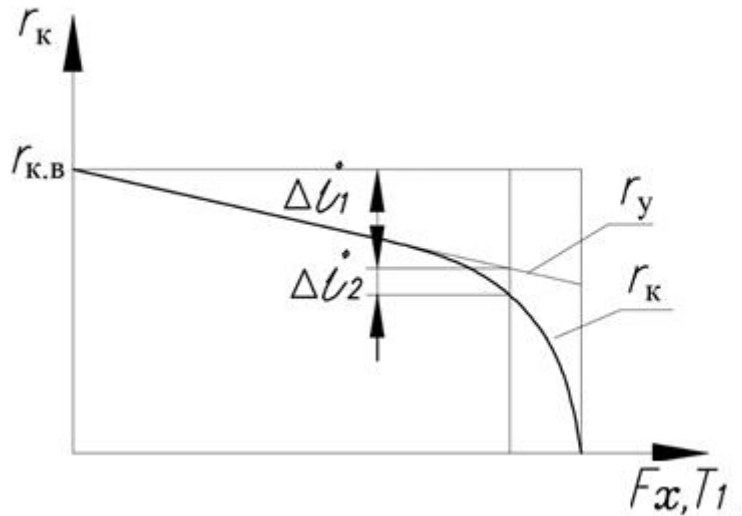


Рис. 4. Зависимость радиуса качения от продольной силы и крутящего момента

В ряде задач целесообразно дифференцированно рассматривать те эффекты, которые обуславливают кинематические потери колеса.

- 1) Упругое проскальзывание, которое приводит к уменьшению радиуса качения r_k по сравнению со свободным радиусом r_c :

$$\Delta i_1 = \Delta i_{11} + \Delta i_{12},$$

где Δi_1 – величина изменения радиуса качения, обусловленная упругими окружными деформациями шины; $\Delta i_{11} = r_c - r_{к.с}$ – составляющая окружных деформаций шины под действием нормальной нагрузки колеса F_z ; r_c – свободный радиус колеса; $r_{к.с}$ – радиус качения колеса в свободном режиме; $\Delta i_{12} = \lambda_x F_x$ – составляющая окружных деформаций шины под действием продольной силы F_x ; λ_x – коэффициент продольной (тангенциальной) эластичности шины по силе. Таким образом,

$$\Delta i_1 = r_c - r_{к.с} + \lambda_x F_x.$$

- 2) Внешнее скольжение, которое приводит к уменьшению радиуса качения r_k по сравнению со свободным радиусом r_c :

$$\Delta i_2 = r_{к0} s_B,$$

где $r_{к0}$ – радиус качения колеса без скольжения; s_B – коэффициент, учитывающий внешнее скольжение колеса.

Проанализируем скоростные потери колеса с использованием аддитивной схемы их представления.

$$\Delta i = \Delta i_1 + \Delta i_2,$$

где $\Delta i_{1,2}$ – снижение передаточного числа, обусловленное двумя различными факторами.

$$\lambda_i = \frac{\Delta i}{\tilde{i}} = \frac{\tilde{i} - i}{\tilde{i}} = \frac{\Delta i_1 + \Delta i_2}{\tilde{i}} = \frac{\tilde{i} - \tilde{i}(1 - s_1) + \tilde{i}(1 - s_1) - \tilde{i}(1 - s_1)(1 - s_2)}{\tilde{i}} =$$

$$= 1 - (1 - s_1)(1 - s_2) = 1 - 1 + s_1 + s_2 - s_1 s_2 = s_1 + s_2 - s_1 s_2 = s_\Sigma. \quad (6)$$

В формуле (6):

$$s_1 = 1 - \frac{r_{к0}}{r_c} - \text{коэффициент упругого проскальзывания};$$

$$s_2 = 1 - \frac{r_k}{r_{к0}} - \text{коэффициент внешнего скольжения};$$

$$s_{\Sigma} = 1 - \frac{r_k}{r_c} - \text{коэффициент суммарного скольжения.}$$

На основе феноменологического представления потерь мощности получены выражения для расчёта силовых и скоростных потерь, возникающих при качении эластичного колеса в составе колёсного движителя по твёрдой опорной поверхности. С использованием аддитивного описания физических явлений рассмотрена структура коэффициента скольжения эластичного колеса по твёрдой поверхности.

Общее феноменологическое представление потерь мощности при качении эластичного колеса позволило установить аналогию с силовыми и объёмными потерями в комплексном гидродинамическом трансформаторе. Полученные результаты могут быть использованы работниками промышленности и научно-исследовательских организаций для целенаправленного совершенствования конструкций движителей колёсных машин с целью повышений их КПД.

Библиографический список

1. **Чудаков, Е.А.** Избранные труды. Т.1. Теория автомобиля / Е.А. Чудаков. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – 463 с.
2. **Фалькевич, Б.С.** Теория автомобиля: учеб. пособие для вузов / Б.С. Фалькевич. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машгиз, 1963. – 240 с.
3. **Петрушов, В.А.** Мощностной баланс автомобиля / В.А. Петрушов, В.В. Москвитин, А.Н. Евграфов; под общ.ред. В.А. Петрушова. – М.: Машиностроение, 1984. – 160 с.
4. **Гришкевич, А.И.** Автомобили: теория: учеб. для вузов / А.И. Гришкевич. – Минск: Вышэйшая школа, 1986. – 208 с.
5. **Литвинов, А.С.** Автомобиль: теория эксплуатационных свойств: учеб. для вузов по специальности «Автомобили и автомобильное хозяйство» / А.С. Литвинов, Я.Е. Фаробин. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.
6. **Смирнов, Г.А.** Теория движения колёсных машин: учеб. для студентов машиностроительных специальностей вузов / Г.А. Смирнов. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Машиностроение, 1990. – 352 с.
7. **Попов, С.Д.** Внешняя механика качения автомобильного колеса с эластичной шиной: учеб. пособие / С.Д. Попов. – М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2001. – 52 с.
8. **Тарасик, В.П.** Теория движения автомобиля: учеб. для вузов / В.П. Тарасик. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 478 с.
9. **Шухман, С.Б.** Теория силового привода колёс автомобилей высокой проходимости / С.Б. Шухман, В.И. Соловьёв, Е.И. Прочко; под общ. ред. С.Б. Шухмана. – М.: Агробизнесцентр, 2007. – 336 с.
10. **Песков, В.И.** Совершенствование эксплуатационных качеств автомобиля: монография / В.И. Песков, В.И. Сердюк, А.Е. Сердюк; НГТУ им Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2009. – 135 с.
11. **Кравец, В.Н.** Теория автомобиля: учеб. для вузов / В.Н. Кравец, В.В. Селифонов. – М.: ООО «Гринлайт+», 2011. – 884 с.
12. **Карташов, А.Б.** Теория движения автомобиля и трактора: лекция № 2 Описание процессов, происходящих при качении эластичного колеса по плоской твёрдой опорной поверхности / А.Б. Карташов. – М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2016. – 52 с.
13. **Левин, М.А.** Теория качения деформируемого колеса / М.А. Левин, Н.А. Фуфаев. – М.: Наука, 1989. – 272 с.
14. **Долгачев, Ф.М.** Основы гидравлики и гидропривод / Ф.М. Долгачев, В.С. Лейко. – М.: Стройиздат, 1981. – 183 с.

Дата поступления
в редакцию: 09.10.2018

**P.E. Dmitriev, V.N. Kravets, P.I. Bazhan, L.A. Zakharov,
Yu.P. Kuznetsov, Yu.I. Palutin, A.S. Slusarev, A.V. Sogin**

**THE LOSSES OF ROLLING ELASTIC WHEELS
ON A SOLID SUPPORT SURFACE**

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alekseev

Purpose: Development of calculating force and speed losses in case of stationary rolling elastic wheels on a solid support surface.

Design/methodology/approach: The theoretical basis of the study is a phenomenological representation of power losses of rolling elastic wheels using the multiplicative and additive descriptions of physical phenomena.

Findings: The obtained results can be used for modification of the design of wheel engine machines thrusters in order to improve their efficiency.

Research limitations/implications: In calculating force and speed losses a wheel-drive is presented by passive inertia less system. The results are only applicable for stationary rolling elastic wheels on a solid support surface.

Originality/value: The difference between finishing work from previously published is in phenomenological view of power losses in wheel pusher by analogy with modeling force and volumetric losses in the complex hydrodynamic transformer.

Key words: elastic wheel, wheel engine, rolling wheels theory, loss power in rolling wheels, force loss, speed loss.

УДК 629.113

В.Г. Дыгало, Е.С. Ларин, В.В. Котов, Л.В. Дыгало

ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ АБС И СДС

Волгоградский государственный технический университет

Работа посвящена созданию экспертной системы для диагностики антиблокировочной тормозной системы и электронного контроля устойчивости автомобиля. Были проанализированы особенности электронного контроля устойчивости, основные недостатки и методы диагностики, характеристики, общие понятия, архитектура, преимущества и недостатки экспертных систем. В ходе исследования выявлено, что точность диагностики современной системы автоматизированного тормозного привода напрямую зависит от квалификации специалиста по обслуживанию. Повысить точность возможно путем применения вспомогательных интерактивных программных средств. Исследование стало основой для создания программного продукта – экспертной системы, позволяющей заменить работу специалиста в области диагностики тормозной системы, АБС с СДС автомобиля.

Ключевые слова: антиблокировочная система тормозов, диагностика, системы активной безопасности автомобиля.

Ежегодно 1,2 млн человек погибает в ДТП и 50 млн получают травмы, и это число каждый день растет. На развивающихся авторынках аварийность на порядок выше: в странах, где большинство населения не имеет возможности позволить себе приобрести качественные автомобили, системы безопасности также не столь высокого уровня. Антиблокировочная система тормозов уже давно носит обязательный характер в Европе, Америке и ряде других стран, с ноября 2011 года в список обязательного оборудования попала и система стабилизации курсовой устойчивости. Применение АБС и СДС вызывает потребность в техническом обслуживании и контроле работоспособности. Хотя системы считаются очень надежными, отказы всё же случаются. Официальная статистика ГИБДД утверждает, что процент происшествий по причине отказов сравнительно невелик. Однако реальное количество таких ДТП гораздо выше. Если ДТП вызвано несколькими причинами, нарушение ПДД фиксируется в качестве основной, а техническая неисправность – в качестве сопутствующей. Наличие технических неисправностей автомобиля опасно не только потому, что они могут явиться прямой или косвенной причиной ДТП, но и потому, что вождение такого транспортного средства затрудняет работу водителя и отвлекает его от процесса управления.

При отказе система АБС отключается и водитель, привыкший к помощнику, оказывается «тет-а-тет» с тормозной системой. При экстренном торможении он по привычке бьет по педали тормоза, срывая автомобиль в юз. Если автомобиль оборудован СДС, при отказе АБС отключается и СДС, что может быть куда опаснее: водитель привыкает к помощникам, которые незаметно компенсируют его ошибки. В случае отказа только СДС некоторые системы активной безопасности остаются активными, однако в случае аварийной ситуации умений водителя, лишённого помощника, может не хватить, и произойдет снос или занос автомобиля.

Как и любая система автомобиля, АБС и СДС нуждаются в диагностике. Для проверки работоспособности и выявления дефектов применяют сканеры. Они отображают коды неисправностей, позволяют считывать текущие параметры, а также открывают доступ к некоторым сервисным функциям. Также сканеры ориентированы только под одну марку автомобиля. В случае использования сканеров и мануалов по ремонту влияние на точность и скорость диагностики имеет квалификация персонала. При использовании технических консультантов скорость и точность диагностики возрастает вместе с затратами. Выходом из данной ситуации может стать экспертная система, которая будет удобна и проста в использовании, что позволит снизить время диагностики и затраты.

Разработанная авторами экспертная система предназначена для стандартного поста диагностики тормозной системы. Пост должен быть оборудован следующими инструментами и оборудованием:

Таблица 1

Механическое: подъемник (или смотровая яма); набор торцевых ключей.	Диагностическое: автомобильный осциллограф; мультиметр; персональный компьютер.
---	--

Экспертная система призвана заменить работу эксперта на посту диагностики неисправностей тормозной системы и АБС автомобиля.

Существует два поколения экспертных систем. Компьютерные системы, которые могут лишь повторить логический вывод эксперта, принято относить к первому поколению. Здесь знания представлены следующим образом:

- а) знаниями системы являются только знания эксперта, опыт накопления знаний не предусматривается;
- б) методы представления знаний позволяют описывать лишь статические предметные области;
- в) модели представления знаний ориентированы на простые области.

Экспертные системы, относящиеся ко второму поколению, называют партнерскими, или усилителями интеллектуальных способностей человека. Их общими отличительными чертами является умение обучаться и развиваться, то есть эволюционировать. Представление знаний в экспертных системах второго поколения следующее:

- а) используются не поверхностные знания, а более глубинные. Возможно дополнение предметной области;
- б) ЭС может решать задачи динамической базы данных предметной области.

Представленный программный продукт был создан по типу экспертной системы первого поколения. Это было необходимо, так как создание экспертной системы второго поколения сильно бы повысило стоимость ЭС. Поскольку диагностика не является интеллектуально сложной задачей, эффект не был бы достигнут.

Экспертная система по диагностике АБС и СДС имеет структуру, изображенную на рис. 1.

Во главе структуры находится экспертная группа инженерии знаний, состоящая из экспертов в предметной области и инженеров знаний. В функции этой группы входит заполнение базы знаний, осуществляемое с помощью специализированной диалоговой компоненты ЭС – подсистемы приобретения знаний, которая позволяет частично автоматизировать этот процесс.

- Подсистема приобретения знаний предназначена для добавления в базу знаний новых правил и модификации имеющихся. В ее задачу входит приведение правила к виду, позволяющему подсистеме вывода применять это правило в процессе работы.
- База знаний – наиболее важная компонента экспертной системы, на которой основаны ее «интеллектуальные способности». В отличие от всех остальных компонент ЭС, база знаний – «переменная» часть системы, которая может пополняться и модифицироваться инженерами знаний и опытом при использовании ЭС между консультациями.
- Подсистема вывода – программная компонента экспертных систем, реализующая процесс ее рассуждений на основе базы знаний и рабочего множества. Она выполняет две функции: во-первых, просмотр существующих фактов из рабочего множества и правил из базы знаний и добавление (по мере возможности) в рабочее множество новых фактов и, во-вторых, определение порядка просмотра и применения правил. Эта подсистема управляет процессом консультации, сохраняет для пользователя информацию о полученных заключениях и

запрашивает у него информацию, когда для срабатывания очередного правила в рабочем множестве оказывается недостаточно данных.

- Диалоговый процессор – состоит из ряда вопросов с вариантами ответа.

Цель ЭС – вывести некоторый заданный факт, который называется целевым утверждением. Работа системы представляет собой последовательность шагов, на каждом из которых из базы выбирается некоторое правило, которое применяется к текущему содержимому рабочего множества. Цикл заканчивается, когда выведено либо опровергнуто целевое утверждение. Цикл работы экспертной системы иначе называется логическим выводом. Логический вывод может происходить многими способами, из которых наиболее распространенные – прямой порядок вывода и обратный порядок вывода. Прямой порядок вывода – от фактов, которые находятся в рабочем множестве, к заключению. Если такое заключение удастся найти, то оно заносится в рабочее множество. Прямой вывод часто называют выводом, управляемым данными.

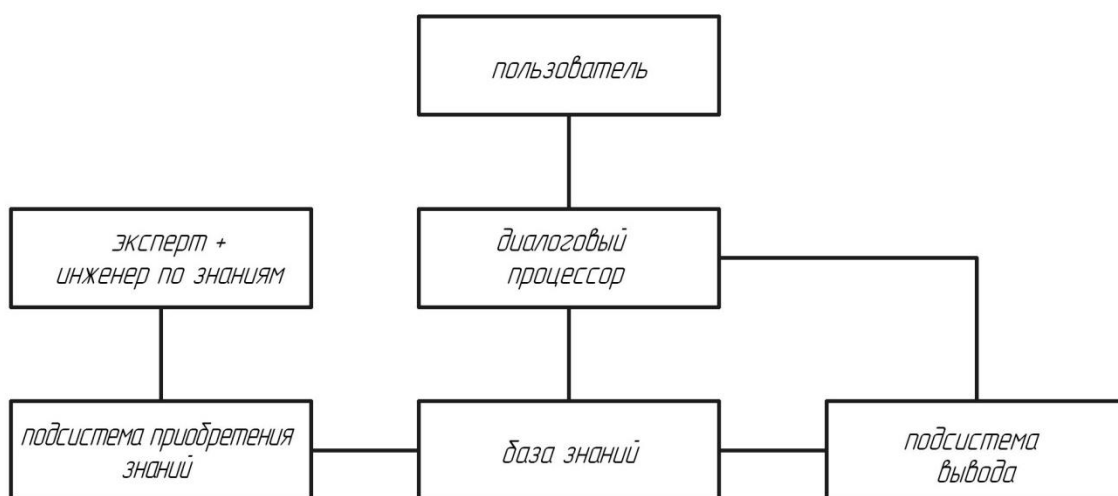


Рис. 1. Структура экспертной системы

В системах диагностики чаще применяется прямой вывод, в то время как в планирующих системах более эффективным оказывается обратный вывод. В некоторых системах вывод основывается на сочетании обратного и ограниченно-прямого. Такой комбинированный метод получил название циклического. В данном программном продукте применялся прямой порядок вывода.

Экспертная система была построена на основе модели графа дерева. Блок-схема алгоритма имеет три основных разветвления: диагностика АБС и СДС, а также диагностика тормозной системы. Диагностика начинается с визуального осмотра и анализа поведения автомобиля в ходе дорожных испытаний. В случае, если после этого дефект не выявлен, система запрашивает данные показаний измерительных приборов без разборки. При необходимости дальнейшей диагностики производится снятие показаний измерительных приборов с разборкой узлов и агрегатов, и делается окончательное заключение о неисправности. В результате прохождения всего теста идет программный анализ ответов пользователя и в конце тестирования высвечивается результат – искомый дефект. Также в программном продукте есть пособие по диагностике для облегчения труда слесаря или мастера.

На рис. 2 представлен пример работы программы. Дефект «окисление контактов от датчиков» может быть выявлен пользователем, отвечающим на вопросы в ходе работы ЭС.

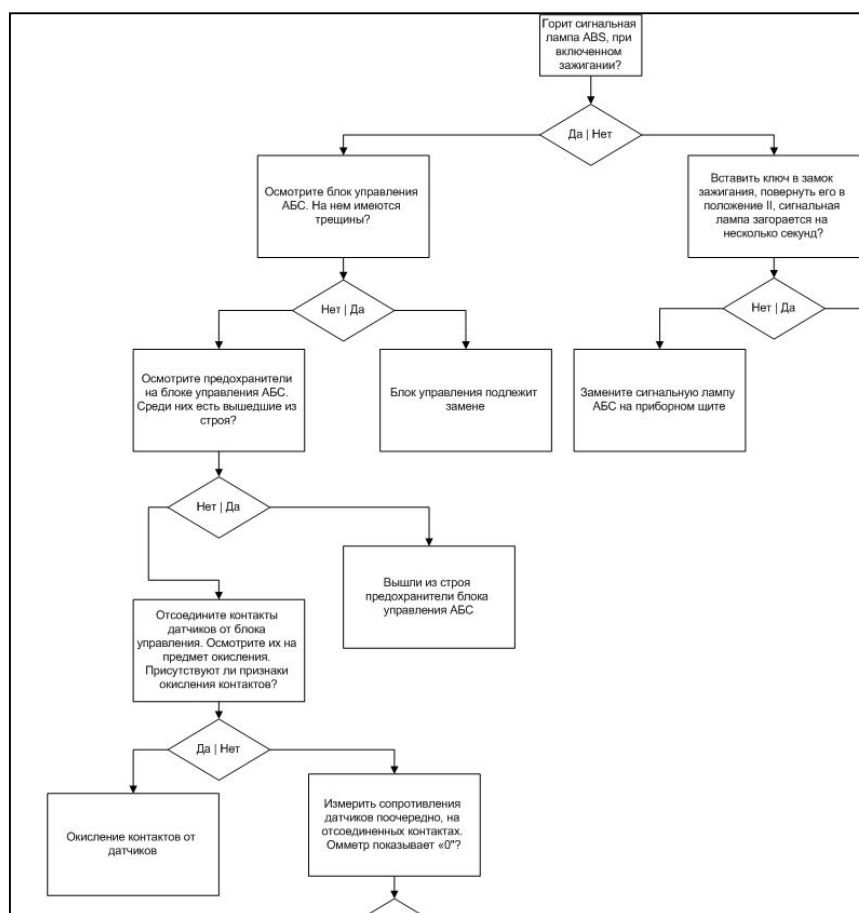


Рис. 2. Фрагмент алгоритма поиска дефектов

Интерфейс программы (рис. 3) разработан с учетом удобства работы для пользователя. Система навигации позволяет легко управлять ходом выполнения программы. В результате прохождения всего теста идет программный анализ ответов пользователя, и в конце тестирования высвечивается результат – искомый дефект. Данный программный продукт предназначен для поста диагностики, пользователь – слесарь со средним специальным образованием, с опытом работы не менее двух месяцев. В настоящее время при возникновении затруднений у слесаря в ходе диагностики, он вынужден обращаться к техническому консультанту. Время диагностики увеличивается так как мастеру необходимо объяснить проблему, и, если специалист не может с ходу решить сложность, приходится использовать специальную литературу. При использовании экспертной системы рабочий обращается к базе знаний программного продукта и пошагово диагностирует систему. Также слесарь может использовать пособие по диагностике, встроенное в экспертную систему, где подробно указаны методика диагностики, необходимый инструмент и места расположения узлов, агрегатов и разъемов. Это позволит сократить время диагностики.

В перспективе база знаний может охватить все системы автомобиля. В таком случае диагностика может производиться быстро и с довольно высокой точностью без привлечения технических консультантов. Это позволит сократить время, затрачиваемое на диагностику и сократить затраты.

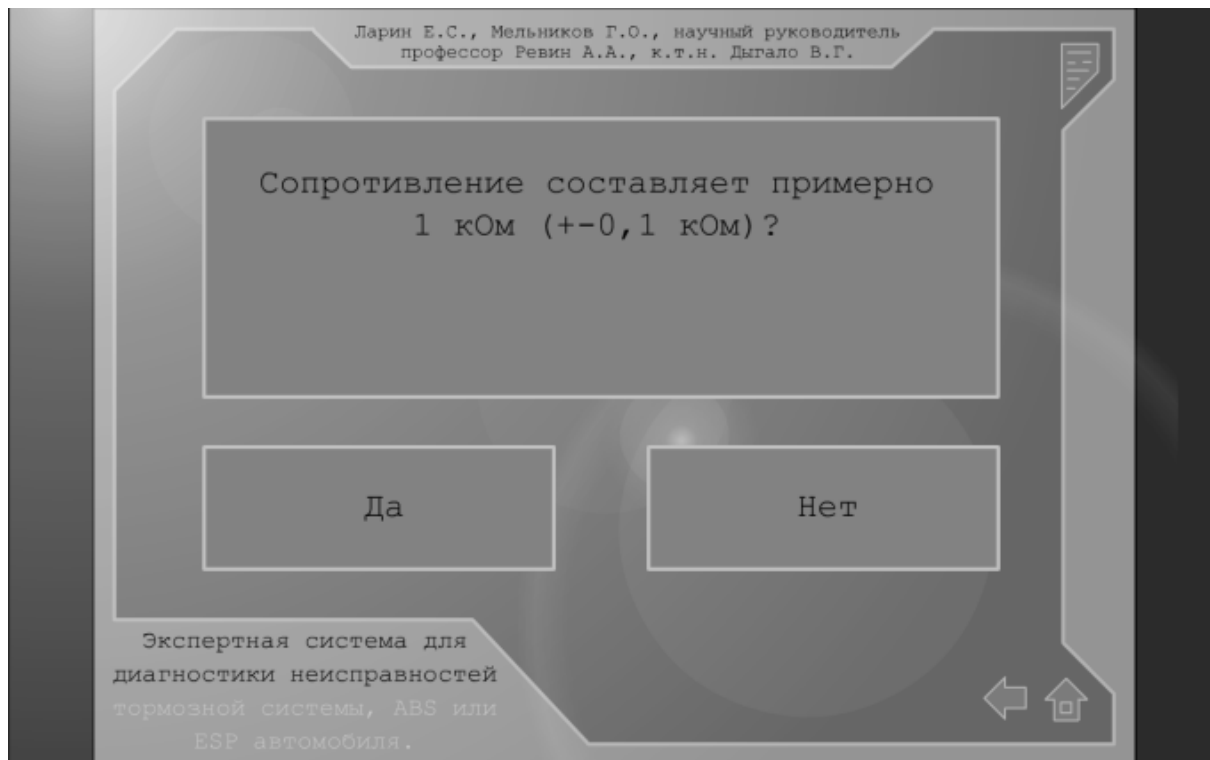


Рис. 3. Интерфейс программы

Разработанная нами экспертная система имеет ряд преимуществ и недостатков перед бортовой диагностикой и техническим консультантом. Они представлены в табл. 2.

Таблица 2

Вид диагностики	Бортовая диагностика	Экспертная система	Технический консультант
Диагностика электрических цепей	+	+	+
Диагностика тормозной системы	-	+	+
Диагностика блока управления ABS	-	-/+	+
Диагностика гидромодулятора ABS	-	-/+	+
Стоимость	+	+	-
Универсальность	-	+	+
Сохранность знаний	-	+	-
Необходимость в специальных знаниях	-	+	-
Возможность альтернативных методов диагностики	-	-	+
Скорость диагностики	-	+	+
Диагностика специфических неисправностей	-	-	+

В результате проделанной работы создана таблица возможных дефектов, составлен алгоритм поиска дефекта, разработано программное средство – экспертная система, реализующая данный алгоритм диагностики тормозной системы, ABS и СДС автомобиля.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 41.13–99 (Правила ЕЭК ООН №13). Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения механических транспортных средств категорий М, N и O в отношении торможения. – Введен впервые; введ. 01.07.00. – М.: Стандартиформ, 2006. – 113 с.
2. ГОСТ Р 51709–2001. Автотранспортные средства. Требования безопасности к техническому состоянию и методы проверки. – Введен впервые; введ. 01.01.02. – М.: Стандартиформ, 2008. – 39 с.
3. **Дворянкин, А.М.** Искусственный интеллект. Базы знаний и экспертные системы: учеб. пособие / А.М. Дворянкин и др. – Волгоград: РПК «Политехник», 2002. – 140 с.
4. Диагностический комплекс для проверки ABS и ESP [Электронный ресурс] / Г.О. Мельников, В.Г. Дыгало, А.А. Ревин, Е.С. Ларин // SCI-ARTICLE.RU: электронный периодический научный журнал. – 2013. – № 3. – С. 17-22. – URL: http://sci-article.ru/stat.php?i=diagnosticheskiy_kompleks_dlya_proverki_ABS_i_ESP. (дата обращения 09.09.2018).
5. Диагностический комплекс систем активной безопасности автомобиля. Диагностика ABS и ESP / Г.О. Мельников, Е.С. Ларин, А.А. Ревин, В.Г. Дыгало // 63-я Открытая студенческая научно-техническая конференция «СНТК Университета машиностроения 2013»: сб. работ. – М., 2013. – С. 220-224.
6. **Дыгало, В.Г.** Виртуально-физическая технология лабораторных испытаний систем активной безопасности автотранспортных средств: монография / В.Г. Дыгало, А.А. Ревин. – Волгоград, 2006. – 316 с.
7. **Дыгало, В.Г.** Виртуально-физическая технология моделирования в цикле проектирования автоматизированных тормозных систем / В.Г. Дыгало // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2007. – Т. 8, № 2. – С. 13-15.
8. **Дыгало, В.Г.** Средства виртуальных испытаний автоматизированных тормозных систем / В.Г. Дыгало, А.А. Ревин // Известия Волгоградского государственного технического университета: Межвуз. сб. науч. ст. – Волгоград, 2004. – С. 67-73.
9. **Дыгало, В.Г.** Стенд для комплексных лабораторных испытаний ЭГТС / В.Г. Дыгало, А.А. Ревин, А. Сорниотти, М. Веллардокиа // Автомобильная промышленность. – 2006. – № 3. – С. 34-35.
10. Комплекс для диагностики систем активной безопасности автомобиля / Г.О. Мельников, Е.С. Ларин, В.Г. Дыгало, А.А. Ревин // Известия ВолгГТУ. Серия "Наземные транспортные системы". – 2013. – Вып. 6, № 10 (113). – С. 102-105.
11. Компьютерный метод диагностики систем активной безопасности автомобиля. Диагностика ABS и ESP / Г.О. Мельников, Е.С. Ларин, А.А. Ревин, В.Г. Дыгало // Актуальные направления фундаментальных и прикладных исследований = Topical areas of fundamental and applied research: матер. междунар. науч.-практ. конф. (Москва, 4-5 марта 2013 г.). – Vol. 2 / spc Academic. – North Charleston (SC, USA), 2013. – С. 81–85.
12. **Ревин А.А.** Виртуальные испытания в цикле проектирования автоматизированных тормозных систем / А.А. Ревин, В.Г. Дыгало // Наука – производству. – 2005. – № 1. – С. 43-47.
13. **Ревин А.А.** Исследование тормозной динамики автомобиля методами комплексной технологии моделирования: Учебное пособие / А.А. Ревин, В.Г. Дыгало. – Волгоград, 2001. – 122 с.
14. **Ревин, А.А.** Комплексное моделирование в цикле проектирования автомобилей и их систем / А.А. Ревин, В.Г. Дыгало // Автомобильная промышленность. – 2002. – № 11. – С. 29-30.
15. **Ревин, А.А.** Комплексная технология моделирования тормозной динамики автомобиля: Монография. – Волгоград, 2000. – 92 с.
16. **Ревин, А.А.** Теория эксплуатационных свойств автомобилей и автопоездов с ABS в режиме торможения: монография / А.А. Ревин. – Волгоград: РПК «Политехник», 2002. – 372 с.
17. Экспертная система для диагностики неисправностей тормозной системы автомобиля с ABS / Е.С. Ларин, Г.О. Мельников, А.А. Ревин, В.Г. Дыгало // 62-я открытая студенческая научно-техническая конференция СНТК МАМИ – 2012, Москва, 16-27 апр. 2012 г.: тез. избран. докл. – М., 2012. – С. 9-10.
18. A Revin et al 2018 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 315 012020
19. Bosch, Automotive Braking Systems, Robert Bosch GmbH, 1995.
20. Martin Maier and Klaus Müller, Robert Bosch GmbH, ABS 5.3: The New and Compact ABS5 Unit for Passenger Cars, SAE Technical Paper Series 950757, 1995.

21. Mitsubishi Lancer X Service Manual & Body Repair Manual, MY 2011-2015 [Электронный ресурс]. – 2015. – URL: http://mmc-manuals.ru/manuals/lancer_x/online/Service_Manual_2008-2012/2015/index_M1.htm (дата обращения 09.09.2018).
22. Reiner Emig, H. Goebels, and H. J. Schramm, Robert Bosch GmbH, Antilock Braking Systems (ABS) for Commercial Vehicles – Status 1990 and Future Prospects, SAE Technical Paper Series 901177, 1990.
23. V Dygalo et al 2018 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 315 012007

*Дата поступления
в редакцию: 09.10.2018*

V.G. Dygalo, E.S. Larin, V.V. Kotov, L.V. Dygalo

EXPERT DIAGNOSTIC SYSTEM ABS AND ESP

Volgograd state technical university

Purpose: The method of automatic control of the braking system with ABS and ESP is described.

Methodology. It is proposed to improve the accuracy of the brake system diagnostics with ABS and ESP using a software and computer complex.

Research implications: The study served as the basis for creating a software product - an expert system.

Conclusions: The accuracy of diagnosis of modern automated brake system directly depends on the qualification of a technical specialist. Increase in accuracy is possible due to the use of additional interactive software.

Keywords: antiblocking system, diagnostics, active safety systems.

УДК 629.369.027.71

А.С. Дьяков¹, А.С. Сученина¹, В.В. Новиков², А.В. Поздеев², И.А. Голяткин²

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОСНОВНЫХ УЗЛОВ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ СНЕГОХОДОВ

Московский государственный университет им. Н.Э. Баумана¹,
Волгоградский государственный технический университет²

В статье описаны конструктивные узлы отечественных снегоходов: бензиновые двигатели, компоновочные схемы и типы платформ, гусеничные движители и гусеницы, передние и задние подвески, рулевое управление, трансмиссия и тормозные системы. В настоящее время наибольшее распространение получила система питания – карбюратор на каждый цилиндр. Вместе с тем, несмотря на все достоинства карбюраторов, отечественные производители постепенно начинают применять системы с впрыском топлива. Тормозные системы устанавливаются дисковые с гидроприводом. В результате таких усовершенствований отечественные снегоходы вплотную приближаются к зарубежным аналогам, но при этом их стоимость остается значительно ниже.

Ключевые слова: отечественные снегоходы, бензиновые, инжекторные двух- и четырехтактные двигатели, компоновочные схемы, гусеничные движители, катково-склизовая система, опорно-катковая система, гусеница, телескопические и рычажные подвески, рулевое управление, тормозные системы.

На основе анализа технических характеристик современных отечественных снегоходов можно выделить следующие характерные конструктивные особенности 7 основных узлов этого типа зимних машин [1-22].

Силовые установки

На настоящий момент наибольшее распространение имеют бензиновые карбюраторные двухтактные агрегаты одно- и двухцилиндровые, рядной компоновки цилиндров (рис. 1). Дизельные двигатели на отечественные снегоходы не устанавливаются по причине их большого веса и затрудненного запуска при низких температурах.

Тенденция использования бензиновых моторов, а также особенности их конструкции могут быть объяснены в основном опытом фирм-производителей по применению того или иного типа двигателя, так как многие производители имеют богатый опыт производства мотоциклов и поэтому используют типично мотоциклетные двигатели и на своих снегоходах.



Рис. 1. Бензиновые одно- и двухцилиндровые двухтактные двигатели PMZ с карбюраторной системой подачи топлива

Несмотря на активное продвижение моделей с четырехтактными моторами, двухтактные имеют следующие достоинства: малый вес; простота конструкции; высокая ремонтпригодность в отсутствие сервисов; возможность ручного запуска. Достоинства четырехтактных двигателей: низкий расход топлива; большой общий ресурс; низкий шум; экологичность. Мощности двигателей (а значит и их объем) и количество цилиндров зависят от класса и назначения снегоходов (утилитарный, туристический, детский, подростковый и т.д.) Соответственно, и объемы двигателей также различны: от 200 до 800 см³ – для одно- и двухцилиндровых агрегатов, реализующих от 6,5 до 67 л.с.

Еще недавно все снегоходы оснащались только карбюраторной системой питания. В 1990-х годах прошлого века появилась альтернатива – впрыск топлива, завоевавший в последнее время широкое признание. Впрыск применяется как на двухтактных, так и на четырёхтактных моторах. Плюсы впрыска: высокая экономичность; стабильность топливной смеси, что позволяет избежать многих проблем с двигателем; экологичность. Но есть и минус, который сводится к сложности впрыска и его неремонтопригодности в полевых условиях. Поэтому карбюраторы еще долго останутся востребованы теми потребителями, которые используют снегоходы в суровых условиях тайги и Крайнего Севера.

В настоящее время наибольшее распространение получила система питания – карбюратор на каждый цилиндр. Но, несмотря на все плюсы карбюраторов, отечественные производители постепенно начинают применять системы с впрыском топлива. Например, в 2018 году АО «Русская механика» начала выпускать новый двухцилиндровый двухтактный двигатель *RMS 551i* с распределенным впрыском топлива мощностью 65 л.с. По сравнению с двигателем *PM3-551* с карбюраторной системой питания данный двигатель обеспечивает рост мощности на 8 %, снижает эксплуатационный расход топлива на 20 % и уменьшает вредные выбросы. В двигателе *RMS 551i* предусмотрена возможность его запуска с аварийного стартера даже при полностью разряженном аккумуляторе (рис. 2).

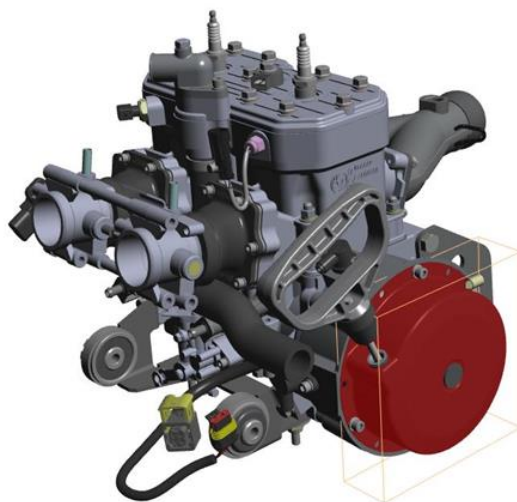


Рис. 2. Двигатель *RMS 551i* с впрыском топлива и механизмом аварийного ручного запуска

Некоторые производители применяют трех- и четырехцилиндровые двигатели. Например, компания «Хаски» на снегоходе «Снегомакс», имеющем кабину, устанавливает трехцилиндровый четырехтактный двигатель объемом 993 см³ и мощностью 53 л.с. Компании «Урал-Моторс», «Моторс Василия Прядеина», НПО «Транспорт» применяют четырехцилиндровые автомобильные двигатели, имеющие еще больший объем и мощность. Модели с этими двигателями имеют явно выраженную утилитарную направленность – фактически, это небольшие грузовики с гусеничным движителем и управляемыми лыжами, имеющие типичную архитектуру и размеры снегоходов.

Применяемые на отечественных снегоходах двигатели в основном имеют принудительное воздушное охлаждение, однако с ростом мощности начинает внедряться система жидкостного охлаждения с установкой радиаторов. Выбор типа охлаждения зависит от предполагаемых условий эксплуатации.

Двигатели с воздушным охлаждением легче и проще, но иногда могут быть склонны к перегреву. Система жидкостного охлаждения обеспечивает более стабильный температурный режим. Но у нее есть и недостаток. Радиатор жидкостного охлаждения на снегоходах в подавляющем большинстве случаев охлаждается не воздухом, а летящим из-под гусеницы снегом. Велика вероятность его повреждения попадающими под гусеницу предметами, пеньками и т.д. Дальнейшее движение с таким повреждением невозможно. Кроме того, система жидкостного охлаждения ограничивает возможность длительного движения по покрытиям, лишенным рыхлого снега – по льду и укатанным дорогам. Поскольку радиатор не охлаждается снегом, возникает перегрев.

Система запуска двигателя может быть как с помощью электростартера от аккумуляторной батареи, так и ручная от магнето.

Система смазки двигателя может быть как смешанная, так и отдельная. Но все более предпочтительной становится последняя, обеспечивающая лучшие условия смазки и снижение расхода масла.

Как показал обзор, электрические силовые установки на отечественных снегоходах практически отсутствуют. Вероятно, это объясняется плохим соотношением масс машины и батарей и отсутствием развитой системы их подзарядки в местах эксплуатации. Однако разработка снегоходов с электроприводом уже начата. Например, в АО «Русская механика» уже тестируют опытные образцы электроквадроциклов, на базе которых планируют разработать и снегоходы с электротягой.

Компоновочные схемы и типы платформ

По общей компоновке снегоходы можно разделить на две схемы: «две гусеницы – одна лыжа» и «одна гусеница – две лыжи». Первая схема в основном применяется для утилитарного класса снегоходов, которым требуется большая площадь опорной поверхности. Вторая схема является более простой, что облегчает снегоход и делает его более поворотливым. Поэтому эта схема в настоящее время является наиболее распространенной.

Схема компоновки во многом определяет форму платформы, на которой монтируются все основные узлы снегохода. Платформа имеет объемную конструкцию и выполняется, как правило, стальной и сварной из гнутого листового профиля (рис. 3). В последнее время для изготовления более легких платформ вместо стали начинают применяться алюминиевые сплавы.

Некоторые особенности алюминиевой платформы Тайга 551 R:

- 1) передняя часть платформы выполнена методом литья под давлением и соединена с остальными элементами в основном с помощью заклепочных соединений и минимального количества сварных соединений, что обеспечивает высокую стойкость в условиях ударных и вибрационных нагрузок;
- 2) скосы в верхней части тоннеля платформы и пирамидальная конструкция передней части (для крепления опоры руля) обеспечивают дополнительную жесткость всей конструкции.



Буран



Тайга 551 R

Рис. 3. Платформы двухгусеничного и одногусеничного снегоходов «Буран» и «Тайга»

Независимо от общей компоновочной схемы, двигатель, как правило, располагается спереди, что обеспечивает возможность лучшего обогрева водителя и пассажира. При этом стремятся по возможности выровнять развесовку снегохода относительно его продольной оси симметрии. Для этого, например, на снегоходе Тайга 551 R коробка перемены передач (КПП) установлена в моторном отсеке справа от двигателя (по ходу движения) (рис. 4).

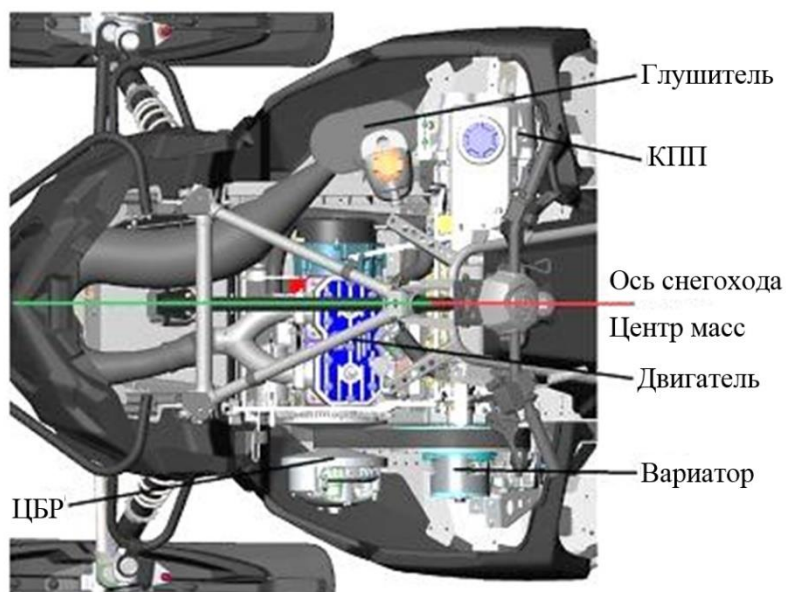


Рис. 4. Компоновка силовой части привода снегохода Тайга 551 R

Также стремятся сделать равномерной развесовку и относительно поперечной оси снегохода. Для этого аккумуляторную батарею располагают под сиденьем пассажира, а багажный отсек делают сзади.

Например, на военном снегоходе АС-1, созданном на базе модели «Тайга Патруль 551 СВТ», имеется увеличенный багажник, который позволяет устанавливать две металлические канистры емкостью 20 л каждая, а также закреплять две пары лыж, гранатомет, автомат АК-74 и винтовку СВД (рис. 5).



Рис. 5. Армейский снегоход АС-1 на базе модели «Тайга Патруль 551 СВТ»

Гусеничные движители

В качестве гусеничного движителя снегоходов, как правило, применяется катково-склизовая система, которая включает в себя комбинацию направляющих, опорных и поддерживающих катков, а также два продольных склиза: это сменные пластиковые «лыжи», которые опираются на основную длину опорной части гусеницы (рис. 6).

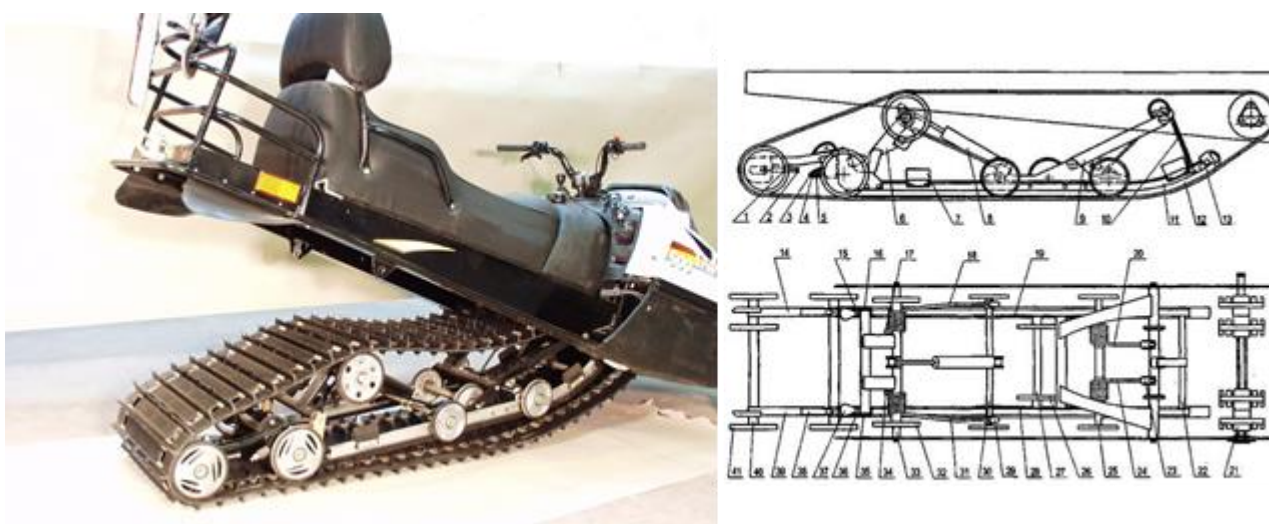


Рис. 6. Гусеничный движитель с катково-склизовой системой снегохода «Тайга 500»

Склизы скользят по металлическим пластинам, расположенным на гусенице. В качестве смазки в этой паре скольжения используется снег. Водитель снегохода должен помнить об этом и следить, чтобы в гусеницу периодически попадал снег, двигаясь по бесснежным покрытиям – льду и плотно укатанным дорогам. Иногда приходится специально подбрасывать в гусеницу снег или даже плескать воду. В противном случае склизы начнут греться, интенсивно изнашиваться – вплоть до их расплавления.

Опорная система только на одних опорных катках используется на отдельных моделях снегоходов, таких, как «Буран», МВП-500, *Alpina Sherpa*. У такой системы есть очевидный плюс – такие снегоходы могут уверенно передвигаться по бесснежным покрытиям: льду и плотно укатанным дорогам (рис. 7).

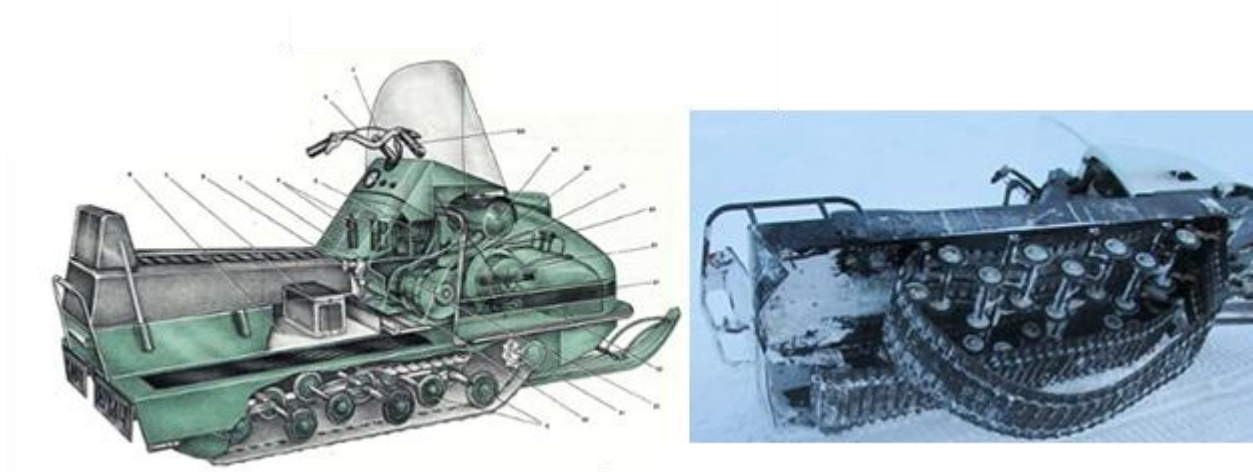


Рис. 7. Гусеничный движитель с опорно-катковой системой снегохода «Буран»

Конструкция гусеницы снегохода представляет собой неразъемную резиновую ленту, армированную синтетическим кордом. С внешней стороны она снабжена грунтозацепами, а внутренняя сторона является гладкой. По всей длине гусеничной ленты выполнены два ряда отверстий, укрепленных металлическими пластинами. Различают два характера зацепления: через окна и цевочное (рис. 8). При цевочном зацеплении на внутренней поверхности ленты имеются зубчатые выступы.



Буран



Тайга 600

Рис. 8. Гусеницы с зацеплением через окна и цевочным зацеплением для снегоходов Буран и Тайга 500

При проектировании снегохода в зависимости от его назначения конструкторы имеют возможность подобрать длину и ширину гусеницы, и высоту грунтозацепа. При этом высота грунтозацепа зависит от мощности двигателя. Техническое описание приведенных выше гусениц представлено ниже и в табл. 1.

Стандартная гусеница для снегохода «Буран» (длинная база) имеет стандартный рисунок «елочка», что обеспечивает высокую проходимость по различным видам снежного покрова. Стандартная гусеница для снегоходов «Тайга-Патруль» и «Барс» имеет симметричный рисунок грунтозацепа, что позволяет уменьшить боковое скольжение и не ограничивает направление движения. Увеличенная ширина 60 см и усиленные ребра жесткости позволяют сделать тяговые свойства более высокими.

Таблица 1

Технические характеристики гусениц моделей Буран и Тайга 600

Модели снегоходов	Буран	Тайга 600
Характер зацепления	Через окна	Цевочное
Количество шагов	73	62
Масса гусеницы, кг	19	35
Размеры (Длина x Ширина x Шаг), мм (дюймов)	3686 x 380 x 50,5 (145 x 15 x 1,99)	3937 x 600 x 63,5 (155 x 24 x 2,5)
Высота грунтозацепа, мм (дюймов)	17,5 (0,69)	22,5 (0,89)
Перечень моделей техники, к которым подходит гусеница	Буран 4ТД, Буран СБ-3700 (Арктика), Буран СБ-640МД, Буран СБ 640 АД	<i>PATRUL 550 SWT</i> , БАРС, Тайга классика 11 компл., Тайга Ст-500Д <i>PATRUL 551 SWT</i>

Производители снегоходов добились того, что гусеница перестала быть расходным элементом. Ее ресурс при нормальной эксплуатации не меньше ресурса самого снегохода. Тем не менее, при повреждении гусеницы возможен ее обрыв. Ремонт в этом случае невозможен, необходима замена. Обязательное условие длительной эксплуатации гусеницы – это регулярный контроль ее натяжения и выравнивание. Отверстия в гусенице необходимы для зацепления зубьев ведущей звездочки. Именно попадание посторонних предметов в эти отверстия – основная причина повреждений и обрывов гусеницы. Металлические пластины, укрепляющие отверстия, выполняют и еще одну функцию – именно они образуют пару скольжения со склизками. Выбор параметров гусеницы и степень ее загрузки очень сильно влияют на баланс качеств снегохода уже на стадии его проектирования. Среди них наиболее важными являются 3 параметра: ширина гусеницы; длина гусеницы; развесовка, то есть распределение полной массы снегохода между лыжами и гусеницей.

Уменьшение ширины гусеницы способствует повышению управляемости и маневренности, снижает зависимость снегохода от продольных неровностей, а ее увеличение улучшает проходимость. В настоящий момент большинство одногусеничных снегоходов выпускается со стандартной шириной гусеницы в 15 дюймов (381 мм), либо с широкой гусеницей (она же – *widetrak*) шириной в 20 дюймов (508 мм). В последнее время становится популярной сверхширокая гусеница – 24 дюйма (610 мм). Использование сверхширокой гусеницы позволяет вплотную приблизиться по проходимости к двухгусеничным снегоходам.

Широкие гусеницы до последнего времени были уделом утилитарных снегоходов. Но в последнее время на рынке появились промежуточные модели, сочетающие комфорт туристических снегоходов с наличием широкой и даже сверхширокой гусеницы.

Уменьшение длины гусеницы способствует повышению управляемости и маневренности, а ее увеличение улучшает проходимость. В технических данных снегоходов всегда приводится длина ее полной окружности, как правило, это 3000-4000 мм. Опорная поверхность гусеницы не превышает трети этой длины.

Увеличение доли нагрузки, приходящейся на лыжи, повышает управляемость. По этому пути идут при конструировании кроссовых и туристических моделей, для которых проходимость по глубокому снегу является вторичным качеством. Увеличение нагрузки на гусеницу в совокупности с увеличением ее размера смещает приоритет в сторону проходимости.

Подвеска

Подвеска передней и задней частей снегохода во многом зависит от компоновочной схемы. У двухгусеничных снегоходов подвеска гусеничных движителей имеет балансирно-подпружиненную конструкцию, рассчитанную на амортизацию мелких неровностей и приспособление гусеницы к ландшафту. У одногусеничных снегоходов подвеска гусеничного движителя рассчитывается на эффективное погашение энергии при движении на больших скоростях, при прыжках. Ее обязательным элементом являются амортизаторы. Основная характеристика такой подвески – ее ход. Обычно он составляет 200-300 мм, на отдельных моделях горных снегоходов может достигать 400 мм.

В качестве упругих элементов для подрессоривания элементов гусеничного движителя применяют пружины кручения, цилиндрические пружины и торсионные валы. В качестве амортизаторов – гидравлические и газонаполненные амортизаторы, в том числе с возможностью регулирования статического положения в зависимости от степени загрузки.

Например, задняя подвеска снегохода «TAYGA 550 Patrol SWT» является настраиваемой, обеспечивает ход 190 мм и имеет подламывающуюся пятку, что предотвращает зарывание в снег при движении задним ходом (рис. 9).

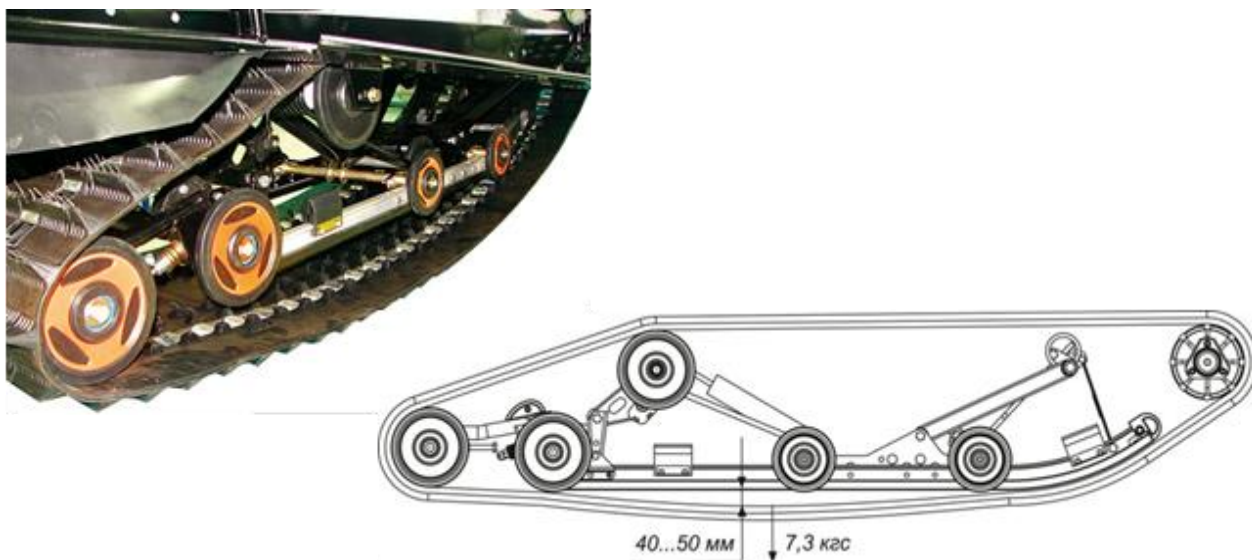


Рис. 9. Задняя подвеска снегохода «TAYGA 550 Patrol SWT»

В настоящее время наибольшее распространение получили два типа передней подвески: телескопическая и двухрычажная. Первый тип является более компактным, а второй тип обеспечивает большие хода (рис. 10).

Рулевое управление

На снегоходах в основном используется рулевое управление мотоциклетного типа, в том числе на самых последних моделях – с регулированием положения (рис. 11). На тяжёлых снегоходах возможна установка гидравлического или электрического усилителя руля.



Stels «Ермак»

RMS 551i TOUR

Рис. 10. Передняя телескопическая и рычажная подвески снегоходов Stels «Ермак» и RMS 551i TOUR

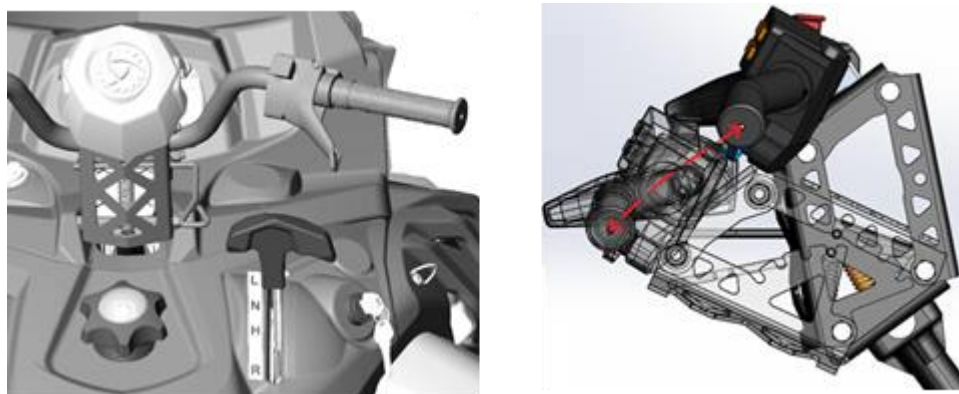


Рис. 11. Рулевое управление с механизмом регулирования положения руля снегохода RMS 551i TOUR

Известно, что по сравнению со схемой «две гусеницы – одна лыжа» снегоход с одной гусеницей и двумя лыжами обладает лучшей управляемостью. В свою очередь, на управляемость такого снегохода оказывает влияние колея лыж, величина которой у большинства современных снегоходов зависит скорее от конструкции передней подвески. Для моделей со свечной подвеской она составляет около 950 мм, для моделей с рычажной – около 1050 мм. Эти величины являются инженерным компромиссом, так как на каждом типе снегохода есть факторы, ограничивающие ее чрезмерное уменьшение или увеличение.

По общему правилу, увеличение колеи улучшает устойчивость и управляемость снегохода, но, вместе с тем, и ограничивает возможность активного управления снегоходом: водителю становится сложнее наклонять снегоход собственным весом при прохождении поворотов, при движении поперек склонов. На многих моделях есть возможность регулировки колеи в зависимости от предпочтений владельца.

Поскольку при одногусеничной схеме все три точки опоры существенно разнесены по углам треугольника, это позволяет оснащать снегоход длинноходными эффективными подвесками.

Трансмиссия

Основой трансмиссии любого снегохода является клиноременный вариатор, который выполняет функции сцепления и редуктора передаточных чисел во время движения (рис. 12).

После вариатора крутящий момент может передаваться на ведущую звездочку гусеницы двумя способами: либо через дополнительный редуктор; либо напрямую. Практически все утилитарные и туристические снегоходы имеют отдельный редуктор, предусматривающий возможность включения заднего хода и пониженную передачу. Пониженная передача используется при движении в тяжелых условиях (глубокий пухлый снег, движение в затяжные подъемы), а также при движении с груженым прицепом.

На спортивных снегоходах пониженная передача не нужна, и редуктор на них используется только для включения заднего хода. Задняя передача уже давно входит в стандартную комплектацию практически всех снегоходов.

Ремень на снегоходе является расходным материалом и наличие запасного ремня является обязательным условием эксплуатации. Средний условный ресурс ремня при его нормальной эксплуатации – 500...1000 км. Хотя его можно привести в негодность и за считанные километры – по неопытности. Напротив, при удачных условиях эксплуатации качественный ремень может прослужить и несколько тысяч километров.

Тормозные системы

Практически все снегоходы имеют дисковые тормозные механизмы с гидроприводом (рис. 12).

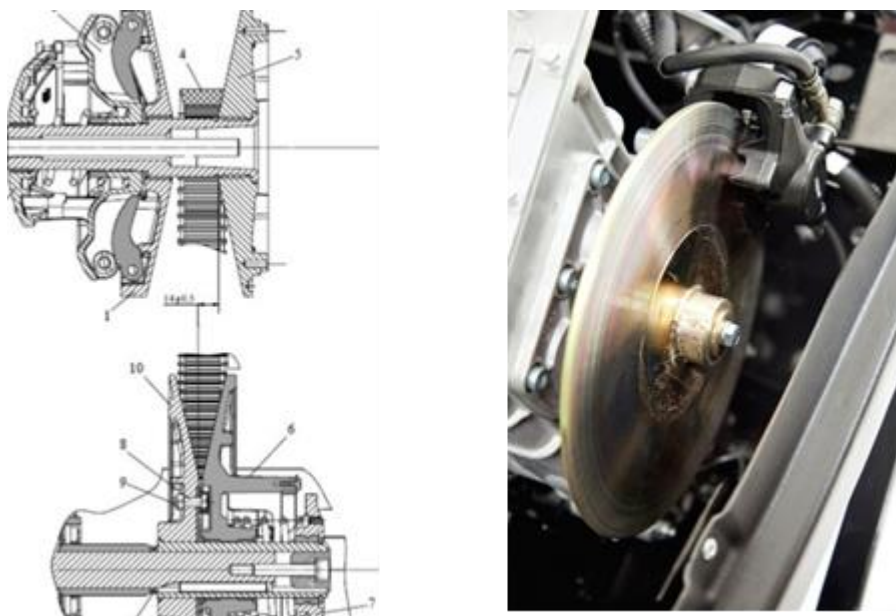


Рис. 12. Вариатор и гидропривод дискового тормоза снегохода «TAYGA 550 Patrol SWT»

Выводы

Анализ конструкций отечественных снегоходов показал, что их развитие идет по пути совершенствования основных узлов с целью улучшения массово-технических характеристик и эксплуатационных свойств.

Среди двигателей наибольшее распространение получают трех- и четырёхцилиндровые четырехтактные бензиновые двигатели, обеспечивающие более низкий расход топлива,

большой ресурс, низкий уровень шума и экологичность выхлопа. Но также востребованными остаются и более простые в эксплуатации двухтактные моторы.

Компоновочные схемы зависят от типа снегохода, но постепенно начинают все чаще выпускаться зимние машины с более простой компоновкой «одна гусеница – две лыжи». При этом независимо от компоновочной схемы основным материалом для изготовления более легких платформ снегоходов становятся алюминиевые сплавы.

Гусеничным двигателем отечественных снегоходов в основном является более простая по конструкции катково-склизовая система. Но есть также опорные системы на одних катках, которые применяются, например, на снегоходах «Буран», МВП-500 и *Alpina Sherpa*. Ресурс работы гусениц уже сравним с ресурсом работы снегохода, ранее она была расходным элементом. При этом для горных снегоходов идет тенденция уменьшения длины и ширины гусеницы, что дает улучшение управляемости, а для утилитарных и туристических снегоходов для повышения их проходимости применяются более широкие и длинные гусеницы.

Элементами подвески являются пружины кручения, цилиндрические пружины и торсионные валы, а также гидравлические и газонаполненные амортизаторы с возможностью регулирования статического положения от степени нагрузки. Наибольшее распространение получили два типа передней подвески – телескопическая и двухрычажная. Первый тип является более компактным, а второй тип обеспечивает большие хода. Рулевое управление используется мотоциклетного типа с регулированием положения и установкой гидравлического или электрического усилителя руля. Также возможна индивидуальная регулировка колеи лыж. Основной трансмиссии является клиноременный вариатор, который также выполняет функции сцепления, и редуктор для понижения оборотов и реверса ведущей звездочки. Но на спортивных снегоходах пониженные передачи не ставятся, а применяется только редуктор с задней скоростью. Ресурс ремня соответствует пробегу до 1000 км. Тормозные системы устанавливаются дисковые с гидроприводом.

В результате таких усовершенствований отечественные снегоходы по качеству становятся очень близким зарубежным аналогам, но при этом их стоимость остается значительно ниже.

Работа выполнена в МГТУ им. Н.Э. Баумана при финансовой поддержке Минобрнауки России по Соглашению №14.577.21.0272 (Уникальный идентификатор работ: RFMEFI57717X0272)

Библиографический список

1. **Дерунов, Г.П.** Машинная тяга саней. История русского снегохода / Г.П. Дерунов, А.М. Кириндас, И.В. Ксенофонтов. – Рыбинск: Медиарост, 2011. – 351 с.
2. **Петрова, М.С.** Оценка конкурентоспособности отечественных снегоходов и пути ее повышения / М.С. Петрова, И.И. Ицкович // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. – 2013. – № 1 (24). – С. 302-306.
3. **Петухов, М.Ю.** Проблемы эксплуатации снегоходов импортного производства в экстремальных условиях / М.Ю. Петухов, А.М. Щелудяков // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. – 2013. – № 1. – С. 323-328.
4. **Сулейменов, Т.Б.** Қардажүргіштің меңгерік шаңғы аспасын жетілдіру / Т.Б. Сулейменов, Д.К. Саржанов, К.К. Абишев, Д.Қ. Есенжол // Вестник ЕНУ им. Л.Н. Гумилева. – 2015. – № 6 (109). – С. 228-231.
5. **Абишев, К.К.** К вопросу совершенствования ходовой части снегоходов / К.К. Абишев, Д.К. Саржанов, О.Т. Балабаев, Д.К. Есенжол // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 5-5. – С. 704-708.
6. **Филиппов, Э.И.** Повышение эффективности эксплуатации снегохода «Буран» в условиях крайнего севера / Э.И. Филиппов, Р.Д. Пастухова // Современные тенденции развития науки и технологий. – 2017. – № 2-3. – С. 52-53.

7. **Лебедева, А.И.** Основные направления реализации политики импортозамещения на примере деятельности АО «Русская механика» / А.И. Лебедева, Т.В. Смирнова // Структурные изменения в экономике России в условиях торгово-экономических санкций и политики импортозамещения. Сборник научных трудов по итогам Всероссийской научно-практической конференции. – Саратов, 2017. – С. 59-62.
8. Анализ рынка снегоходов в России [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.prnews.ru/topic/analiz-rynka-snegohodov-v-rossii>. (дата обращения 09.09.2018).
9. Снегоходы СТЕЛС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://snegohod-stels.ru>.
10. АО «Русская механика» — производитель снегоходов и мотовездеходов (квадроциклов) в г. Рыбинске [Электронный ресурс]. – URL: <http://go-rm.ru>. (дата обращения 09.09.2018).
11. Сравнение снегоходов Стелс Мороз и Буран [Электронный ресурс]. – URL: <https://badmoto.ru/2017/10/16/russkaja-mehanika-buran-lider-vs-stels-moroz>. (дата обращения 09.09.2018).
12. Новая модель от Русской Механики – снегоход RMS 551I TOUR! [Электронный ресурс]. – URL: <http://royal-auto.kz/blog/novaya-model-ot-russkoj-mehaniki---snegohod-rms-551i-tour>. (дата обращения 09.09.2018).
13. П. м. 170153 Российская Федерация, МПК В62М 27/02, В62D 55/06. Корпус снегохода / А.С. Афанасьев, Ю.В. Барщевский, А.М. Жогин; заявитель и патентообладатель ООО «ВЕЛОМОТОРС». - № 2016127430; заявл. 07.07.2016; опубл. 17.04.2017, Бюл. № 11.
14. П. м. 170216 Российская Федерация, МПК В62М 27/02, В62D 55/104. Подвеска гусеницы снегохода / Р.С. Валеев, А.В. Маслов, Д.С. Тихомиров; заявитель и патентообладатель АО «Русская механика». - № 2016140076; заявл. 11.10.2016; опубл. 18.04.2017, Бюл. № 11.
15. П. м. 168245 Российская Федерация, МПК В62М 27/02, В62D 55/08. Подвеска гусеницы снегохода / А.М. Жогин, А.Н. Ермолаев, Ю.В. Барщевский, А.С. Афанасьев; заявитель и патентообладатель ООО "ВЕЛОМОТОРС". - №2016115130; заявл. 20.04.2016; опубл. 25.01.2017, Бюл. № 3.
16. П. м. 168762 Российская Федерация, МПК В62D 55/00. Подвеска гусеницы снегохода / А.М. Жогин, Ю.В. Барщевский; заявитель и патентообладатель ООО «ВЕЛОМОТОРС». - №2016124097; заявл. 17.06.2016; опубл. 17.02.2017, Бюл. № 5.
17. П. м. 171267 Российская Федерация, МПК F16H 1/00, В60K 17/06. Коробка переключения передач снегохода / А.М. Жогин, А.Н. Хмелевский; заявитель и патентообладатель ООО «ВЕЛОМОТОРС». - № 2016150874; заявл. 23.12.2016; опубл. 26.05.2017, Бюл. № 15.
18. П. м. 171285 Российская Федерация, МПК В60K 15/063, В62D 63/04. Снегоход / А.М. Жогин, А.С. Афанасьев; заявитель и патентообладатель ООО "ВЕЛОМОТОРС". - № 2016150875; заявл. 23.12.2016; опубл. 29.05.2017, Бюл. № 16.
19. П. м. 174344 Российская Федерация, МПК В62D 55/00, В62D 65/02. Рама снегохода / А.М. Жогин, Ю.В. Барщевский; заявитель и патентообладатель ООО «ВЕЛОМОТОРС». - № 2016150873; заявл. 23.12.2016; опубл. 11.10.2017, Бюл. № 29.
20. П. м. 176578 Российская Федерация, МПК В62В 17/04, В62В 13/10, В62К 25/00. Подвеска рулевой лыжи снегохода / Р.С. Валеев, А.А. Кудрявов, А.В. Маслов; заявитель и патентообладатель АО «Русская механика». - № 2017129040; заявл. 14.08.2017; опубл. 23.01.2018, Бюл. № 3.
21. П. о. 107038 Российская Федерация, МКПО 12-14. Снегоход / А.А. Фабишевский, А.В. Шаршаков, П. Варотто; заявитель и патентообладатель ООО «Санрайз». - №2017501368; заявл. 27.03.2017; опубл. 13.02.2018.
22. П. о. 104682 Российская Федерация, МКПО 12-14. Снегоход / Р.С. Валеев, А.В. Каменский, А.В. Маслов; заявитель и патентообладатель АО «Русская механика». - № 2016503093; заявл. 09.08.2016; опубл. 16.08.2017.

*Дата поступления
в редакцию: 09.10.2018*

A.S. Dyakov¹, A.S. Suchenina¹, V.V. Novikov², A.V. Pozdeev², I.A. Golyatkin²

CONSTRUCTIVE FEATURES OF THE MAIN KNOTS OF DOMESTIC SNOWMOBALS

Moscow state university. N.E. Bauman¹,
Volgograd state technical university²

Purpose: Development and design of the main elements of snowmobiles.

Design/methodology/approach: This article describes such constructive components of domestic snowmobiles as gasoline engines, layout schemes and types of platforms, tracked propulsion and tracks, front and rear suspension, steering, transmission and braking systems.

Findings: As a result of these improvements, domestic snowmobiles are closely approaching foreign ones, but their cost remains much lower.

Research limitations/implications: Among engines, the most common are three- and four-cylinder four-stroke gasoline engines, providing lower fuel consumption, greater resource, low noise level and environmentally friendly exhaust.

Originality/value: Analysis of the designs of domestic snowmobiles showed that their development follows the path of improving the main components in order to improve the mass-technical characteristics and operational properties.

Keywords: domestic snowmobiles, petrol, injection two- and four-stroke engines, layout diagrams, tracked propulsion, roller-sklyzicheskaya system, support-roller system, caterpillar, telescopic and lever suspension, steering, brake systems.

УДК 656.1

М.М. Жилейкин, А.Ю. Захаров, М.В. Паньшин

ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ И ТОЧНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛАСТИЧНОГО КОЛЕСА С ДЕФОРМИРУЕМЫМ ОПОРНЫМ ОСНОВАНИЕМ

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

К настоящему времени известно большое число математических моделей движения колеса по деформируемому опорному основанию, основанных на разных подходах к математическому описанию как оболочки шины, так и самого грунта. При разработке любой математической модели всегда возникают вопросы, связанные с ее адекватностью и точностью, что можно проверить только в случае сравнения вычисляемых в модели параметров с их значениями, полученными в ходе проведения измерений на реальных объектах, то есть экспериментальными методами. Целью работы является проверка точности и адекватности математической модели взаимодействия эластичного колеса с деформируемым опорным основанием, разработанной авторами, экспериментальными методами. Установлено, что относительная ошибка при определении различных параметров взаимодействия шины с деформируемым опорным основанием не превышает 7,4%.

Ключевые слова: деформируемое опорное основание, математическая модель колеса, адекватность и точность математической модели.

Введение

При разработке новых вездеходных автомобилей спрогнозировать их проходимость в многообразных дорожно-грунтовых условиях можно только с помощью методов математического моделирования. Широкое практическое использование этих методов затрудняется малой изученностью процессов взаимодействия эластичного колеса с деформируемым опорным основанием, недостаточным объемом материалов по характеристикам грунтов [1].

К настоящему времени известно большое число математических моделей движения колеса по деформируемому опорному основанию, основанных на разных подходах к математическому описанию как оболочки шины, так и самого грунта [2-8].

При разработке любой математической модели всегда возникают вопросы, связанные с ее адекватностью и точностью, что можно проверить только в случае сравнения вычисляемых в модели параметров с их значениями, полученными в ходе проведения измерений на реальных объектах, то есть экспериментальными методами.

Целью работы является проверка точности и адекватности математической модели взаимодействия эластичного колеса с деформируемым опорным основанием, разработанной авторами [9], экспериментальными методами.

Экспериментальное определение параметров взаимодействия колеса с деформируемым опорным основанием

Целью экспериментального исследования является определение параметров взаимодействия одиночного колёсного движителя с деформируемой опорной поверхностью (форма пятна контакта, глубина колеи, «зарывание» колеса в грунт, деформирование опорной поверхности).

В качестве объекта исследования использовался многоцелевой автомобиль МЗКТ-6001 (рис. 1), технические характеристики которого представлены в табл. 1.



Рис. 1. Используемый тягач

Таблица 1

Технические характеристики МЗКТ-6001

Колесная формула	6x6
Снаряженная масса ТС, кг	12800
Полная масса ТС, кг	24000
Допустимые осевые массы, кг	3x8000
Максимальная скорость, км/ч	90
Запас хода по контрольному расходу топлива, км	1000
Емкость топливных баков, л	250+250
Высота ТС, мм	3195
Колея ТС, мм	2550
Двигатель – ЯМЗ-7513:	
Максимальная мощность при $n_0=1900$ об/мин, л.с. (кВт)	420 (309)
Максимальный крутящий момент при $n_0=1100-1300$ об/мин, кгс·м (Н·м)	185 (1813)
Статический радиус, м (шина – 16.00R20)	0,67

Для определения нагрузочной характеристики шины экспериментальное исследование проводилось на твердой ровной опорной поверхности – асфальтобетонном дорожном покрытии в сухую погоду на полигоне в Дмитровском филиале МГТУ им. Н.Э. Баумана. При проведении эксперимента регистрировались нагрузка на колесо, свободный радиус шины на твердой ровной опорной поверхности, количество грунтозацепов, их высота, глубина колеи, образовавшаяся в области взаимодействия колёсного движителя с грунтом, расстояние от центра вращения колеса до сформированного грунта, а также параметры, характеризующие длину поверхности контакта. Было произведено пятнадцать замеров с дальнейшей обработкой полученных результатов измерений с использованием известных статистических методов.

Замеры проводились на твердой ровной опорной поверхности для левого колеса передней оси автомобиля МЗКТ-6001.

Регистрировались следующие параметры, определяющую нагрузочную характеристику шины (рис. 2):

- 1) нагрузка на колесо G_k , Н;
- 2) свободный радиус шины $r_{св}$, мм;
- 3) расстояние от центра вращения колеса до опорной поверхности $z_{кп}$, мм;
- 4) количество грунтозацепов $n_{г}$;
- 5) высота грунтозацепов $h_{zг}$, мм.

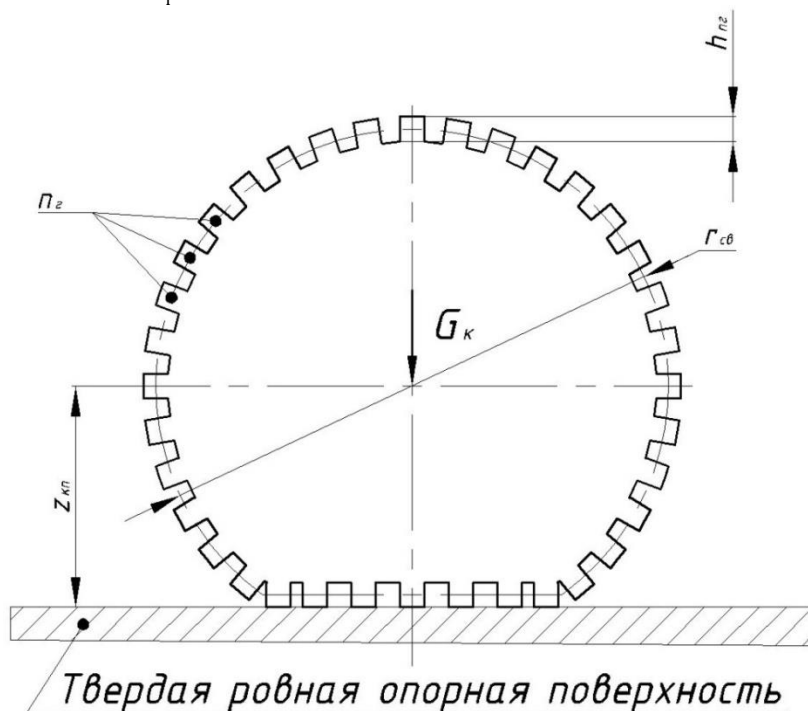


Рис. 2. Измеряемые параметры шины на ровном твердом опорном основании

Замеры нагрузки на колесо были проведены при помощи весоизмерительного устройства – подкладных весов «Исток» 7,5-2.

Результатом измерения являются следующие значения искомых параметров:

- 1) $G_k = 45472,21$ Н;
- 2) $r_{св} = 671,5$ мм;
- 3) $z_{кп} = 615$ мм;
- 4) $n_{г} = 128$;
- 5) $h_{zг} = 25$ мм.

В процессе измерений производился выезд автомобиля на деформируемую опорную поверхность, где осуществлялось наблюдение за взаимодействием одиночного колесного движителя (левое колесо передней оси автомобиля МЗКТ-6001) с деформируемой опорной поверхностью (рис. 3).



Рис. 3. Взаимодействие колесного движителя с грунтом

При этом необходимо было определить следующие параметры взаимодействия колёсного движителя с деформируемым опорным основанием (рис. 4):

- 1) длина передней части пятна контакта L_1 , мм;
- 2) расстояние по горизонтали от центра колеи до точки контакта профиля колеса с недеформированным грунтом X_r , мм;
- 3) длина задней части пятна контакта L_2 , мм;
- 4) глубина колеи h_r , мм;
- 5) расстояние от центра вращения колеса до уплотненного грунта z_k , мм.

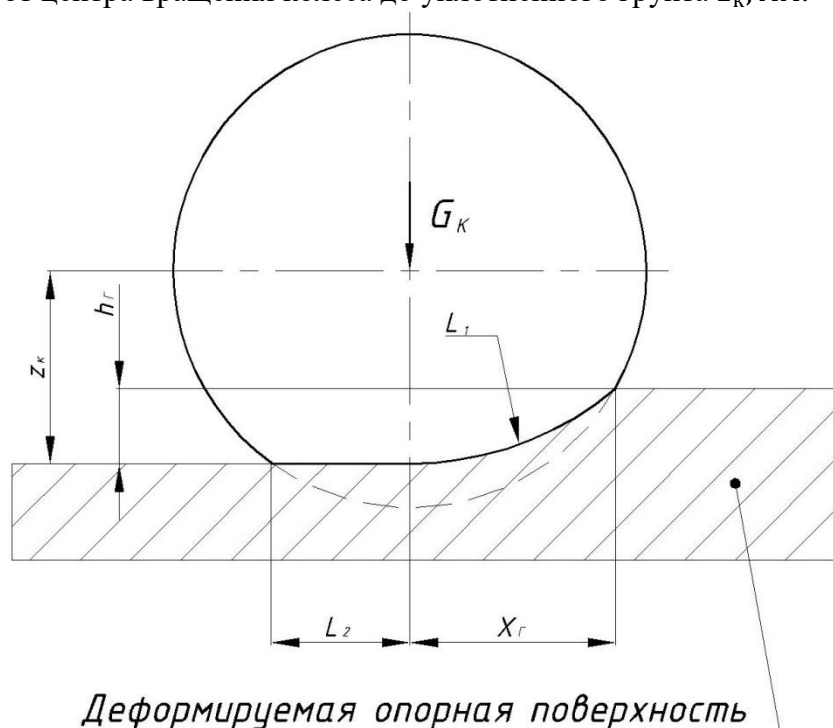


Рис. 4. Схема взаимодействия колесного движителя с грунтом

Чтобы определить искомые параметры, производилась расчистка области пятна контакта и их регистрация с помощью измерительных инструментов: линейки измерительной металлической и рулетки измерительной (рис. 5).



Рис. 5. Измерение параметров взаимодействия колесного движителя с грунтом

Результаты измерения сведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры взаимодействия колеса с грунтом

№ п/п	L_1 , мм	X_{Γ} , мм	L_2 , мм	h_{Γ} , мм	Z_{κ} , мм
1	183	180	148	10	603
2	180	170	145	12	606
3	183	181	150	20	610
4	180	178	148	10	605
5	178	173	157	8	605
6	185	183	145	15	605
7	188	184	155	13	603
8	182	175	155	13	605
9	176	170	180	15	608
10	196	190	125	13	607
11	188	180	145	18	609
12	186	180	148	15	605
13	190	180	145	10	610
14	200	190	130	15	610
15	188	180	145	15	608

Обработка результатов экспериментальных исследований

Оценка математического ожидания и дисперсии исследуемых параметров представлена в табл. 3.

Таблица 3

**Оценка математического ожидания и дисперсии
исследуемых параметров колеса на грунте**

Параметр	L_1 , мм	X_r , мм	L_2 , мм	h_r , мм	z_k , мм
Оценка мат. ожидания, \bar{m}	185.5	179.6	148.8	13.47	606.6
Оценка дисперсии, S^2	39.45	33.44	18.31	9.58	5.57

Вычисление статистики [10] и проверка первого и максимального членов вариационного ряда, сравнение полученных значений с табличным критическим значением U_α (для уровня значимости $q = 0,05$ и объема выборки $n = 15$) по каждому из исследуемых параметров показало, что вся совокупность результатов испытаний по всем исследуемым параметрам, кроме совокупности результатов по параметру длины задней части пятна контакта L_2 , принимается в рассмотрение. Для L_2 было исключено несколько выбросов из рассмотрения, а оценки математического ожидания, дисперсии и среднеквадратического отклонения были скорректированы для 12 замеров без учета исключённых значений.

Проверка соответствия эмпирической функции распределения теоретическому закону распределения с использованием критерия χ^2 – Пирсона для группированных наблюдений показала, что измеренные результаты по каждому из исследуемых параметров колеса на грунте подчиняются нормальному закону.

Было установлено, что результаты наблюдений подчиняются нормальному закону, поэтому в качестве наилучшей оценки измеряемых величин принимается оценка математического ожидания выборки [10].

Значения математического ожидания выборки и доверительных интервалов измеряемых параметров представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Математические ожидания и доверительные интервалы
исследуемых параметров колеса на грунте**

Параметр	L_1 , мм	X_r , мм	L_2 , мм	h_r , мм	z_k , мм
Оценка мат. ожидания, \bar{m}	185.5	179.6	148.8	13.47	606.6
Минимальное значение доверительного интервала, X_{pH}	181.93	176.29	145.995	11.7	605.25
Максимальное значение доверительного интервала, X_{pB}	189.13	182.91	151.67	15.24	607.95

**Проверка адекватности математической модели взаимодействия
эластичного колеса с деформируемым опорным основанием**

Проверка проводилась путем сравнения численных значений параметров взаимодействия колеса с опорным основанием, полученных как экспериментальными методами, так и методами имитационного моделирования движения многоцелевого автомобиля МЗКТ-6001 (рис. 6), по деформируемому грунту, характеристики которого получены в ходе проведенных

ранее замеров. Математическая модель взаимодействия колеса с деформируемым опорным основанием представлена в работе [9], модель движения колесной машины – в работе [11].

В качестве модели деформируемого опорного основания принята модель Бернштейна-Летошнева [1]:

$$p_{0z} = c_{гр} h_r^\mu, \text{ МПа,}$$

где $c_{гр}$, МПа – коэффициент деформации грунта; μ – показатель плотности грунта.

Ранее экспериментальными методами были получены следующие значения $c_{гр}$ и μ для исследуемого опорного основания: $\mu = 0.61211$; $c_{гр} = 0.19343$ МПа

В процессе проведения описанных выше испытаний были получены следующие параметры взаимодействия для переднего левого колеса:

- общая длина пятна контакта $L_1 + L_2 = 334,36$ мм;
- расстояние от центра вращения колеса до уплотненного грунта $z_k = 615$ мм;
- глубина колеи $h_r = 13,47$ мм.

Эти же параметры, полученные при моделировании движения МЗКТ-6001 по ровному деформируемому опорному основанию (рис. 6), представлены на рис. 7а, б, в.

Установившиеся значения параметров взаимодействия с грунтом переднего левого колеса, полученные при моделировании:

- общая длина пятна контакта $L_1 + L_2 = 357$ мм;
- расстояние от центра вращения колеса до уплотненного грунта $z_k = 613$ мм;
- глубина колеи $h_r = 14,40$ мм.

Относительная ошибка при определении общей длины пятна контакта составила 6,8%, при определении расстояние от центра вращения колеса до уплотненного грунта – 0,3%, при определении глубины колеи – 7,4%.

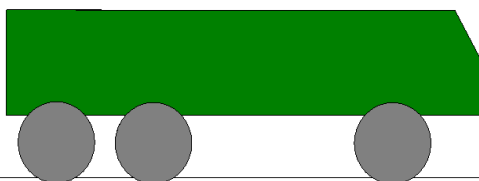
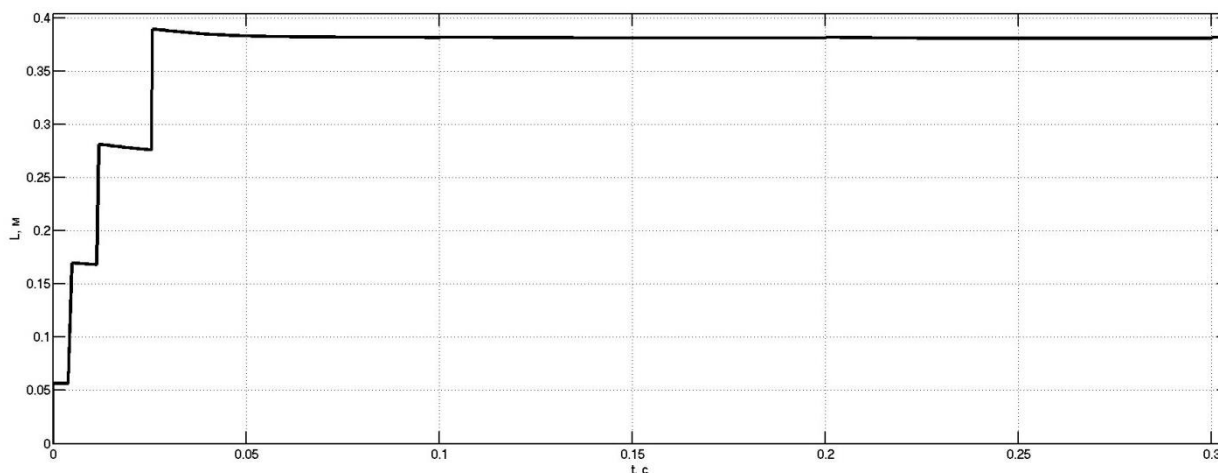
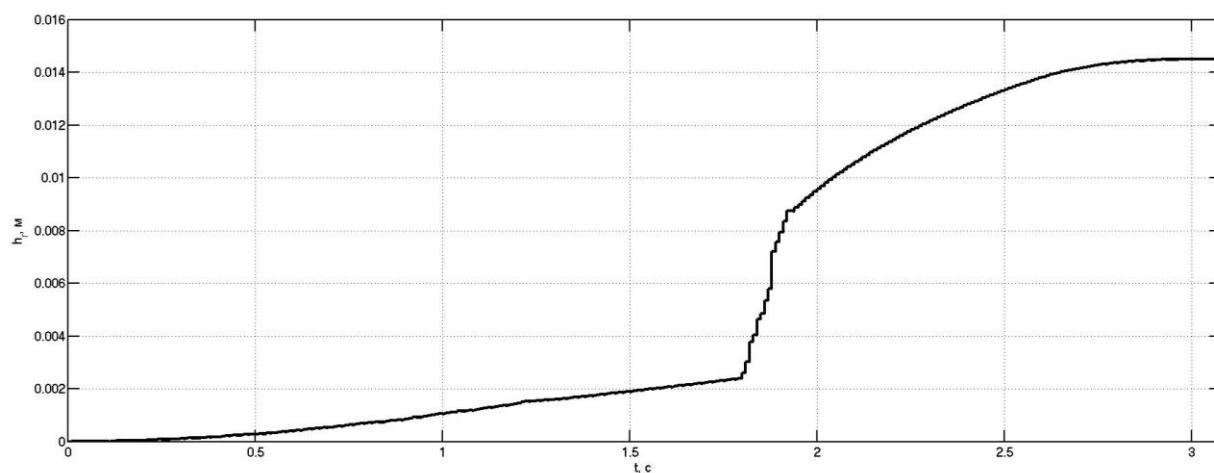


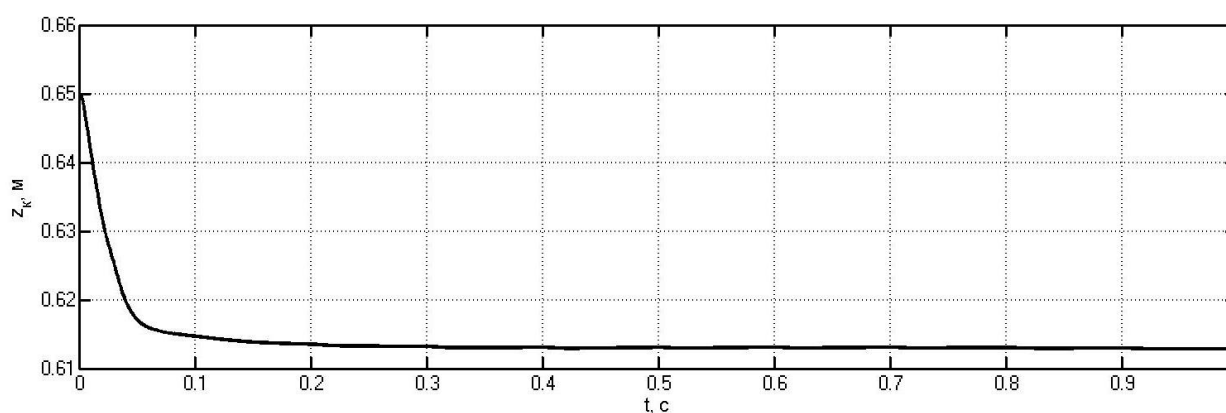
Рис. 6. Моделирование движения МЗКТ-6001 по ровному деформируемому опорному основанию



a)



б)



в)

Рис. 7. Зависимости от времени параметров взаимодействия левого переднего колеса МЗКТ-6001 с ровным деформируемым опорным основанием:
а – общая длина пятна контакта; б – глубина колеи;
в – расстояние от центра вращения колеса до уплотненного грунта

Заключение

Проведена проверка адекватности математической модели взаимодействия эластичного колеса с деформируемым опорным основанием путем сравнения численных значений параметров взаимодействия колеса с опорным основанием, полученных как экспериментальными методами, так и методами имитационного моделирования движения многоцелевого автомобиля МЗКТ-6001. Установлено, что относительная ошибка при определении различных параметров взаимодействия шины с деформируемым опорным основанием не превышает 7,4%.

Библиографический список

1. **Вольская, Н.С.** Оценка проходимости колесных машин при движении по неровной грунтовой поверхности / Н.С. Вольская. – М.: МГИУ, 2007. – 215 с.
2. **Агейкин, Я.С.** Проходимость автомобилей / Я.С. Агейкин, Н.С. Вольская, И.В. Чичекин. – М.: МГИУ, 2010. – 275 с.
3. **Бабийчук, А.Э.** Методика определения потерь мощности на качение колесного движителя с учетом типа трансмиссии и давления воздуха в шинах машины / А.Э. Бабийчук, А.С. Агейкин, Н.С. Вольская // Журнал автомобильных инженеров. – 2013. – № 3. – С. 24-27.

4. **Лепешкин, А.В.** Математическая модель взаимодействия эластичного колеса с деформируемой опорной поверхностью при установившемся прямолинейном качении / А.В. Лепешкин, С.Е. Петров // Материалы 77-й Международной научно-технической конференции ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров». – М.: МГТУ «МАМИ», 2012. – С. 141-149.
5. **Shoop, S.** Finite element modeling of tires on snow / S. Shoop, K. Kestler, R. Haehnel // Tire Science and Technology. – 2006. – Vol. 34, № 1. – P. 2-37.
6. **Botero, J.** A new mathematical model of the traction force in pneumatic tire snow chain systems / J. Botero, M. Gobbi, G. Mastinu // Associazione Italiana Per L'Analisi Delle Sollecitazioni / Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano. 2005. 10 p. – URL: www.aiasonline.org/AIAS2005/Articoli/art084.pdf. (дата обращения 09.09.2018).
7. **Белкин, А.Е.** Конечно-элементный анализ контакта автомобильной шины с опорной поверхностью на основе оболочечной модели / А.Е. Белкин, Н.Л. Нарская // Вестник МГТУ. Серия Машиностроение. – 2004. – № 3. – С. 14–28.
8. **Одинцов, О.А.** Разработка метода решения нелинейных контактных задач стационарного качения автомобильной шины: дисс. ... канд. техн. наук / О.А. Одинцова. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008.
9. **Вольская, Н.С.** Математическая модель прямолинейного качения эластичного колеса по неровному деформируемому опорному основанию / Н.С. Вольская, М.М. Жилейкин, А.Ю. Захаров // Известия ВУЗов. Машиностроение. – 2017. – № 10. – С. 25-33.
10. **Орлов, А.И.** Прикладная статистика / А.И. Орлов. – М.: Изд-во «Экзамен», 2006. – 672 с.
11. **Жилейкин, М.М.** Теоретические основы повышения показателей устойчивости и управляемости колесных машин на базе методов нечеткой логики / М.М. Жилейкин. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – 238 с.

*Дата поступления
в редакцию: 09.10.2018*

M.M. Zhileykin, A.J. Zakharov, M.V. Panshin

**VERIFICATION OF THE ADEQUACY AND ACCURACY
OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE INTERACTION
OF THE ELASTIC WHEEL WITH A DEFORMABLE SUPPORT BASE**

Moscow state university. N.E. Bauman

Purpose: verification of the accuracy and adequacy of the mathematical model of the elastic wheel interaction with the deformable support base, developed by the authors, by experimental methods.

Design/methodology/approach: verification of the mathematical model was carried out by methods of experimental studies of the real object on the ground.

Findings: it was found that the relative error in determining the various parameters of the interaction of the tire with the deformable support base does not exceed 7.4%.

Research limitations/implications: the carried out researches allow to apply the developed mathematical model of rolling of an elastic wheel on roughnesses of the deformable basic basis for forecasting of basic passability of wheel cars.

Originality/value: for the first time, detailed experimental studies of the interaction of an elastic wheel with a deformable support base were carried out.

Key words: a deformable support base, a mathematical model of the wheel, the adequacy and accuracy of the mathematical model.

УДК 621.43.057

П.Я. Кантор¹, С.А. Плотников¹, А.В. Пляго¹, М.Н. Втюрина²

ВЛИЯНИЕ ДИСУЛЬФИДА МОЛИБДЕНА НА ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ ЭТАНОЛО-ТОПЛИВНОЙ ЭМУЛЬСИИ

Вятский государственный университет, г. Киров¹,
Вятская государственная сельскохозяйственная академия, г. Киров²

Объектом исследования является топливная смесь, состоящая из тяжелых жидких углеводородов (дизельное топливо) и этилового спирта. Задачей исследования явилось изучение действия дисульфида молибдена в качестве цетаноповышающей присадки. Целью исследования явилось выяснение предположительного механизма влияния дисульфида молибдена на процессы горения дизельного топлива. Методами настоящего исследования явились теоретический анализ возможных механизмов влияния дисульфида молибдена на кинетику процесса горения топливной смеси. Проведенные экспериментальные исследования и их теоретический анализ выявили возможность использования дисульфида молибдена в качестве цетаноповышающей присадки.

Ключевые слова: дизельное топливо, этанол, дисульфид молибдена, процесс сгорания, жесткость, цетановое число.

Процесс горения топлива в камере сгорания двигателя определяет все выходные показатели (мощность, экономичность, токсичность), соответственно, усилия многих исследователей направляются на его оптимизацию. Горение этанола-топливной эмульсии в камере сгорания двигателя отличается от горения чистого дизельного топлива в силу изменения ряда ее свойств. Это и суммарное цетановое число, и удельная теплота сгорания, и теплотворная способность смеси, и температура процесса, и ряд других свойств. Поиск решения проблемы оптимизации горения этилового спирта в дизельном двигателе ведется отечественными учеными очень давно: это и МГТУ им. Баумана, и МГМУ «МАМИ», и МСХА им. Тимирязева, и ВГСХА, и, конечно же, ВятГУ. В работе В.В. Бирюкова [1] из МГТУ им. Баумана представлены результаты исследований работы дизелей фирмы Mercedes-Benz (Германия) на биоэтаноле. Испытаны автомобильные дизели моделей OM 352 и OM355/50, работающие на этаноле с присадкой TE6DN, изготовленной бразильской фирмой Britanite und Expro на основе триэтилглицольденитрата. Эта присадка улучшает самовоспламенение этанола до требуемого уровня при ее добавке 4,5 % (объемные доли). Результаты исследований свидетельствуют о том, что при работе указанных дизелей на этаноле с присадкой износ деталей одинаков или даже ниже износов при работе на ДТ. В то же самое время проблема горения смеси в цилиндре не решена.

В работах ученых из ВГСХА, в частности, А.И. Чупракова [2], для стабилизации этанола-топливной эмульсии использовалась известная сукцинимидная присадка С-5А. При этом стабильность ЭТЭ составляла 1,2 часа, при содержании присадки 0,5 % и достигает 4,1 часа при содержании присадки 2,0 %. Отмечается также, что работа дизеля на ЭТЭ сопровождается увеличенной жесткостью. В то же самое время проблема процесса горения мало затронута. Проведенный анализ литературных данных показывает, что процесс горения может быть осуществлен путем применения различных присадок специального класса. Учитывая глубину проблемы, необходимо рассматривать возможность применения комплексной присадки с целым рядом необходимых свойств. Присадка должна не только стабилизировать этанола-топливную эмульсию, но и воздействовать на процесс ее сгорания в цилиндре дизеля.

Целью настоящих исследований является выяснение предположительного механизма влияния присадки дисульфида молибдена на процессы горения дизельного топлива. В работе рассматривается стабилизированная топливная эмульсия, состоящая из равных объемов дизельного топлива и этанола с добавкой присадки и без нее (рис. 1) [3, 4].



Рис. 1. Общий вид пробы топливной эмульсии

Известно, что процесс горения протекает по радикальному механизму. На первой стадии (зарождение цепи) образуются свободные атомы, радикалы и другие неустойчивые промежуточные соединения, обладающие повышенной химической активностью. Затем эти частицы взаимодействуют с исходным веществом с образованием многочисленных активных центров (разветвление цепи), что приводит к значительному ускорению реакции. Столкновения активных центров между собой, с молекулами инертного вещества и со стенкой сосуда, напротив, замедляют реакцию (обрыв цепи), идущую до исчерпания порции топлива или окислителя. Применительно к работе двигателя внутреннего сгорания актуальной остается проблема ингибирования стадии разветвления цепи для улучшения равномерности процесса горения.

Как известно, одной из проблем, возникающих при эксплуатации спиртосодержащих топливных смесей, является ощутимое уменьшение цетанового числа, обусловленное тем обстоятельством, что его значение для чистого этанола равно 8 [5]. В то же самое время оптимальное значение цетанового числа топлива для нормальной работы дизельного двигателя должно составлять 40...45 единиц.

Таблица 1

Свойства этанола и дизельного топлива

Свойство	Этанол	Летнее дизельное топливо	Зимнее дизельное топливо
Скрытая теплота испарения, кДж/кг	840	230...250	230...250
Цетановое число	8	≥ 45	≥ 45

Как следствие, указанное обстоятельство приводит к более жесткой работе двигателя на этаноле-топливной смеси. Снижение цетанового числа смеси обусловлено двумя факторами (табл. 1). Во-первых, удельная теплота парообразования этанола в 3,5 раза выше, чем у чистого дизельного топлива, и это обстоятельство приводит к уменьшению температуры топливоздушной смеси в цилиндре и соответственно задержке момента ее самовозгорания. Во-

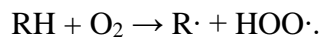
вторых, наличие кислорода в молекуле спирта обуславливает более быстрое сгорание топливной смеси. Как следствие, указанное обстоятельство приводит к более жесткой работе двигателя на этано-топливной смеси. Улучшение эксплуатационных свойств топливной смеси обычно достигается путем добавления присадок, которые в соответствии с вышесказанным либо снижают температуру самовоспламенения, либо увеличивают время сгорания.

Модификаторы воспламенения предназначены для улучшения воспламеняемости дизельных топлив в камере сгорания или, другими словами, для увеличения цетанового числа. Они добавляются в количестве 0,1-0,5 % в среднестиллятные фракции нефтепереработки, а также в дизельные топлива из нефтей нафтенового основания, топлива из газового конденсата, распространенные в местах нефтедобычи. Принцип действия цетаноповышающих присадок объясняется легким распадом их молекул (чаще всего, нитратов или пероксидов) по связи O-O и O-N с невысокой энергией активации. Образующиеся свободные радикалы инициируют воспламенение топлива. В качестве модификаторов воспламенения используются, в основном, присадки нитратного типа, наиболее распространенные из которых содержат в качестве действующего вещества 2-этилгексилнитрат и циклогексилнитрат. 2-этилгексилнитрат стабилен при нормальной температуре, однако при нагревании до температуры выше 100°C он претерпевает самоускоряющуюся реакцию разложения с выделением тепла, которая вызывает быстрый рост температуры и давления и, тем самым, взрывоопасную ситуацию [6].

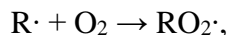
Цетаноповышающие присадки на основе пероксидов алифатических или циклических спиртов имеют, как правило, высокую стоимость, но при этом являются более экологичными и безопасными в отличие от присадок нитратного типа. Эффективность присадок на основе нитратов и пероксидов практически одинакова, хотя пероксиды по эффективности уступают нитратам. Недостатками присадок на основе пероксидов являются присущая им невысокая стабильность и повышенное смолообразование содержащих их топлив [6].

Присадки указанных типов действуют только на начальных стадиях процесса горения в качестве модификаторов воспламенения. Стало быть, они практически не влияют на время сгорания и не решают проблему жесткости работы двигателя. Присадки второго типа представляют собой ингибиторы горения. Механизм ингибирования состоит в связывании активных центров, что приводит к обрыву цепной реакции горения. В настоящей работе рассматриваются возможные механизмы увеличения цетанового числа топливной эмульсии при добавлении дисульфида молибдена. Выбор MoS₂ в качестве дополнительной присадки обусловлен известным ингибирующим эффектом указанного вещества, приводящим к значительному уменьшению скорости окисления углеводородов [7].

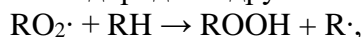
Предположительный механизм ингибирующего действия присадки сводится к следующему. При взаимодействии исходного углеводорода с кислородом на первой стадии окисления образуются свободные радикалы:



Далее радикал R· присоединяет к себе молекулу кислорода, превращаясь в пероксидный радикал RO₂·:



который, в свою очередь, отрывает атом водорода от другой молекулы углеводорода:



образуя гидропероксид и новый свободный радикал R·, продолжающий цепь [7]. В присутствии MoS₂ может происходить обрыв кинетической цепи.

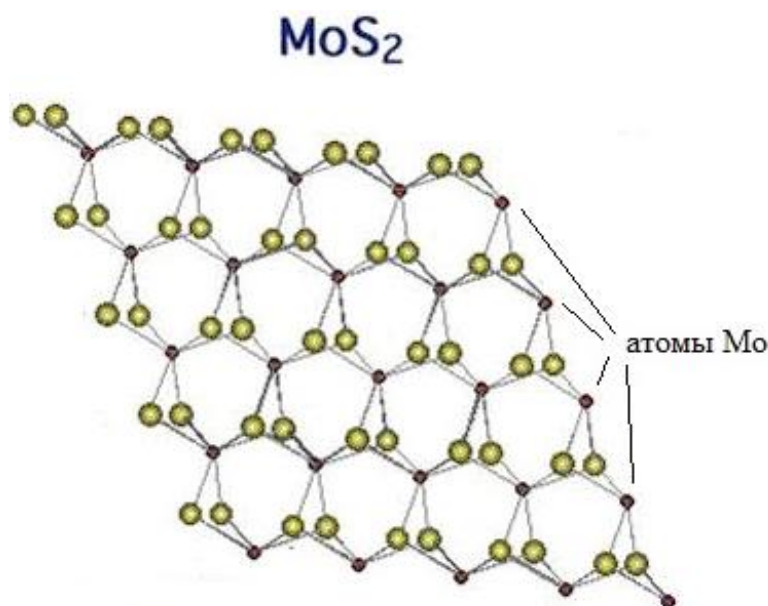
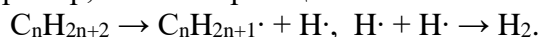


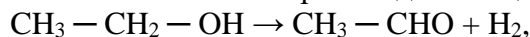
Рис. 2. Структура дисульфида молибдена

Каталитическая активность дисульфида молибдена связывается с наличием на боковых гранях кристаллитов анионных вакансий. Так, в структуре MoS_2 (рис. 2) имеется три типа атомов серы с разной координацией по молибдену. Часть ионов Мо локализована в частично недостроенных тригональных призмах – на торцевых гранях и углах слоев. Предположительно кинетические цепи обрываются по реакциям пероксидных радикалов с дисульфидом молибдена на поверхности его частиц [8], что выражается в присоединении радикалов к «выступающим» атомам молибдена, отмеченным на рис. 2. В результате замедляется процесс окисления топлива. Процесс горения растягивается во времени, нарастание температуры и давления происходит более плавно, что эквивалентно увеличению цетанового числа.

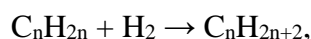
Другой возможный (предположительный) механизм влияния дисульфида молибдена на свойства топливной смеси, который представляется нам менее вероятным, но все же принципиально осуществимым, может заключаться в следующем. При температурах $t \geq 650^\circ\text{C}$, характерных для топливовоздушной смеси перед самовоспламенением, может происходить дегидрирование углеводородов, например, согласно реакции:



Подобные реакции, приводящие к отщеплению атома водорода, рассмотрены в [9]. Наряду с этим при наличии в смеси этанола может происходить его дегидрирование:



поскольку характерные энергии связей $\text{C} - \text{H}$ и $\text{O} - \text{H}$ близки по величине. Выделяющийся водород вступает в реакцию гидрокрекинга циклических (нафтеновых) углеводородов, которые представляют собой, главным образом, гомологи циклогексана и циклопентана [10]. Известно, что содержание нафтенов в дизельном топливе составляет от 20 до 60 % [10]. В этом случае MoS_2 играет роль катализатора гидрокрекинга [10], который может происходить, например, согласно уравнению:



например, при гидрировании циклопентана раскрывается цикл с образованием н-пентана.

Согласно данным исследований [11], при равном числе атомов углерода цетановое число циклического углеводорода в среднем на 20...40 единиц меньше, чем у соответствующего алкана, что представляет собой частный случай общей тенденции повышения цетанового числа с ростом относительного числа атомов Н в молекуле углеводорода. Таким образом, результатом гидрокрекинга является повышение цетанового числа топлива, что в свою очередь

приводит к уменьшению времени задержки самовоспламенения и более плавному сгоранию топлива.

Можно сделать следующие выводы:

- 1) оптимизация процесса горения этилового спирта в дизельном двигателе является актуальной проблемой;
- 2) выявлен предположительный механизм влияния дисульфида молибдена на процессы горения этанола-топливной эмульсии;
- 3) установлена возможность использования дисульфида молибдена в качестве цетаноповышающей присадки смесевых топлив.

Библиографический список

1. **Бирюков, В.В.** Методы повышения эффективности работы дизеля при использовании этанола в качестве экологической добавки к дизельному топливу: дис. ... канд. техн. наук: 20.05.17 / В.В. Бирюков. – М., 2017.
2. **Чупраков, А.И.** Исследование рабочего процесса дизеля 4Ч 11,0/12.5 при использовании в качестве топлива этанола-топливной эмульсии: дис. ... канд. техн. наук: 08.11.12. – СПб., 2012.
3. **Втюрина, М.Н.** Исследование свойств этанола-топливных эмульсий с присадками / М.Н. Втюрина, А.В. Пляго // Транспортные системы. – 2017. – № 2 (5). – С. 51-54.
4. **Плотников, С.А.** Исследование моторных свойств смесей дизельного топлива с рапсовым маслом / С.А. Плотников, П.Я. Кантор, И.С. Козлов, М.Н. Втюрина // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2018. – № 2 (121). – С. 169-174.
5. **Быкова, Е.В.** Перспективы применения топливного этилового спирта на транспорте / Е.В. Быкова, А.В. Гемонов, А.В. Лебедев // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. – 2014. – № 3. – С. 26-30.
6. **Минибаева, Л.К.** Разработка цетаноповышающей присадки для дизельных топлив: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.07 / Л.К. Минибаева. – Уфа, 2015.
7. **Денисов, Е.Т.** Окисление и стабилизация реактивных топлив / Е.Т. Денисов, Г.И. Ковалев. – М.: Химия, 1983. – 272 с.
8. **Радченко, Е.Д.** Промышленные катализаторы гидрогенизационных процессов нефтепереработки / Е.Д. Радченко, Б.К. Нефедов, Р.Р. Алиев. – М.: Химия, 1987. – 224 с.
9. **Басевич, В.Я.** Механизмы окисления и горения нормальных парафиновых углеводородов: от C₁–C₁₀ к C₁₁–C₁₆ / В.Я. Басевич [и др.] // Хим. физика. – 2013. – Т. 32, № 4. – С. 1–10.
10. **Мановян, А.К.** Технология первичной переработки нефти и природного газа. – М.: Химия, 2001. – 568 с.
11. **Ахметов, С.А.** Технология глубокой переработки нефти и газа. – Уфа: Гилем, 2002. – 672 с.
12. **Плотников, С.А.** Модернизация трактора Беларус 952 для работы на этанолосодержащих топливах / С.А. Плотников, А.В. Пляго // Актуальные проблемы гуманитарных, социальных, экономических и технических наук. Материалы науч.-практ. конф. – Киров: Кировский филиал МГИУ, 2013. – С. 105-108.

*Дата поступления
в редакцию: 09.10.2018*

P.Y. Kantor¹, S.A. Plotnikov¹, A.V. Plyago¹, M.N. Vtyurina²

**THE INFLUENCE OF MOLYBDENUM DISULPHIDE
ON THE PROCESS OF COMBUSTION ETHANOL-FUEL EMULSION**

Vyatka state University, Kirov¹,
Vyatka state agricultural Academy, Kirov²

Object of research is the fuel mix consisting of heavy liquid hydrocarbons (diesel fuel) and ethyl spirit.

Research problem was action studying molybdenum disulphide as a cetane-increasing additive.

Research objective was finding-out of the presumable mechanism of influence disulphide of molybdenum on processes of burning of diesel fuel.

Methods of the present research were the theoretical analysis of possible mechanisms of influence disulphide of molybdenum on kinetics of process of burning of a fuel mix.

The carried out experimental studies and their theoretical analysis have revealed the possibility of using molybdenum disulphide as a cetane-increasing additive.

Key words: diesel fuel, ethanol, molybdenum dioxide, combustion process, stiffness, cetane number.

УДК 504.06:534.83

Л.Н. Лузанова, В.А. Соколова, В.А. Марков, Г.К. Парфенопуло, Л.Г. Черных

**СНИЖЕНИЕ ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ РАБОТ**

Санкт-Петербургский лесотехнический университет имени С.М. Кирова

Цель работы – снижение шумовых характеристик до нормативных значений по СН 2.2.412.1.8.566-96 при проведении лесозаготовительных работ на трелевочном тракторе. Основные первичные источники шума на тракторах – это силовая установка с вспомогательными агрегатами, система всасывания, система выхлопа, трансмиссия и подвеска, взаимодействие между двигателем машины и поверхностью грунта (шум движения), потоки воздуха, обтекающие внешние контуры трактора (аэродинамический шум). Вторичным источником шума может быть сама кабина. В данной работе проводится исследование по снижению уровня шума в кабине оператора при применении средств индивидуальной и коллективной защиты. В качестве средства индивидуальной защиты были использованы наушники, а под средством коллективной защиты подразумевается внутренняя звукопоглощающая прослойка кабины. Результатом исследования явилось выявление таких средств защиты от шумового воздействия, которые в большей степени способны защитить оператора при проведении трелевочных работ от шумового воздействия.

Ключевые слова: шум, защита, звукопоглощение, транспортное средство.

Автомобильный транспорт сыграл огромную роль в формировании современного характера грузоперевозок и развития всех видов промышленности, в том числе и лесозаготовок. В то же время он вызвал и многие отрицательные явления, среди которых одним из главных факторов, влияющих на безопасность работы оператора, является уровень шумовой характеристики.

Наблюдается зависимость между числом жалоб и характером выполняемой работы. Данные опроса показывают, что беспокоящее действие шума в кабине транспортного средства отражается на производительности труда операторов, вызывает целый ряд болезней и зачастую влияет на безопасность людей. Постоянное воздействие сильного шума может не только отрицательно повлиять на слух, но и вызвать другие вредные последствия – звон в ушах, головокружение, головную боль, повышенную усталость. Следовательно, от уровня шума зависит производительность труда, процент дорожно-транспортных происшествий и тяжесть их последствий [1, 2].

В любой машине существует, как правило, несколько источников шума, однако определенная часть их доминирующая. Обычно эффективное снижение шума до среднего уровня получают при частичной ликвидации шума именно от этого ограниченного числа доминирующих источников. Например, если в машине имеется три источника шума с уровнями 72, 72 и 80 дБ, то доминирующим является источник, создающий шум уровнем 80 дБ, а общий уровень шума этой машины составит 81 дБ. Если уровень доминирующего источника шума уменьшить до 70 дБ, то общий уровень снизится до 76 дБ. Однако если дополнительной доработкой доминирующего источника уменьшить уровень его шума до 65 дБ, то общий уровень снизится на 1 дБ и составит 75 дБ. Таким образом, после снижения уровня шума доминирующего источника до среднего значения дальнейшее уменьшение уровня шума машины возможно только в результате обработки всех источников.

Основными источниками шума при проведении лесозаготовительных работ являются звук двигателя и ходовой части трактора, звуки, возникающие в ходе непосредственной валки деревьев, а также различные шумы, вызванные окружающей средой. Проведя анализ данных шумов, мы пришли к выводу, что большая часть вышеперечисленных звуков находится в частоте 1000 Гц. Вследствие этого необходимо произвести анализ звукопоглощающих устройств и средств, способных подавить или снизить воздействие шума на данной частоте.

В работе ставились следующие задачи: 1) выявить источники шума; 2) провести исследование шумовых характеристик с целью уменьшения их воздействия на человека.

Объектом исследования послужил шум в кабине трелевочного трактора ОНЕЖЕЦ 300.

Методика исследования. Исследования проводились в Ленинградской области при проведении лесозаготовительных работ на тракторе ОНЕЖЕЦ 300 (рис. 1).



Рис. 1. Трелевочный трактор ОНЕЖЕЦ 300

Для уменьшения уровня шума в кабине временно можно использовать средства индивидуальной защиты, но для постоянного гашения звукового давления требуются коллективные средства защиты. Под индивидуальным средством защиты, в настоящей работе подразумевается подбор наушников для шумопогашения при нормированной среднегеометрической частоте октавной полосы 1000 Гц, которые будут соответствовать данному уровню шума [3, 4], под коллективным средством защиты от шума – звукопоглощающая прослойка кабины.

Для объективного определения уровня шума, в работе, был использован портативный цифровой шумомер UNI-T UT353 (рис. 2). Диапазон измерений 30-130 дБ, диапазон частот 31.5 Hz – 8.5 KHz. Данный прибор предназначен для быстрого и мобильного измерения уровня акустического шума в диапазоне от 30 до 130 дБ. Прибор имеет простую и надежную конструкцию и предельно простое управление. Данные об уровне шума выводятся на большой контрастный жидкокристаллический дисплей с подсветкой. Результаты измерений и расчетов шумовых характеристик при трелевке леса представлены в табл. 1.



Рис. 2. Портативный шумомер UNI-T UT353

Требуемое снижение уровня определяется по следующей формуле:

$$L_{TP} = L - L_H, \text{ дБ} \quad (1)$$

где L – измеренные значения уровня шума, дБ;

L_H – нормированные значения уровней шума по ГОСТ 12.1.003-83, дБ.

Таблица 1

Результаты измерений и расчетов

№ позиции	Величина	Единица измерения	Среднегеометрическая частота октавной полосы, Гц								Уровень звука, дБА
			63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
1	L - уровень звукового давления в октавных полосах	дБ	99	96	93	91	88	90	93	89	93
2	L_H -нормативные значения уровней шума (ГОСТ 12.1.003-83)	дБ	99	92	86	83	80	78	76	74	85
3	L_{TP} -требуемое снижение уровней шума	дБ	0	4	7	8	8	12	17	15	8
4	Тип противошума	Наушники ВЦНИИОТ-1									
5	$L_{СИЗ}$ -эффективность средств индивидуальной защиты	дБ	2	3	4	7	13	23	36	33	
6	Уровень шума при применении СИЗ	дБ	97	96	89	84	58	67	57	56	
7	Уровень шума после применения коллективного средства шумозащиты	дБ	83	75	65	58	50	57	60	47	60

Тип противошума выбирался по табл. 2.

Таблица 2

Выбор средства индивидуальной защиты

Тип противошума	Среднегеометрическая частота октавной полосы, Гц								Акустическая эффективность средств индивидуальной защиты
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Наушники: ВЦНИИОТ-2М	4	7	11	14	22	35	45	38	дБ
ВЦНИИОТ-4М	1	2	4	5	16	25	36	28	дБ
ВЦНИИОТ-А1	3	10	14	16	17	36	36	34	дБ
ВЦНИИОТ-1	2	3	4	7	13	23	36	33	дБ
ВЦНИИОТ-7И	5	10	16	18	22	36	40	32	дБ
Шумозащитное оголовье ШЗО-1	7	12	18	30	31	34	38	34	дБ
Противошумная каска ВЦНИИОТ-2	4	7	11	14	22	35	45	38	дБ
Антифоны	5	10	10	10	13	24	29	25	дБ
Беруши	8	15	18	18	24	26	26	31	дБ
Гарнитур шумозащитный ГШ-1	13	20	22	25	27	27	37	37	дБ

Выбранные в соответствии с табл. 2 наушники ВЦНИИОТ-1, представлены на рис. 3.



Рис. 3. Противошумные наушники ВЦНИИОТ-1

Уровень шума в расчетной точке после введения мероприятия по звукопоглощению определяется по следующей формуле:

$$L_p = L - L_{ш} \text{ , дБ} \quad (2)$$

где $L_{ш}$ – акустический эффект шумозащиты (для средств индивидуальной защиты $L_{ш} = L_{СИЗ}$), дБ.

Для проведения исследований коллективной шумоизоляции кабина трелевочного трактора ОНЕЖЕЦ 300 была оборудована акустическим войлоком. Выбор данного материала обусловлен отличным звукопоглощающим материалом для звукоизоляции, при котором, вся конструкция не утолщается, а также тем, что войлок изготавливается из полиэфирного (синтетического) волокна без добавления каких-либо клеящих составов, не содержит вредных веществ, в отличие от других средств шумоизоляции.

После проведения работ по шумоизоляции акустический эффект в кабине был существенно снижен, данные замеров представлены в табл. 3.

Таблица 3

Акустический эффект звукоизолирующей кабины

№ позиции	Величина	Единица измерения	Среднегеометрическая частота октавной полосы, Гц							
			63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	L- уровень звукового давления в октавных полосах	дБ	99	96	93	91	88	90	93	89
2	$L_{н}$ -нормативные значения уровней шума (ГОСТ 12.1.003-83)	дБ	99	92	86	83	80	78	76	74
3	S-площадь ограждений кабины	м ²	16,59							
4	V-постоянная кабины	м ³	0,23	0,22	0,2	0,23	0,29	0,41	0,62	0,73
5	S/V		72,13	75,41	82,95	72,13	57,21	40,46	26,76	22,73
6	10 lg S/V		18,58	18,72	19,19	18,58	17,57	16,07	14,27	13,57
7	$R_{тр.каб.}$ -требуемая звукоизолирующая способность реальной конструкции кабины	дБ	18,58	22,72	26,19	26,58	25,57	28,07	31,22	28,57
8	R_0 -звукоизолирующая способность реальной конструкции кабины	дБ	16	21	28	33	33	33	33	42
9	$L_{каб.}$ -уровень шума в кабине	дБ	83	75	65	58	55	57	60	

Площадь ограждения, через которые шум проникает в кабину, определяется по формуле

$$S = a * b + 2 * b * h + 28a * h, \text{ м}^2 \quad (3)$$

где a, b, h – соответственно длина, ширина и высота кабины, м.

Постоянная помещения рассчитывается по отношению:

$$B = B_{1000} * \mu, \text{ м}^2 \quad (4)$$

где B_{1000} – постоянная помещения, м^2 ; μ – частотный множитель.

Требуемая звукоизолирующая способность кабины определяется по формуле

$$R_{\text{тр.каб.}} = L + 10 * \lg \frac{S}{B} - L_H, \text{ дБ} \quad (5)$$

где L – уровень шума в расчетной точке до установки кабины, дБ;

L_H – допустимые значения уровней звукового давления, дБ.

По результатам расчетов принимаем материал звукоизолирующей кабины – металлопластик толщиной 20 мм. Результаты расчета занесены в таблицу 2.

Уровень шума в кабине находим по следующей формуле:

$$L_{\text{каб.}} = L - R_0, \text{ дБ} \quad (6)$$

где R_0 – звукоизолирующая способность реальной конструкции стен кабины, дБ.

Результаты исследований шумовых характеристик при использовании индивидуальных и коллективных средств защиты, а также с учетом уровней реального звука и нормативных его характеристик представлены в виде графика на рис. 4.

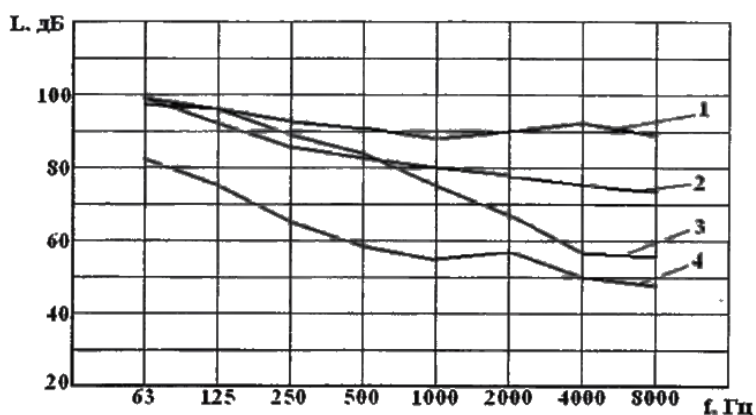


Рис. 4. Графическое представление результатов измерения:

- 1 – измеренные уровни звукового давления;
- 2 – нормативные значения уровня звукового давления;
- 3 – уровни звукового давления после применения индивидуального средства защиты;
- 4 – уровни звукового давления после применения коллективного средства защиты

На основании полученных данных можно сказать о том, что наиболее низкий уровень шума при измеренных значениях был получен при применении коллективного средства защиты, т. е., в диапазоне октавных частот от 63 до 8000 уровень звука при нормативном значении 80 дБ принимал наименьшее значение 50 дБ, тогда как при тех же нормированных значениях уровень шума при применении средств индивидуальной защиты составил 55 дБ.

В результате исследований и анализа экспериментальных данных было выявлено, что коллективные средства защиты в большей мере способны защитить оператора при проведении трелевочных работ от шумового воздействия.

Библиографический список

1. Борьба с шумом в городах / В.И. Белоусов, В.Г. Прутков, С. Азаис [и др.]; под ред. В.Г. Пруткова, С. Азаиса. – М.: Стройиздат, 1987.
2. ГОСТ 12.1.003-83*. ССБТ. Шум. Общие требования безопасности. – М.: Изд-во стандартов, 1983.
3. ГОСТ 20444-85. Шум. Транспортные потоки. Методы измерения шумовой характеристики. – М.: Изд-во стандартов, 1985.
4. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки/Минздрав России. – М., 1996.

*Дата поступления
в редакцию: 09.10.2018*

L.N. Luzanova V.A. Sokolova, V.A. Markov, G.K. Parfenopulo, L.G. Chernykh

**DECREASE IN NOISE CHARACTERISTICS
WHEN CARRYING OUT LESOZAGOTO-VITELNYH OF WORKS
ON THE ONEZHETS 300 TRELEVOCHNY TRACTOR**

St. Petersburg timber university of S.M. Kirov

Purpose: Decrease in noise characteristics to standard values on CH 2.2.412.1.8.566-96 when carrying out logging works on the trelevochny tractor.

Design/methodology/approach: In any car exists, as a rule, several sources of noise, however a certain part them dominating. Usually effective noise reduction to the average level is received at partial elimination of noise from this limited number of the dominating sources. The main primary sources of noise on tractors the power plant with auxiliary units, the system of absorption, the system of an exhaust, transmission and a pendant, interaction between the propeller of the car and the surface of soil (noise of the movement), the air streams which are flowing round external contours of the tractor (aerodynamic noise). The cabin can be a secondary source of noise. In this work it is conducted researches on decrease in noise level in a cabin of the operator at application of means of individual and collective protection. As individual protection equipment earphones have been used, and means of collective protection is meant as an internal sound-absorbing layer of a cabin.

Conclusions: In this work, identification of such means of protection from noise influence which, are capable to protect the operator when carrying out trelevochny works from noise influence to a large extent was result of a research.

Key words: noise, protection, sound absorption, vehicle.

УДК 629.113

С.Е. Манянин³, П.Е. Дмитриев³, Ю.И. Палутин², А.С. Слюсарев¹, А.А. Аникин³**РАЗДЕЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЙ НА «БЫСТРЫЕ» И «МЕДЛЕННЫЕ»
ПРИ ПОСТРОЕНИИ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

Волжский государственный университет водного транспорта¹,
Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия²,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева³

Приводятся примеры уравнений движения и идеи, лежащие в основании разделения фазовых переменных на «быстрые» и «медленные». Указываются критерии, по которым осуществляется разделение переменных на «быстрые» и «медленные». Концепция разделения движений на «быстрые» и «медленные» представляет собой идеализированное представление реальных процессов, происходящих в объекте исследования. К типичным допущениям, которые принимаются при построении динамических моделей транспортных средств (ТС), относятся дискретное распределение инерционных параметров, выбор постоянных параметров, принятие квазистатических характеристик отдельных элементов. На первый взгляд, эти идеализации не имеют между собой ничего общего и принимаются из совершенно различных физических соображений. Метод разделения движений (МРД) на «быстрые» и «медленные» позволяет с единых позиций рассмотреть широкий круг допущений, принимаемых при построении динамических моделей ТС, в том числе и указанных выше.

Ключевые слова: динамическая модель, метод разделения движения, транспортное средство, концепция, дифференциальные уравнения.

Суть МРД применительно к задачам динамики ТС заключается в следующем. В зависимости от целей и постановки задач исследования в большинстве случаев удается выделить в реальном объекте ряд процессов (переменных или движений), которые существенно (на порядок) различаются между собой по скорости протекания. Условно такие переменные называют «медленные», «средние», «быстрые». Если их больше трех, вводят дополнительные названия и понятия, такие, как «очень медленные», «очень быстрые», «спектр характеристических времен» и т.д.

Такое разделение переменных позволяет сократить число дифференциальных уравнений описывающих состояние динамической модели ТС из следующих соображений. «Медленные» переменные не успевают сколько-нибудь существенно измениться за определенный отрезок времени, и их можно считать на этом временном интервале постоянными параметрами. «Быстрые» переменные на том же отрезке успевают достичь своих стационарных значений практически мгновенно по сравнению с «медленными».

В результате дифференциальные уравнения, описывающие «медленные» переменные, исключаются из полной системы уравнений, а в правых частях оставшихся уравнений записывается вместо исключенной «медленной» переменной ее усредненное постоянное значение (параметр); дифференциальные уравнения для «быстрых» переменных преобразуются в алгебраические уравнения для их стационарных значений.

Рассмотрим пример с «медленными», «средними» и «быстрыми» движениями на простейшем примере трехмассовой цепной крутильной динамической модели трансмиссии ТС (рис. 1).

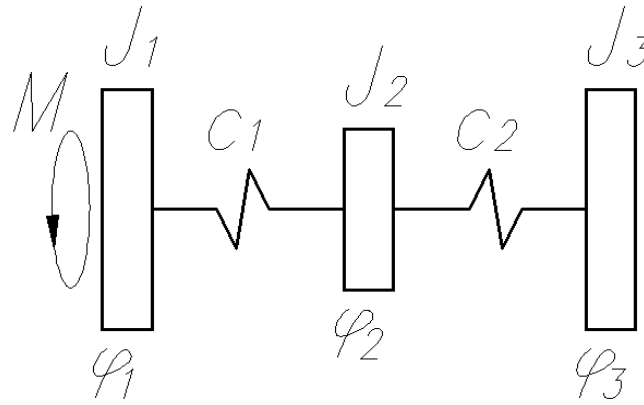


Рис. 1. Трехмассовая модель трансмиссии:

J_1, J_2, J_3 – моменты инерции маховых масс; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ – угловые координаты маховых масс; c_1, c_2 – угловые жесткости валов; M – крутящий момент, приложенный к первой маховой массе

Уравнения движения представленной на рис. 1 простейшей динамической модели записываются в виде системы трех дифференциальных уравнений второго порядка:

$$\begin{cases} J_1 \cdot \ddot{\varphi}_1 + c_1 \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) = M; \\ J_2 \cdot \ddot{\varphi}_2 + c_2 \cdot (\varphi_2 - \varphi_3) - c_1 \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) = 0; \\ J_3 \cdot \ddot{\varphi}_3 - c_2 \cdot (\varphi_2 - \varphi_3) = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Примем в системе уравнений (1) синусоидальный закон изменения крутящего момента ($M = m \cdot \sin(\omega \cdot t)$) и запишем ее относительно первых производных для большей наглядности дальнейших рассуждений:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_1}{dt} = \varphi_4; \\ \frac{d\varphi_2}{dt} = \varphi_5; \\ \frac{d\varphi_3}{dt} = \varphi_6; \\ \frac{d\varphi_4}{dt} = \frac{c_1}{J_1} (M - (\varphi_1 - \varphi_2)); \\ \frac{d\varphi_5}{dt} = \frac{c_2}{J_2} \left(\frac{c_1}{c_2} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) - (\varphi_2 - \varphi_3) \right); \\ \frac{d\varphi_6}{dt} = \frac{c_2}{J_3} \cdot (\varphi_2 - \varphi_3); \\ \frac{dM}{dt} = \frac{m \cdot \omega}{c_1} \cdot \cos(\omega \cdot \tau); \\ \frac{d\tau}{dt} = 1. \end{cases} \quad (2)$$

Разделим далее переменные, входящие в систему уравнений (2), в зависимости от того, как скорость их изменения относится к единице:

1. τ и $\varphi_1, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_6$ $\left(\frac{c_1}{J_1} \cong \frac{c_2}{J_3} \cong 1 \right)$ – «средние» переменные;

2. $M \left(\frac{m \cdot \omega}{c_1} \ll 1 \right)$ – «медленная» переменная;

3. $\varphi_2, \varphi_5 \left(J_2 \ll 1 \text{ и } \frac{c_2}{J_2} \gg 1 \right)$ – «быстрые» переменные.

В соответствии с выделенной иерархией переменных заменим «медленную» переменную M на ее среднее значение \tilde{M} за временной интервал τ , а пятое уравнение системы уравнений (2) для «быстрой» переменной φ_5 заменим алгебраическим уравнением для ее стационарного значения $\left(\frac{d\varphi_5}{dt} = 0 \right)$: $\frac{c_2}{J_2} \left(\frac{c_1}{c_2} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) - (\varphi_2 - \varphi_3) \right) = 0$. Упрощенная система уравнений примет вид:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_1}{dt} = \varphi_4; \\ \frac{d\varphi_3}{dt} = \varphi_6; \\ \frac{d\varphi_4}{dt} = \frac{c_1}{J_1} (\tilde{M} - (\varphi_1 - \varphi_2)); \\ \frac{c_2}{J_2} \left(\frac{c_1}{c_2} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) - (\varphi_2 - \varphi_3) \right) = 0; \\ \frac{d\varphi_6}{dt} = \frac{c_2}{J_3} \cdot (\varphi_2 - \varphi_3); \\ \frac{d\tau}{dt} = 1. \end{cases} \quad (3)$$

Перейдем обратно от системы дифференциальных уравнений первого порядка (3) к системе уравнений второго порядка. После выполнения преобразований окончательно получим:

$$\begin{cases} J_1 \cdot \ddot{\varphi}_1 + c_\Sigma \cdot (\varphi_1 - \varphi_3) = \tilde{M}; \\ J_3 \cdot \ddot{\varphi}_3 - c_\Sigma \cdot (\varphi_1 - \varphi_3) = 0, \end{cases} \quad (4)$$

где $c_\Sigma = \frac{c_1 \cdot c_2}{c_1 + c_2}$ – суммарная жесткость валов рис.1. Из системы уравнений (4) следует, что она описывает двухмассовую крутильную модель.

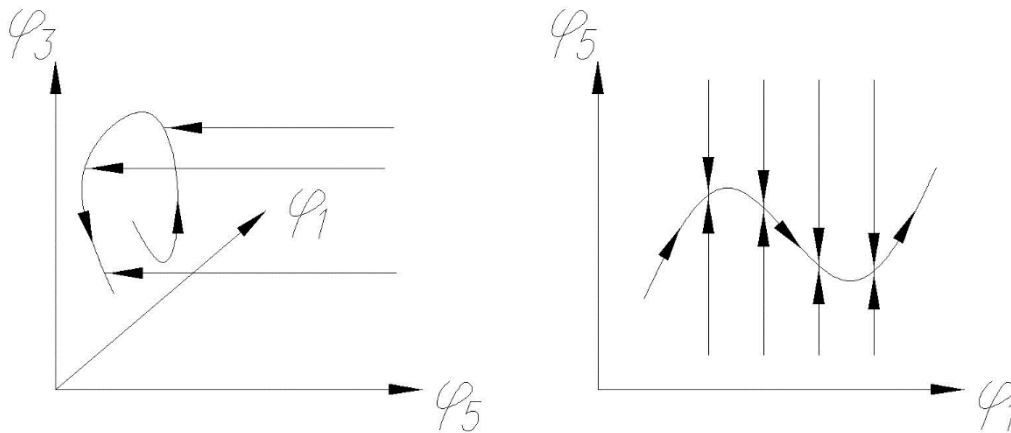


Рис. 2. Качественный вид сечений фазового пространства системы (3)

Таким образом, на стадии разработки динамических моделей ТС, когда принимаются решения о количестве рассматриваемых сосредоточенных масс, а также решения о том, отнести данную величину к переменной задачи или к постоянному параметру, неявно осуществляется разделение переменных на «медленные», «средние», «быстрые» и т.д. Степень допустимости принятия таких идеализаций становится более «прозрачной» и оценивается в зависимости от соотношений скоростей изменения переменных.

В заключение рассмотрим допущение о квазистатических характеристиках элементов в свете принятой концепции «быстрых» и «медленных» движений на примере источника ограниченной мощности, взаимодействующего с элементарной колебательной системой (рис. 3).

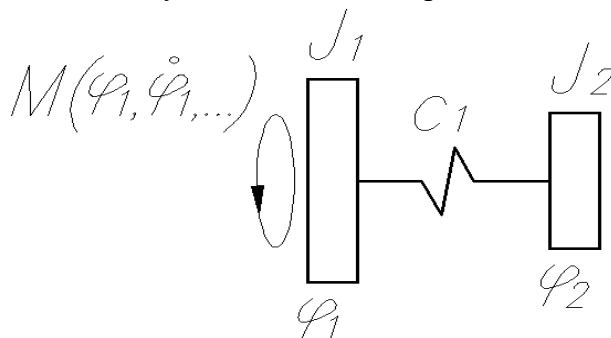


Рис. 3. Колебательная система, взаимодействующая с источником ограниченной мощности:

J_1, J_2 – моменты инерции маховых масс; φ_1, φ_2 – угловые координаты маховых масс; $\dot{\varphi}_1$ – угловая скорость; c_1 – угловая жесткость вала; M – крутящий момент, двигателя как источника ограниченной мощности

Из выполненных работ [2] известно, что моделирование воздействия двигателя как заданной функции времени (источником неограниченной мощности) является недопустимой идеализацией для большинства задач, поскольку в этом случае не учитывается взаимодействие двигателя с колебательной системой и не достигается требуемой адекватности динамической модели реальному объекту исследования. С другой стороны, учет ограниченной мощности двигателя ТС требует более детального описания самого двигателя (как динамической системы) и ведет к существенному усложнению задач. На этом пути (в первом приближении) принимают внешнюю скоростную характеристику двигателя, которая, как известно, является квазистационарной характеристикой. Чтобы оценить степень допустимости использования квазистационарной характеристики двигателя (внешней скоростной или частичной), рассмотрим это допущение с точки зрения МРД.

Уравнения движения динамической модели представленной на рис. 3 имеют вид:

$$\begin{cases} J_1 \cdot \ddot{\varphi}_1 + c_1 \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) = M(\varphi_1, \dot{\varphi}_1, \ddot{\varphi}_1, \dots); \\ J_2 \cdot \ddot{\varphi}_2 - c_1 \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) = 0, \end{cases} \quad (5)$$

где $M(\varphi_1, \dot{\varphi}_1, \ddot{\varphi}_1, \dots)$ – характеристика двигателя с учетом нестационарного нагружения.

Будем считать уточненную характеристику двигателя $M(\varphi_1, \dot{\varphi}_1, \ddot{\varphi}_1, \dots)$ известной и разложим ее в ряд Тейлора в некоторой рабочей точке:

$$M(\varphi_1, \dot{\varphi}_1, \ddot{\varphi}_1, \dots) = M_0 + \frac{\partial M}{\partial \varphi_1} d\varphi_1 + \frac{\partial M}{\partial \dot{\varphi}_1} d\dot{\varphi}_1 + \frac{\partial M}{\partial \ddot{\varphi}_1} d\ddot{\varphi}_1 + \dots, \quad (6)$$

где члены дальнейшего разложения упущены.

Первые два члена разложения производной $M(\varphi_1, \dot{\varphi}_1, \ddot{\varphi}_1, \dots)$ имеют вид:

$$\frac{dM}{dt} = d \left[\frac{\partial M}{\partial \varphi_1} \right] \frac{d\varphi_1}{dt} + d \left[\frac{\partial M}{\partial \dot{\varphi}_1} \right] \frac{d^2 \varphi_1}{dt^2} + \dots \text{или} \quad (7)$$

$$\frac{dM}{dt} = A \frac{d\varphi_1}{dt} + B \frac{d^2\varphi_1}{dt^2} + \dots = A \cdot \omega + B \cdot \varepsilon + \dots,$$

где $\omega = \frac{d\varphi_1}{dt}$; $\varepsilon = \frac{d^2\varphi_1}{dt^2}$.

Запишем систему уравнений (5) как систему уравнений первого порядка:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_1}{dt} = \omega; \\ \frac{d\varphi_2}{dt} = \varphi_3; \\ \frac{d\varphi_3}{dt} = \frac{c_1}{J_2} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2); \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J_1} (M(\varphi_1, \dot{\varphi}_1, \ddot{\varphi}_1, \dots) - c_1 \cdot (\varphi_1 - \varphi_2)); \\ \frac{dM}{dt} = A \cdot \omega. \end{cases} \quad (8)$$

Разделим далее переменные, входящие в систему уравнений (8). Предположим, что $A \cdot \omega \ll 1$ Тогда переменные M , ω будут «медленными», переменные φ_2, φ_3 – «средними», а остальные «быстрыми». Примем некоторое среднее значение для $\frac{dM}{dt} = A \cdot \omega$: $A \cdot \omega = \tilde{\omega}$ и подставим его в качестве параметра в уравнение $M(\varphi_1, \dot{\varphi}_1, \ddot{\varphi}_1, \dots)$, считая остальные аргументы равными нулю.

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_1}{dt} = \omega; \\ \frac{d\varphi_2}{dt} = \varphi_3; \\ \frac{d\varphi_3}{dt} = \frac{c_1}{J_2} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2); \\ 0 = \frac{1}{J_1} (M(0, \tilde{\omega}, 0, \dots) - c_1 \cdot (\varphi_1 - \varphi_2)), \end{cases} \quad (9)$$

откуда $M(0, \tilde{\omega}, 0, \dots) = c_1 \cdot (\varphi_1 - \varphi_2)$; $J_2 \frac{d^2\varphi_2}{dt^2} = c_1 \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) = M(0, \tilde{\omega}, 0, \dots)$.

Нагрузочную характеристику M , принято аппроксимировать квадратичным уравнением в виде [3]:

$$M(\omega) = a \cdot \omega^2 + b \cdot \omega + c,$$

где a, b, c – коэффициенты, учитывающие специфические особенности двигателя.

Окончательно система уравнений вырождается в следующее уравнение:

$$J_2 \frac{d^2\varphi_2}{dt^2} = a \cdot \omega^2 + b \cdot \omega + c \quad (10)$$

При этом отметим, что $\tilde{\omega}$ не является истинно стационарным значением. «Медленная» переменная ω будет продолжать изменяться и «увлекать» за собой более «быстрые» переменные φ_2, φ_3 . В этом смысле «медленная» переменная является ведущей, или «параметром порядка».

Критерии разделения фазовых переменных на «быстрые», «медленные» в общем случае не выработаны. Поэтому разделение движений основывается на физических соображениях, присущих конкретной задаче и составляет отдельный этап исследования. В любом случае, «малость» параметров определяется по отношению к интервалу времени T , на котором рассматривается движение системы. Характерные значения фазовых переменных допускают оценку максимальными значениями из абсолютных величин на рассматриваемом интервале времени $T: \varphi_i^* = \max_T |\varphi_i|$.

Выводы:

1) показана взаимная связь принимаемых допущений при построении динамических моделей транспортных средств с точки зрения метода разделения движений на «быстрые» и «медленные»;

2) приведены примеры задач по разделению движений на «быстрые» и «медленные», которые широко используются в исследовании динамики транспортных средств.

Библиографический список

1. Андронов, А.А. Теория колебаний / А.А. Андронов, А.А. Витт, С.Э. Хайкин. – М.: Физматлит, 1959. – 915 с.
2. Новожилов, И.В. Методы разделения движений / И.В. Новожилов. – М.: МЭИ, 1981. – 126 с.
3. Кононенко, В.О. Колебательные системы с ограниченным возбуждением / В.О. Кононенко. – М.: Наука, 1964. – 256 с.
4. Литвинов, А.С. Автомобиль: Теория эксплуатационных свойств: Учебник для вузов по специальности «Автомобили и автомобильное хозяйство» / А.С. Литвинов, Я.Е. Фаробин. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.

Дата поступления

в редакцию: 09.10.2018

S.E. Manyanin³, P.E. Dmitriev³, Yu.I. Palutin², A.S. Slusarev¹, A.A. Anikin³

SEPARATION OF MOVEMENTS INTO «FAST» AND «SLOW» WHEN BUILDING DYNAMIC VEHICLE MODELS

Volga state University of water transport¹,
Nizhny Novgorod state agricultural academy²,
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev³

Purpose: The article presents examples of equations of motion and ideas underlying the separation of phase variables into «fast» and «slow»; Criteria are indicated by which the variables are divided into «fast» and «slow».

Design/methodology/approach: The concept of separation of movements into «fast» and «slow» represents an idealized representation of real processes taking place in the object of investigation. Typical assumptions that are accepted when constructing dynamic models of vehicles (TS) include the discrete distribution of inertia parameters, the choice of constant parameters, the adoption of quasistatic characteristics of individual elements.

Findings: From the work performed [2], it is known that modeling the impact of the engine, as a given function of time (the source of unlimited power), is an unacceptable idealization for most tasks. Since in this case, the interaction of the engine with the oscillatory system is not taken into account and the required adequacy of the dynamic model to the real object of study is not achieved.

Research limitations/implications: Depending on the goals and the formulation of research tasks, in most cases it is possible to isolate in a real object a number of processes (variables or movements) that differ significantly (by an order of magnitude) in their flow rate. Conventionally, these variables are called «slow», «medium», «fast».

Originality/value: Thus, at the stage of developing dynamic models of TS, when decisions are made on the number of concentrated masses considered, as well as decisions on whether to carry this value to a task variable or to a constant parameter, the variables are implicitly divided into «slow», «medium», «fast», etc.

Keywords: dynamic model, motion separation method, vehicle, concept, differential equations.

УДК 629.113

Г.Р. Мардоян¹, Р.И. Симонян², Н.А. Карпов³, Н.А. Пронин³, С.Ю. Метелев³**СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ИСПЫТАНИЮ СИСТЕМ ADAS
НА ВСЕХ ЭТАПАХ РАЗРАБОТКИ**ЕИА Инжиниринг¹,
ООО «Нэшнл Инструментс АМ»²,
ООО «ЭнАй Рус»³

В публикации ставится задача рассмотреть процесс создания аппаратно-программного комплекса для исследования, разработок и испытаний алгоритмов системы ADAS, состоящего из программных сценариев и имитаторов реальных сигналов для датчиков автомобиля, таких как камеры и радары. В публикации продемонстрировано выполнение лабораторной проверки таких систем, как радары, камеры и лидары, которые работают автономно или интегрированы в систему Sensor Fusion в автомобиле. Это дает возможность проводить испытания до наличия транспортного средства, чтобы выявлять ошибки системы на этапе разработки, которые в противном случае возникли бы слишком поздно. Гибкость, модульность и масштабируемость программно-аппаратной платформы National Instruments позволяет в рамках одного интегрированного стенда решать задачи по комплексным испытаниям системы Sensor Fusion, состоящей из любого набора и типа датчиков. Открытость платформы предоставляет возможность интегрировать сторонние системы программно-аппаратного моделирования узлов автомобиля. Все компоненты системы Sensor Fusion являются критическими для безопасности пассажира автомобиля, поэтому способность тестировать алгоритмы в лаборатории до проведения тестов на транспортных средствах является необходимым шагом.

Ключевые слова: программно-аппаратное моделирование, HIL, ADAS, Sensor Fusion, Radar, Camera, LIDAR, Connected Car, Autonomous Driving, Unmanned Vehicle.

В настоящее время подавляющее большинство современных автомобилей представляет собой достаточно сложные многофункциональные, а порой и многопроцессорные программируемые электронные системы, к эффективности, качеству и надежности которых предъявляются самые высокие требования. Сложность электронных компонентов автомобиля, их широкая номенклатура и разнообразие требований по контролю качества требуют от производителей внедрения автоматизированных контрольно-измерительных систем, предназначенных для оперативного многофункционального тестирования изделий в условиях разработки, испытаний и массового производства.

При разработке новой системы производители автомобильных систем проходят несколько основных этапов:

- программное моделирование (MIL, SIL);
- параметрические испытания прототипа;
- программно-аппаратное моделирование (HIL);
- производственные испытания;
- полевые испытания.

В настоящее время полевые испытания становятся все дороже и сложно реализуемы. В частности, переход к автономному (беспилотному) транспорту сопровождается естественным процессом внедрения в автомобиль все большего количества интеллектуальных систем и датчиков. Полевое испытание автомобиля на протяжении многих лет является основным этапом разработки, а его результаты – ключевыми перед выпуском автомобиля на рынок. С появлением в автомобиле большого количества сложных систем и подсистем, основанных на передовых технологиях, возникает серьезный вопрос к безопасности и надежности всей системы в целом. Большинство экспертов сходятся во мнении, что новому автомобилю, оснащенному системами автономного движения, для достижения требуемого тестового покрытия дорожных

ситуаций, необходимо преодолеть на полевых испытаниях не менее 16 млн км. Проведение испытаний традиционным способом становится слишком долгим и дорогим.

Также отчетливо ясно, что датчики, системы датчиков и алгоритмы, их связывающие, играют одну из главных ролей в будущем поколении систем автономного движения, обеспечивая множественными способами обучение автомобиля к восприятию окружающей среды. Данные, предоставляемые от датчиков разного типа, должны быть верно интерпретированы и объединены для построения суммарной картины окружающего пространства. Сразу возникают вопросы: какие испытания дадут наибольшую пользу и как проверить работоспособность новейших алгоритмов и сенсоров.

В настоящее время, компания National Instruments развивает несколько ключевых и перспективных направлений по испытаниям беспилотных автомобильных систем:

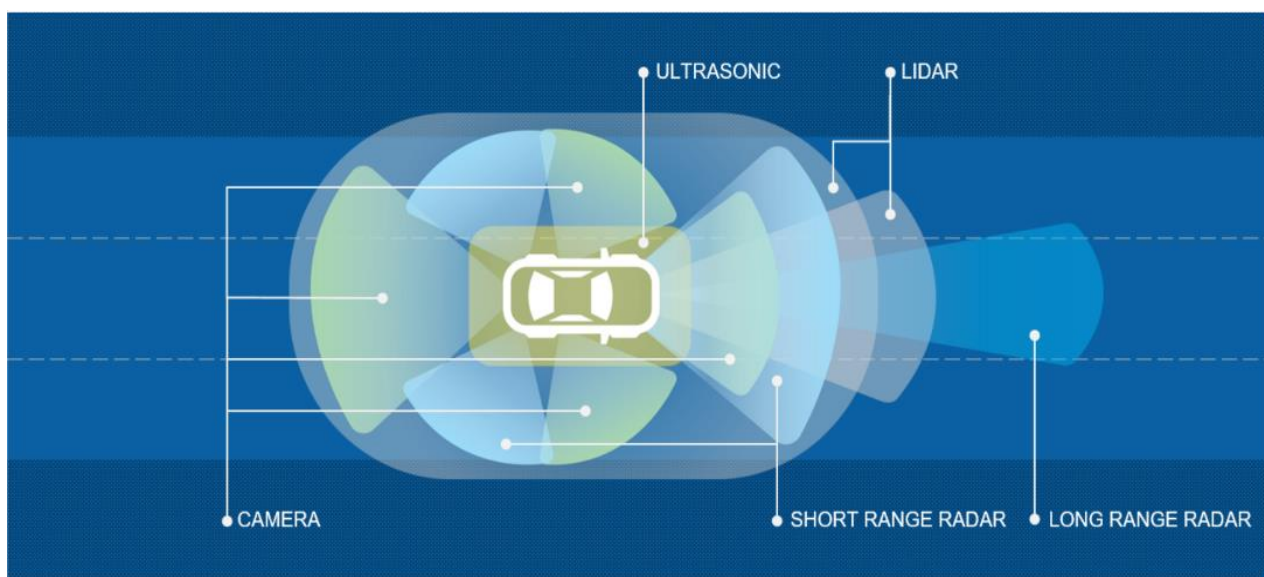
- 1) испытания систем помощи водителю (ADAS);
- 2) аппаратно-программные комплексы для исследования и разработок системы беспроводной коммуникации типа V2X-коммуникации автомобилей, инфраструктуры, человека;
- 3) испытательные стенды для отработки технического зрения;
- 4) имитация сигналов для навигационных систем автономных автомобилей;
- 5) аппаратно-программные комплексы моделирования дорожной обстановки и движения автомобиля.

Постановка задачи. Что такое Sensor Fusion

Сегодня многие автомобили имеют несколько ADAS-систем на основе различных датчиков – таких, как радары, камеры, лидары и ультразвуковые дальнометры. Исторически каждая из этих подсистем выполняла определенную функцию, и только в редких случаях они обменивались информацией друг с другом. Объем информации, которую получает водитель, пропорционален количеству используемых датчиков и подсистем различного типа. Если подсистемы предоставляют достаточно данных и являются связанными друг с другом, то возможна разработка комплексных интеллектуальных алгоритмов для создания автономной системы вождения.

Sensor Fusion – это совокупность информации от различных датчиков, которая обеспечивает более полное представление об окружении автомобиля (рис. 1). Это необходимая технология для создания более безопасных, функциональных и эффективных автономных систем вождения.

Система Sensor Fusion может быть актуальна для всех типов датчиков. Типичным примером является объединение информации, предоставляемой передней камерой и передним радаром. Камера, работающая в видимом спектре, имеет проблемы в нескольких условиях, таких как дождь, густой туман, солнечный блик и отсутствие света, но обладает высокой надежностью при распознавании цвета (например, дорожных разметках). Радар даже при низком разрешении полезен для обнаружения расстояния и не чувствителен к условиям окружающей среды.



**Рис. 1. Датчики, входящие в систему Sensor Fusion
Обоснование использования Sensor Fusion**

Ряд функций ADAS, которые используют объединение данных от датчиков передней камеры и радара, являются наиболее распространенными.

1. Адаптивный круиз-контроль (ACC). Система круиз-контроля автомобиля адаптирует скорость к условиям движения. Скорость уменьшается, когда расстояние до автомобиля впереди падает ниже порога безопасности. Когда дорога становится свободной или расстояние до следующего автомобиля достаточно, ACC производит возврат автомобиля до заданной скорости.
2. Автономное аварийное торможение (АЕВ). Данная функция управляет тормозной системой, уменьшая скорость в случае вероятного столкновения или иным образом предупреждая водителя в критических ситуациях.

Описание системы ADAS HiL

Для проверки сложных систем необходимо создать соответствующую тестовую среду, которая эффективно симулирует датчики для проверки поведения транспортного средства в реальных условиях.

Далее мы рассмотрим одно из внедренных решений подобной системы, которая предназначена для тестирования алгоритмов системы ADAS [1]. Был разработан единый комплекс программно-аппаратного моделирования, состоящий из имитатора радарных объектов на основе технологий National Instruments и имитатора окружающей среды. В программной части данного комплекса создаются виртуальные сценарии дорожного окружения, а аппаратная часть на базе платформы National Instruments PXI синхронно генерирует симулированные сигналы на реальные объекты испытаний – камеры и радиолокаторы автомобиля.

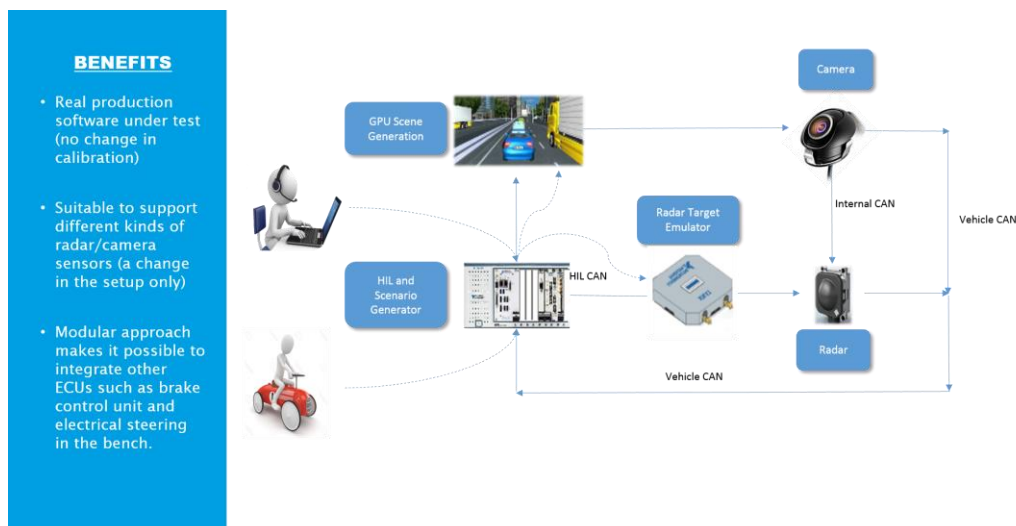


Рис. 2. Тестовая система ADAS HIL

Имитатор окружающей среды открыт к изменениям, позволяя настраивать такие параметры, как модели транспортных средств, дороги или тестовые маршруты с подробным окружением, стили и поведение водителя, сценарии дорожного движения с многочисленными окружающими объектами и т.д. (рис. 3). Существует множество графических сред, которые можно интегрировать в данный комплекс, например Altran, IPG Carmaker, TASS PreScan и другие.

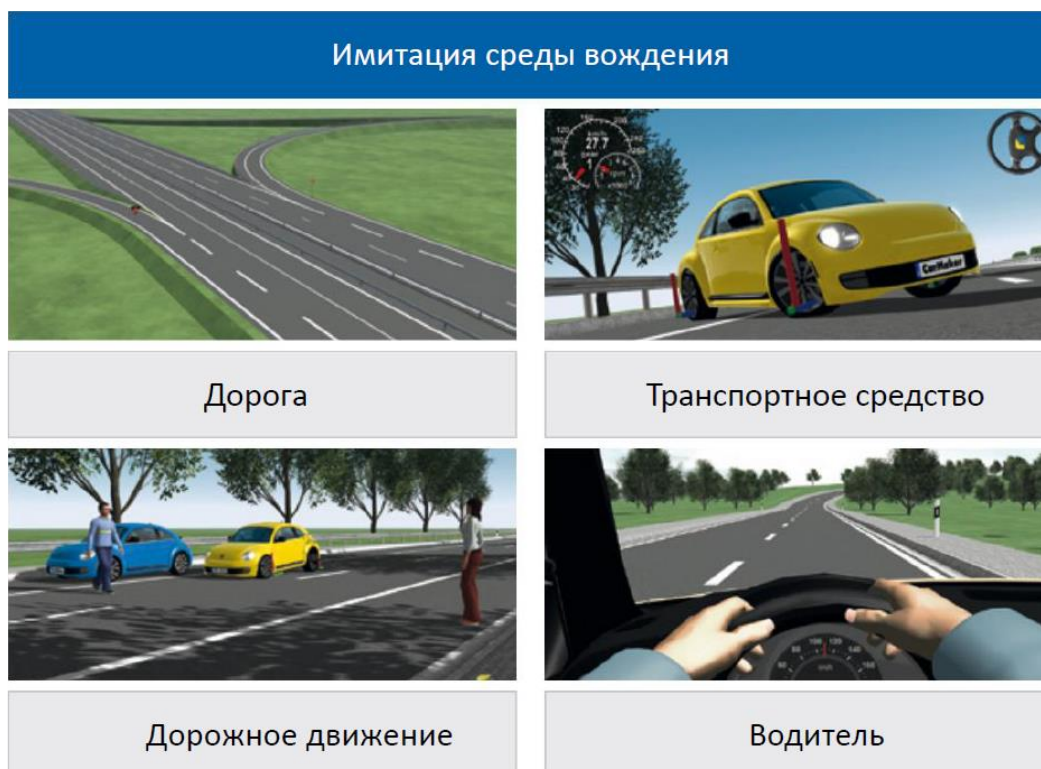


Рис. 3. Имитатор окружающей среды

Для управления автомобилем графический движок получает данные о положении педалей тормоза и дроссельной заслонки в дополнение к углу поворота колес. Система National Instruments PXI дополняет эти данные к сигналам от рулевого колеса и педалей. Динамическая модель автомобиля интегрирована в систему симуляции и может быть гибко настроена.

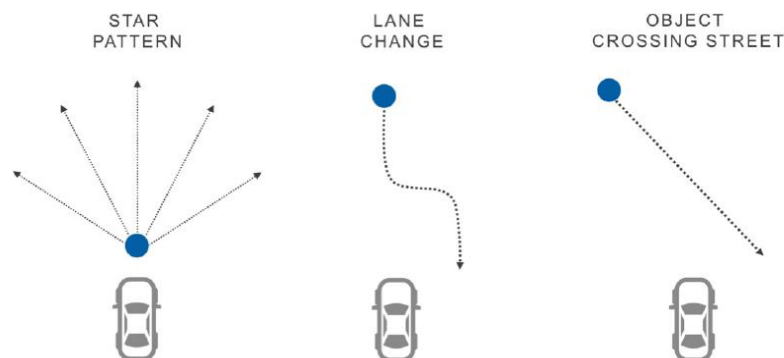


Рис. 4. Сценарии стандартных маневров

Исходя из сценария выбранного маневра (с примерами на рис. 4) программная модель рассчитывает скорость транспортного средства, а также при помощи NI VRTS (система имитации целей для радара) генерирует радиочастотные сигналы для радара, соответствующие имитируемым объектам. Все данные через каналы ввода/вывода передаются через требуемые пользователю протоколы и интерфейсы, а также могут быть изменены по мере необходимости.

Данные от программного симулятора (расстояние, ЭПР, угол места и скорость цели) передаются по CAN-интерфейсу посредством модуля NI PXI-8512. NI PXI-8512 – это двухпортовый высокоскоростной интерфейс CAN/CAN-FD для PXI-систем, используемый для передачи и приема кадров CAN-шины со скоростью 1 Мбит/с.

Помимо отправки данных в имитатор целей и получения сигналов педалей и рулевого управления, PXI также передает сообщения CAN через локальную сеть автомобиля. Сообщения CAN синхронизируются с происходящими в виртуальной среде событиями и имитатором целей для создания достоверного окружения, необходимого для тестирования современных камер и радарных систем автомобиля.

Описание компонентов системы

Ниже приведены краткие описания компонентов системы (рис. 5).

1. Электронный блок управления радаром (ECU). Основной задачей радиолокационного датчика является обнаружение объектов и измерение их скорости и положения относительно движения транспортного средства, оснащенного радаром. Радиолокационный датчик является моностатическим мультимодальным радаром и работает на частоте 76 ГГц с шестью фиксированными радиолокационными антеннами. Датчик может обнаруживать другие транспортные средства примерно на расстоянии 250 метров. Радиолокатор оснащен обогреваемой линзой, которая обеспечивает работу датчика даже в плохих погодных условиях, таких как снег и лед. Относительная скорость объектов измеряется с помощью эффекта Доплера – изменение частоты между отраженным и передаваемым сигналами, а расстояние до объекта может определяться временной задержкой. Электронный блок управления объединяет данные с радаров и камеры и отвечает за такие функции, как АСС и АЕВ.

2. Электронный блок управления камеры обрабатывает изображения окружающей среды и предоставляет информацию, такую как расстояние от линий полосы и других объектов. Эта информация отправляется в электронный блок управления радиолокатором для объединения данных с датчиков, но в некоторых случаях (например, дорожные знаки и удержание полосы) ЭБУ камеры работает в одиночку и отправляет CAN-сообщения по CAN-интерфейсу.

3. Генератор видеопотока – это симулятор, включающий в себя модель транспортного средства, который получает данные от NI PXI-8512/2 через CAN-интерфейс и передает информацию об имитируемой среде. Радарные данные, такие как расстояние, эффективная площадь

рассеяния (ЭПР), угол места и скорость, генерируются во время моделирования и вычисляются в реальном времени на основе данных виртуальной среды. Через автоматизированное рабочее место оператора можно удаленно управлять параметрами симуляции, изменять погодные условия, регулировать положение радара, добавлять объекты на дороге, например, автомобиль с определенной скоростью и расстоянием.

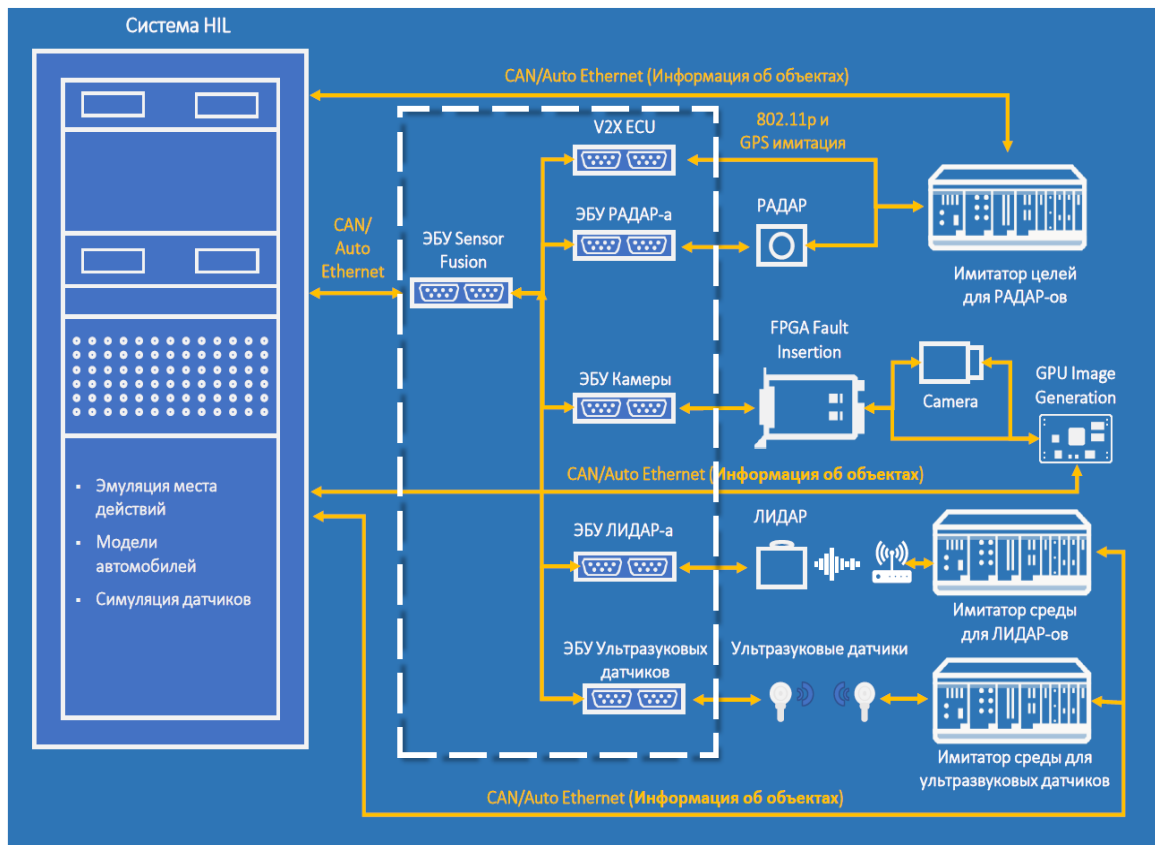


Рис. 5. Архитектура тестирования системы ADAS с использованием комплекса программно-аппаратного моделирования

Платформа PXI представляет собой крейтовую систему, базирующуюся на форм-факторе CompactPCI, и использующую дополнительные шины синхронизации и управления запуском контрольно-измерительных модулей, установленных в шасси. Измерительная станция управляется контроллером PXI, работающим под управлением таких операционных сред, как Microsoft Windows, Linux, MacOS, LabVIEW Real-Time и др. Функциональные возможности тестовой станции определяются, во-первых, набором контрольно-измерительных модулей, а во-вторых, разработанным ПО, определяющим процедуру использования измерительных модулей при испытаниях каждого конкретного электронного блока или компонента.

В настоящее время NI производит более 500 модификаций контрольно-измерительных модулей PXI таких типов, как осциллографы, генераторы, мультиметры, источники питания, системы управления приводами, машинного зрения, а также распространенные и специализированные интерфейсы RS232/485, GPIB, CAN и др., на базе которых не составляет труда построить универсальные тестовые станции для испытаний самого широкого класса электронной аппаратуры.

Имитатор радарных целей предназначен для использования в составе комплекса программно-аппаратного моделирования для испытаний и тестирования радарной системы автомобиля. Гибкость, модульность и масштабируемость программно-аппаратной платформы National Instruments позволяют в рамках одного интегрированного стенда решать задачи по комплексным испытаниям системы Sensor Fusion, состоящей из любого набора и типа датчиков.

Открытость программно-аппаратной платформы предоставляет возможность интегрировать сторонние системы программно-аппаратного моделирования узлов автомобиля по протоколу ASAM XIL.

Система позволяет производить следующие действия:

- радиочастотные измерения для проверки автомобильного радара;
- анализ сигналов: излучаемая мощность, коэффициент шума, ширина луча ДН и несущая частота;
- анализ ЛЧМ сигнала;
- имитация целей различного типа (ЭПР);
- одиночные и множественные цели;
- фиксированное и переменное расстояние;
- несколько сценариев объектов (расстояние, скорость, размер и угол места);
- настраиваемые сценарии перемещения нескольких объектов.

В основе имитатора целей – векторный приемо-передатчик с ПЛИС NI PXIe-5840 с характеристиками:

- количество входных аналоговых каналов – 1;
- количество выходных аналоговых каналов – 1;
- частота дискретизации – 1.25 ГГц/канал;
- входная полоса пропускания – до 1 ГГц;
- диапазон частот – 9 кГц – 6,5 ГГц;
- разрешение ЦАП/АЦП – 16 бит;
- ПЛИС Xilinx Virtex-7 X690T.

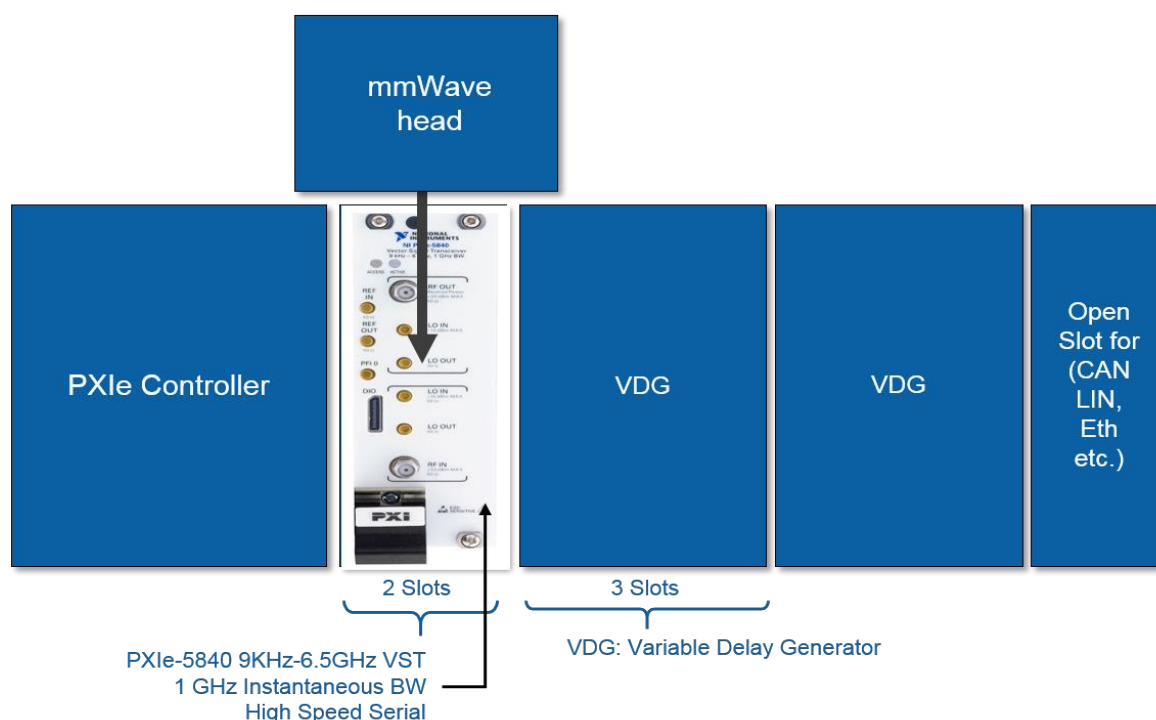


Рис. 6. Архитектура, реализующая симуляцию сигнала двух целей с одним углом места

На рис. 6 эскиз PXI системы с одним векторным приемопередатчиком NI PXIe-5840 и одним переносчиком частоты до 76 ГГц может генерировать две цели с одинаковым углом места. Благодаря гибкости платформы PXI система может быть легко расширена, чтобы имитировать несколько целей с кратными углами места. На рис. 7 конфигурация с четырьмя устройствами PXIe-5840 и четырьмя переносчиками частоты может моделировать до восьми различных целей.

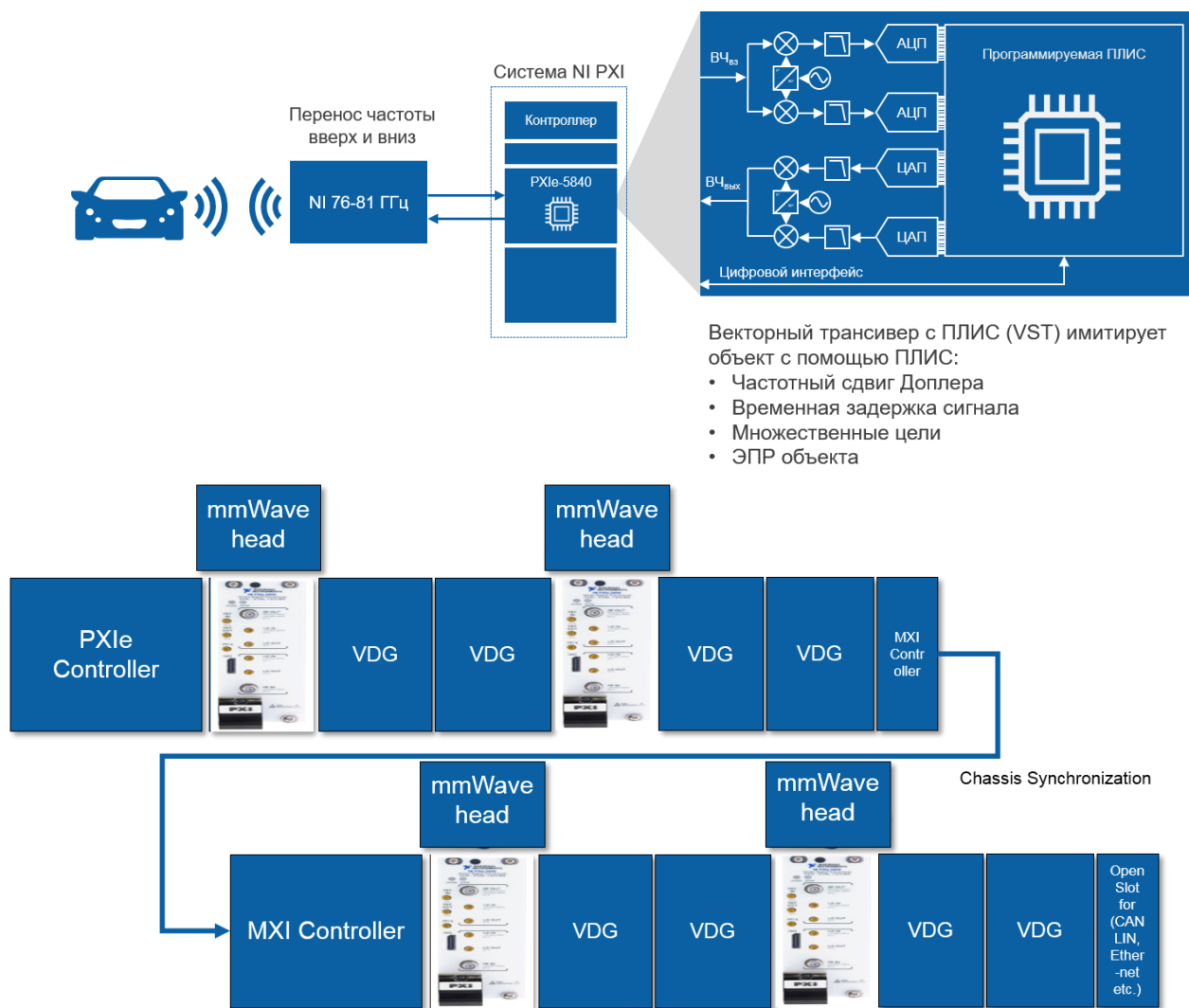


Рис. 7. Архитектура, реализующая симуляцию сигнала восьми целей с четырьмя углами места

Система имитации целей PXI может обмениваться данными как по стандартной автомобильной шине (CAN, LIN, FlexRay), так с помощью других протоколов, необходимых для взаимодействия с ЭБУ автомобиля. Модульность решения позволяет автопроизводителям тестировать сложные сценарии движения транспортных средств с возможностью обработки нескольких углов места одновременно. Стандартные маневры, предусмотренные рекомендациями NCAP, могут быть подгружены автоматически, что позволяет сократить время проработки испытаний.

В рамках данной публикации была рассмотрена система для лабораторной валидации совместной работы в рамках Sensor Fusion радарной системы и камеры автомобиля. Оба компонента критичны для безопасности, поэтому тестирование в лабораторных условиях перед испытаниями является необходимым и важным этапом. Валидация в подобных условиях предоставляет следующие преимущества:

- 1) возможность реализовать проверку на этапе до наличия транспортного средства, чтобы запланировать корректирующие действия, которые в противном случае потребовалось бы производить слишком поздно;
- 2) общее время разработки значительно сокращается, так как испытания могут быть начаты до того, как автомобиль будет доступен;
- 3) затраты на разработку сокращаются за счет наличия системы, которая может работать весь день, семь дней в неделю;

4) безрегрессионные испытания могут проводиться в значительно сокращенное время и с минимальными затратами по сравнению с использованием собранного автомобиля.

Хотя комплекс для тестирования ADAS-системы с применением программно-аппаратного моделирования был создан на основе программного обеспечения и аппаратного обеспечения National Instruments для проверки и валидации, его использование не ограничивается этими областями; на самом деле он может также использоваться, например, для калибровки ЭБУ, для определения параметров испытаний транспортных средств.

Система тестирования ADAS может быть полностью интегрирована с другими аппаратными продуктами National Instruments для программно-аппаратного моделирования (HIL), такими как аппаратное обеспечение формирования согласования сигнала и нагрузки (SLSC) для стандартизации и маршрутизации сигналов, коммутирующих нагрузок и формирования сигнала (рис. 8) [2]. С помощью программного обеспечения VeriStand в режиме реального времени каждый компонент может быть интегрирован в инфраструктуру, которая может взаимодействовать с системами HIL реального времени, в том числе сторонних производителей.

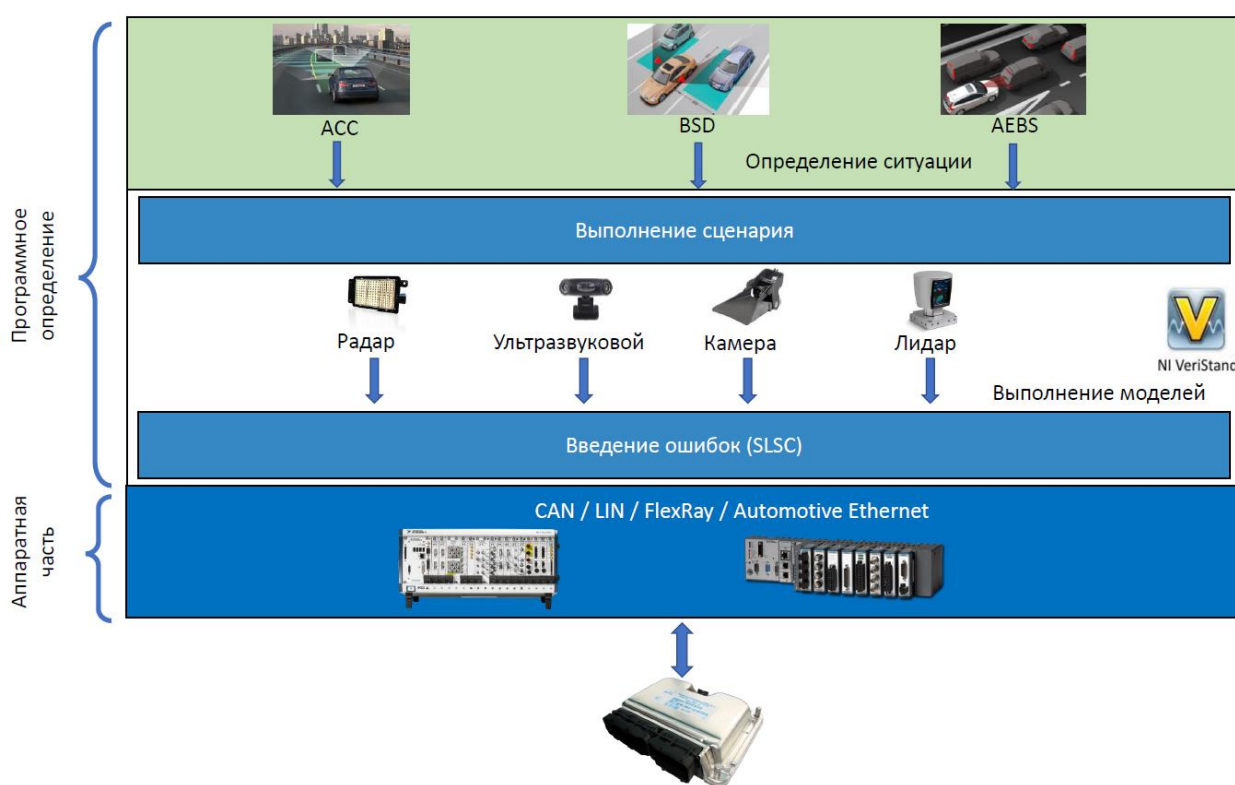


Рис. 8. Архитектура системы с применением аппаратного обеспечения формирования согласования сигнала и нагрузки

Также подобная система может быть интегрирована с системами тестирования мультимедиа, системы управления гибридной и электрической энергоустановкой, V2X и другими системами современных автомобилей.

Библиографический список

1. ADAS HIL With Sensor Fusion // National Instruments. [США, Остин, 2017]. – URL: <http://www.ni.com/white-paper/53961/en/> (дата обращения: 20.09.07).
2. Using The SLSC Architecture To Add Additional Elements To The Signal Path Of A Test System // National Instruments. [США, Остин, 2017]. – URL: <http://www.ni.com/white-paper/53702/en/> (дата обращения: 20.09.07).

G.R. Mardoyan¹, R.I. Simonyan², N.A. Karpov³, N.A. Pronin³, S.Yu. Metelev³

**MODERN APPROACHES TO TESTING ADAS SYSTEMS
AT ALL STAGES OF DEVELOPMENT**

YEA Engineering ¹,
LLC «National Instruments AM»²,
LLC «NI Rus»³

Purpose: The publication aims to consider the process of creating a hardware-software complex for research, development and testing of algorithms of the ADAS system, consisting of software scenarios and simulators of real signals for vehicle sensors, such as cameras and radars.

Design/methodology/approach: Currently, the vast majority of modern cars are quite complex multifunctional, and sometimes multiprocessor, programmable electronic systems, to the efficiency, quality and reliability of which the highest demands. The complexity of the electronic components of the car, their wide range and variety of quality control requirements require manufacturers to introduce automated control and measurement systems designed for rapid multifunctional testing of products in terms of development, testing and mass production.

Findings: As part of this publication, a system was considered for laboratory validation of joint work within Sensor Fusion radar system and a car camera. Both components are critical to safety, so testing in the laboratory before testing is a necessary and important step.

Research limitations/implications: Currently, the vast majority of modern cars are quite complex multifunctional, and sometimes multiprocessor, programmable electronic systems, to the efficiency, quality and reliability of which the highest demands. The complexity of the electronic components of the car, their wide range and variety of quality control requirements require manufacturers to introduce automated test systems

Originality/value: The ADAS testing system can be fully integrated with other National Instruments hardware products for software and hardware modeling (HIL), such as signal conditioning and load shaping hardware (SLSC) for standardizing and routing signals, switching loads and signal generation.

Keywords: Software and hardware modeling, HIL, ADAS, Sensor Fusion, Radar, Camera, LIDAR, Connected Car, Autonomous Driving, Unmanned Vehicle.

УДК 629.331

Ю.И. Молев¹, М.Г. Черевастов², П.И. Бажан¹, Л.А. Захаров¹,
А.А. Аникин¹, Ю.П. Кузнецов¹, А.С. Слюсарев³

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ, ВНЕСЕННЫХ В КОНСТРУКЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ, ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПЕРЕБОРУДОВАНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ НА ТЕРРИТОРИИ НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ В 2015 ГОДУ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина²
Волжский государственный университет водного транспорта³

В настоящей работе дан общий анализ изменений, внесенных в конструкции транспортных средств, при производстве переоборудования автомобилей на территории Нижегородской области в 2015 году, на основе статистических данных. В результате проведенного анализа определены основные базовые модели автомобилей, подверженных переоборудованию, их общие черты, а также типовые изменения их конструкции и потенциально возможные отклонения различных параметров машин. В конце публикации определено дальнейшее направление исследований.

Ключевые слова: управляемость автомобиля, внесение изменений в конструкцию транспортного средства.

В последнее время на территории Нижегородской области сохраняется устойчивый рост уровня автомобилизации населения. Во всем этом многообразии транспортных средств необходимо выделить отдельную категорию автомобилей, в конструкцию которых по различным причинам были внесены изменения [1]. Нельзя не отметить, что данные изменения носят массовый характер и, изучая вопросы управляемости колесных машин, невозможно обойти стороной эти автомобили, несомненно, делающие свой вклад в общую аварийность на дорогах Нижегородской области и других регионов России.

Целью настоящей работы является исследование конкретных случаев внесения в 2015 году изменений в конструкцию автомобилей и прицепов, эксплуатирующихся на территории Нижегородской области для формирования основных видов изменений, необходимых для их классификации, а также определения тех параметров транспортного средства, величины которых изменяются при его переоборудовании. Полученные данные нами будут в дальнейшем использованы для теоретической оценки возможных изменений управляемости переоборудованных автомобилей по сравнению с их базовой моделью.

Предварительно, перед началом нашего исследования, необходимо упомянуть о том, что нами не рассматривалась нормативно-правовая сторона произведенных изменений и причины, предшествовавшие данным изменениям, а принимался во внимание только их характер.

В начале работы приведем обобщенную информацию, используя основные виды классификации механических транспортных средств. По данным МВД России в Нижегородской области на протяжении 2015 года было переоборудовано 2100 единиц автотранспортных средств [2]. Распределение внесенных изменений в конструкцию транспортного средства по категориям колесных машин в соответствии с классификацией автомобилей по Европейской Конвенции о дорожном движении 1968 года [3] составило, по уточненным данным, в процентном соотношении от общего числа переоборудованных автомобилей за 2015 год: категория «А» – 0 %, категория «В» – 53,4 %, категория «С» – 13 %, категория «D» – 33,1 %, категория «E» – 0,5 % [2]. Как видно из приведенных данных, на долю автомобилей категорий «В» и «D» приходится основная часть, а точнее 86,5 % от всех переоборудованных за вышеуказанный период времени транспортных средств.

Таблица 1

Распределение переоборудованных автомобилей по категориям

Категория автомобиля	A	B	C	D	E
Количество (%)	0	53,4	13	33,1	0,5

По аналогии, укажем распределение внесенных изменений, используя классификацию автомобилей в соответствии с ГОСТ Р 52051 – 2003 [4]. Данные [2] приведены в табл. 2.

Таблица 2

Распределение переоборудованных автомобилей по категориям

Категория автомобиля	M_1	M_2	M_3	N_1	N_2	N_3	O_4
Количество (%)	15,6	9,2	23,9	37,8	10,5	2,5	0,5

Изучив табл. 2, можно сделать вывод о том, что основными категориями автомобилей данной классификации, подверженными переоборудованию, являются M_3 и N_1 , на долю которых приходится около 62 % от общего количества переоборудованных. Теперь, имея общее представление о процентном соотношении количества автомобилей с внесенными изменениями в их конструкцию, внимательно изучим марки и модельный ряд этих базовых механических транспортных средств. Для этого представим в табличной форме всю необходимую информацию (табл. 3 и табл. 4).

Таблица 3

Распределение переоборудованных автомобилей по маркам

№ п/п	Марка базового транспортного средства	Количество автомобилей	Процент распределения
1	ВАЗ	41	2%
2	ГАЗ	972	46,2%
3	КамАЗ	14	0,7%
4	МАЗ	18	0,9%
5	ПАЗ	473	22,5%
6	УАЗ	306	14,5%
7	Citroen	6	0,3%
8	Fiat	12	0,6%
9	Ford	31	1,5%
10	Hyundai	19	0,9%
11	Isuzu	11	0,5%
12	Kia	6	0,3%
13	Mercedes-Benz	53	2,5%
14	Mitsubishi	6	0,3%
15	Nissan	6	0,3%
16	Peugeot	10	0,5%
17	Renault	32	1,5%
18	Toyota	12	0,6%
19	Volkswagen	21	1%
20	Volvo	11	0,5%
21	Прочие	40	1,9%
Всего		2100	100%

подавляющее количество переоборудований, а именно 83,2 % от общего их числа, было произведено на автотранспортных средствах марок ГАЗ, ПАЗ и УАЗ. Далее более внимательно разберем модельный ряд подвергнутых переоборудованию базовых автомобилей внутри соответствующих марок.

Таблица 4

Распределение переоборудованных автомобилей по моделям

№ п/п	Модель базового транспортного средства	Количество автомобилей	Процент распределения внутри марки	Процент распределения от общего количества
1	2	3	4	5
1	ГАЗ 3302 и модификации	223	22,9%	10,6%
2	ГАЗ 33023 и модификации	84	8,6%	4,0%
3	ГАЗ 2705 и модификации	151	15,6%	7,2%
4	ГАЗ 3321 и модификации	219	22,7%	10,4%
5	ГАЗ 3307 и модификации	17	1,7%	0,8%
6	ГАЗ 3308 и модификации	10	1,0%	0,5%
7	ГАЗ 3309 и модификации	68	7%	3,2%
8	ГАЗ 3310 и модификации	60	6,2%	2,8%
9	ГАЗ 2752 и модификации	49	5,0%	2,3%
10	ГАЗ 2217 и модификации	39	4,0%	1,9%
11	ГАЗ А21RXX	19	2,0%	0,9%
12	ГАЗ А22RXX	12	1,2%	0,6%
13	ГАЗ С41RXX	11	1,1%	0,5%
14	Прочие модели ГАЗ	10	1,0%	0,5%
15	Всего по марке ГАЗ	972	100%	46,2%
16	ПАЗ 320302-08	136	28,8%	6,5%
17	ПАЗ 320402-04	14	3,0%	0,7%
18	ПАЗ 32053	145	30,6%	6,9%
19	ПАЗ 32054	173	36,5%	8,2%
20	Прочие модели ПАЗ	5	1,1%	0,2%
21	Всего по марке ПАЗ	473	100%	22,5%
22	УАЗ 23632	74	24,3%	3,5%
23	УАЗ 3163 и модификации	66	21,6%	3,1%
24	УАЗ 3909 и модификации	116	37,8%	5,5%
25	Прочие модели УАЗ	50	16,3%	2,4%
26	Всего по марке УАЗ	306	100%	14,5%
27	ВАЗ 213100	5	12,2%	0,2%
28	ВАЗ 219010	22	53,7%	1,1%
29	Lada Largus	9	21,9%	0,5%
30	Прочие модели ВАЗ	5	12,2%	0,2%
31	Всего по марке ВАЗ	41	100%	2%
32	КамАЗ 43101	4	28,5%	0,2%
33	КамАЗ 53229	4	28,5%	0,2%
34	КамАЗ 65225	6	43%	0,3%
35	Всего по марке КамАЗ	14	100%	0,7%
36	МАЗ 437041	5	27,7%	0,2%
37	МАЗ 4371	7	38,9%	0,4%
38	МАЗ 544008	3	16,7%	0,15%
39	МАЗ 5334	3	16,7%	0,15%
40	Всего по марке МАЗ	18	100%	0,9%
41	Mercedes-Benz Sprinter	27	50,9%	1,3%

Окончание табл. 4

№ п/п	Модель базового транспортного средства	Количество автомобилей	Процент распределения внутри марки	Процент распределения от общего количества
42	Mercedes-Benz 2236XX	24	45,2%	1,1%
43	Mercedes-Benz E200	2	3,9%	0,1%
44	Всего по Mercedes-Benz	53	100%	2,5%
45	Renault Sandero	2	7,1%	0,1%
46	Renault Logan	9	27,8%	0,4%
47	Renault Kango	5	14,3%	0,2%
48	Renault Master	14	43,7%	0,7%
49	Renault Megane	2	7,1%	0,1%
50	Всего по марке Renault	32	100%	1,5%
51	Ford Tranzit	31	100%	1,5%
52	Прочие модели других марок автомобилей	160	100%	7,7%
Всего		2100	-	100%

Изучая данные, представленные в табл. 4, можно говорить о том, что подавляющее большинство моделей колесных машин носит коммерческий оттенок, то есть они предназначены для оказания каких-либо транспортных услуг, меньшая же часть автомобилей применяется исключительно в личных целях, причем общим признаком практически для всех указанных моделей (более 90 %) является наличие двух осей с задними ведущими колесами. Последнее уточнение упрощает в конечном итоге для нас выбор расчетной модели автомобиля и сужает круг дальнейших исследований.

Далее обратим внимание на характер внесенных изменений в конструкцию автомобилей. Начнем с описания одного из широко распространенных изменений конструкции, связанного с установкой газобаллонного оборудования. Выделяем данное изменение как отдельный вид переоборудования транспортного средства. Итак, установка газобаллонного оборудования производилась на 702 автомобилях (автобусах), что составило 33,4 % от общего количества переоборудованных транспортных средств. При этом количество автобусов (M_3) подвергнутых данному виду переоборудования составляет 462 единицы. Следует указать, что масса газобаллонного оборудования имеет значительную величину [5], основная часть этого оборудования располагается в большинстве случаев за пределами колесной базы в пределах заднего свеса автомобиля. Существуют и другие способы установки ГБО, но в любом случае оно значительно влияет на положение центра тяжести транспортного средства, как при снаряженной, так и при полной его массе, а, следовательно, может оказать влияние на управляемость автомобиля [6]. Нельзя не отметить, что данный вид переоборудования, рассматривая его изолированно, влияя на весовые параметры колесной машины, не изменяет ее конструктивных габаритных параметров (величины колесной базы, переднего и заднего свеса и т.д.). Некоторые первые результаты теоретического исследования данного вида переоборудования автобусов Павловского автомобильного завода с позиции управляемости представлены в работе [5].

Перейдем к следующему самостоятельному виду переоборудования автомобилей, также широко распространенному в 2015 году. Это замена двигателя внутреннего сгорания. На 333 транспортных средствах было внесено данное изменение в их конструкцию, что составило 15,8 % от общего количества переоборудованных автомобилей. Наиболее широко оно применялось на грузовых автомобилях категории N_1 . В нашем случае замена двигателя не сопровождается практическим изменением весовых и конструктивных габаритных параметров машины, а изменяет характеристики двигателя. Влияние на управляемость автомобиля при замене двигателя внутреннего сгорания должно быть уточнено отдельным исследованием.

Другим не менее значимым видом переоборудования транспортного средства стало в 2015 году бронирование кузова автомобиля. При этом 91 единица транспортных средств (что составляет 4,3% от общего количества переоборудованных автомобилей) подверглась бронированию. Существенная их часть – автомобили категории M_1 . В данном случае происходит значительное увеличение снаряженной массы машины, изменение ее весовых параметров, в том числе положения центра тяжести, а конструктивные габаритные параметры автомобиля практически не изменяются. Так же, как и в предыдущем случае, влияние бронирования кузова автомобиля на его управляемость необходимо исследовать.

Далее выделим следующий отдельный вид переоборудования, характерный в основном для грузовых автомобилей и направленный на изменение типа кузова: на базовой модели грузовика производят замену грузового бортового кузова, к примеру, на цистерну или самосвальный кузов, изотермический или кузов-рефрижератор, устанавливают эвакуаторную платформу и т.д. В 135 случаях была произведена такая замена, что составляет 6,4 % от общего количества переоборудованных автомобилей. При этом могут изменяться как весовые, так и конструктивные габаритные параметры колесной машины, следовательно, данные изменения могут оказывать влияние на управляемость автомобиля и должны быть отдельно исследованы.

Имеют место и изменения конструкции как отдельный вид переоборудования, производимые для защиты груза от несанкционированного проникновения в кузов и воздействий атмосферы. 332 автомобиля были переоборудованы по такому принципу, что составляет 15,8 % от их общего количества. В этом случае зачастую, происходит удлинение транспортного средства за счет увеличения колесной базы и заднего свеса, что неизбежно влияет на конструктивные габаритные параметры автомобиля. При этом после удлинения рамы взамен штатного грузового кузова устанавливается так называемый «еврофургон» (или «европлатформа») что также влечет изменение весовых параметров. Таким образом, нужно внимательно рассмотреть данный вид переоборудования с позиции управляемости.

Наконец, необходимо упомянуть и о таком виде переоборудования автомобилей, как внутренняя перепланировка их салона. Здесь возможны различные изменения, связанные как с увеличением, так и с уменьшением количества сидений, установкой различного электротехнического или иного оборудования для получения различного рода лабораторий, медицинских автомобилей и др. Частота повторений данного вида переоборудования составляет 379 раз, что составляет 18 % от общего числа переоборудованных автомобилей. Для перепланировки салона характерно изменение весовых параметров транспортного средства при неизменных конструктивных габаритных параметрах.

Приведенный список различных видов переоборудования автомобилей – далеко не исчерпывающий. Он, по сути, является лишь основой для формирования классификации изменений, вносимых в конструкцию транспортного средства, и будет постоянно дополняться и корректироваться при дальнейших исследованиях.

В конце работы после выполненного анализа статистики необходимо отметить что, во-первых, наиболее активным видом переоборудования автомобилей в 2015 году на территории Нижегородской области стала установка газобаллонного оборудования; во-вторых, любой из видов переоборудования автомобилей, за исключением замены двигателя внутреннего сгорания, может оказать существенное влияние на их управляемость; в-третьих, были сформированы основные виды внесенных в конструкцию транспортного средства изменений, которые необходимы для создания соответствующей классификации. В дальнейшем нами будут сделаны попытки детального изучения на основе различных расчетных моделей автомобиля, с учетом влияния конкретного вида переоборудования на управляемость транспортного средства как чисто механической системы.

Библиографический список

1. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 018/2011 «О безопасности колесных транспортных средств» [Электронный ресурс]. – URL: http://base.garant.ru/70106658/00cfe3602830d7b2aff92d8371707221/#block_100000 (дата обращения: 28.03.2018).
2. **Молев, Ю.И.** К вопросу о классификации изменений, вносимых в конструкцию транспортных средств / Ю.И. Молев, М.Г. Черевастов // Будущее технической науки. Сборник материалов XVI Международной молодежной научно-техн. конф.; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2017 – С. 323-324.
3. Конвенция о дорожном движении (Вена, 8 ноября 1968 года) [Электронный ресурс]. – URL: <http://base.garant.ru/2540357> (дата обращения: 28.03.2018).
4. ГОСТ Р 52051 – 2003. Механические транспортные средства и прицепы. Классификация и определения [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200032017> (дата обращения: 28.03.2018).
5. **Молев, Ю.И.** Теоретическая оценка влияния установки газобаллонного оборудования на управляемость автобуса ПАЗ 32054 [Электронный ресурс] / Ю.И. Молев, М.Г. Черевастов. – URL: http://transport-systems.ru/1_2017.html (дата обращения: 28.03.2018).
6. **Куляшов, А.П.** Безопасность дорожного движения / А.П. Куляшов, А.Г. Китов, Ю.И. Молев, В.А. Шапкин. Ч. 3. Автомобиль и безопасность дорожного движения: учебное пособие. – 2-е изд. – Нижний Новгород: ВГИПА, 2005. – 368 с.

*Дата поступления
в редакцию: 09.10.2018*

**Yu.I. Molev¹, M.G. Cherevastov², P.I. Bazhan¹, L.A. Zakharov¹,
A.A. Anikin¹, Yu.P. Kuznetsov¹, A.S. Slyusarev³**

**ANALYSIS OF CHANGES IN VEHICLE CONSTRUCTION, IN THE PRODUCTION
OF THE CONVERSION OF VEHICLES ON THE TERRITORY
OF NIZHNY NOVGOROD REGION IN 2015**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev¹,
Nizhny Novgorod state pedagogical university of a name of Kozma Minin²
Volga state university of water transport³

Object of research. In the present work the General analysis of the changes made in a design of vehicles by production of re-equipment of cars in the territory of the Nizhny Novgorod region in 2015 on the basis of statistical data is given.

Originality/value. As a result of the analysis, the main basic models of cars subject to conversion, their common features, as well as typical changes in their design and potentially possible deviations of various parameters of cars are determined.

Findings: At the end of the publication, the further direction of research is determined.

Key words: controllability of the vehicle, changes in the design of the vehicle.

УДК 631.372.43.03

С.А. Плотников¹, П.Н. Черемисинов¹, П.И. Бажан², Л.А. Захаров²**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ ДИЗЕЛЯ 4ЧН 11,0/12,5 ПРИ РАБОТЕ НА ДИЗЕЛЬНОМ ТОПЛИВЕ С ДОБАВКОЙ РАПСОВОГО МАСЛА**Вятский государственный университет, г. Киров¹,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

В настоящее время фирмы-производители тракторов и автомобилей поставлены в такие условия, что вынуждены снижать токсичность отработавших газов двигателей. В итоге все чаще стали применять так называемые альтернативные топлива. Для европейских условий наиболее перспективным считается масло, получаемое из семян рапса. Его использование возможно в дизельных двигателях, как в чистом виде, так и после химической переработки. Объектом исследования является процесс сгорания в дизеле 4ЧН 11,0/12,5 при работе на дизельном топливе с добавкой рапсового масла. Целью исследования явилось построение номограмм для определения периода задержки воспламенения, фазы быстрого горения, индикаторной диаграммы и характеристики тепловыделения дизеля 4ЧН 11,0/12,5 при работе на дизельном топливе с добавкой рапсового масла.

Ключевые слова: дизельное топливо, биотопливо, рапсовое масло, вязкость, процесс сгорания, тепловыделение, период задержки воспламенения, фаза быстрого горения.

В мире наблюдается истощение запасов нефти, продукты переработки которой являются основным источником энергии для мобильных транспортных средств. Такая ситуация вынуждает двигателестроителей искать им замену. К этому же подталкивает и осложняющаяся экологическая ситуация. В настоящее время фирмы-производители тракторов и автомобилей поставлены в такие условия, что вынуждены снижать токсичность отработавших газов двигателей. В итоге все чаще стали применять так называемые альтернативные топлива, в частности, топлива, получаемые из растительных масел. Для европейских условий наиболее перспективным считается масло, получаемое из семян рапса. Его использование возможно в дизельных двигателях, как в чистом виде, так и после химической переработки [1-3].

Рапсовое масло имеет ряд достоинств по сравнению с дизельным топливом (ДТ): масло не токсично и не огнеопасно, не содержит сернистых соединений, является возобновляемым топливом, использование рапсового масла (РМ) не нарушает баланс двуокиси углерода (парникового газа) в природе. Применение рапсового масла (РМ) в чистом виде затруднено в силу отличия свойств нефтяного и растительного топлива. Различие этих свойств обуславливает особенности работы двигателя на чистом рапсовом масле и его смесях с дизельным топливом. Исследователями этой проблемы отмечается, что показатели рабочего процесса двигателя связаны с особенностями процессов испарения, смесеобразования и сгорания РМ [4, 5].

Известно, что период задержки воспламенения $\varphi_i(\tau_i)$ в дизеле определяется по индикаторной диаграмме как угол или время от момента начала впрыскивания до момента начала заметного повышения давления, фиксируемого по моменту отрыва кривой нарастания давления при сгорании от кривой давления прокрутки. На данном участке интенсивность процессов стока и выделения теплоты за счет испарения и сгорания примерно одинакова. Процессом теплоотдачи в стенки можно пренебречь. На этом участке также можно пренебречь выгоранием топлива и его влиянием на скорость тепловыделения. При работе дизеля 4ЧН 11,0/12,5 на смесях рапсового масла целесообразно ввести несколько упрощающих расчет допущений. Так, для заданных условий следует фиксировать показатель адиабаты сжатия для каждого выбранного состава и на уровне $n_1=1,36$.

Температуру T_a в конце впуска также можно зафиксировать для каждого состава, теплоемкость воздуха C_v следует принять постоянной для всех режимов работы дизеля.

Тогда скорректированное выражение для расчета периода задержки воспламенения смесей дизельного топлива с рапсовым маслом по нагрузочным и скоростным характеристикам окончательно примет вид:

$$\bar{\varphi}_i = \frac{\varphi_i}{\varphi_{\text{впр}}} = \sqrt{6 \cdot n \cdot 10^{-4}} \left\{ \frac{1 - \Theta_{\text{нв}}}{a} \cdot \Theta_{\text{оп.впр}}^p + 0,085 \cdot \left(2 + \frac{\varphi_{\text{впр}}}{\Theta_{\text{оп.впр}}} \right) \cdot \frac{\sqrt{a_1 - 1}}{\Psi \cdot \Theta_{\text{оп.впр}}^p} \right\}, \quad (1)$$

где:

a, a_1 – коэффициенты, зависящие от конструктивных параметров дизеля и параметров топливоподачи;

Ψ – относительная скорость химических реакций (отношения характеристик выделения и стока теплоты);

$\varphi_{\text{впр}}$ – длительности впрыскивания топлива;

$\Theta_{\text{оп.впр}}$ – угла опережения впрыскивания топлива;

$\Theta_{\text{нв}}$ – безразмерной температуры в момент начала впрыскивания;

φ_i – период задержки воспламенения;

n – частота вращения;

$\Theta_{\text{впр}}^p$ – расчетный угол опережения впрыскивания топлива.

На рис. 1 в соответствии с табл. 1 приведена номограмма для определения периода задержки воспламенения при работе дизеля на разных составах топлива. Видно, что с увеличением присутствия рапсового масла в топливе значение угла, соответствующего периоду задержки воспламенения, увеличивается.

Таблица 1

Данные расчета ПЗВ при работе дизеля с добавками рапсового масла

Состав топлива	Частота вращения мин ⁻¹	α	Значение φ_i градус при $\Theta_{\text{оп.впр}}$ (от уст. угла)				
			18	20	22	24	26
100%ДТ	1400	0,8	6,12	6,30	6,52	6,78	7,11
	1600	0,9	6,31	6,48	6,74	6,96	7,32
	1800	1,1	6,53	6,70	6,90	7,14	7,44
	2000	3,5	7,02	7,19	7,41	7,53	7,98
55%ДТ + 45%РМ	1400	0,8	6,64	7,01	7,48	8,18	9,49
	1600	0,9	6,94	7,26	7,73	8,38	9,61
	1800	1,1	7,21	7,52	7,95	8,59	9,71
	2000	3,7	7,64	7,94	8,37	8,93	10,06
100%РМ	1400	1,73	7,25	7,72	8,43	9,58	11,86
	1600	1,74	7,57	8,03	8,71	9,80	11,89
	1800	1,76	7,89	8,34	9,00	10,04	11,98
	2000	4,2	8,25	8,69	9,32	10,32	12,14

При работе дизеля на чистом топливе значения φ_i в рассматриваемом скоростном диапазоне изменяются в пределах от 7,11 до 7,98 градусов пкв. В случае состава, содержащего 45 % РМ, при $\Theta_{\text{оп.впр.}} = 26^\circ$ до в.м.т. эти же значения φ_i изменяются в пределах от 9,49 до 10,06 градусов пкв. Наконец, при работе дизеля на чистом рапсовом масле значения φ_i , соответствующие периоду задержки воспламенения, составляют, соответственно от 11,86 до 12,14 градусов пкв. Данное обстоятельство может быть объяснено снижением воспламеняемости суммарного топлива, а также уменьшением давления и температуры в цилиндре в момент начала впрыскивания.

Анализ данных расчета ПЗВ в дизеле при его работе на основных скоростных режимах (рис. 1, табл. 1) позволяет рекомендовать предложенные соотношения для предварительной оценки работы дизеля на топливах с добавками рапсового масла.

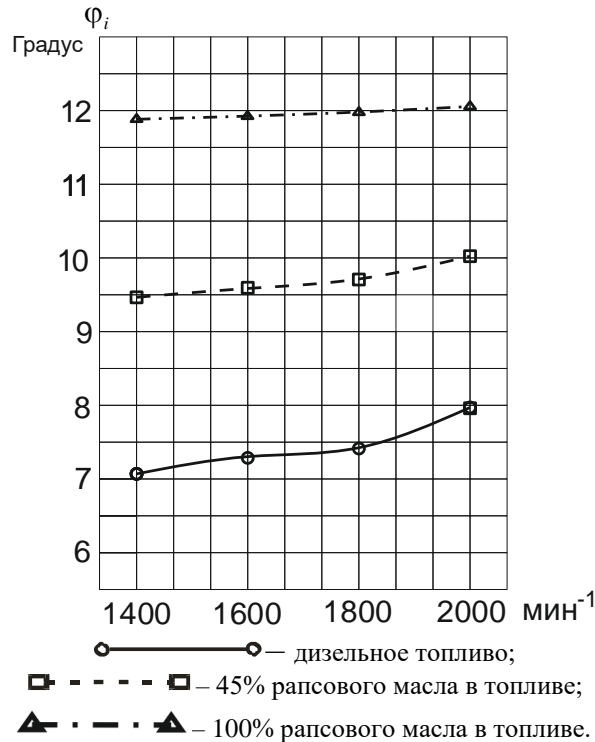


Рис. 1. Номограмма для определения ПЗВ при работе дизеля 4ЧН 11,0/12,5 на топливе с добавками рапсового масла при $\theta_{уст}=26^\circ$ пкв:

Рассмотрев особенности изменения параметров фазы быстрого сгорания, можно попытаться провести дальнейший расчет следующих величин:

- максимального давления цикла P_z ;
- средней скорости нарастания давления $(dp/d\phi)_{ср}$.

P_z можно определить в зависимости от количества испарившегося за период задержки воспламенения топлива. Для предварительного расчета можно воспользоваться следующей зависимостью [6]:

$$P_z = P_c + 5,39 \cdot 10^{-4} \cdot m_{v,i} \cdot H_u \cdot (n_1 - 1) / V_c \quad (2)$$

где P_c – давление в конце сжатия, МПа;

$m_{v,i}$ – количество топлива, испаряющегося за период задержки воспламенения, г;

H_u – теплота сгорания топлива, кДж/кг;

n_1 – показатель политропы;

V_c – объем камеры сжатия, м³.

Учитывая, что точное определение $m_{v,i}$ достаточно проблематично, в расчетах принимаем согласно, $m_{v,i} \approx (45 \dots 55\%) q_{ц}$.

Цикловую подачу суммарного топлива можно определить по известной формуле [7]:

$$q_{ц} = 16,6 \cdot \frac{G_T \cdot \tau}{i_c \cdot n} \quad (3)$$

где G_T – часовой расход топлива, кг/ч;

n – частота вращения, мин⁻¹;

i_c – число цилиндров двигателя;

τ – тактность двигателя.

В то же время полагаем, что количество сгоревшего РМ равно:

$$m_{v,i,PM} = (m_{v,i}/q_{ц}) \cdot (q_{ц,PM}/\alpha), \quad (4)$$

где α – коэффициент избытка воздуха в смеси.

Для расчета параметров фазы быстрого горения – максимальной скорости нарастания давления $(dp/d\varphi)_{\max}$, угла φ_z , средней скорости нарастания давления $(\Delta p/d\varphi)_{cp}$ – можно воспользоваться известными зависимостями с учетом характерных особенностей суммарного топлива [8]:

$$\left(\frac{dp}{d\varphi}\right)_{\max} = \frac{6 \cdot n \cdot 10^{-3}}{\sqrt{K_{T,\Sigma} \cdot d_{20,\Sigma}^{20}}} \cdot \frac{P_z \cdot P'}{\varphi_i} \cdot \left(\frac{m_{v,i}}{q_{ц}} \cdot \frac{1 + q_{ц,сн}/(q_{ц} \cdot \alpha)}{1 + q_{ц,сн}/q_{ц}} \cdot \bar{\tau}_i \cdot \frac{100}{ЦЧ_{\Sigma}} \right), \quad (5)$$

где: n – частота вращения двигателя, мин^{-1} ;

$K_{T,\Sigma}$ – фактор, характеризующий свойства топлива;

$d_{20,\Sigma}^{20}$ – коэффициент, характеризующий отношение плотности РМ к суммарной плотности топлива;

P' – теоретическое давление конца сжатия, МПа;

φ_i – период задержки воспламенения в градусах п.к.в.;

$\bar{\tau}_i$ – время, с;

$ЦЧ_{\Sigma}$ – суммарное цетановое число топлива.

$$\left(\frac{\Delta p}{d\varphi}\right)_{cp} = (P_z - P'_c) \cdot (\varphi_z + \Theta_{впр}^p - \varphi_i) \quad (6)$$

Таблица 2

Данные расчета показателей ФБГ при работе дизеля на смеси ДТ с РМ

Состав	n, мин^{-1}	α	Значение $g_{\text{цикл}}$ и P_z при $\theta_{\text{оп.впр}} = 26^\circ$	
			P_z , МПа	$(dp/d\varphi)_{cp}$, МПа/град
100%РМ	1400	0,8	14,031	1,075
	1600	0,9	13,441	1,002
	1800	1,1	12,803	0,922
	2000	3,5	7,599	0,207
55%ДТ + 45%РМ	1400	0,8	14,827	1,355
	1600	0,9	13,820	1,205
	1800	1,1	13,203	1,117
	2000	3,7	10,324	0,669
100%ДТ	1400	1,73	15,154	1,641
	1600	1,74	14,256	1,487
	1800	1,76	13,545	1,367
	2000	4,2	10,455	0,805

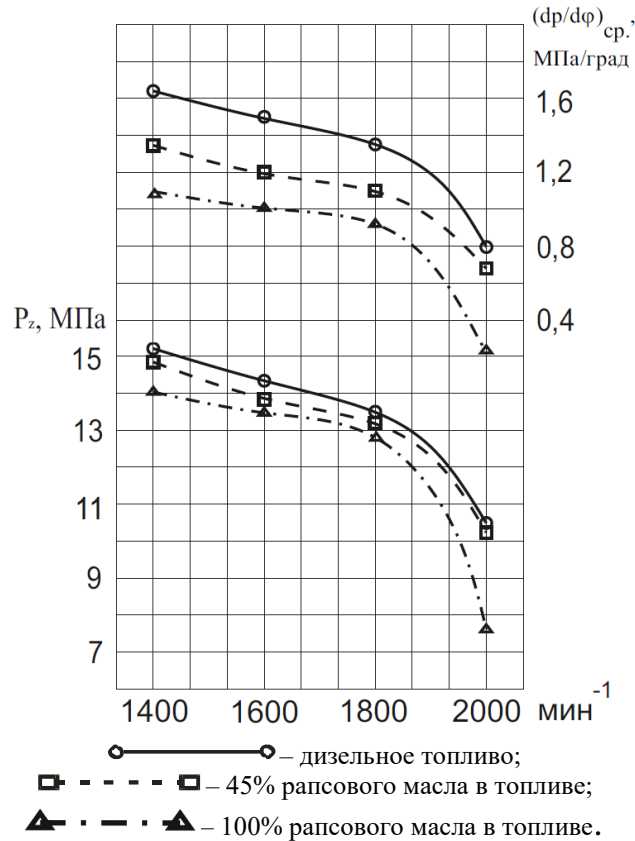


Рис. 2. Номограмма для определения показателей ФБГ при работе дизеля 4ЧН 11,0/12,5 на топливе с добавками рапсового масла при $\theta_{уст}=26^\circ$ пкв:

Данные расчетов показывают, что применение смеси ДТ с РМ влияет на параметры фазы быстрого горения. Средняя скорость нарастания давления в цилиндре достигает предельно допустимого по соображениям долговечности дизеля значения при добавке 45% РМ. Таким образом, предложенная номограмма может быть использована для предварительной оценки показателей работы дизеля на топливах с добавками рапсового масла.

На рис. 3 представлена расчетная индикаторная диаграмма работы дизеля 4ЧН 11,0/12,5 на чистом ДТ и смесях с содержанием РМ 20 % и 45 % соответственно. Анализируя график (рис. 3) видно, что при увеличении содержания РМ в смеси, кривая сдвигается в сторону поздних углов ϕ_i . Так, ϕ_i ДТ = 20,4 градуса, а значения углов, соответствующих действительному моменту впрыскивания при работе дизеля на СТ равны ϕ_i РМ20 = 21,1 градус и ϕ_i РМ45 = 21,8 градус. Также наблюдается снижение давления P_z с увеличением концентрации РМ в смеси.

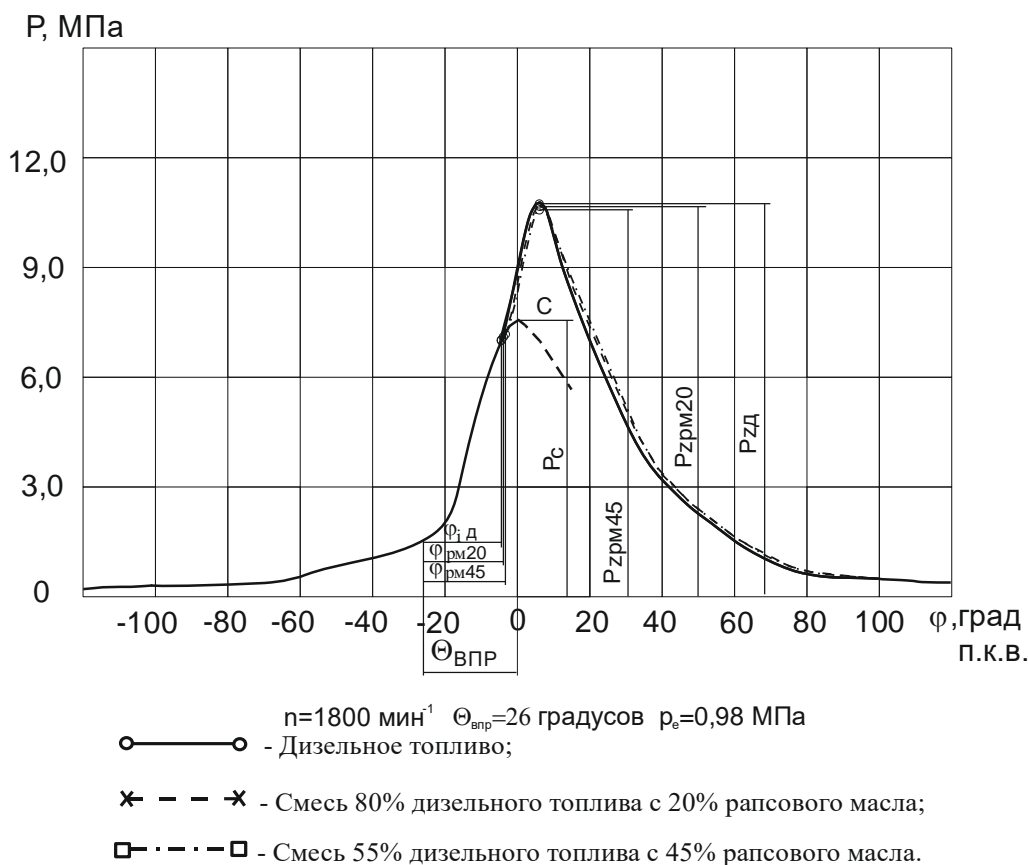


Рис. 3. Влияние применения СТ на основе РМ на индикаторные диаграммы дизеля 4ЧН 11,0/12,5

Анализ данных обработки индикаторных диаграмм по методике ЦНИДИ на ЭВМ показал, что работа дизеля на смесевом топливе сопровождается изменением характеристик тепловыделения (рис. 4). Так, при частоте вращения 1800 мин^{-1} и работе на чистом ДТ $T_{\text{max}} = 2820 \text{ К}$, при работе на СТ с содержанием РМ 20 % и 45 % $T_{\text{max РМ20}} = 2785 \text{ К}$ и $T_{\text{max РМ45}} = 2610 \text{ К}$.

Сравнение кривых выделения теплоты χ , активного тепловыделения χ_i и динамики использования теплоты позволяет заключить, что сгорание смесевого топлива начинается позже, чем ДТ, и идет медленнее. Это можно объяснить тем, что смесевое топливо имеет меньшее значение ЦЧ, чем ДТ.

В в.м.т. при работе на ДТ доля активного тепловыделения составляет 0,17 от общего количества выделившейся теплоты. При содержании 20 % РМ в топливе $\chi_i \text{ РМ20} = 0,16$, а при содержании в 45 % РМ – 0,13. По кривым динамики активного тепловыделения видно, что выделение теплоты с увеличением содержания РМ в смеси замедляется, процесс сгорания заканчивается позднее.

Замедление процесса сгорания обуславливает снижение скорости тепловыделения. Если для дизельного процесса $(d\chi/d\phi)_{\text{max ДТ}} = 0,092$, то при работе на смеси ДТ и РМ эти значения равны, соответственно, $(d\chi/d\phi)_{\text{max РМ20}} = 0,089$ и $(d\chi/d\phi)_{\text{max РМ45}} = 0,085$. Снижение максимальной скорости тепловыделения обуславливается увеличением периода задержки воспламенения и меньшей скоростью сгорания смесевого топлива.

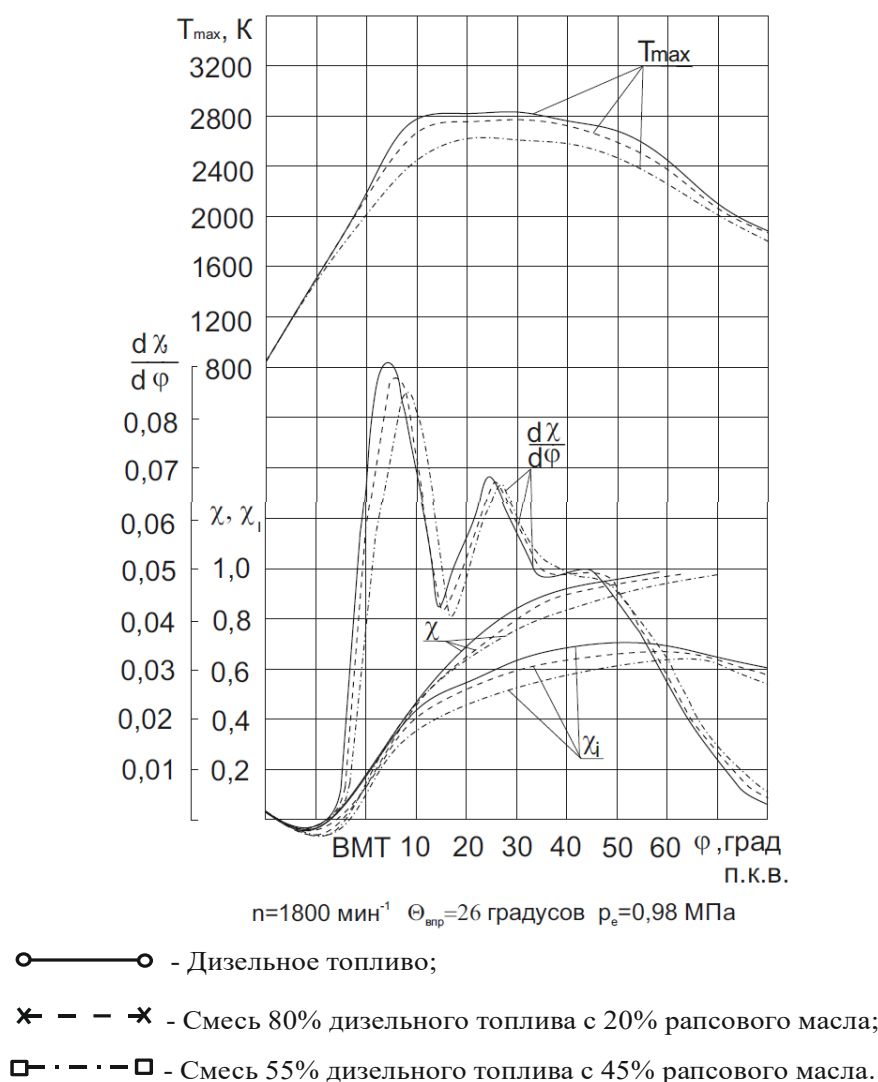


Рис. 4. Влияние применения СТ на основе РМ на характеристики тепловыделения дизеля 4ЧН 11,0/12,5

Рассмотрев показатели индикаторной диаграммы и тепловыделения дизеля 4ЧН 11,0/12,5, видно, что с увеличением содержания РМ в смеси замедляется процесс сгорания топлива.

Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы:

- 1) при работе дизеля на смесевом топливе значения периода задержки воспламенения увеличиваются во всем рассматриваемом скоростном диапазоне, пропорционально содержанию рапсового масла в смеси;
- 2) наблюдается снижение давления P_z с увеличением концентрации рапсового масла в смеси;
- 3) сгорание смесевое топлива начинается позже, чем дизельного топлива, и идет медленнее.

Библиографический список

1. **Карташевич, А.Н.** Возобновляемые источники энергии: науч.-практ. пособие / А.Н. Карташевич, В.С. Товстыка. – Горки: БГСХ, 2007. – 264 с.
2. **Карташевич, А.Н.** Исследование свойств альтернативных топлив на основе рапсового масла / А.Н. Карташевич, С.А. Плотников, П.Н. Черемисинов // Вестник Белорусской сельскохозяйственной академии. – 2017. – № 3. – С. 144-147.
3. **Плотников, С.А.** Улучшение смесей дизельного топлива с рапсовым маслом для использования в тракторных дизелях / С.А. Плотников, А.Н. Карташевич, П.Н. Черемисинов // Двигателестроение. – 2017. – № 4. – С. 21-25.

4. **Гусаков, С.** Особенности применения чистого рапсового масла в качестве топлива в малоразмерных высокооборотных дизелях / С. Гусаков, Пабло Вальехо // Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо. – 2006. – № 4. – С. 58-62.
5. **Плотников, С.А.** Исследование свойств альтернативных топлив на основе рапсового масла / С.А. Плотников, П.Н. Черемисинов // Общество, наука, инновации (НПК-2017). Всерос. ежегод. науч.-практ. конф. (Вят. гос. ун-т, 1-29 апреля 2017 г.). Сборник статей. – Киров, 2017. – С. 1875-1882.
6. **Грехов, Л.В.** Топливная аппаратура и системы управления дизелей: учебник для вузов / Л.В. Грехов, В.А. Иващенко, В.А. Марков. – 2-е изд. – М., 2005. – 344 с.
7. **Аднан, И.Ш.** Расчет периода задержки воспламенения в дизеле в условиях двухфазного смесеобразования / И.Ш. Аднан, Г.М. Камфер, В.Н. Луканин // Совершенствование автотракторных двигателей внутреннего сгорания: Тр. МАДИ. – Москва, 1985. – С. 10-19.

*Дата поступления
в редакцию: 09.10.2018*

S.A. Plotnikov¹, P.N. Cheremisinov¹, P.I. Bazhan², L.A. Zakharov²

**INVESTIGATION OF DIESEL COMBUSTION PROCESS BY WORKING
ON DIESEL 4CH 11,0/12,5 FUEL WITH RAXED RAPE SEED OIL**

Vyatka state University, Kirov¹,
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev²

Purpose: The object of the study is the combustion process in diesel when working on diesel 4CHN 11,0/12,5 fuel with the addition of rape seed oil.

Design/methodology/approach: The article presents the possibility of using an alternative type of fuel based on rapeseed oil in the power system of a diesel engine.

Findings: The results of theoretical calculations of the ignition delay period and the maximum rate of pressure increase are given, and the influence of rapeseed oil on combustion processes is analyzed.

Research limitations/implications: The aim of the study was the construction of nomograms for determining the period of ignition delay, the phase of rapid combustion, the indicator diagram and the heat dissipation characteristics of the diesel engine when operating on diesel 4CHN 11,0/12,5 fuel with the addition of rape seed oil.

Originality/value: The methods discussed in this paper make it possible to select the rational parameters of special transport-technological means.

Key words: diesel fuel, biofuel, rape seed oil, toughness, combustion process, heat release, ignition delay period, fast burning phase.

НАШИ АВТОРЫ

ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Бушуева Марина Евгеньевна – доцент
НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. тех. наук;
bme@nntu.ru

Гордеев Максим Михайлович – студент
НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
maximgrdv@gmail.com

Голованов Андрей Алексеевич – магистрант Научно-исследовательского университета «Высшая школа экономики»;
andrey.golovanov@mail.ru

Диденкулова (Шургалина) Екатерина Геннадьевна – младший научный сотрудник Института прикладной физики РАН, канд. физ.-мат. наук;
eshurgalina@mail.ru

Зенькович Алексей Вячеславович – профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р тех. наук;
avzen@nntu.ru

Ильичева Мария Николаевна – старший преподаватель НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
roman99@mail.ru

Иконников Владимир Всеволодович – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
vov4iK25.08@rambler.ru

Карпычев Владимир Юрьевич – профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р тех. наук;
kavlyr@yandex.ru

Лошилов Александр Андреевич – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
aloshil@gmail.com

Неимушев Сергей Андреевич – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
srgynmv@gmail.com

Неимущева Любовь Ивановна – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
love23942@yandex.ru

Орлов Юрий Федорович – профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р физ.-мат. наук;
yorlov@mts-nn.ru

Пелиновский Ефим Наумович – главный научный сотрудник Института прикладной физики РАН, ведущий научный сотрудник НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р физ.-мат. наук, профессор;
pelinovsky@appl.sci-nnov.ru

Санников Алексей Николаевич – студент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
lexsannikov@yandex.ru

Талипова Татьяна Георгиевна – ведущий научный сотрудник Института прикладной физики РАН, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р физ.-мат. наук;
tgtalipova@mail.ru

Тимофеева Ольга Павловна – доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. тех. наук;
optimofeeva@mail.ru

Тобиш Елена (Tobisch Elena) – научный сотрудник, профессор Университета Кеплера (Линц, Австрия);
Elena.Tobisch@jku.at

Шаулов Денис Алексеевич – ведущий инженер Новогорьковской ТЭЦ;
desh0045@yandex.ru

Юрова Надежда Вячеславовна – старший преподаватель НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
vm@nntu.ru

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

Абузьяров Тагир Хусаинович – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
atx888@yandex.ru

Андреев Вячеслав Викторович – профессор, заведующий кафедрой НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р тех. наук;
vyach.andreev@mail.ru

Асабин Анатолий Александрович – доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. тех. наук;
asanatoliy@yandex.ru

Баринов Александр Александрович – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
lxbarinov92@mail.ru

Бедретдинов Рустам Шамилович – доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. тех. наук;
rsb88@yandex.ru

Безносков Александр Викторович – профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р тех. наук;
beznosov@nntu.ru

Берберова Мария Александровна – научный сотрудник Международного Центра по ядерной безопасности, канд. тех. наук;
maria.berberova@gmail.com

Боков Павел Андреевич – ассистент НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. тех. наук;
p.bokow@mail.ru

Бокова Татьяна Александровна – доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. тех. наук;
tatabo@bk.ru

Волков Никита Сергеевич – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
hortmetall@yandex.ru

Гагарин Юрий Александрович – канд. тех. наук;
legchanov@nntu.ru

Дарьенков Андрей Борисович – доцент, заведующий кафедрой, директор Образовательно-научного института электроэнергетики НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. тех. наук;
fae@nntu.ru

Дегтерёв Евгений Геннадьевич – старший преподаватель НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
fae_nir@nntu.ru

Денисова Оксана Владимировна – старший научный сотрудник Российского федерального ядерного центра – Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики;
brandy3007@live.com

Дмитриев Сергей Михайлович – ректор НГТУ, д-р тех. наук, профессор;
nntu@nntu.ru

Егошин Михаил Андреевич – доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. тех. наук;
egmforwk@gmail.com

Захаров Дмитрий Александрович – ведущий инженер-испытатель Опытного конструкторского бюро машиностроения им. И.И. Африкантова;
okbm@okbm.nnov.ru

Калинин Евгений Владимирович – ведущий инженер НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
chernmaza@eandex.ru

Козелков Андрей Сергеевич – начальник отдела Российского федерального ядерного центра – Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р физ.-мат. наук;
askozelkov@mail.ru

Кочеганов Дамир Михайлович – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
dk402@yandex.ru

Кралин Алексей Александрович – доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. тех. наук;
akralin@yandex.ru

Крутякова Ольга Леонидовна – научный сотрудник Российского федерального ядерного центра – Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики;
puch9@yandex.ru

Крюков Евгений Валерьевич – старший преподаватель НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
e.kryukov@rambler.ru

Кузнецов Николай Матвеевич – ведущий научный сотрудник Кольский научный центр РАН, канд. тех. наук;
kuzn55@mail.ru

Куркин Андрей Александрович – главный научный сотрудник НГТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор;
aakurkin@gmail.com

Курулин Вадим Викторович – начальник научно-исследовательской группы Российского федерального ядерного центра – Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики, канд. физ.-мат. наук;
kurulin@mail.ru

Лукичев Никита Сергеевич – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
nikitalukichev@mail.ru

Львов Александр Вячеславович – инженер НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
knyazlvov@mail.ru

Маслеева Ольга Владимировна – доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. тех. наук;
ovm1552@yandex.ru

Михай Сергей Анатольевич – техник НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
ftf@nntu.ru

Мелузов Александр Георгиевич – доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. тех. наук;
meluzov@mail.ru

Морозов Иван Николаевич – доцент Мурманского арктического государственного университета;
moroze.84@mail.ru

Новинский Эрнест Георгиевич – профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р тех. наук;
okbm@okbm.nnov.ru

Новожилова Ольга Олеговна – доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. тех. наук;
oo.novozhilova@gmail.com

Онищенко Георгий Борисович – профессор НПФ «Приводная техника», д-р тех. наук;
earu@mail.ru

Пахомов Алексей Николаевич – начальник отдела Опытного конструкторского бюро машиностроения им. И.И. Африкантова;
dep59@okbm.nnov.ru

Пичков Сергей Николаевич – профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева; главный специалист Опытного конструкторского бюро машиностроения им. И.И. Африкантова, д-р тех. наук;
okbm@okbm.nnov.ru

Полуничев Виталий Иванович – д-р тех. наук, главный специалист Опытного конструкторского бюро машиностроения им. И.И. Африкантова;
dep59@okbm.nnov.ru

Сапаркин Лев Михайлович – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
lev-kazan@mail.ru

Соколов Андрей Николаевич – начальник бюро теплогидравлических расчетов Опытного конструкторского бюро машиностроения им. И.И. Африкантова;
asokmail@mail.ru

Соколова Галина Марковна – старший преподаватель НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
fae_nir@nntu.ru

Турусов Александр Юрьевич – инженер Опытного конструкторского бюро машиностроения им. И.И. Африкантова;
dep59@okbm.nnov.ru

Уткин Дмитрий Александрович – математик Российского федерального ядерного центра – Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики;
dimitryavich@yandex.ru

Фадеев Юрий Петрович – главный конструктор Опытного конструкторского бюро машиностроения им. И.И. Африкантова;
dep59@okbm.nnov.ru

Хорьков Сергей Васильевич – доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. физ.-мат. наук;
Sv.Khorkov@yandex.ru

Чернов Евгений Александрович – профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р тех. наук;
toe@nntu.ru

Шумаев Алексей Алексеевич – инженер Опытного конструкторского бюро машиностроения им. И.И. Африкантова;
okbm@okbm.nnov.ru

Эрдили Наталья Игоревна – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
erdili.ni@yandex.ru

Яшина Алла Николаевна – доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. физ.-мат. наук;
fae_nir@nntu.ru

Яшина Наталья Федоровна – доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. физ.-мат. наук;
fae_nir@nntu.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

Аникин Алексей Александрович – профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р тех. наук;
anikin.zvm@mail.ru

Бажан Павел Иванович – заместитель начальника центра Верхне-Волжского филиала Российского Речного Регистра, д-р тех. наук, профессор;
kormg@list.ru

Втюрина Марина Николаевна – доцент Вятской государственной сельскохозяйственной академии, г. Киров, канд. хим. наук;
vturina-60@mail.ru

Голяткин Иван Александрович – аспирант Волгоградского государственного технического университета;
vano006@yandex.ru

Дмитриев Павел Евгеньевич – доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. тех. наук;
pavel-952475555@yandex.ru

Дьяков Алексей Сергеевич – доцент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (национального исследовательского университета), канд. тех. наук;
diakov57@list.ru

Дыгало Владислав Геннадиевич – профессор Волгоградского государственного технического университета, д-р тех. наук;
dygalo@vstu.ru

Дыгало Людмила Викторовна – инженер Волгоградского государственного технического университета (национальный исследовательский университет);
dygalo@vstu.ru

Жилейкин Михаил Михайлович – профессор Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (национального исследовательского университета), д-р тех. наук;
jileykin_m@mail.ru

Захаров Александр Юрьевич – доцент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (национального исследовательского университета), канд. тех. наук;
zakharov-al@mail.ru

Захаров Лев Анатольевич – профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р тех. наук;
kormg@list.ru

Кантор Павел Яковлевич – доцент Вятского государственного университета, г. Киров, канд. физ.-мат. наук;
shawl@list.ru

Карпов Никита Андреевич – менеджер ООО «ЭнАй Рус»;
nikita.karpov@ni.com

Котов Владислав Владимирович – доцент Волгоградского государственного технического университета, канд. тех. наук;
dygalo@vstu.ru

Кравец Владислав Николаевич – профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р тех. наук;
vnkravets@yandex.ru

Кузнецов Юрий Павлович – профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р тех. наук;
vladimir.makarov@nntu.ru

Ларин Егор Сергеевич – аспирант Волгоградского государственного технического университета;
gorge90@mail.ru

Лузанова Людмила Николаевна – старший преподаватель Санкт-Петербургского лесотехнического университета им. С.М. Кирова;
Dans77777@yandex.ru

Макаров Владимир Сергеевич – профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р тех. наук;
vladimir.makarov@nntu.ru

Манянин Сергей Евгеньевич – доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. тех. наук;
vladimir.makarov@nntu.ru

Мардоян Гурген Робертович – руководитель отдела по испытаниям автомобильных систем и компонентов ЕИА Инжиниринг, канд. тех. наук;
g.mardoyan@yea-engineering.com

Марков Виктор Александрович – доцент Санкт-Петербургского лесотехнического университета им. С.М. Кирова, канд. тех. наук;
mactor85@mail.ru

Молев Юрий Игоревич – профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р тех. наук;
moleff@yandex.ru

Метелев Сергей Юрьевич – руководитель проектов ООО «ЭнАй Рус»;
sergey.metelev@ni.com

Новиков Вячеслав Владимирович – профессор Волгоградского государственного технического университета, д-р тех. наук;
nvv_60@mail.ru

Паньшин Максим Владимирович – инженер Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (национального исследовательского университета);
max.pan880@yandex.ru

Парфенопуло Георгий Константинович – старший преподаватель Санкт-Петербургского лесотехнического университета им. С.М. Кирова;
parfenon73@mail.ru

Палутин Юрий Иванович – профессор Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии, д-р тех. наук;
vladimir.makarov@nntu.ru

Папунин Алексей Валерьевич – старший преподаватель НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
lexa-lenia@rambler.ru

Плотников Сергей Александрович – профессор Вятского государственного университета, г. Киров, д-р тех. наук;
Plotnikovsa@bk.ru

Пляго Анатолий Веславович – аспирант Вятского государственного университета, г. Киров;
Tom.PAV@mail.ru

Поздеев Алексей Владимирович – доцент Волгоградского государственного технического университета, канд. тех. наук;
pozdeev.vstu@gmail.com

Пронин Николай Александрович – руководитель проектов ООО «ЭнАй Рус»;
nikolay.pronin@ni.com

Симонян Рубен Игоревич – руководитель проектов ООО «Нэшнл Инструментс АМ», канд. тех. наук;
ruben.simonyan@ni.com

Слюсарев Анатолий Сидорович – профессор Волжского государственного университета водного транспорта, д-р тех. наук;
vladimir.makarov@nntu.ru

Согин Александр Васильевич – профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р тех. наук;
vladimir.makarov@nntu.ru

Соколова Виктория Александровна – доцент, заведующий кафедрой Санкт-Петербургского лесотехнического университета имени С.М. Кирова, канд. тех. наук;
sokolova_vika@inbox.ru

Сученина Анна Сергеевна – студент Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (национального исследовательского университета);
vladimir.makarov@nntu.ru

Черевастов Максим Геннадьевич – аспирант НГПУ им. К. Минина;
chermaxim_1978@mail.ru

Черемисинов Павел Николаевич – аспирант Вятского государственного университета, г. Киров;
Pavlon-ch@mail.ru

Черных Лариса Георгиевна – аспирант Санкт-Петербургского лесотехнического университета им. С.М. Кирова;
2904180@mail.ru

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО НАПИСАНИЮ АВТОРСКИХ РЕЗЮМЕ

(АННОТАЦИЙ, РЕФЕРАТОВ К СТАТЬЯМ)

Авторский реферат на английском языке должен быть понятен без ссылки на саму статью. Это краткое точное изложение содержания документа, включающее основные фактические сведения и выводы описываемой работы. Объем не менее 10 строк (100–250 слов – 850 знаков). Реферат включает: 1) предмет, тему, цель работы; 2) метод или методологию проведения работы; 3) результаты и область их применения; 4) выводы. Таблицы, формулы, рисунки (нумерация в реферате может не совпадать с текстом статьи) включаются, если раскрывают основное содержание документа и позволяют сократить объем реферата.

Реферат можно начать с изложения результатов работы и выводов. Сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте реферата. Следует применять терминологию, характерную для иностранных специальных текстов, избегать терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных слов. Текст должен быть связным с использованием слов «следовательно», «более того», «например», «в результате» (consequently, moreover, for example, the benefits of this study, as a result). Необходимо использовать активный, а не пассивный залог, т.е. «The study tested», но не «It was tested in the study».

Авторское резюме из International Journal of Operations & Production Management. V. 22. N 8.

B. Meijboom, M. Houtepens

STRUCTURING INTERNATIONAL SERVICE OPERATIONS: A THEORETICAL FRAMEWORK AND A CASE STUDY IN THE IT-SECTOR

The name of organization

Purpose: The specific challenges with which companies pursuing international manufacturing strategies are faced, if their output also contains a service dimension, are addressed.

Design/methodology/approach: A theoretical framework is proposed based on three virtually complementary perspectives by integrating international production, demand, and contemporary ICT-based theory. Subsequently, an exploratory case study in a pure service environment is described that illustrates the value of the framework.

Findings: It is possible, for example, to apply the theoretical framework to case studies in internationally-operating companies delivering a mix of goods and services.

Research limitations/implications: The present study provides a starting-point for further research in the international manufacturing sector.

Originality/value: Moreover, the framework has proven to be useful in improving the European structure of the case company. This is a notable and promising side-effect of the exploratory study, at least from a managerial point of view.

Key words: multinationals, service operations, location, decision making, case studies.

**ПРИНИМАЕМ В ПЕЧАТЬ НАУЧНЫЕ СТАТЬИ В ЖУРНАЛ
«ТРУДЫ НГТУ им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»**

Адрес редакции: 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24

Телефон: 8(920)00-37-877

E-mail: rsl@nntu.ru

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ, НАПРАВЛЯЕМЫХ В РЕДАКЦИЮ

- В редакцию направляют **два экземпляра** статьи и комплекта сопроводительной документации: бумажный и электронный.
- Желательно, чтобы объем статьи не превышал 10 страниц текста и 4–6 рисунков. Все страницы должны быть пронумерованы. Минимальное количество страниц – 6.
- **Статью необходимо сопроводить** актом и протоколом экспортного контроля, экспертным заключением о возможности открытого опубликования, выпиской из заседания кафедры, рекомендующей статью к опубликованию, сведениями об авторах и рецензией от внешней организации, подписанной доктором наук и заверенной печатью.
- Статья должна быть подписана всеми авторами.
- Первая страница статьи должна содержать следующую информацию: УДК (код по универсальному десятичному классификатору); инициалы и фамилии авторов (в таком порядке); название статьи; место работы всех авторов (полное название организации, город); аннотацию; ключевые слова (не более 10).
- Изложение материала должно быть ясным, логически выстроенным. Рекомендуется следующая структура статьи: вводная часть с обоснованием необходимости и изложением цели работы, теоретический анализ, методика, экспериментальная часть, результаты и выводы (не более 0,5 страницы), библиографический список.
- Статья должна завершаться **информацией на английском языке**: инициалы и фамилии авторов, тема, названия организаций, в которых работают авторы, реферат и ключевые слова.
- К статье следует **приложить файл с информацией об авторах** на русском языке: ФИО (полностью), место работы, должность, ученая степень и звание, служебный телефон и адрес электронной почты.
- Текст набирают через один интервал 12 кеглем. Сноски и примечания 10 кеглем. Поля: левое, правое и нижнее – 20 мм, верхнее – 25 мм. Переносы не допускаются. Используется формат **Word for Windows** и стандартные шрифты **Times New Roman** и **Symbol**.
- Формульные выражения выполняют строго в редакторе MS Equation 3 –12 кегль. Размерность физических величин должна соответствовать системе СИ.
- Сокращение слов, кроме общепринятых, не допускается.
- Таблицы (11 кегль жирный) должны иметь названия, их следует располагать по тексту статьи, ссылки на таблицы (табл. 1).
- Диаграммы выполняются в формате Excel.
- Графический материал (только в черно-белом изображении) должен быть четким и не требовать перерисовки. Изображение выполняется в формате **jpg** или **tif** с разрешением 300 **dpi**. Рисунки выполняются по ГОСТ, подрисовочная подпись 11 жирный кегль.

**РУКОПИСИ И СОПРОВОДИТЕЛЬНАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ
ПРИНИМАЮТСЯ ПО СЛЕДУЮЩИМ АДРЕСАМ:**

05.05.03 Колесные и гусеничные машины

Владимир Сергеевич Макаров: vladimir.makarov@nntu.ru

05.14.02 Электрические станции и электроэнергетические системы

Евгений Викторович Бычков: fae_nir@nntu.ru

**05.14.03 Ядерные энергетические установки, включая проектирование,
эксплуатацию и выход из эксплуатации**

Максим Александрович Легчанов: legchanov@nntu.ru

**05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям).
05.13.17 Теоретические основы информатики**

Валерий Павлович Хранилов: hranilov@nntu.ru

16+

**ТРУДЫ НГТУ
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА**

№ 4 (123)

Редакторы: **В.И. Казакова П.В. Чеченков**
Технический редактор: **Д.В. Вилков**

Редакция:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.
rs1@ntu.ru
Свободная цена

Подписано в печать: 30.12.2018. Дата выхода в свет Формат 60x84 ¹/₈.
Бумага офсетная. Печать трафаретная.
Усл. печ. 33 л. 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.

Индекс 44757
Объединенный каталог «Пресса России»

Свидетельство о регистрации
периодического печатного издания
ПИ № ФС 77-56417 от 11 декабря 2013