

ISSN 1816-210X

ТРУДЫ НГТУ

ИМ. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА

Нижний Новгород

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

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

Журнал издается с 1935 года

№ 4 (111)

Нижний Новгород 2015

УДК 050(06)
ББК 9я54
Т 78

Т 78 Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева /
НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2015. № 4 (111). – 246 с.

Выходит 4 раза в год

Главный редактор С.М. Дмитриев

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Н.Ю. Бабанов (зам. гл. редактора), М.В. Ширяев (зам. гл. редактора), Е.Г. Ивашкин (зам. гл. редактора),
О.В. Пугина (отв. редактор), А.В. Крылова (глав. редактор выпуска)

Члены редколлегии: В.Г. Баранов, В.Д. Вавилов, А.М. Groшев, В.М. Галкин, А.Е. Жуков,
А.Б. Дарьенков, В.Е. Колотилин, А.А. Куркин, Д.Н. Лапаев, М.Г. Михаленко, А.Ю. Панов,
В.П. Хранилов, А.Е. Хробостов, Е.А. Чернышов

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель

Федор Михайлович Митенков

(академик РАН, д-р физ.-мат. наук, проф.,
директор ОКБМ Африкантов)

Заместитель председателя

Сергей Михайлович Дмитриев

(д-р техн. наук, проф., ректор НГТУ им. Р.Е. Алексеева)

Ответственный секретарь

Владимир Викторович Беляков

(д-р техн. наук, проф., начальник УНИИР)

ЗАРУБЕЖНЫЕ ЧЛЕНЫ СОВЕТА

Дмитрий Ефимович

Пелиновский

Ласло Палкович

Варлаки Петер

Виджай Кумар

Ялчнер Ахмед К.

PhD, проф. Математики, Университет Мак Мастера,
Хамилтон, Онтарио, Канада

Проф. Сечени Иштван Университет, Венгрия

Проф. Сечени Иштван Университет, Венгрия

Д-р философии, проф. – исследователь,

Шив Надар Университет, Индия

Д-р, профессор, METU, директор OERC, Турция

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА

Гуляев Юрий Васильевич

Гринберг Руслан Семенович

Бабанов Николай Юрьевич

Ширяев

Михаил Виссарионович

Ивашкин

Евгений Геннадьевич

Митяков Сергей Николаевич

Куркин Андрей Александрович

Воротынцева

Владимир Михайлович

Кондратьев

Вячеслав Васильевич

Рындык Александр Георгиевич

Раевский Сергей Борисович

Кошелев Олег Сергеевич

Кулепов Виктор Федорович

Член Президиума РАН, академик, д-р физ.-мат. наук, проф.,
директор Института радиоэлектроники РАН им. В.А. Котельникова

Член-кор. РАН, д-р эконом. наук, проф.,

Директор Института ФГБУН экономики РАН

Канд. техн. наук, доцент, проректор на научной работе НГТУ

Канд. техн. наук, доцент, проректор по развитию НГТУ

Канд. техн. наук, доцент, проректор по учебной работе НГТУ

Канд. техн. наук, доцент, проректор по учебной работе НГТУ

Д-р физ.-мат. наук, проф., директор ИНЭУ НГТУ

Д-р физ.-мат. наук, проф., зав. кафедрой ПМ

Д-р хим. наук, проф., зав. кафедрой ФТМКЭТ

Член-кор. РАН, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ВСТ

Член-кор. РАН, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ВСТ

Д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ИР

Д-р техн. наук, профессор

Д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой МТКОДСП

Д-р техн. наук, профессор, директор ДПИ (филиал НГТУ)

УДК 050(06)
ББК 9я54

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

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

© Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева, 2015

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE RUSSIAN FEDERATION
FEDERAL STATE BUDGET EDUCATIONAL INSTITUTION
OF HIGHER PROFESSIONAL EDUCATION
NIZHNI NOVGOROD STATE TECHNICAL UNIVERSITY
n.a. R.E. ALEXEEV

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

Published since 1935

№ 4 (111)

Nizhni Novgorod 2015

Editor-in-Chief S.M. Dmitriev

EDITORIAL BOARD

N.Y. Babanov (Deputy Editor-in-Chief), M.V. Shiryaev (Deputy Editor-in-Chief),
Y.G. Ivashkin (Deputy Editor-in-Chief), V.V. Belyakov (Executive Secretary),
O.V. Pugina (Executive Editor), A.V. Krylova (Executive Editor),

Members of Editorial Board: V.G. Baranov, V.D. Vavilov, V.M. Galkin, A.M. Groshev, A.B. Darenkov,
A.E. Zhukov, V.Y. Kolotilin, A.A. Kurkin, D.H. Lapaev, M.G. Mikhalenko,
A.Y. Panov, V.P. Khranilov, A.E. Khrobostov, Y.A. Chernyshov,

EDITORIAL COUNCIL

Chairman

Fedor Mikhailovich Mitenkov

Member of Russian Academy of Sciences
Head of OAO I.I. Afrikantov OKB Mechanical Engineering
Doctor of physical and mathematical sciences, professor
(Nizhniy Novgorod, Russia)

Vice – chairman

Sergei Mikhailovich Dmitriev

Doctor of technical sciences, professor
Rector of NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Executive Secretary

Vladimir Viktorovich Beliakov

Doctor of technical sciences, professor
Head of NSTU Research and innovative works office
(Nizhniy Novgorod, Russia)

*Dmitri Efimovich
Pelenovski
Laslo Palkovich
Varlaki Peter
Vidzhai Kumar*

Foreign members of Editorial council

PhD, Doctor of mathematical sciences, professor
McMaster University (Ontario, Canada)
The Széchenyi István University (Győr, Hungary)
The Széchenyi István University (Győr, Hungary)
PhD, Doctor of philosophical sciences, professor
Shiv Nadar University (India)
professor, head of Ocean Engineering Research Center
Middle East Technical University (Turkey)

Ialchner Akhmed K.

Members of Editorial council

Guliaev Yuri Vasilevich

Member of Russian Academy of Sciences
Doctor of physical and mathematical sciences, professor
Institute of Radio Engineering and Electronics (IREE) named after Academician V.A. Kotelnikov
(Moscow, Russia)

Grinberg Ruslan Semenovich

Associate member of the Russian Academy of Sciences
Doctor of physical and mathematical sciences, professor
Director of the Institute for International Economic and Political Studies at the Russian Academy
of Sciences
(Moscow, Russia)

Babanov Nikolai Iurevich

Doctor of technical sciences, professor
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Shiriaev

Mikhail Vissarionovich

Candidate of technical sciences, docent
Vice-rector for perspective projects
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Ivashkin

Evgeni Gennadevich

Candidate of technical sciences, docent
Vice-rector for teaching and learning enhancement
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Mitiakov Sergei Nikolaevich

Doctor of physical and mathematical sciences, professor
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Kurkin Andrey Aleksandrovich

Doctor of physical and mathematical sciences, professor
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Vorotyntsev

Vladimir Mikhailovich

Doctor of chemical sciences, professor
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Kondratev

Viacheslav Vasilevich

Associate member of the Russian Academy of Sciences,
Doctor of technical sciences, professor
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Ryndyk Alexander Georgievich

Doctor of technical sciences, professor
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Raevski Sergei Borisovich

Doctor of technical sciences, professor
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Koshelev Oleg Sergeevich

Doctor of technical sciences, professor
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Kulepov Viktor Fedorovich

Doctor of technical sciences, professor
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

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

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ.....	9
Миндров А.Е., Кашеев Н.И., Путихин Н.С., Тимофеева О.П. Построение проверяющих тестов дискретных схем на основе непрерывных расширений булевых функций.....	9
Поляков Д.В., Попов А.И., Дузькрятченко С.А. Структура данных для создания ассоциативного массива на основе монотонных хеш-функций.....	19
Сидорова Е.В., Котельникова О.А. Исследование моделей надежности программного обеспечения в среде имитационного моделирования Any Logic	41
Матысик О.В. Итерационная регуляризация некорректных уравнений первого рода	52
Мякиньюков А.В., Смирнова Д.М., Шишанов С.В. Определение координат целей в многопозиционной сверхширокополосной РЛС.....	62
Душкина Э.О., Игнатов С.К., Разуваев А.Г. Анализ инвариантов в задаче разделения неизоморфных орграфов.....	68
Бирюков В.В., Курзенков М.И., Мауль Р.В. Стабилизация частоты генератора сигналов Г4-207.....	77
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ.....	83
Гордеев Б.А., Охулков С.Н., Плехов А.С. Особенность применения волновых методов при тарировке магнитореологических трансформаторов.....	83
Гордеев Б.А., Дарьенков А.Б., Охулков С.Н., Плехов А.С. Применение магнитореологических жидкостей для виброзащиты от стохастических нагрузок.....	88
Вихорев Н.Н., Чивенков А.И., Панфилов И.С., Панфилов С.Ю. Моделирование работы автономного источника электропитания в среде MATLAB/SIMULINK.....	94
Мамедов Ф.И., Аббасов А.Г., Шахбазов П.Н. Определение рабочих характеристик датчика с проволочными сопротивлениями.....	102
Мамаев А.В., Дмитриев С.М., Рязанов Р.Р., Соборнов А.Е., Котин А.В. Численное моделирование закрученного течения в кольцевом канале с внутренней спиральнонавитой трубой.....	108
Арсенов П.В., Варенцов А.В., Доронков Д.В., Полозкова Е.Н., Пронин А.Н., Хробостов А.Е. Экспериментальные исследования движения потока теплоносителя в ТВСА реактора ВБЭР.....	118
Арсенов П.В., Добров А.А., Доронков Д.В., Полозкова Е.Н., Сорокин В.Д., Хробостов А.Е. Исследования закономерностей течения теплоносителя за перемешивающей решеткой с различными типами дефлекторов в области направляющего канала ТВС-квадрат.....	126
МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО	136
Береснев П.О., Михеев А.В., Беляев А.М., Папунин А.В., Кострова З.А., Колотилин В.Е., Еремин А.А., Макаров В.С., Зезюлин Д.В., Беляков В.В., Куркин А.А. Статистическая модель выбора геометрических параметров, массо-инерционных, мощностных и скоростных характеристик многоосных колесных транспортно-технологических машин.....	136

Углов А.Л., Хлыбов А.А., Макаров А. Д., Рязанов Р.Р., Соборнов А. Е. Методика оценки поврежденности аустенитной стали при термопульсациях акустическим методом.....	151
Гладких И.В. Влияние гранулометрического состава огнеупорного заполнителя из техногенного сырья на свойства жаростойкого бетона.....	159
Жеребцов С. Н., Лобов Е. В., Чернышов Е. А. Комплексное воздействие на кристаллизующийся жаропрочный никелевый сплав при электрошлаковом кокильном литье.....	164
Зенкин Р.Н., Зенкин Н.Н., Вальтер А.И. Математическое моделирование процесса расплавления магнийсодержащего модификатора при модифицировании высокопрочного чугуна с шаровидной формой графита.....	171
Пачурин В.Г., Галкин В.В., Пачурин Г.В., Дербенев А.А. Оценка влияния структурного состояния на циклическую долговечность деформированных материалов... ..	177
Зими́на Е.В., Кайнова В.Н. Роль метрологической экспертизы технической документации в повышении проектного качества продукции.....	186
Неделяева Т.А. Особенности подготовки студентов очно-заочной и заочной форм обучения машиностроительного профиля в области профессионально-ориентированных информационных технологий.....	193
Петровский А.Н., Воронков С.В. К задаче оптимизации внецентроидного циклоидального зацепления.....	198
Елисеев М.Е., Липенков А.В., Ясенов В.В., Галкина Е.Д. Подбор аппроксимирующей функции времени движения при составлении «гибкого» расписания движения маршрутных транспортных средств.....	211
Дун Синьшо Определение площади и плеча парусности судна-газовоза LNG.....	218
Захаров Л.А., Тарасов А.Н., Захаров И.Л., Дегтярев А.В. Методологические основы выбора энергетической установки для средств коллективного спасения.....	222
Москвичева Ю.А. Влияние сплоченности мелкобитого льда и ширины ледового канала на ледовое сопротивление судов.....	228
Ваганов А.Б., Нгуен Нгок Тан Динамика водоизмещающего амфибийного судна при входе в воду и при выходе из воды на берег.....	234

CONTENTS

INFORMATICS AND MANAGEMENT IN TECHNICAL AND SOCIAL SYSTEMS....	9
Mindrov A., Kascheev N., Putikhin N., Timopheeva O. Test pattern generation for discrete circuits using continuous extensions of boolean functions.....	9
Polyakov D.V., Popov A.I., Duzkryatchenko S.A. Data structures to create an associative array based on monotone hashing.....	19
Sidorova E. V., Kotelnikova O.A. Investigation of models of software reliability in simulation environment Any Logic.....	41
Matysik O.V. Of the iteration regularization of ill-posed equations the first kind.....	52
Myakinkov A.V., Smirnova D.M., Shishanov S.V. Target coordinate measurement in multi-static ultra wideband radar.....	62
Dushkina E.O., Ignatov S.K., Razuvaev A.G. An analysis of the invariants in the task of separation of nonisomorphic oriented graphs.....	68
Biryukov V.V., Kurzenkov M.I., Maul R.V. Frequency stabilization of the signals generator G4-207.....	77
ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES.....	83
Gordeev B. A., Okhulkov S. N., Plekhov A. S. Evaluation of pogreshnostei at calibration methods magnetorheological wave transformer.....	83
Gordeev, B. A., Darenkov A. B., Okhulkov S. N., Plekhov A. S. Study of magnetorheological fluids for vibration isolation bearings under shock nagruzkakh.....	88
Vikhorev N.N., Chivenkov A.I., Panfilov I.S., Panfilov S.J. Modeling work of an autonomous power source in MATLAB / SIMULINK.....	94
Mamedov F. I., Abbasov A. G., Shahbazov P. N. Definition of operating characteristics of the sensor wire resistance.....	102
Mamaev A. V., Dmitriev S. M., Ryazapov R. R., Sobinov A. E., Kotin A.V. Numerical simulation of swirling flow in the ring-the first channel with an inner pipe spiridonovich... ..	108
Arsenov P.V., Varentsov A.V., Doronkov D.V., Polozkova E.N., Pronin A.N., Khrobostov A.E. Experimental investigations of coolant flow in fa VBER.....	118
Arsenov P.V., Dobrov A.A., Doronkov D.V., Polozkova E.N., Sorokin V.D., Khrobostov A.E. Investigation of coolant flow behind the mixing grid having various type of vanes in the region of the control rod in TVS-kvadrat fuel assembly.....	126
MECHANICAL AND TRANSPORT: THEORY, TECHNOLOGY, PRODUCTION.....	136
Beresnev P.O., Miheev A.V., Belyaev A.M., Papunin A.V., Kostrova Z.A., Kolotilin V.E., Eremin A.A., Zeziulin D.V., Makarov V.S., Belyakov V.V., Kurkin A.A. Statistical model of selection of geometric parameters, mass- inertia and power characteristics of multi-wheeled transportation and technological vehicles.....	136
Uglov A. L., Khlybov A. A., Makarov A. D., Ryazapov R. R., Sobornov A. E. Technique of assessing damage austenitic steel because of thermal pulsation by acoustic method.....	151
Gladkikh I.V. Influence of granulometric composition of heat-resistant filler from technogenic raw materials on properties of heat-resistant concrete.....	159
Zherebtsov S.N., Lobov E. V., Chernyshov E.A. Komplexny impact on the crystallizing heat resisting nickel alloy at electroslag kokilny molding.....	164

Zenkin R. N., Zenkin N. N., Walter A. I. Mathematical simulation of melting magnesium-bearing modifier during modification of ductile cast iron with spherical graphite.....	171
Pachurin V.G., Galkin V.V., Pachurin G.V., Derbenev A.A. Assessment of structural condition for cyclic durability deformed material.....	177
Zimina E.V., Kaynova V.N. The role of metrological expert examination of technical documentation to improve project quality.....	186
Nedelyaeva T.A. Features of training of students of part-time and correspondence forms of education of machine-building specialities in the field of the vocationally-orientated information technologies.....	193
Petrovskiy A.N., Voronkov S.V. To the problem of the cycloid gearing optimization.....	198
Eliseev M. E., Lipenkov A.V., Yasenov V.V., Galkina E.D. Calculation of approximating functions time traffic in compiling «flexible» timetables route vehicles.....	211
Dong Xinshuo Determination of the wind area and lever arm of lng carriers.....	218
Zakharov L.A., Tarasov A.N., Zakharov I.L., Degtyarev A.V. Methodological basis for the selection of the power plant means of collective rescue.....	222
Moskvicheva Ju. Influence of unity of small broken ice and width of the ice channel on the ice resistance of ships.....	228
Vaganov A. B., Nguyen Ngoc Than. The dynamics of movement of amphibious vessel during entering and exiting the water.....	234

ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

УДК 681.004.6

А.Е. Миндров¹, Н.И. Кашцев², Н.С. Путихин², О.П. Тимофеева¹

ПОСТРОЕНИЕ ПРОВЕРЯЮЩИХ ТЕСТОВ ДИСКРЕТНЫХ СХЕМ НА ОСНОВЕ НЕПРЕРЫВНЫХ РАСШИРЕНИЙ БУЛЕВЫХ ФУНКЦИЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики, Н. Новгород²

Посвящена разработке способа построения тестов цифровых схем с использованием непрерывных моделей дискретных устройств. Представлены алгоритмы, позволяющий решить задачу поиска тестовых наборов с помощью непрерывной оптимизации. Предложенный подход реализован программно в виде среды для поиска тестов цифровых схем. В целях апробации построена система автоматической генерации тестов для константных неисправностей комбинационных схем. Приведены результаты работы программного комплекса для ряда схем набора ISCAS'85, демонстрирующие эффективность используемых алгоритмов и методов.

Ключевые слова: автоматическое построение тестов, моделирование неисправностей, непрерывные модели, цифровые схемы, комбинационные схемы, константные неисправности.

Введение

Трудоемкость выполнения задач построения тестов значительно возрастает при увеличении сложности цифровых схем. Следовательно, требования к эффективности методов и алгоритмов становятся существенно выше. В связи с этим разработке методов и алгоритмов построения тестов дискретных устройств в последнее время уделяется много внимания. Большинство ставших классическими методов построения тестов основаны на использовании модели константной неисправности. В настоящей работе предложен метод построения тестов на основе непрерывного подхода к моделированию работы схемы. В качестве апробации изложенного подхода на базе разработанных программных модулей построена система автоматической генерации тестов для константных неисправностей комбинационных схем. Представлены результаты работы данного программного комплекса на ряде схем набора ISCAS'85.

Непрерывный подход к моделированию дискретных устройств

В большинстве традиционных методов построения тестов используются дискретные модели цифровых устройств. Наиболее распространенными дискретными математическими моделями являются правильные логические сети, таблицы истинности и различные формы аналитических выражений булевых функций, реализуемых устройствами. Как следствие, задачи поиска тестовых последовательностей, основанные на подобных моделях, имеют комбинаторный характер решения. В настоящее время большинство методов представляют собой вариации метода ветвей и границ. Общеизвестна трудоемкость таких методов.

Однако возможно описание комбинационного устройства с помощью функций от непрерывного аргумента. Данная работа описывает метод, при котором булевы функции элементов схемы заменяются их непрерывными аналогами. Подобная идея была впервые пред-

ложена Капо [1]. Настоящая работа развивает этот подход и расширяет область его практического применения.

Итак, изложим основные аспекты непрерывного подхода к моделированию дискретных устройств. Введем следующие обозначения: $x = (x_1, \dots, x_n)$ – координаты точки в n -мерном пространстве, единичный гиперкуб – $T^n = \{x | 0 \leq x_i \leq 1, i = 1, \dots, n\}$, $V^n = \{x | x_i \in \{0, 1\}, i = 1, \dots, n\}$, элементами множества $V^n \subset T^n$ являются вершины единичного гиперкуба T^n .

Как известно, любая комбинационная схема может быть представлена логической функцией или множеством функций, реализующих логику схемы. При этом каждому первичному выходу схемы будет соответствовать своя логическая функция от n переменных $x_1, \dots, x_n; x_i \in \{0, 1\}$.

Пусть $\mu(x)$ – некоторая n -местная функция алгебры логики, которую можно определить как отображение вершин единичного n -мерного гиперкуба на множество $\{0, 1\}$ – $\mu(x): V^n \rightarrow V^1$.

Определение 1. Непрерывным продолжением функции алгебры логики $\mu(x)$ называется любая функция $f(x)$, отображающая n -мерное арифметическое пространство R^n во множество действительных чисел R^1 и совпадающая с функцией $\mu(x)$ на множестве V^n : $f(x): R^n \rightarrow R^1, f(x) = \mu(x), \forall x \in V^n$.

Как видим, единственное существенное условие, налагаемое на вид функции $f(x)$, является требование совпадения значений $f(x)$ и $\mu(x)$ в вершинах n -мерного гиперкуба.

Рассмотрим вопрос о соотношении булевых функций, образующих базис, с их непрерывными продолжениями. Исходя из приведенного определения, легко видеть справедливость следующего утверждения.

Пусть функция алгебры логики $\mu(x)$ представлена суперпозицией базисных функций. Тогда суперпозиция, полученная заменой базисных функций на их непрерывные продолжения, есть непрерывное продолжение функции $\mu(x)$.

Таким образом, достаточно построить лишь непрерывные продолжения функций алгебры логики, образующих базис. На их основе можно построить непрерывное продолжение любой функции алгебры логики. Возьмем за основу конъюнктивный базис Буля. Определим следующие непрерывные продолжения базисных функций: $\tilde{y} = x_1 x_2$ – для конъюнкции, $\tilde{y} = 1 - x$ – для отрицания. На множестве вершин единичного гиперкуба значения непрерывных продолжений действительно совпадают со значениями соответствующих булевых функций. Основываясь на приведенном утверждении, построим непрерывные продолжения для всех основных функций алгебры логики:

Таблица 1
Непрерывные продолжения булевых функций

Булева функция	Непрерывное продолжение
$Y = \bar{X}$	$\tilde{y} = 1 - x$
$Y = X_1 \wedge X_2$	$\tilde{y} = x_1 x_2$
$Y = X_1 \vee X_2$	$\tilde{y} = x_1 + x_2 - x_1 x_2$
$Y = X_1 \oplus X_2$	$\tilde{y} = x_1 + x_2 - 2x_1 x_2$

Построенная система функций имеет следующее свойство: для любых значений аргумента, лежащих внутри единичного гиперкуба, значения функции лежат в интервале $(0, 1)$. Таким образом, значения 0 и 1 достигаются непрерывными продолжениями только на гранях

и в вершинах единичного гиперкуба T^n . Рассмотрим далее правильную логическую сеть, представляющую некоторое комбинационное устройство. В качестве множества возможных неисправностей рассмотрим множество одиночных константных неисправностей.

Определение 2. Непрерывной моделью комбинационного устройства назовем непрерывную сеть A^h , получающуюся из правильной логической сети A заменой функций алгебры логики, реализуемых элементами сети A , их непрерывными продолжениями.

Рассмотрим линию l , соединяющую выходной полюс элемента t_1 с входным полюсом элемента t_2 . По аналогии с дискретной моделью определим одиночную константную неисправность l/a , $a \in \{0, 1\}$ непрерывной сети A^h как неисправность, приводящую к постоянному присутствию на линии l арифметического значения a .

Пусть построена непрерывная сеть A^h для комбинационного устройства A . Разорвем линию l сети и создадим дополнительный вход ω . Пусть $\tilde{\varphi}^m(\omega, x_1, x_2, \dots, x_n)$ есть функция, реализуемая на линии m сети A^h .

Определение 3. Функцией чувствительности для сигнала ω на линии m назовем функцию

$$\tilde{W}_l^m(x_1, x_2, \dots, x_n) = \tilde{\varphi}^m(1, x_1, x_2, \dots, x_n) + \tilde{\varphi}^m(0, x_1, x_2, \dots, x_n) - 2\tilde{\varphi}^m(1, x_1, x_2, \dots, x_n)\tilde{\varphi}^m(0, x_1, x_2, \dots, x_n).$$

Очевидно, что эта функция есть непрерывное продолжение функции исключающее ИЛИ.

Теорема 1

Неисправности $\omega \equiv 1$ и $\omega \equiv 0$ сети A^h проверяются теми и только теми входными наборами, которые являются решениями уравнений (1) и (2) соответственно:

$$\tilde{W}_l^m(x_1, x_2, \dots, x_n)(1 - \tilde{\varphi}^l(x_1, x_2, \dots, x_n)) = 1, x \in V^n; \quad (1)$$

$$\tilde{W}_l^m(x_1, x_2, \dots, x_n)\tilde{\varphi}^l(x_1, x_2, \dots, x_n) = 1, x \in V^n. \quad (2)$$

Если $\tilde{W}_l^m(x_1, x_2, \dots, x_n) = 1$, то значение ω на линии l распространяется до линии m так, что мы наблюдаем ω или $\bar{\omega}$ на линии m . Из теоремы 1 непосредственно следует, что функции в левой части уравнений (1) и (2) являются непрерывными продолжениями различающих функций.

Определение 4. Непрерывными различающими функциями неисправностей $\omega \equiv 1$ и $\omega \equiv 0$ на линии l сети A^h называются функции (3) и (4), соответственно:

$$\varphi_l^1(X) = \tilde{W}_l^m(x_1, x_2, \dots, x_n)(1 - \tilde{\varphi}^l(x_1, x_2, \dots, x_n)); \quad (3)$$

$$\varphi_l^0(X) = \tilde{W}_l^m(x_1, x_2, \dots, x_n)\tilde{\varphi}^l(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (4)$$

Получение непрерывных различающих функций представляет собой значительно более простую задачу, чем получение булевых различающих функций. Действительно, серьезную проблему при получении аналитических выражений булевых функций представляет операция инвертирования нормальных форм в соответствии с правилами Де Моргана. В отличие от этого, инвертирование непрерывных продолжений в соответствии с табл. 1 заключается в простой смене знака у всех слагаемых инвертируемой функции и прибавлении к ней единицы.

Построение проверяющего теста, близкого по длине к минимальному

При нахождении близких к минимальным покрытий таблицы неисправностей P можно применять достаточно простое и эффективное эмпирическое правило: в таблице P выбирается столбец с минимальным числом единиц. Среди строк, содержащих единицу в выбранном столбце, выбирается та, которая содержит максимальное количество единиц. Найденная, та-

ким образом, строка включается в покрытие, а таблица P сокращается путем вычеркивания этой строки и столбцов, которые она покрывает. Далее аналогичная процедура проводится с сокращенной таблицей P и т.д. до тех пор, пока в таблице P не будут вычеркнуты все столбцы.

Алгоритм построения проверяющих тестов, основанный на таком эмпирическом правиле нахождения почти-минимального покрытия таблицы неисправностей P , состоит из выполнения следующих пунктов:

1. Для каждой неисправности $s_i \in S$ определяем r_i число проверяющих ее наборов.
2. Полагаем S' подмножество всех обнаружимых неисправностей из S .
3. Во множестве S' выбираем неисправность s_i , проверяемую минимальным числом входных наборов.
4. Находим M_i – множество наборов, проверяющих неисправность s_i .
5. Во множестве M_i выбираем набор v_j , проверяющий максимальное количество неисправностей из множества S' , и включаем его в тест.
6. Из множества S' исключаем неисправности, проверяемые набором v_j .
7. Если $S' = \emptyset$, тест построен, в противном случае идем на пункт 3.

Очевидно, этот алгоритм может быть эффективно реализован в том случае, если удастся, не находя таблицы P , решать следующие задачи:

Задача А: для каждой неисправности $s_i \in S$ найти r_i – количество проверяющих ее наборов.

Задача В: построить множества M_i всех наборов, проверяющих неисправность s_i .

Задача С: определить для любого входного набора множество проверяемых ей неисправностей.

Рассмотрим задачу А. Пусть $\varphi_i(x)$ – непрерывная различающая функция неисправности $s_i \in S$. Функция $\varphi_i(x)$ имеет вид:

$$\varphi_i(x) = \sum_{j=1}^N b_j x_{j_1} \dots x_{j_{i_j}} + b_0,$$

где $b_j, j = \overline{0, N}$ целые числа. Перегруппировав в этом выражении слагаемые, легко представить функцию $\varphi_i(x)$ в виде

$$\varphi_i(x) = \alpha_0 + \sum_p \alpha_p x_p + \sum_{p < j} \alpha_{pj} x_p x_j + \sum_{p < j < t} \alpha_{pjt} x_p x_j x_t + \dots,$$

где $\alpha_0 = \varphi_i(\overline{0, \dots, 0})$,

...

$$\alpha_p = \varphi_i(\overline{0, \dots, 1, \dots, 0}) - \alpha_0,$$

...

$$\alpha_{pj} = \varphi_i(\overline{0, \dots, 1, \dots, 1, \dots, 0}) - (\alpha_0 + \alpha_p + \alpha_j), \text{ и т. д.}$$

Решение задачи А дает следующая теорема.

Теорема 2

$$r_i = 2^n \varphi(0.5, \dots, 0.5),$$

где r_i – количество входных наборов, проверяющих неисправность s_i сети A^H , $\varphi_i(x)$ – непрерывная различающая функция неисправности s_i , n – количество входных полюсов сети A^H .

Доказательство

Определим операцию над двумя векторами $x \in T^n$ и $v_j = (v_{j_1}, \dots, v_{j_n}) \in V^n, j = \overline{1, 2^n}$:

$$(x * v_j) = \prod_{m=1}^n \eta(x_m, v_{jm}), \text{ где } \eta(x_m, v_{jm}) = \begin{cases} x_m, & \text{если } v_{jm} = 1, \\ 1 - x_m, & \text{если } v_{jm} = 0. \end{cases}$$

Операция $(x * v_j)$ обладает следующим очевидным свойством:

$$(v_i * v_j) = \begin{cases} 0, & \text{если } v_i \neq v_j, \\ 1, & \text{если } v_i = v_j. \end{cases} \quad (5)$$

Рассмотрим функцию $\varphi_i^*(x) = \sum_{j=1}^{2^n} \varphi_i(v_j)(x * v_j)$.

Раскрыв в функции $\varphi_i^*(x)$ все скобки и приведя подобные члены, представим $\varphi_i^*(x)$ в виде

$$\varphi_i^*(x) = c_0 + \sum_p c_p x_p + \sum_{p < j} c_{pj} x_p x_j + \sum_{p < j < t} c_{pjt} x_p x_j x_t + \dots,$$

где

$$c_p = \varphi_i^* \left(\overset{1}{0}, \dots, \overset{n}{0} \right)$$

$$c_p = \varphi_i^* \left(\overset{1}{0}, \dots, \overset{p}{1}, \dots, \overset{n}{0} \right) - c_0$$

$$c_{pj} = \varphi_i^* \left(\overset{1}{0}, \dots, \overset{p}{1}, \dots, \overset{j}{1}, \dots, \overset{n}{0} \right) - (c_0 + c_p + c_j), \text{ и т.д.}$$

Учитывая свойство (5),

$$\varphi_i^*(v_m) = \sum_{j=1}^{2^n} \varphi_i(v_j)(v_m * v_j) = \varphi_i(v_m), m = \overline{1, 2^n}.$$

Отсюда следует, что $c_0 = d_0, \dots, c_p = d_p, \dots, c_{pj} = d_{pj}, \dots$ и т.д.

Тогда в любой точке $x \in T^n$ справедливо $\varphi_i(x) = \varphi_i^*(x)$.

Таким образом,

$$\varphi_i(0.5, \dots, 0.5) = \varphi_i^*(0.5, \dots, 0.5) = \sum_{j=1}^{2^n} \varphi_i(v_j)((0.5, \dots, 0.5) * v_j) = \sum_{j=1}^{2^n} \varphi_i(v_j)(0.5)^n = 2^{-n} \sum_{j=1}^{2^n} \varphi_i(v_j) = 2^{-n} r_i,$$

что и требовалось доказать.

Рассмотрим задачу В.

Из теоремы 2 имеем $0 \leq \varphi_i(0.5, \dots, 0.5) = 2^{-n} r_i$

Случай $\varphi_i(0.5, \dots, 0.5) = 0$ соответствует необнаружимой неисправности s_i , тогда $M_i = \emptyset$.

Рассмотрим случай $\varphi_i(0.5, \dots, 0.5) > 0$. Как было показано выше, справедливо представление

$$\varphi_i(x_1, 0.5, \dots, 0.5) = f_{i_1}(0.5, \dots, 0.5)x_1 + g_{i_1}(0.5, \dots, 0.5).$$

Из точки $a_0 = (0.5, \dots, 0.5)$ перейдем в точку $a_1 = (\delta_1, 0.5, \dots, 0.5)$, где

$$\delta_1 = \begin{cases} 1, & \text{если } f_{i_1}(a_0) = \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_1}(a_0) > 0, \\ 0, & \text{если } f_{i_1}(a_0) = \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_1}(a_0) < 0, \\ 0 \text{ или } 1, & \text{если } f_{i_1}(a_0) = \frac{\partial \varphi_i}{\partial x_1}(a_0) = 0. \end{cases}$$

Очевидно, $\varphi_i(a_0) \leq \varphi_i(a_1)$. Аналогично совершим переход из точки a_1 в точку $a_2 = (\delta_1, \delta_2, \dots, 0.5, \dots, 0.5)$ и т.д. до тех пор, пока не придем в точку $a_n = \delta^1 \in V^n$. Поскольку $\varphi_i(\delta^1) \geq \varphi_i(a_0) > 0$ и $\varphi_i(x) \in \{0, 1\}$ при $x \in V^n$, для значения $\varphi_i(\delta^1)$ остается единственная возможность - $\varphi_i(\delta^1) = 1$.

Таким образом, получен набор δ^1 , проверяющий неисправность s_i . Набор δ^1 включаем в множество M_i и рассматриваем далее функцию $\varphi_{i_1}(x) = \varphi_i(x) - (x * \delta^1)$.

Функция $\varphi_{i_1}(x)$ совпадает с функцией $\varphi_i(x)$ во всех точках множества V^n за исключением точки δ^1 . Действительно, $\varphi_{i_1}(\delta^1) = \varphi_i(\delta^1) - (\delta^1 * \delta^1) = 1 - 1 = 0$. С другой стороны, если $v_i \neq \delta^1$ то $\varphi_{i_1}(v_j) = \varphi_i(v_j) - (v_j * \delta^1) = \varphi_i(v_j)$. Способом, описанным ранее, найдем точку δ^2 такую, что $\varphi_{i_1}(\delta^2) = \varphi_{i_1}(\delta^2) = 1$. Набор δ^2 включаем в множество M_i и рассматриваем далее функцию $\varphi_{i_2}(x) = \varphi_{i_1}(x) - (x * \delta^2)$. и т.д. до тех пор, пока не будет получен последний набор $\delta^r, r_i \geq 1$, проверяющий неисправность s_i .

Рассмотрим задачу С. Решение ее очевидно. Пусть v_i - некоторый входной набор, $S' \subset S$ - некоторое подмножество множества S рассматриваемых неисправностей. Набор v_i проверяет неисправность s_i тогда и только тогда, когда $v_i(v_j) = 1$, а количество неисправностей из S' , проверяемых набором v_i , определяется по формуле $R_j = \sum_{s_i \in S'} \varphi_i(v_j)$.

В качестве примера применения алгоритма рассмотрим построение теста для схемы, изображенной на рис. 1.

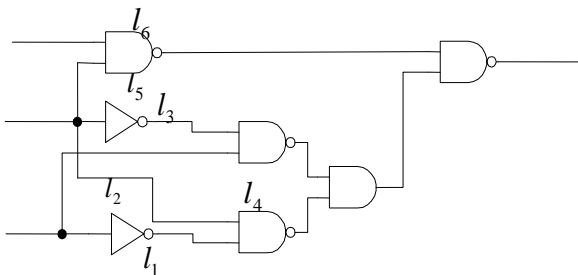


Рис. 1. Комбинационная схема

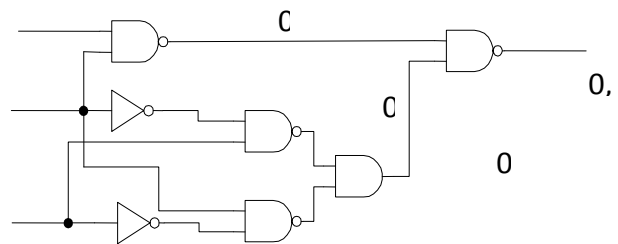


Рис. 2. Вычисление значений на каждой линии схемы

В табл. 2 для каждой рассматриваемой неисправности приведены непрерывные различающие функции $\varphi_i(x)$, а также $r_i = 8\varphi_i(0.5, 0.5, 0.5)$ - количество наборов, проверяющих каждую из рассматриваемых неисправностей. На первом шаге построения теста $S' = S$. Из табл. 2 видно, что множество S' содержит 8 неисправностей, каждая из которых проверяется единственным набором. Выберем любую из них, например s_1 . Для того чтобы найти набор, проверяющий неисправность s_1 , рассмотрим функцию $\varphi_1(x_1, x_2, x_3) = x_1x_2 - x_1x_2x_3$.

Производные функции $\varphi_1(x)$ равны $\partial\varphi_1/\partial x_1 = x_2 - x_2x_3$, $\partial\varphi_1/\partial x_2 = x_1 - x_1x_3$, $\partial\varphi_1/\partial x_3 = -x_1x_2$. Поскольку $\partial\varphi_1/\partial x_1(0.5, 0.5, 0.5) = 0.25 > 0$, из этой точки $a_0 = (0.5, 0.5, 0.5)$ переходим в точку $a_1 = (1, 0.5, 0.5)$; $\partial\varphi_1/\partial x_2(a_1) = 0.5 > 0$, переходим в точку $a_2 = (1, 1, 0.5)$; $\partial\varphi_1/\partial x_3(a_2) = -1 < 0$, переходим в точку $a_3 = (1, 1, 0)$. Таким образом, найден набор 110, проверяющий неисправность s_1 . Поскольку $\varphi_1(1, 1, 0) = 1$ для $i \in \{1, 1, 12\}$, удалив неисправности s_1, s_5, s_{12} из множества S' , получим $S' = \{s_2, s_3, s_4, s_6, s_7, s_8, s_9, s_{10}, s_{11}\}$. Для дальнейшего рассмотрения из множества S' выберем неисправность s_2 .

Аналогично найдем набор 010, проверяющий эту неисправность. После удаления неисправностей, проверяемых набором 010, множество S' примет вид $S' = \{s_3, s_4, s_6, s_8, s_9, s_{10}, s_{11}\}$. Выберем далее неисправность s_9 . Ее проверяет набор 111. После сокращения множества S' получаем: $S' = \{s_3, s_4, s_6, s_8, s_{10}\}$. В множестве S' находится единственная неисправность s_{10} , для которой $r_i = 1$. Ее проверяет набор 001. После сокращения множества S' получим $S' = \{s_3, s_6\}$.

Из табл. 2 определяем $r_3 = r_6 = 2$. Рассмотрим любую неисправность из S' , например s_3 . Поскольку $r_3 = 2$, множеством M_3 будет состоять из двух наборов. Используя функцию $\varphi_3(x) = x_1 - x_1x_2$, найдем первый проверяющий набор 100. Рассматривая функцию $\varphi_{3_1}(x) = \varphi_3(x) - ((x_1, x_2, x_3) * (1, 0, 0)) = x_1 - x_1x_2 - x_1(1 - x_2)(1 - x_3)$ найдем второй набор 101.

Таким образом, получено множество $M_3 = \{100, 101\}$. Поскольку оба найденных набора проверяют по две неисправности из S' , выбираем любой из них, например 100. После этого шага имеем $S' = \emptyset$. Таким образом, получен тест, состоящий из пяти наборов 110, 010, 111, 000, 100.

Таблица 2

Таблица непрерывных различающих функций

i	s_i	$\varphi_i(x_1, x_2, x_3)$	r_i
1	$l_1 \equiv 0$	$x_1x_2 - x_1x_2x_3$	1
2	$l_1 \equiv 1$	$x_2 - x_1x_2 - x_2x_3 + x_1x_2x_3$	1
3	$l_2 \equiv 0$	$x_1 - x_1x_2$	2
4	$l_2 \equiv 1$	$1 - x_1 - x_2 + x_1x_2$	2
5	$l_3 \equiv 0$	$x_1x_2 - x_1x_2x_3$	1
6	$l_3 \equiv 1$	$x_1 - x_1x_2$	2
7	$l_4 \equiv 0$	$x_2 - x_1x_2 - x_2x_3 + x_1x_2x_3$	1
8	$l_4 \equiv 1$	$1 - x_1 - x_2 + x_1x_2$	2
9	$l_5 \equiv 0$	$x_1x_2x_3$	1
10	$l_5 \equiv 1$	$x_3 - x_2x_3 - x_1x_3 + x_1x_2x_3$	1
11	$l_5 \equiv 0$	$x_1x_2x_3$	1
12	$l_6 \equiv 1$	$x_1x_2 - x_1x_2x_3$	1

Континуальный метод построения проверяющих тестов

Рассмотренный ранее алгоритм можно отнести к аналитическим методам построения проверяющих тестов комбинационных устройств и, будучи таковым, он имеет ограничение на применение, присущее всей группе этих методов. Ограничения эти связаны с необходимостью получения функций (в данном случае – непрерывных различающих функций) в аналитическом виде. В рамках традиционных моделей комбинационных устройств этот недостаток аналитических методов непреодолим. Непрерывная же модель, каковой является непрерывная сеть A^H , дает возможность вычислять значение реализуемой ей функции, а, значит, и непрерывных различающих функций, в любой точке $x \in R^n$. Присвоим входным полюсам $x_1x_2x_3$ сети A^H значения 0.5, 0.5, 0.5. На рис. 2 показана последовательность вычисления значений всех линий схемы. На выходе получаем значение 0,578125.

Основным преимуществом непрерывных методов моделирования схемы является другой принцип работы с моделью схемы по сравнению с традиционными подходами. Схема моделируется как обычная непрерывная функция нескольких переменных. Задача алгоритмов построения тестов на основе непрерывного подхода схемы – найти глобальный максимум целевой функции. Таким образом, открывается возможность использовать алгоритмы глобальной оптимизации применительно к задачам поиска тестов для логических схем.

Построение тестов для цифровых схем будем осуществлять в процессе максимизации специально построенной непрерывной целевой функции, описывающей поведение тестируемой схемы, как в присутствии, так и в отсутствии неисправности. В данной работе рассмотрено применение алгоритма поиска максимума целевой функции на основе метода покоординатного подъема. Будем использовать систему, проверяющую эквивалентность двух схем: исправной и неисправной (рис 3). В общем случае, данная система описывается следующей функцией:

$$G(x) = \bigcup_{k=1}^s (F_k(x) \oplus F'_k(x)).$$

Выход G принимает значение 1 тогда и только тогда, когда две схемы имеют различные значения выходных линий при подаче определенной комбинации сигналов на входы x_1, \dots, x_p .

Действительно, как можно видеть из рис. 3, значение функции G будет равно 1, если выходы исправной и неисправной схем различаются, и нулю – в противном случае.

$$G(X) = 1. \quad (6)$$

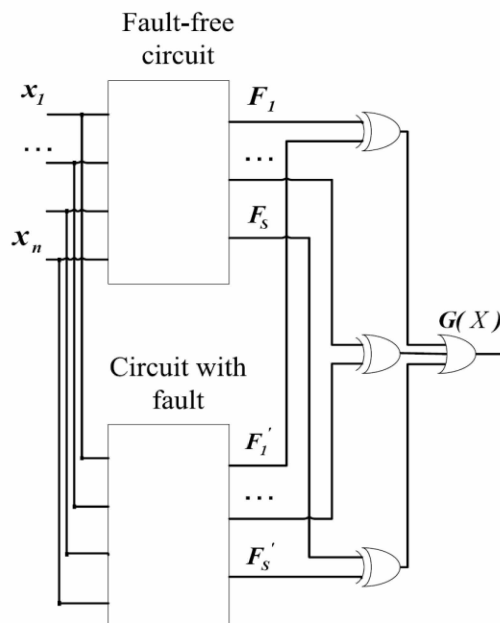


Рис. 3. Система, реализующая целевую функцию

Задачу дискретной оптимизации (6) можно заменить на задачу непрерывной оптимизации (7), используя непрерывную модель дискретного устройства путем замены всех булевых функций на соответствующие непрерывные продолжения булевых функций.

$$\tilde{G}(X) = 1. \quad (7)$$

Функция $\tilde{G}(X)$ есть непрерывный аналог логической функции $G(X)$.

Итак, для поиска тестов на основе непрерывного подхода необходимо:

- получить непрерывную модель схемы;

- внедрить в схему неисправность и получить непрерывную модель схемы с неисправностью;
- построить непрерывную целевую функцию;
- найти входной вектор, максимизирующий целевую функцию. Полученный вектор и есть тест для рассматриваемой неисправности.

Задача поиска максимума целевой функции – это задача глобальной оптимизации, поскольку нас интересует именно глобальный максимум исследуемой функции на всей области определения данной функции. Заметим, что хотя глобальных максимумов может быть и несколько, во всех точках экстремума значение целевой функции будет равно 1, т.е. максимум заранее известен, это упрощает решение задачи. Координаты каждого глобального максимума будут представлять собой один из возможных тестовых наборов.

В качестве первоначального приближения тестового набора выбирается точка $x^1 = (x_1^1, x_2^1, \dots, x_n^1) = (0.5, 0.5, \dots, 0.5)$ - центр единичного гиперкуба. Далее следуют одна или более итераций, каждая из которых заключается в следующем. Относительно текущей точки вычисляется оценка для частной производной $\partial G(x) / \partial x_i, i = 1, 2, \dots, n$ по каждой координате, значение которой не равно 0 или 1. Оценка определяется как модуль разности между значением целевой функции в текущей точке и значением в точке, имеющей приращение по одной из координат. Выбирается та координата, для которой вычисленная оценка максимальна. Далее, вычисленная разность используется как критерий установления значения для выбранной координаты. Если значение разности неотрицательно, то устанавливается 1. Для отрицательных значений берется 0. Если для вновь полученной точки функция достигает единичного значения, то тестовый набор найден, и работа алгоритма завершается. В противном случае начинается следующая итерация. Количество итераций ограничено, если за заданное количество итераций решение не найдено, то такая неисправность считается необнаружимой. Очевидно, что ограничение накладываемое на количество итераций является компромиссом между быстродействием алгоритма и процентом покрытия неисправностей.

Результаты

Описанные алгоритмы и методы были реализованы в программном комплексе генерации тестовых наборов для константных неисправностей комбинационных схем. Разработанный программный продукт, названный CONTINENT, был апробирован на некоторых комбинационных схемах набора ISCAS'85. В табл. 3 приведены полученные результаты.

Таблица 3

Результаты работы программы генерации тестов

Схема	CONTINENT		ATALANTA [5]		ATPG [4]	
	Покрытие	Время (с)	Покрытие	Время (с)	Покрытие	Время (с)
c432	520 / 524	0.52	520 / 524	1.742	519 / 524	2
c499	750 / 758	0.901	750 / 758	0.11	749 / 758	2
c880	942 / 942	0.63	942 / 942	0.1	922 / 942	7
c1355	1566 / 1574	2.313	1566 / 1574	0.3	1554 / 1574	39
c1908	1870 / 1879	2.323	1870 / 1879	3.194	1852 / 1879	74
c2670	2630 / 2747	18.486	2630 / 2747	68.298	2473 / 2747	3614
c3540	3291 / 3428	14.841	3291 / 3428	1.662	3274 / 3428	1250
c5315	5291 / 5350	10.505	5291 / 5350	1.662	5285 / 5350	320
c6288	7710 / 7744	13.359	7710 / 7744	1.732	7710 / 7744	1100
c7552	7419 / 7550	28.861	7414 / 7550	415.116	7150 / 7550	3600
Всего	31989 / 32496	92.739	31984 / 32496	493.916	31488 / 32496	10008

Выводы

В данной работе предлагается метод построения тестов, основанный на использовании непрерывной модели цифровой схемы. Полученные алгоритмы применены при построении и программой реализации автоматической системы поиска тестовых наборов для константных неисправностей комбинационных схем. Представлены результаты апробации разработанного программного комплекса на некоторых схемах набора ISCAS'85.

Библиографический список

1. **Капо, Н.** Test pattern generation for logic networks by real number logic simulation // AUTOTESTCONF'79. 1979. P. 168–178.
2. **Миндров, А.Е.** Использование непрерывной модели схемы для генерации тестов / А.Е. Миндров, Н.И. Кашеев // Simulation and CAD systems. 1989. P. 47–50.
3. **Кашеев, Н.И.** Использование непрерывной оптимизации для генерации тестовых наборов / Н.И. Кашеев, В.В. Белобородов // Системы обработки информации и управления. – Н. Новгород. 2001. Вып. 7. С. 21–25.
4. **Goel, P.** An implicit enumeration algorithm to generate tests for combinational logic circuits // IEEE Trans. on Computers. vol.C-31, P. 215–222, March 1981.
5. H. K. Lee and D. S. Ha. On the Generation of Test Patterns for Combinational Circuits, Technical Report No. 12_93, Department of Electrical Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1993
6. I. Rivin and S.T. Chakradhar. Discrete Test Generation by Continuous Methods // in Proc. 12th IEEE VLSI Test Symposium. P. 100–105, April 1994.

*Дата поступления
в редакцию 25.10.2015*

A. Mindrov¹, N. Kascheev², N. Putikhin², O. Timopheeva¹

TEST PATTERN GENERATION FOR DISCRETE CIRCUITS USING CONTINUOUS EXTENSIONS OF BOOLEAN FUNCTIONS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev¹,
National Investigate University Higher School of Economics, Nizhny Novgorod²

Purpose: Create a novel algorithm for gate-level test pattern generation for combinational circuits.

Design/methodology/approach: Test generation method for combinational circuits by means of continuous optimization is proposed. The classical ATPG methods target the problem at the logical level and use a discrete approach for simulation of the circuit behavior. This paper presents a new approach for circuit simulation using continuous set of values. In scope of this approach a continuous gate-level model of a circuit is introduced. Boolean functions of the gates are replaced with corresponding continuous analogues. The continuous objective function is constructed and then the problem of test pattern generation is solved by means of maximization of the objective function. Experimental results for ISCAS'85 benchmarks are presented to demonstrate the effectiveness of the method proposed.

Key words: ATPG, test generation, combinational circuits, continuous models.

УДК 519.72

Д.В. Поляков, А.И. Попов, С.А. Дузькрятченко

**СТРУКТУРА ДАННЫХ ДЛЯ СОЗДАНИЯ АССОЦИАТИВНОГО МАССИВА
НА ОСНОВЕ МОНОТОННЫХ ХЕШ-ФУНКЦИЙ**

Тамбовский государственный технический университет

Цель: Снижение сложности алгоритмов решения задач поиска ближайшего объекта, интервального поиска, путём разработки структуры данных для создания хеш-таблицы на основе монотонных хеш-функций.

Подход: Методика исследований основана на теории множеств, теории информационного поиска и теории алгоритмов.

Результаты: Предложена структура данных для создания ассоциативного массива на основе монотонных хеш-функций, алгоритмы работы с ней и проведён сравнительный анализ предложенной и существующих структур данных для хеш-таблиц.

Ограничения исследований: Исследования не затрагивают вопроса выбора хеш-функции, требуя от неё только монотонности. Также в работе очерчен круг необходимых в дальнейшем теоретических и экспериментальных исследований, для выбора параметров предложенной структуры и условий рехеширования.

Оригинальность / значение: Предлагаемая структура данных и алгоритмы работы с ней показывают хорошие результаты при решении задач о близости и интервального поиска в сравнении с другими обобщениями индексных массивов для хеш-таблиц.

Ключевые слова: хеш-таблица, хеш-функция, ассоциативный массив, задача поиска идентичных объектов, задача о близости, задача интервального поиска, интервальный поиск, информационный поиск.

Хранение и поиск информации, безусловно, являются ключевыми процессами любой информационной системы (ИС). Их эффективная реализация рассматривается в двух важнейших областях современной информатики: теории информационного поиска и теории баз данных. Однако задачи информационного поиска крайне разнообразны. Так, Гасанов и Кудрявцев в своей работе «Теория хранения и поиска информации» [1] выделяют базовые задачи информационного поиска. Они охарактеризованы наличием таких объектов, как «запрос», представляющий собой некий минимальный элемент, задающий семантику интересов пользователя; «запись» – поисковый образ данных, представленный обычно в виде множества полей базы данных, и «отображение», позволяющее определить подмножество записей, которое необходимо вернуть в ответ на соответствующий запрос. Таким образом, по Гасанову, задача информационного поиска, формализуется кортежем

$$\langle X, Y, \rho: X \rightarrow P(Y) \rangle, \quad (1)$$

где X – это универсум запросов, Y – множество записей, ρ – отображение, а $P(Y)$ – булеан (множество всех подмножеств) Y .

Вместе с тем, существует широкий класс задач, в котором само построение отображения ρ нетривиально. Например, задачи поиска текстовых сведений ставят вопрос о релевантности и пертинентности результатов информационного поиска. Под релевантностью понимается соответствие результатов информационного поиска запросу пользователя, а под пертинентностью – соответствие полученных результатов его информационной потребности [2]. Эти понятия были рассмотрены в работах Ландэ, Санарского, Безсудного, Робертсона и других [3-10]. По сути, определение множества документов, релевантных запросу пользователя или пертинентных его информационным потребностям, и есть построение отображения ρ .

На сегодняшний день разработано множество механизмов определения релевантности и пертинентности: начиная с расширенной булевой и пространственно-векторной моделей, разработанных Солтоном, Фоксом, Ву [11-14], заканчивая методами *text meaning*, компьютерной лингвистики и анализа коллокаций термов [15-21].

Однако при построении отображения ρ или же, имея его в тривиальном виде, мы

сталкиваемся с задачей информационного поиска (1). Существует её тривиальное решение, заключающееся в последовательном обходе множества Y и проверки каждого $y \in Y$ на принадлежность результату отображения запроса. Такой подход вполне применим, однако крайне неэффективен с позиции алгоритмической сложности решения задач информационного поиска.

Вместе с тем, даже несмотря на постоянный рост вычислительной мощности комплектов ИС, эффективные с позиции времени решения задач информационного поиска являются крайне важными для современных ИС. Это происходит из-за того, что увеличение объёмов обрабатываемой информации существенно опережает рост вычислительной мощности устройств. На сегодняшний день существует широкий класс задач, например, задачи мониторинга или учёта, предполагающих статистическую или интеллектуальную обработку накопленных данных и потому требующих выполнения огромного числа различного вида поисковых запросов. Кроме того, работа с данными зачастую происходит по сети, что приводит к дополнительным временным потерям. Такая ситуация свидетельствует о несомненной актуальности исследований в области структур данных и алгоритмов, позволяющих эффективно решать задачи информационного поиска вида (1).

Рассмотрим основные подвиды задачи (1) более подробно:

- задачи поиска с коротким ответом [1] – подвид задачи (1), в которых результат работы отображения ρ содержит ограниченное подмножество Y . Задачи с коротким ответом, в свою очередь, разделяются на следующие типы:

- а) задача поиска идентичных объектов, которая заключается в нахождении объекта идентичного объекту-запросу – она рассмотрена в работах Гасанова, Ландиса, Белобродского, Решетникова, Фергюсона и других [1, 22-26];

- б) задача о близости, заключающаяся в поиске на множестве с заданным линейным бинарным отношением порядка или предпорядка объекта, ближайшего к объекту-запросу и исследованная в работах Гасанова, Ювала, Фредмана, Брукхарда, Минского и других [1, 26-29];

- задача интервального поиска [1], заключающаяся в поиске на множестве с заданными линейными бинарными отношениями порядка или предпорядка элементов находящихся в интервале, определённом поисковым запросом. Эти задачи также были исследованы во многих работах [1, 30-38].

Для решения рассмотренных задач информационного поиска используется два вида структур данных с алгоритмами их обработки: деревья и хеш-таблицы [39, 40]. Под деревьями, в данном случае, понимаются связные ациклические графы. Такие структуры данных, повышающие скорость поиска хранимых в них элементов, называют ассоциативными массивами [39].

Хранение данных с помощью деревьев в большинстве случаев представлено такой структурой, как бинарное дерево и множеством обслуживающих его алгоритмов. Различные алгоритмы обработки бинарных деревьев определяют разные виды построенных на них ассоциативных массивов, таких как, например, AVL-деревья, вероятностные деревья, красно-чёрные деревья [39, 40].

Сложность поиска идентичных объектов и решения задачи о близости на эффективных бинарных деревьях как в среднем, так и в худшем случае, пропорциональна логарифму от количества хранимых записей. Вместе с тем, сложность задачи интервального поиска может меняться и, зачастую, довольно высока из-за того, что переход к следующему элементу является нетривиальной задачей с неконстантной (зависящей от количества хранимых записей) алгоритмической сложностью.

При использовании хеш-таблиц можно добиться константного (не зависящего от количества хранимых записей) в среднем и даже в худшем случае времени поиска элементов [39, 40]. Вместе с тем, в хеш-таблицах нетривиальной задачей является добавление элементов, а также решение задач о близости и интервального поиска. Кроме того, при организации хеш-таблиц, зачастую, неэффективно используется память.

В данной работе предлагается структура данных, которая, в случае использования её для построения хеш-таблицы, при определённых условиях позволит улучшить средние и худшие показатели скорости решения задач о близости и интервального поиска.

Сравнительный анализ хеш-таблиц

Идея хранения и поиска данных на основе хеш-таблицы состоит в том, чтобы построить отображение из множества Y на множество $\{n \in N_0 \mid n < m\}$, где m – некоторое число, ограничивающее область допустимых значений отображения, а N_0 – множество натуральных чисел и 0. Такое отображение называется хеш-функцией. Для рассматриваемого множества допустимых значений хеш-функции, ограниченного сверху натуральным числом m обозначим хеш-функцию как $h_m: Y \rightarrow \{n \in N_0 \mid n < m\}$.

В качестве структуры данных для создания хеш-таблицы обычно используется индексный массив или некоторое его обобщение.

Индексный массив представляет собой коллекцию записей расположенных в *RAM*-памяти последовательно, что позволяет, зная индекс, вычислить адрес записи, и в силу свойств *RAM*-памяти обратиться к записи за константное время.

Пусть A_m – индексный массив, а $A_m[i]$ – его i -тый элемент, $0 \leq i < m$. При добавлении записи в хеш-таблицу вычисляется с помощью хеш-функции индекс массива и соответствующему его элементу присваивается запись. То есть добавление записи $y \in Y$ выглядит как $A_m[h_m(y)] := y$, где символ $:=$ означает присваивание.

Тогда решение задачи поиска идентичного объекта будет тривиальным: если для нашего запроса $x \in X$ $A_m[h_m(x)] = x$, то элемент найден, в противном случае данный элемент в хеш-таблице отсутствует.

Для сравнительной оценки эффективности работы ассоциативных массивов исследуем потребляемые ими ресурсы, такие как сложность алгоритмов решения тех или иных задач и объём требуемой ассоциативному массиву памяти. Вместе с тем, оценка данных величин в абсолютных значениях крайне затруднительна, ибо они зависят от технических характеристик устройств, на которых запускаются алгоритмы, а для хеш-таблиц ещё и от самого множества записей – Y . В качестве способа оценки сложности алгоритмов и используемой хеш-таблицей памяти воспользуемся классическим подходом: оценкой асимптотической сложности с помощью O -нотации. Этот подход широко используется, а его адекватность хорошо исследована, например, в работах Кнута, Кормена, Лейзерсона, Ривеста, Штайна [39, 41] и других.

Вернёмся к рассмотрению хеш-таблиц. Из рассмотренных алгоритмов следует, что время поиска и добавления элемента в хеш-таблицу не зависит от количества хранимых элементов, то есть оно константно, что на языке O -нотации обозначается как $O(1)$. Это хорошая оценка, так как большинство ассоциативных массивов, работающих на основе деревьев, имеют асимптотическую сложность для тех же операций $O(\log n)$.

Вместе с тем, при решении задачи поиска идентичного объекта у хеш-таблиц имеют место два существенных недостатка:

- в массиве A_m присутствуют пустые ячейки, что в отличие от ассоциативных массивов на основе деревьев, приводит к существенному перерасходу памяти;
- существует возможность коллизий – ситуаций, когда две разных записи хеш-функция отображает в один и тот же индекс.

Стоит отметить, что зачастую, в случае использования хеш-функций с хорошими характеристиками, верно правило: чем меньше в хеш-таблице лишней памяти, тем больше в ней коллизий.

Для решения проблемы коллизий существует множество подходов. Рассмотрим подробнее основные [39, 40].

1. Линейное зондирование – метод, при котором в случае возникновения коллизии осуществляется линейный проход по массиву с поиском незанятых ячеек для вставки эле-

мента. Очевидным плюсом линейного зондирования является снижение объёма лишней памяти. Однако при поиске записи, в случае, если она была вставлена в массив путём линейного зондирования время работы алгоритма, которому в процессе поиска приходится повторять весь путь до искомого объекта, деградирует вплоть до $O(n)$. А $O(n)$ соответствует оценке простейшего алгоритма полного перебора.

2. Двойное хеширование – метод, который обрабатывает коллизии путём взятия новой хеш-функции, задающей циклический сдвиг по A_m . Поиск осуществляется путём того же циклического сдвига. Плюсы и минусы двойного хеширования аналогичны линейному зондированию, с той лишь разницей, что удачный выбор второй хеш-функции позволит уменьшить число повторных коллизий в сравнении с линейным зондированием. С другой стороны, применяемые на практике в качестве отображений для повторного хеширования, квадратичные функции [40] могут привести к тому, что добавление элемента будет невозможно, при наличии в A_m большого количества пустых ячеек. Такая ситуация может произойти из-за того, что циклический сдвиг в общем случае не будет обходить все элементы массива, в отличие от процесса поиска свободного места на основе линейного зондирования.

3. Использование вместо индексного массива некоторого его обобщения, которое позволяет в одну и ту же ячейку добавлять несколько записей. Такие обобщения используют следующие алгоритмы разрешения коллизий:

- метод цепочек переполнения, заключающийся в том, что каждый элемент A_m является началом линейного списка, в который и добавляются записи, попавшие в данную ячейку;
- подход, предлагающий использование бинарных деревьев вместо списков, что позволяет ускорить поиск среди элементов, попавших в одну ячейку;
- механизм разрешения коллизий, основанный на использовании для каждой ячейки своей отдельной хеш-таблицы.

Основным недостатком хеш-таблиц, рассмотренных в третьем пункте списка, при решении задачи поиска идентичного объекта является, то, что в отличие от линейного зондирования и двойного хеширования, в ассоциативном массиве хранится большой объём пустых ячеек. При этом, хотя поиск идентичного объекта в среднем осуществляется за $O(1)$, благодаря выбору хорошей хеш-функции, минимизирующей коллизии, в случае их возникновения решаемая задача сводится к поиску среди хранимых записей, составляющих с коллизией запросом. Сложность такого поиска определяется структурой данных, разрешающей коллизии (список/дерево/хеш-таблица) относительно мощности множества записей, составляющих коллизии с объектом-запросом. В дальнейшем такое множество будем называть *коллизийным доменом* запроса.

Пусть C – некоторый алгоритм разрешения коллизий. Тогда хеш-таблица задаётся набором элементов

$$\langle h_m, A_m, C \rangle. \quad (2)$$

Рассмотрим теперь эффективность представленных хеш-таблиц при решении двух оставшихся поисковых задач, исследуемых в данной работе.

В общем случае, хеш-таблицы не предназначены для решения задач о близости и интервального поиска. Действительно, хеш-функция, в общем случае, может отобразить близкие значения в произвольную пару индексов. Вместе с тем, для того, чтобы решать задачу о близости с помощью хеш-таблиц, достаточно потребовать от используемых в них хеш-функций монотонность.

Отметим, что требование монотонности к хеш-функциям при решении задач о близости или интервального поиска корректны, так как в формулировке обеих задач присутствует условие наличия отношения порядка или предпорядка на множестве Y . Более того, в рамках информатики данное условие никак не ограничивает общность поисковой задачи в силу того, что на множестве любых, хранящихся в памяти компьютера, объектов можно установить отношение порядка. Действительно, если даже объекты не имеют естественного подхода к

установлению такого бинарного отношения, как, например, лексикографический порядок на множестве строк или порядок, задаваемый отношениями «<<» и «>>», на любом числовом множестве, они всё равно представляют собой битовые последовательности, которые можно интерпретировать как числа в двоичной системе счисления.

На сегодняшний день предложено и исследовано большое количество монотонных хеш-функций. Эти исследования представлены в работах Гасанова, Белазегуа, Болди, Дрососа и других [1, 42-44]. Кроме того, монотонные хеш-функции представлены и в работах [45-48], например, в статье «Генератор монотонных хеш-функций для ассоциативного масива» был предложен метод получения хеш-функции на основе генератора с использованием произвольных непрерывных строго возрастающих биекций из множества хранимых записей на отрезок $[0, 1]$ [48].

Для оценки сложности решения задачи о близости и интервального поиска сформулируем некоторые определения и утверждение, докажем его, а также введём в рассмотрение необходимые величины.

Пусть имеем задачу информационного поиска вида (1), которая решается посредством хеш-таблицы вида (2). Пусть $|Y| = n$, то есть n определяет количество хранимых записей.

Активной вершиной назовём элемент $Am[i]$, если $(\exists y \in Y)(h_m(y) = i)$. Другими словами, активными вершинами будем называть все ячейки массива Am , в которые попадают записи Y при построении отображения этих записей с помощью хеш-функции.

Пассивной вершиной назовём элемент $Am[i]$, если $(\forall y \in Y)(h_m(y) \neq i)$. Другими словами пассивными вершинами будем называть все ячейки массива Am , в которые в результате построения отображения с помощью хеш-функции для элементов множества Y не попало ни одной записи.

Пустыми вершинами назовём все ячейки массива Am , которые не хранят в себе записи. *Заполненными вершинами* назовём все ячейки массива Am , которые хранят в себе запись и не являются активными.

Отметим, что в данных ранее определениях ячейки массива Am названы вершинами. Это было из-за того, что предлагаемую в данной статье структуру данных удобно рассматривать как граф, частью вершин которого будут ячейки массива Am . В дальнейшем будем называть как вершинами, так и ячейками в зависимости от контекста.

Может показаться, что понятия пустой и пассивной вершины синонимичны, однако это не так. Пустые вершины, безусловно, всегда являются пассивными. В то время как пассивные вершины могут содержать записи, попавшие туда в результате работы алгоритма разрешения коллизий (C). Так, если C представляет собой методы двойного хеширования или линейного зондирования, множества пассивных и пустых вершин не будут совпадать в случае появления и обработки хотя бы одной коллизии. Вместе с тем, для группы методов разрешения коллизий, использующих дополнительные структуры, таких, например, как метод цепочек переполнения, множества пассивных и пустых вершин всегда совпадают.

Утверждение: из монотонности хеш-функции следует, что ближайшая к искомой (x) запись попала либо в ту же вершину, что и x , либо в одну из соседних по Am активных вершин. Докажем утверждение. Предположим противное: ближайшая запись к запросу x не попала ни в ячейку $Am[h_m(x)]$ ни в соседние к ней активные вершины. Представим соседние непустые элементы как $Am[h_m(x) - \delta_1]$ и $Am[h_m(x) + \delta_2]$, где δ_1 и δ_2 – некоторые натуральные числа. Обозначим искомую запись $y_x, y_x \in Y$. Тогда

$$h_m(y_x) \in \overline{0, h_m(x) - \delta_1 - 1 \cup h_m(x) + \delta_2 + 1, m}. \quad (3)$$

Действительно, в противном случае, если бы $h_m(y_x) \in \overline{h_m(x) - \delta_1, h_m(x) + \delta_2}$, запись y_x попала бы в $Am[h_m(x)]$ или $Am[h_m(x) - \delta_1]$ или $Am[h_m(x) + \delta_2]$, что невозможно из-за нашего

предположения, либо в пассивные вершины между $A_m[h_m(x)]$ и $A_m[h_m(x) - \delta_1]$ или $A_m[h_m(x)]$ и $A_m[h_m(x) + \delta_2]$, а это невозможно по определению пассивных вершин.

Разобьём рассмотрение условия (3) на два случая и покажем ошибочность изначального предположения в обоих.

1. $h_m(y_x) \in \overline{0, h_m(x) - \delta_1 - 1}$. Рассмотрим произвольный $y^* \in Y$, такой что $h_m(y^*) = h_m(x) - \delta_1$. Хотя бы одна такая запись точно существует в силу того, что $A_m[h_m(x) - \delta_1]$ активная вершина по построению. Относительно y^* очевидно неравенство

$$h_m(y_x) < h_m(y^*) < h_m(x).$$

Тогда в силу монотонности $h_m(\cdot)$ получим

$$y_x < y^* < x,$$

что противоречит нашему предположению о том, что y_x – ближайшая запись к искомому объекту x .

2. $h_m(y_x) \in \overline{h_m(x) + \delta_2 + 1, m}$. Рассмотрим произвольный $y^* \in Y$, такой, что $h_m(y^*) = h_m(x) + \delta_2$. Хотя бы одна такая запись точно существует в силу того, что $A_m[h_m(x) + \delta_2]$ активная вершина по построению. Относительно y^* очевидно неравенство

$$h_m(x) < h_m(y^*) < h_m(y_x).$$

Тогда в силу монотонности $h_m(\cdot)$ получим

$$x < y^* < y_x,$$

что противоречит нашему предположению о том, что y_x – ближайшая запись к искомому объекту x .

Из рассмотренных случаев, очевидно, что при выполнении условия (3) неизбежно получаем противоречие, а значит наше предположение неверно. Утверждение доказано.

Так как в данной работе не рассматриваются конкретные реализации хеш-функций и статистические характеристики хранимых элементов, для оценки сложности алгоритмов решения задач о близости и интервального поиска исследуемыми хеш-таблицами введём величины:

- k – математическое ожидание количества коллизий в одном элементе массива;
- l – средняя длина непрерывной последовательности пустых вершин;
- c – число элементов в искомом интервале;
- m_k – математическое ожидание числа элементов хеш-таблицы, использующейся для разрешения коллизий.

Легко заметить, что методы линейного зондирования и двойного хеширования не очень подходят для решения задачи о близости, так как записи каждого коллизийного домена могут оказаться в любом элементе A_m . Вследствие этого, поиск ближайшего элемента можно осуществить лишь полным обходом массива A_m за $O(m)$, что хуже, чем поиск по линейному списку записей за $O(n)$, так как для хеш-таблиц с рассматриваемыми алгоритмами разрешения коллизий $n \leq m$.

Аналогично дело обстоит и с интервальным поиском, который можно осуществить лишь полным обходом A_m . Средний и худший случаи решения задачи о близости в данном случае совпадают.

В случаях разрешения коллизий методами линейного зондирования и двойного хеширования все n записей хранятся в массиве A_m . Отсюда легко оценить перерасход памяти как $O(m-n)$.

В научной литературе [39] отмечается, что «при вполне обоснованных допущениях математическое ожидание поиска элемента в хеш-таблице составляет $O(1)$ ». В данном случае, под «вполне обоснованными допущениями» понимается эффективность h_m и величина

массива m . Как уже отмечалось ранее, не выбор h_m , не величина массива A_m в рамках данной работы не рассматривается. Потому и сравнение хеш-таблиц по среднему времени поиска идентичного объекта проводиться не будет, так как оно зависит лишь от выбора m и h_m .

Рассмотрим теперь эффективность работы хеш-таблиц, которые используют обобщения индексных массивов, позволяющие добавлять в одну и ту же ячейку массива A_m несколько записей, благодаря тому, что за этой самой ячейкой скрывается другая структура данных. Назовём эту структуру вспомогательной и введём для её оценки величину $T(k)$, которая определяет сложность разрешения задачи о близости в соответствующей структуре. Так, при использовании метода цепочек переполнения вспомогательной структурой является неупорядоченный список и $T(k) = O(k)$. Если же в качестве такой структуры выбрано бинарное дерево, то $T(k) = O(\log(k))$.

Решение задач о близости для рассматриваемых хеш-таблиц в силу доказанного утверждения равносильно получению трёх ячеек: основной за $O(1)$, соседних активных ячеек, путём обхода A_m за $O(l)$; и решению для каждой из полученных ячеек задачи о близости за $T(k)$. Таким образом, оценим сложность решения задачи о близости как $O(l) + T(k)$.

Решение задачи интервального поиска состоит из решения двух задач о близости, соответствующих левой и правой границам интервала и обходу хеш-таблицы. Так как по итогам обхода будет найдено c значений, количество активных ячеек A_m в интервале будет равно $\frac{c}{k}$. Тогда, для решения задачи интервального поиска необходимо обойти $\frac{c}{k} \cdot l$ ячеек A_m и $\frac{c}{k}$ коллизионных домена из k элементов.

Таким образом, оценка сложности решения задачи интервального поиска (T_i) для хеш-таблиц, которые используют обобщения индексных массивов, позволяющие добавлять в одну и ту же ячейку массива A_m несколько записей, имеет вид

$$T_i = O(l) + T(k) + O\left(\frac{c}{k} \cdot l\right) + O\left(\frac{c}{k} \cdot t_k\right),$$

где t_k - сложность обхода коллизионного домена из k элементов при заданном методе разрешения коллизий, или

$$T_i = O(l) + T(k) + O\left(\frac{c}{k} \cdot (l + t_k)\right). \quad (4)$$

Так как в случае исследуемой группы методов разрешения коллизий – все элементы коллизионного домена хранятся в отдельных структурах данных, лишнюю память оценим как общее число вершин за вычетом активных вершин, то есть объём неиспользуемой памяти оценивается как $O\left(m - \frac{n}{k}\right)$. А в случае, когда дополнительная структура представляет собой хеш-таблицу, тратится ещё больше памяти, так как каждая дополнительная хеш-таблица имеет пустые ячейки. В среднем каждая вспомогательная хеш-таблица имеет $m_k - k$ незанятых ячеек, в то время как общее число вспомогательных хеш-таблиц оценивается как $\frac{n}{k}$. С учётом ячеек, оставшихся свободными в основной таблице, оценка неиспользуемой памяти принимает вид: $O\left(m - \frac{n}{k} + (m_k - k) \cdot \frac{n}{k}\right)$.

Однако, приняв во внимание то, что $(m_k - k)$ в среднем не может быть меньше 1, но и асимптотически больше k . Это означает, что асимптотическая оценка объёма неиспользуемой памяти корректно оценить как $O(m)$.

Полученные оценки асимптотической сложности алгоритмов и требуемой памяти для различных способов разрешения коллизий приведены в табл. 1.

Таблица 1

Метод разрешения коллизии	Средняя сложность решения		Средний перерасход памяти
	Задача о близости	Интервальный поиск	
Линейное зондирование	$O(m)$	$O(m)$	$O(m-n)$
Двойное хеширование	$O(m)$	$O(m)$	$O(m-n)$
Цепочки переполнения	$O(l+k)$	$O\left(\left(\frac{c}{k}+1\right)\cdot(l+k)\right)$	$O\left(m-\frac{n}{k}\right)$
Бинарные Деревья	$O(l+\log(k))$	$O\left(\left(\frac{c}{k}+1\right)\cdot(l+\log(k))\right)$	$O\left(m-\frac{n}{k}\right)$
Вторичные хеш-таблицы	$O(l)$	$O\left(\left(\frac{c}{k}+1\right)\cdot(l+m_k)\right)$	$O(m)$

Предлагаемая структура данных для хеш-таблицы

Базовым элементом предлагаемой структуры является классический узел двусвязных списков. Он представляет собой объединение хранимой записи и двух указателей на такие же узлы. Произвольный узел a_i формализуем в виде

$$a_i = \langle l_i, y_i, r_i \rangle, \tag{5}$$

где l_i и r_i – указатели; y_i – запись – элемент множества Y .

Так как указатели позволяют реализовать связи между узлами структуры данных, образуя, по сути, некоторый граф, будем в дальнейшем называть узлы вида (5) вершинами.

Предлагаемая структура состоит из связанных между собой посредством указателей вершин вида (5). Построим массив A_m из данных вершин и назовём эти вершины *базовыми*. Остальные, не принадлежащие A_m вершины будем называть *дополнительными*.



Рис. 1. Условные обозначения вершин разных видов

Базовую активную вершину a_i назовём *индексной*, если $l_i = NULL$ – специальное значение, которое свидетельствует о том, что в указателе не содержится адреса объекта, то есть

l_i ни на что не указывает. В противном случае базовую активную вершину a_i назовём *списочной*. Списочная вершина представляет собой первый элемент циклического двусвязного списка. В предлагаемой структуре данных списочные вершины будут пересечениями циклических двусвязных списков и индексного массива A_m .

Для удобства представления предлагаемой структуры данных в виде графа введём некоторые обозначения. На рис. 1 изображены условные обозначения разных видов вершин.

Пусть a_i – некоторая активная вершина, а a_j – соседняя справа активная вершина. Вершину a_i и все пассивные вершины A_m , расположенные между a_i и a_j назовём *подмассивом* вершины a_i . Возможно, что две активные вершины расположены непосредственно рядом друг с другом. Тогда считаем что подмассив левой активной вершины пустой. Пример пустого и непустого подмассивов изображены на рис. 2.

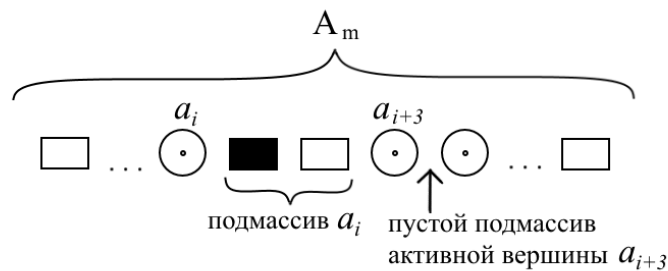


Рис. 2. Виды подмассивов

В качестве базовой структуры для хеш-таблицы в данной работе предлагается граф с вершинами, представленными на рис. 1 и обладающий следующими свойствами:

- любая пассивная вершина a_i с помощью l_i указывает на ближайшую левую активную, а с помощью r_i на ближайшую правую активную;
- в случае отсутствия коллизий дополнительные вершины в структуре данных отсутствуют, все пассивные вершины – пустые, активные – индексные и с помощью r_i указывают на самих себя;
- в случае возникновения коллизий, происходят изменения на основании алгоритма A , который будет рассмотрен в данной работе далее.

Отметим, что любая хеш-таблица имеет период работы без коллизий, к примеру, при добавлении одного элемента, поэтому задание структуры данных с помощью перечисленных трёх свойств корректно.

Кроме того, очевидно, что для того, чтобы выполнялись условия – необходимо наличие у каждой пассивной вершины левой и правой активных вершин. Поэтому, при практической реализации хеш-таблицы рекомендуется искусственно добавить два объекта – активные вершины – в начало и конец A_m . Такая практика, кроме того, что позволит выполнить требуемые условия, ещё и удобна с точки зрения выявления первого и последнего элементов структуры данных.

Пример предлагаемой структуры данных до появления коллизий представлен на рис. 3.

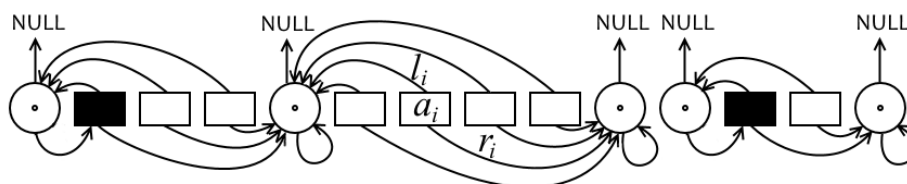


Рис. 3. Пример предлагаемой структуры данных до появления коллизий

Для удобства визуализации предлагаемой структуры посредством графов указатели l_i произвольной базовой вершины a_i будут формализованы стрелками, располагающимися над последовательностью вершин A_m , а указатели r_i стрелками, находящимися под ней.

Рассмотрим вспомогательную процедуру, которая по индексу вершины определяет её тип. Пусть стоит задача найти тип некоторой вершины $a_i = \langle l_i, y_i, r_i \rangle$. Представим алгоритм данной процедуры.

Шаг 1. Проверить содержит ли l_i константу $NULL$. Если содержит, то a_i – индексная вершина и конец алгоритма.

Шаг 2. Проверить указывает ли l_i на базовый элемент. Если указывает, то a_i – пассивная вершина. В противном случае a_i – списочная вершина. Конец алгоритма..

Для удобства назовём процедуру определения типа вершины на основе рассмотренного алгоритма H .

Отметим, что процедуры H достаточно для определения пустой вершины. Действительно, пустая вершина по определению является пассивной и не содержит записи. С помощью процедуры H определяем, что вершина пассивная и проверяем: есть ли в ней запись. На практике хеш-таблицы реализуются таким образом, что всегда можно определить, содержит ли вершина запись. Это может быть реализовано с помощью специальной зарезервированной записи, означающей отсутствие настоящей, либо использованием в качестве y_i указателей или ссылок.

Кроме того, важно отметить, что шаг 2 осуществляется за константное время. Действительно, если у нас есть массив, значит, мы имеем адрес его первого элемента и размер массива. Эти величины и позволяют составить неравенство, определяющее является ли рассматриваемая вершина базовой, то есть, по определению, принадлежащей массиву.

В дальнейшем для простоты будет указано, что при необходимости определения типа вершины в различных алгоритмах будет использоваться процедура H . Вместе с тем, очевидно, что до внесения каких-либо изменений в отношении любой вершины процедура H должна быть применена единожды. В рамках парадигмы объектно-ориентированного программирования это реализуется крайне просто. Рассматриваемая процедура реализована в виде метода итератора, который кэширует полученное значение и при повторном вызове не проводит аналогичные действия, а просто возвращает ранее сохранённый тип вершины.

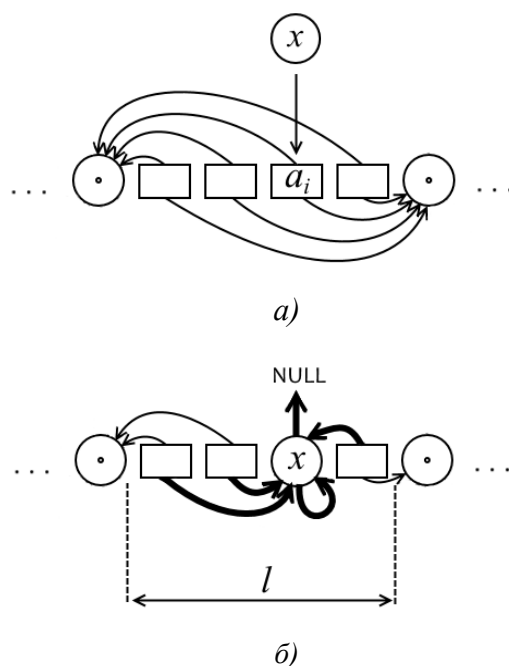


Рис. 4. Добавление нового элемента в структуру данных, не вызывающее коллизии:

a – изначальный вид, необходимо добавить x в a_i ;

$б$ – вид после добавления, жирными линиями выделены новые связи

Рассмотрим процесс добавления записи в вершину в случае отсутствия коллизии. Очевидно, что не вызвать коллизию может только добавление в пустую вершину. Данный процесс представлен на рис. 4.

Изменение структуры графа, представленное на рис. 4, с алгоритмической точки зрения тривиально и имеет асимптотическую сложность $O(l)$. Действительно, пустая вершина является пассивной, а значит, согласно свойствам исследуемого графа, содержит в себе указатели на ближайшие левую и правую активные вершины. А для представленного на рис. 4 изменения структуры графа достаточно пройти по массиву между двумя этими активными вершинами и соответствующим образом поменять связи. Средняя асимптотическая сложность вытекает из средней величины массива между двумя активными вершинами, которая ранее была обозначена l .

Алгоритмы разрешения коллизий на предлагаемой структуре данных

Рассмотрим теперь задачу разрешения коллизий на предлагаемой структуре данных. В общем виде алгоритм разрешения коллизий A , заявленный в свойствах рассматриваемого графа, состоит из двух вспомогательных алгоритмов: A_1 и A_2 . Алгоритм A_1 используется для разрешения коллизий при попадании новой записи в активную вершину, а алгоритм A_2 решает аналогичную задачу, при попадании новой записи в заполненную вершину. Алгоритм A заключается в процедуре H и запуске алгоритма A_1 , если по итогам H выяснилось, что вершина активная (индексная или списочная), либо запуске алгоритма A_2 , если вершина пассивная.

На данном этапе рассмотрения предлагаемой структуры данных может сложиться неверное мнение, что для неё множества пустых и пассивных вершин совпадает. На самом деле заполненные пассивные вершины появляются в результате коллизий на активных вершинах. Появление заполненных пассивных вершин, в свою очередь, приводит к появлению на них коллизий. Поэтому целесообразно рассмотреть сначала разрешение коллизий на активных вершинах (алгоритм A_1), а уже потом исследовать аналогичные алгоритмы на пассивных вершинах (алгоритм A_2).

Для начала наглядно представим алгоритм разрешения коллизий A_1 . На рис. 5 представлены различные случаи разрешения коллизий в предлагаемом графе с помощью алгоритма A_1 . Для предотвращения загромождения иллюстрации лишними построениями показаны связи только активных вершин.

Формализуем строго алгоритм A_1 . Пусть a_i – активная вершина, в которую по результатам работы хеш-функции необходимо поместить некоторый объект x . Рассмотрим алгоритм A_1 по разрешению коллизии в вершине a_i .

Шаг 1. Если подмассив a_i не содержит пустые вершины перейти к шагу 3.

Шаг 2. Добавить x в подмассив a_i с сохранением порядка элементов в нём. В качестве новой вершины взять первую пустую, следующую за непустыми вершинами подмассива. Сдвинуть в A_m указатель r_i на одну вершину вправо, если a_i – индексная вершина. Конец алгоритма.

Шаг 3. Присвоить значение последней вершины подмассива a_i в переменную u . Если $x > u$, то поменять их местами. Пометить последнюю вершину подмассива a_i как пустую. Сдвинуть в A_m указатель r_i на одну вершину влево, если a_i – индексная вершина.

Шаг 4. Если вершина a_i индексная, то преобразовать её в списочную.

Шаг 5. Добавить u в циклический список при списочной вершине a_i , с сохранением упорядоченности элементов списка и перейти к шагу 2.

По сути, алгоритм разрешения коллизий A_1 предлагает сохранять все элементы коллизийного домена в подмассиве соответствующей активной вершины в упорядоченном виде. А когда пустые вершины подмассива заканчиваются – активная вершина из индексной преобразуется в списочную, представляющую собой начало двусвязного циклического списка. При этом новые элементы коллизийного домена добавляются в упорядоченном виде уже в этот список.

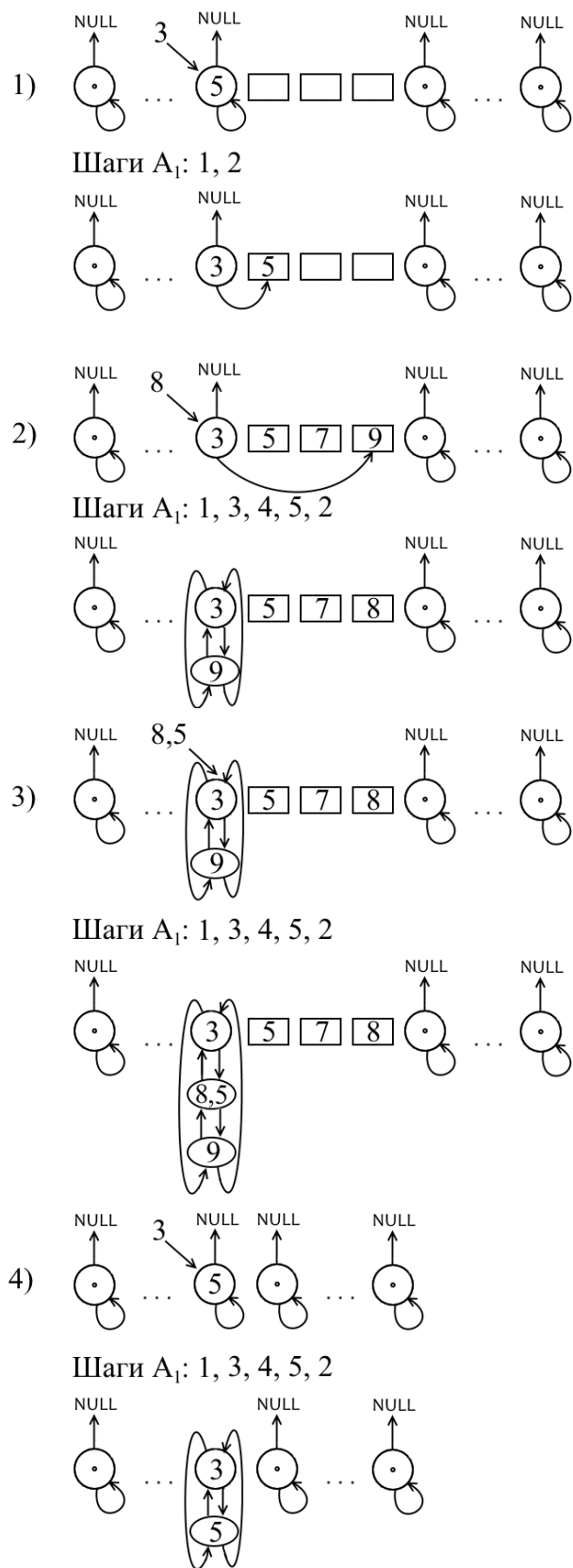


Рис. 5. Примеры разрешения коллизий с помощью алгоритма A_1

По итогам рассмотрения A_1 становится понятным, что предлагаемая структура данных представляет собой индексный массив, пересекающийся в списочных вершинах с циклическим двунаправленным списком.

Рассмотрим подробнее алгоритм A_1 , пояснив, возможно неочевидные, операции и проведя оценку его асимптотической сложности.

Пусть a_j – ближайшая справа к a_i активная вершина. Рассмотрим вспомогательное утверждение о том, что зная a_i легко найти и a_j (здесь и далее под понятиями «знать вершину» и «найти вершину» будут пониматься соответствующие операции с её адресом). Действительно, для этого достаточно применить процедуру H к стоящей в A_m справа от a_i вершине. Если эта вершина активная, то она и есть a_j , в противном случае данная вершина является пассивной, а, значит, её правый указатель r_{i+1} содержит адрес a_j .

На шаге 1 осуществляется проверка наличия непустых вершин в подмассиве a_i . Из алгоритма A_1 следует, что, если вершина a_i индексная, то r_i – её правый указатель – содержит адрес последней заполненной вершины подмассива a_i . Поэтому достаточно проверить следующую вершину в A_m за последней заполненной. Если эта вершина a_j , то подмассив a_i не содержит пустых элементов. В том случае, если a_i – списочная вершина, то также очевидно, что её подмассив не содержит пустых элементов. Заметим, что процедура H , поиск ближайшей справа активной вершины и все операции шага 1 происходят за константное время.

На шаге 2 производится операция добавления элемента в упорядоченный массив с сохранением порядка. Примем среднее количество заполненных вершин в подмассиве p , тогда асимптотическая сложность данной операции равна $O(p)$. Отметим, что $p \leq l$.

Все операции шага 3 стандартны и выполняются за константное время. Тем не менее, может показаться неочевидным то, что известна последняя вершина подмассива вершины a_i . Вместе с тем, переход к шагу 3 осуществляется, только если в подмассиве нет пустых ячеек. А это значит, что последняя ячейка подмассива вершины a_i находится слева в A_m от вершины a_j .

Шаги 4 и 5 содержат единственную операцию с неконстантной асимптотической сложностью – добавление элемента в упорядоченный список с сохранением порядка. Если положить среднюю длину списка s , то такая операция асимптотически оценивается как $O(s)$.

На основе проведённого анализа алгоритма A_1 , легко видеть, что в нём присутствуют только две операции, осуществляемые за неконстантное время. Это добавление элемента в список, имеющее сложность $O(s)$ и добавление элемента в массив со сложностью $O(p)$. Таким образом, асимптотическая сложность рассматриваемого алгоритма (T_{A_1}) имеет вид:

$$T_{A_1} = O(p) + O(s) = O(p + s) = O(k).$$

Рассмотрим второй алгоритм разрешения коллизий – A_2 , используемый, в случае если коллизия возникла в пассивной заполненной вершине.

Пусть a_i – пассивная заполненная вершина, в которую по результатам работы хеш-функции необходимо поместить некоторый объект x . Отметим, что a_i входит в подмассив ближайшей левой активной вершины a_{left} . Данный подмассив ограничен ближайшей активной вершиной справа как к a_i , так и к a_{left} . Назовём эту вершину a_{right} . Согласно второму свойству предлагаемой структуры данных именно на a_{left} и a_{right} указывают l_i и r_i соответственно. Ранее мы показали, как, зная a_{left} и a_{right} , найти первую пустую вершину или показать, что таковых, в исследуемом подмассиве, нет. Нахождение первой пустой вершины, означает нахождение последней заполненной, так как она, по факту, является предыдущей. Назовём последнюю заполненную вершину рассматриваемого подмассива a_{end} . Так как a_{left} , a_{right} и $a_{end} \in A_m$ и наименования $left$, $right$ и end до сих пор были связаны только с семантикой и никак не привязаны к месторасположению вершин, положим без ограничения общности, что $a_{left} = A_m[left]$, $a_{right} = A_m[right]$ и $a_{end} = A_m[end]$.

Рассмотрим алгоритм A_2 по разрешению коллизии в вершине a_i .

Шаг 1. Находим $left$, $right$ и end .

Шаг 2. Создаём связный список tmp вершин вида (5) из $end - left + 1$ элементов.

Шаг 3. Проходим параллельно массив A_m , начиная с $A_m[left]$ и заканчивая $A_m[end]$, и список tmp , присваивая соответствующий элемент массива списку и помечая элементы массива как пустые.

Шаг 4. Если вершина a_{left} индексная, то преобразовать её в списочную.

Шаг 5. Вставить tmp в циклический двусвязный список при вершине a_{left} .

Шаг 6. Провести процедуру вставки объекта x без возникновения коллизии. Конец алгоритма.

На рис. 6 изображён пример разрешения коллизий в предлагаемой структуре данных с помощью алгоритма A_2 . Для предотвращения загромождения иллюстрации лишними построениями показаны связи только активных вершин.

Заметим, что асимптотическая сложность всех операций кроме шагов 3 и 6 $O(1)$. Так, значения вершин списка tmp после копирования их из массива упорядочены и наибольшая из них меньше наименьшего значения в циклическом списке при a_{left} , если такой существовал.

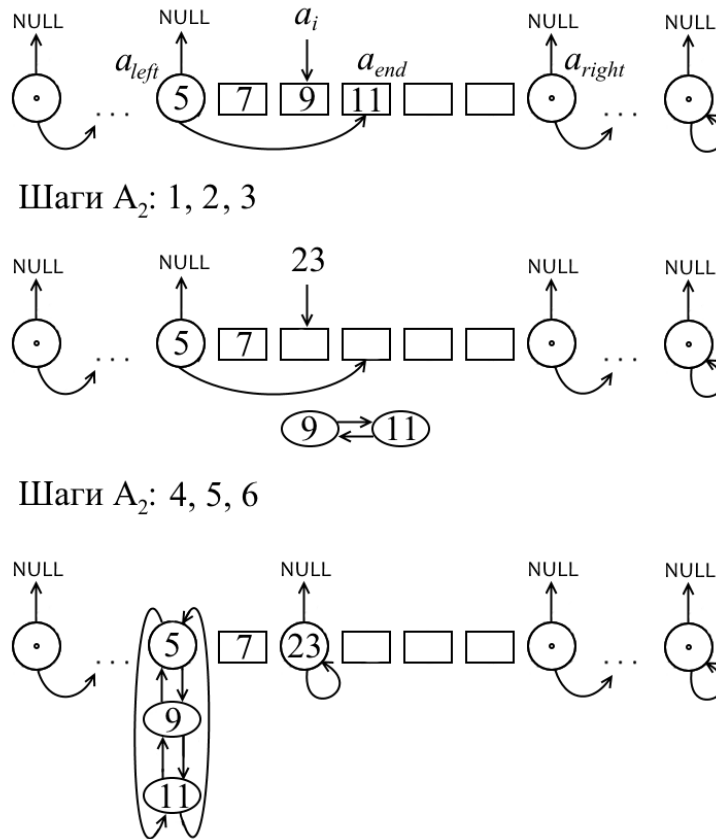


Рис. 6. Разрешение коллизий на основе алгоритма A_2 в случае, когда a_{left} – индексная вершина

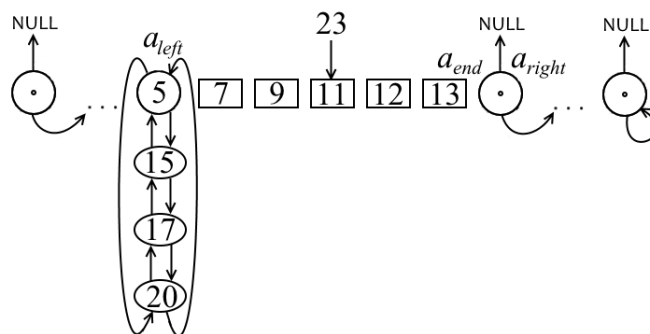
Это неравенство имеет место из-за способа заполнения подмассива и списка при вершине a_{left} . Поэтому вставка списка tmp в циклический двусвязный список осуществляется путём перераспределения нескольких связей, а значит за константное время.

Асимптотическая сложность выполнения шага 3 равна $O(l)$, так как, по своей сути, рассматриваемый этап алгоритма представляет собой проход по подмассиву некоторой активной вершины, со средней длиной, равной l .

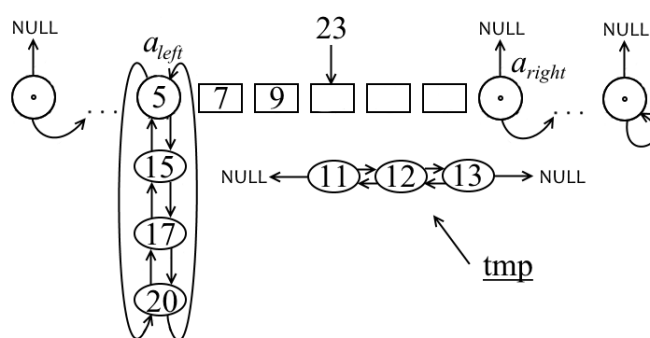
Заметим, что на рис. 6 изображён пример разрешения коллизий с помощью алгоритма A_2 только в случае, когда коллизия произошла в подмассиве индексной вершины. На рис. 7 изображён пример разрешения коллизии с помощью алгоритма A_2 , при условии, что a_{left} – списочная вершина.

Отметим, что шаг 6 не продемонстрирован на рис. 6 и рис. 7 в силу того, что мы отказались от построения связей пассивных вершин. Вместе с тем, изменения структуры данных на шаге 6 алгоритма A_2 продемонстрированы на рис. 4 и оценка асимптотической сложности данной процедуры $O(l)$.

Таким образом, асимптотическая сложность рассматриваемого алгоритма (T_{A_2}) имеет вид: $T_{A_2} = O(1) + O(1) + O(l) + O(1) + O(1) + O(l) = O(l)$.



Шаги A_2 : 1, 2, 3



Шаги A_2 : 4, 5, 6

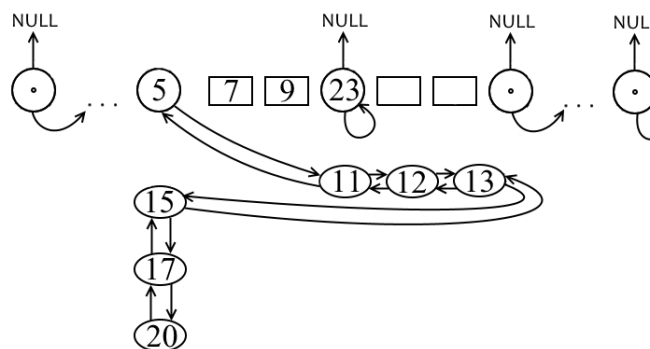


Рис. 7. Разрешение коллизий с помощью алгоритма A_2 в случае, когда a_{left} – списочная вершина

Очевидно, что для оценки асимптотической сложности алгоритма A , представляющего собой выполнение одного из алгоритмов A_1 или A_2 , необходимо определить корреляцию между l и k , а также найти вероятность возникновения коллизии в активной и пассивной вершинах. Это возможно лишь при условии выбора конкретного вида h_m , поэтому в данной статье ограничимся оценкой сложности алгоритма разрешения коллизий (T_A) в виде $T_A = O(\max\{k, l\})$.

Решение задач информационного поиска на предлагаемой структуре данных

Рассмотрим алгоритм поиска идентичных объектов на исследуемом графе. Пусть имеем задачу информационного поиска вида (1). К хеш-таблице был послан запрос $x \in X$. Найдём запись y из хеш-таблице, идентичную x .

Шаг 1. Вычисляем $i = h_m(x)$. Осуществляем процедуру H для вершины $A_m[i]$. Если $A_m[i]$ – пассивная вершина, то искомой записи в таблице нет и конец алгоритма.

Шаг 2. Если вершина $A_m[i]$ индексная, то переходим к шагу 5.

Шаг 3. Проверяем: лежит ли x в отрезке, задаваемом первым и последним элементом списка. Если x больше максимального элемента списка, то искомой записи в таблице нет и конец алгоритма, а если меньше минимального, то переходим к шагу 5.

Шаг 4. Производим поиск по двусвязному циклическому списку при вершине $A_m[i]$. В результате объект может быть найден или не найден. Результат считается результатом поиска x в Y . Конец алгоритма.

Шаг 5. Производим поиск по индексному массиву – части состоящей из заполненных элементов подмассива $A_m[i]$. Результат считается результатом поиска x в Y . Конец алгоритма.

Единственные шаги рассматриваемого алгоритма, осуществляющиеся за неконстантное время – это шаги 4 и 5. Заметим, что в результате работы алгоритма выполняется только один из этих шагов. Число вершин циклических двусвязных списков в предлагаемой структуре данных в среднем было обозначено s , тогда асимптотическая сложность шага 5 равна $O(s)$. Среднее количество заполненных вершин в подмассиве было обозначено p , тогда асимптотическая сложность шага 5 равна $O(\log(p))$.

В среднем время поиска на хеш-таблице константно. Это происходит благодаря тому, что при выборе хорошей хеш-функции мощность абсолютного большинства коллизионных доменов равна 1. Это означало бы, что $s = 0$, а $p = k = 1$.

Вместе с тем, если сравнить алгоритм поиска в предлагаемой структуре данных с алгоритмами поиска при линейном зондировании, двойном хешировании, цепочками переполнения лишь в случаях возникновения коллизий, то становится ясно, что названные виды хеш-таблиц имеют сложность поиска искомой вершины в коллизионном домене со сложностью как минимум $O(k)$. В то время как предлагаемая структура обеспечивает частично логарифмический поиск по коллизионному домену. Если же разрешение коллизий происходит на основе бинарных деревьев и дополнительных хеш-таблиц, то сложность поиска в коллизионном домене будет логарифмической и константной соответственно. Эти показатели лучше, чем у предлагаемой структуры данных.

Заметим, что вместо циклических двусвязных списков можно использовать бинарные деревья, составленные из тех же узлов вида (5). При таком построении скорость поиска не будет падать ниже логарифмической относительно мощности коллизионного домена. Однако подобная модернизация усложнит процедуру разрешения коллизий в пассивных вершинах. Например, в случае, изображённом на последнем графе (рис. 7), осуществлённая там операция добавления списка была бы гораздо сложнее. Также сложнее были бы операции обхода хеш-таблицы. С другой стороны, замена циклического двусвязного списка на дерево может существенно ускорить все операции поиска, на хранимой в списках части коллизионного домена. В дальнейших работах планируется исследование аналогичных структур данных, использующих вместо циклического двусвязного списка различного рода бинарные деревья. А в данной работе ограничимся тем, что выбор хорошей хеш-функции приведёт к отсутствию слишком длинных списков.

Рассмотрим теперь решение задачи о близости на предлагаемой структуре данных. Пусть имеем задачу информационного поиска вида (1). К хеш-таблице был послан запрос $x \in X$. Требуется найти запись, ближайшую к запросу.

Шаг 1. Вычисляем $i = h_m(x)$. Осуществляем процедуру H для вершины $A_m[i]$. Если $A_m[i]$ – пассивная вершина, то переходим к шагу 6.

Шаг 2. Если x меньше минимального элемента коллизионного домена $A_m[i]$, то переходим к шагу 7. А если x больше максимального элемента коллизионного домена $A_m[i]$, то переходим к шагу 8.

Шаг 2. Если вершина $A_m[i]$ индексная, то переходим к шагу 4.

Шаг 3. Осуществляем решение задачи о близости на циклическом двусвязном упорядоченном списке при вершине $A_m[i]$.

Шаг 4. Осуществляем решение задачи о близости на индексном массиве – части состоящей из заполненных элементов подмассива $A_m[i]$.

Шаг 5. Выбираем ближайший элемент к x из полученных в результате шага 3, если он имел место, и шага 4. Он и является решением задачи о близости. Конец алгоритма.

Шаг 6. Находим ближайшие к $A_m[i]$ слева и справа активные вершины: $A_m[left]$ и $A_m[right]$ соответственно. Сравниваем максимальный элемент коллизионного домена $A_m[left]$ и минимальный $A_m[right]$ по критерию близости с x . Ближайший из них и есть решение поставленной задачи о близости. Конец алгоритма.

Шаг 7. Находим ближайшую слева активную вершину $A_m[left]$. Решением задачи будет ближайший к x элемент из максимального элемента $A_m[left]$ и минимального элемента $A_m[i]$. Конец алгоритма.

Шаг 8. Находим ближайшую справа активную вершину $A_m[right]$. Решением задачи будет ближайший к x элемент из минимального элемента $A_m[right]$ и максимального элемента $A_m[i]$. Конец алгоритма.

Рассматриваемый алгоритм решения задачи о близости оперирует понятиями минимальный и максимальный элементы коллизионного домена активной вершины. Существование данных элементов определяется тем, что на основе определений активной вершины и коллизионного домена, очевидно, что последний у активных вершин не пуст и содержит хотя бы один элемент (это, кстати, означает отсутствие коллизии как таковой).

Минимальный элемент коллизионного домена всегда содержится в вершине $A_m[i]$. А на максимальный указывает либо её правый указатель r_i , если $A_m[i]$ – индексная вершина, либо левый l_i , если $A_m[i]$ вершина списочная. Нахождение ближайших слева и справа активных вершин к известной рассматривалось ранее и осуществляется за $O(1)$. Решение задач о близости на упорядоченных списке и массиве, осуществляемое на 3-м и 4-м шагах соответственно общеизвестны. Асимптотическая сложность 3-го и 4-го шагов $O(s)$ и $O(\log(p))$ соответственно.

Опираясь на оценки, представленные в табл. 1, можно утверждать, что решение задачи о близости на предлагаемой структуре обладает меньшей асимптотической сложностью, чем в хеш-таблицах с линейным зондированием, двойным хешированием и цепочками переполнения. Что же касается хеш-таблиц осуществляющих разрешение коллизий путём организации коллизионного домена с помощью бинарных деревьев и дополнительных хеш-таблиц, то на данном этапе исследования можно сказать, что скорости решения задачи о близости сравнимы. Более точное сравнение возможно лишь с учётом характеристик h_m и планируется в дальнейших исследованиях.

Решение задачи интервального поиска представляет собой решение двух задач о близости, позволяющих найти границы интервала и проход по записям между левой и правой границами найденного интервала. Отметим, что предлагаемая структура данных позволяет пройти по записям, минуя пустые вершины. Действительно, ранее было показано, что для любой ячейки A_m можно за константное время найти левую соседнюю активную вершину, которая связана с упорядоченным списком, если таковой присутствует в её коллизионном домене, и подмассивом, конец непустых ячеек которого также легко найти за константное время. Кроме того, известно:

- для каждой пары соседних активных вершин все элементы коллизионного домена левой меньше элементов коллизионного домена правой;
- все записи, хранящиеся в списке активной вершины больше записей хранящихся в её подмассиве;

- все записи, хранящиеся в списке и в подмассиве активной вершины, упорядочены.

Так как алгоритмы последовательного прохождения индексных массивов и двусвязных списков в обе стороны тривиальны, то и алгоритм обхода интервала в любую сторону очевиден. Если положить асимптотическую сложность решения задачи о близости за T , то та же сложность решения задачи интервального поиска определяется как $T + c$, где c – мощностная нижняя оценка сложности решения задачи интервального поиска, определяемая количеством записей в искомом интервале. Такое выражение для сложности означает, что понизить её могут лишь ассоциативные массивы с лучшими характеристиками решения задачи о близости.

В сравнении с другими хеш-таблицами, асимптотическая сложность интервального поиска в которых представлена в табл. 1, решение задачи о близости лучше только у ассоциативного массива, использующего для разрешения коллизий дополнительные хеш-таблицы. Вместе с тем, подобный подход приводит к тому, что перечисление всех записей в интервале предполагает не только обход пустых ячеек A_m , но и пустых ячеек базовых массивов всех дополнительных хеш-функций, разрешающих коллизии внутри искомого интервала. Кроме того, предполагается, что все дополнительные хеш-функции также обладают свойством монотонности, поэтому при хорошей h_m и малых размерах списков в предлагаемой структуре данных, она показывает лучшие показатели на интервальном поиске.

Выводы

В статье предлагается структура данных для использования в качестве базовой при проектировании хеш-таблиц. Эта структура состоит из однотипных элементов вида (5), и представляет собой индексный массив, пересекающийся с двусвязными циклическими списками. При этом элементы самого массива связаны друг с другом и с узлами списков определённым образом.

Показано, что в случае задачи поиска идентичных объектов при условии, данный объект составляет коллизию с несколькими хранимыми записями, предлагаемая структура показывает более низкую асимптотическую сложность, чем хеш-таблицы с линейным зондированием, двойным хешированием и цепочками переполнения, но более высокую чем хеш-таблицы с методами разрешения коллизий, основанными на построениях бинарных деревьев и дополнительных хеш-таблиц.

При решении задачи о близости лучшие показатели, в сравнении с предлагаемой структурой данных, наблюдаются только при использовании метода разрешения коллизий путём использования дополнительных хеш-таблиц.

При переходе к задачам интервального поиска предлагаемая структура данных составляет конкуренцию и последнему методу. Это происходит из-за того, что метод использования дополнительных хеш-таблиц для разрешения коллизий приводит к выделению большого объёма неиспользованной памяти, которую приходится обходить при интервальном поиске. Вместе с тем, тот же поиск в хеш-таблицах, основанных на предлагаемой структуре, не предполагает обхода пустых ячеек памяти.

Если сравнивать по критерию перерасхода памяти, то ситуация обратная.

Наибольший перерасход и соответственно худшие показатели демонстрирует метод разрешения коллизий путём дополнительных хеш-таблиц. Это происходит, так как кроме пустых ячеек в A_m появляются пустые ячейки и в дополнительных хеш-таблицах, разрешающих коллизии.

За ним следуют методы цепочек переполнения и использования бинарных деревьев для разрешения коллизий. Эти методы содержат весь коллизионный домен в дополнительной памяти.

Предложенная в данной работе структура содержит часть коллизионного домена в дополнительной памяти и часть в самом массиве A_m и поэтому имеет лучшие показатели по использованию памяти в сравнении с методами разрешения коллизий, основанными на цепочках переполнения и бинарных деревьях.

Лучшими по критериям использования памяти являются хеш-таблицы, использующие такие методы разрешения коллизий, как линейное зондирование и двойное хеширование: они хранят все объекты коллизионного домена в ячейках массива A_m , но, как было показано раньше, абсолютно не приспособлены для решения задач о близости и интервального поиска.

Таким образом, можно сделать предварительный вывод о том, что предложенную в статье структуру данных целесообразно использовать при необходимости часто осуществлять интервальный поиск и, в меньшей степени, решать задачу о близости в условиях дефицита памяти.

В дальнейших исследованиях планируется оценка асимптотической сложности решения базовых поисковых задач предложенной структурой данных с группой современных монотонных хеш-функций. Также необходимо рассмотреть сложность аналогичной структуры данных, использующей вместо циклических двусвязных списков бинарные деревья. А также возможную гибридизацию этих структур, которая, с одной стороны, не влечёт ухудшение в среднем сложности разрешения коллизий на пассивных вершинах и интервального поиска, а с другой, не позволяет образовывать длинные списки, преобразуя их в бинарные деревья.

Кроме того, предполагается провести вычислительные эксперименты, подтверждающие теоретические оценки на практике и более строго очерчивающие границы на множестве задач информационного поиска, при которых предложенная структура данных показывает лучшие результаты, чем другие известные хеш-таблицы.

Библиографический список

1. **Гасанов, Э.Э.** Теория хранения и поиска информации / Э.Э. Гасанов, В.Б. Кудрявцев. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 288 с.
2. ГОСТ по пертинентности и релевантности. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Поиск и распространение информации. Термины и определения. – Взамен ГОСТ 7.27-80; введ. 31.03.1997. – Минск, 2001. – Режим доступа: <http://www.docload.ru/Basesdoc/6/6316>.
3. **Ландэ, Д.В.** Интернетика: Навигация в сложных сетях: модели и алгоритмы / Д.В. Ландэ, А.А. Санарский, И.В. Безсуднов. – М.: ЛИБРОКОМ, 2009. – 264 с.
4. **Белобродский, А.В.** Об одном способе поиска релевантных векторов. / А.В. Белобродский, В.Н. Решетников // Вопросы оптимизации и управления. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. – С. 59–63.
5. **Robertson, S.E.** Simple, proven approaches to text retrieval / S.E. Robertson, K.S. Jones // Cambridge Technical Report. – 1997. – С. 21–23.
6. **Поляков, Д.В.** Нечеткий подход к определению пертинентности результатов поиска и выбору оптимального запроса / Ю.Ю. Громов, Д.В. Поляков, О.Г. Иванова, В.Е. Дидрих // Вестник Воронежского института ФСИН России. г. Воронеж. ООО ИПЦ «Научная книга». – 2011. – №2 – С. 49–55.
7. **Поляков, Д.В.** Использование математического аппарата нечеткой логики для определения пертинентности результатов поиска текстовых сведений / Д.В. Полякови [и др.] // Математические методы и информационно-технические средства: Труды VIII Всероссийской научно-практической конференции, Краснодарский университет МВД России. – 2012. – С. 163.

8. **Поляков, Д.В.** Построение пертинентного запроса к информационно-поисковой машине на основе математического аппарата нечеткой логики / Д.В. Поляков [и др.] // Математические методы и информационно-технические средства: Труды VIII Всероссийской научно-практической конференции, Краснодарский университет МВД России. – 2012. – С. 167.
9. **Поляков, Д.В.** Определение пертинентности результатов запроса с использованием нечеткой логики / Д.В. Поляков [и др.] // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2012. – №3 – С. 29–33.
10. **Поляков, Д.В.** Формализация информационной потребности с помощью коллокаций на основе теории нечётких множеств для пертинентного поиска текстовых сведений / Д.В. Поляков [и др.] // Информация и безопасность. Воронеж: Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета. – 2012. – Т. 15. – №2 – С. 213–218.
11. **Salton, G.** Extended Boolean information retrieval / G. Salton, E. Fox, H. Wu // Communications of the ACM. – 2001. – V. 26. № 4. – С. 35–43.
12. **Salton, G.** A Vector Space Model for Automatic Indexing / G. Salton, A. Wong, C. Yang. // Communications of the ACM. – 1975. – С. 613–620.
13. **Salton, G.** Selective Text Traversal / G. Salton, A. Singhal. – Department of Computer Science, Cornell University, Ithaca – 1995. – С. 131–144.
14. **Salton, G.** Automatic Information Retrieval / G. Salton. – Cornell University. – 1980. – С. 41–54.
15. **Ермаков, А.Е.** Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии: труды Международной конференции Диалог'2008 // Автоматизация онтологического инжиниринга извлечения знаний из текста. – М., 2008.
16. **Пивоварова, Л.М.** Извлечение и классификация терминологических коллокаций на материале лингвистических научных текстов (предварительные наблюдения) / Л.М. Пивоварова, Е.В. Ягунова // Материалы симпозиума "Терминология и знание". – М., 2010.
17. **Захаров, В.П.** Анализ эффективности статистических методов выявления коллокаций в текстах на русском языке. [Электронный ресурс] / В.П. Захаров, М.В. Хохлова. – Санкт-Петербургский государственный университет, Институт лингвистических исследований РАН, Санкт-Петербург, 2010. – Режим доступа: <http://www.dialog-21.ru/dialog2010/materials/html/22.htm>.
18. **Савина, А.Н.** Исследование коллокаций с помощью экспериментов с информантами / А.Н. Савина, Е.В. Ягунова // Корпусная лингвистика–2011: труды международной конференции. – СПб.: С.-Петербургский гос. университет, Филологический факультет. – 2011. – С. 1–7.
19. **Недошивина, Е.В.** Учёт синтаксических связей при поиске коллокаций // Natural Language Processing. – 2008. – С. 1–3.
20. **Поляков, Д.В.** Формализация информационной потребности с помощью коллокаций на основе теории нечётких множеств для пертинентного поиска текстовых сведений / Д.В. Поляков, [и др.] // Информация и безопасность. Воронеж: Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета. – 2012. – Т. 15. – №2 – С. 213–218.
21. **Поляков, Д.В.** Кластеризация текстовых коллекций на основе нечеткого описания коллокаций / О.Г. Иванова, Д.В. Поляков, А.Ю. Громова, В.Е. Дидрих // Информация и безопасность. – Воронеж: Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета. – 2011. – №3 – С. 459–462.
22. **Адельсон-Вельский, Г.М.** Алгоритм организации информации / Г.М. Адельсон-Вельский, Е.М. Ландис // ДАН СССР – 1962. – Т. 146. – С. 263–266.
23. **Белобродский, А.В.** Об одном способе поиска релевантных векторов / А.В. Белобродский, В.Н. Решетников // Вопросы оптимизации и управления. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1979. – С. 59–63.
24. **Ben-Or, M.** Lower bounds for algebraic computation trees // Proc. 15th ACM Annu. Symp. Theory Comput. – 1983. – С. 80–86.
25. **Ferguson, D.E.** Fibonacci searching // C ACM. – 1960. – V. 3. – С. 648.
26. **Yuval, G.** Finding nearest neighbours // Inform Processing Lett. – 1976. – V. 5. – С. 63–65.

27. **Fredman, M.L.** An algorithm for finding best match in logarithmic expected time / M.L. Fredman, J.L. Bentley, R.A. Finkel // ACM Trans. Math. Software. – 1977. – V. 3. – С. 209–226.
28. **Fredman, M.L.** An algorithm for finding nearest neighbors. / M.L. Fredman, F. Baskett, J. Shustek. // IEEE Trans. Comput. – 1975. – С. 1000–1006.
29. **Burkhard, W.A.** Some Approaches to best match file searching / W.A Burkhard, R.M. Keller // Commun. Ass. Comput. Mach. – 1973. – V. 16. – С. 230–236.
30. **Loftsgaarden, D.** A nonparametric density function / D.O. Loftsgaarden C.P. Queensberry. – Ann. Math. Stat. 36, 1965 – С. 1049–1051.
31. **Lauter, U.** 4-dimensional binary search trees as a means to speed up associative searches in design verification of integrated circuits // Journal of Design Automation and Fault Tolerant Computing, 2 1978. №3. – С. 241–247.
32. **Bentley, J.L.** Multidimensional binary search trees used for asso- associative searching / J.L. Bentley // Commun. Ass. Comput. Mach. – 1975. – V. 18. – С. 509–517.
33. **Bentley, J.L.** Data structures for range searching / J.L. Bentley, J.H. Friedman // Comput. Surveys. – 1979. – V. 11. – С. 397–409.
34. **Bentley, J.L.** Efficient worst-case data structures for range searching / J.L. Bentley, H.A. Maurer // Acta Inform. – 1980. – V. 13. – С. 155–168.
35. **Bentley, J.L.** A problem in multivariate statistics: Algorithms, data structure and applications / J.L. Bentley, M.I. Shamos // Proc. 15th Allerton Conf. Commun., Contr., Comput. – 1977. — С. 193–201.
36. **Bentley, J.L.** Analysis of range range searching in quad trees / J.L. Bentley, D.F. Stanat // Inform. Processing Lett. – 1975. – V. 3. – С. 170–173.
37. **Lee, D.T.** Worst case analysis for region and partial region searches in multidimensional binary search trees and bal- anced quad trees / D.T. Lee, C.K. Wong. // Ada Informatica. – 1977. – V. 9. – С. 23–29.
38. **Lee, D.T.** Quintari trees: A file structures for multi- multidimensional database system / D.T. Lee, C.K. Wong // ACM Trans. Database Syst. – 1980. – С. 339–353.
39. **Кормен, Т.** Алгоритмы: построение и анализ / Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Ривест, К. Штайн.– 2-е изд. – М.: Вильямс, 2011. – 1290 с.
40. **Кузнецов, С.Д.** Методы сортировки и поиска / С.Д. Кузнецов. – ИСП РАН, Центр информационных технологий Режим доступа: <http://citforum.ru/programming/theory/sorting/sorting1.shtml>.
41. **Кнут, Д. Э.** Искусство программирования. Т. 1. Основные Алгоритмы / Д. Э. Кнут. – 3-е изд. – М.: Вильямс, 2006. – 720 с.
42. **Belazzougui, D.** Monotone Minimal Perfect Hashing: Searching a Sorted Table with $O(1)$ Accesses / D. Belazzougui, P. Boldi, R. Pagh, S. Vigna. –Proceedings of the 20th Annual ACM-SIAM Symposium On Discrete Mathematics (SODA), New York, 2009. ACM Press.
43. **Belazzougui, D.** Theory and Practise of Monotone Minimal Perfect Hashing / D. Belazzougui, P.Boldi, R. Pagh, S. Vigna. – In Proceedings of the 11th Workshop on Algorithm Engineering and Experiments, ALENEX '09. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2009.
44. **Drossos, L.** 2-D Monotone spatial indexing scheme with optimal update time / L. Drossos, S. Sioutas, K. Tsihclas, K. Ioannou. – WSEAS Int. Conf. on REMOTE SENSING, Venice, Italy, November 2-4. 2005. – P. 121–125.
45. **Поляков, Д.В.** Алгоритм поиска идентичных объектов на непрерывном множестве // Методы управления потоками в транспортных системах. – М: Изд-во МАДИ. – 2009, С. 114–121.
46. **Яковлев, А.В.** Оптимизационная задача построения отображения на адресное пространство для модели хранения данных с константным временем поиска / А.В. Яковлев [и др.]. – Воронеж: Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2013. №12. С. 36–41.
47. **Поляков, Д.В.** К вопросу о построении ассоциативных массивов для высокопроизводительных вычислений / Д.В. Поляков, А.И. Попов, В.А. Батуров // Информационные системы и технологии «ИСТ-2015»: материалы XXI Международной научно-технической конференции

– Нижний Новгород: Издательство Института радиоэлектроники и информационных технологий НГТУ. – 2015. – С. 269–270.

48. **Поляков, Д.В.** Генератор монотонных хеш-функций для ассоциативного массива / Д.В. Поляков, А.И. Попов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород. – 2015. №2 (109). – С. 70–82.

*Дата поступления
в редакцию 22.10.2015*

D.V. Polyakov, A.I. Popov, S.A. Duzkryatchenko

DATA STRUCTURES TO CREATE AN ASSOCIATIVE ARRAY BASED ON MONOTONE HASHING

Tambov state technical university

Purpose: Reducing the complexity of algorithms for solving problems of searching of the nearest object, searching of the interval, by developing of the data structure to create a hash table based on a monotone hash function.

Approach: The research is based on set theory, the theory of information retrieval and the theory of algorithms.

Findings: The structure of the data to create an associative array based on a monotone hash function and algorithms for this structure are suggested. Besides, provides a comparative analysis of the proposed and existing data structures for hash tables.

Research limitations: The research does not address problem of the choice of hash function, requiring only the its monotony. Also in this article is described the number of future researches, that needed for selection the parameters of the proposed structure and conditions of the re-hashing.

Originality / value: The proposed data structure and algorithms, working with it, show good results in solving problems of searching of the nearest object and searching of the interval, in comparison with other data structures, using in hash tables.

Key words: hash table, hash function, an associative array, the problem of searching for identical objects, the problem of searching of the nearest object, the problem of searching of the interval.

УДК 004.052.42

Е.В. Сидорова, О.А. Котельникова

**ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
В СРЕДЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ANY LOGIC**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Статья посвящена сравнительному анализу моделей надежности программного обеспечения на основе их имитационного моделирования в среде Any Logic. Представлены этапы имитационного моделирования и предложены рекомендации к выбору модели надежности программного обеспечения.

Ключевые слова: надежность программного обеспечения, модели надежности программного обеспечения, моделирование, имитационная среда Any Logic.

Чрезвычайно высокая структурная сложность программных систем, динамичность версий и технологий сильно влияют на задачу снижения числа уязвимостей в программных системах. На надежность программного обеспечения (ПО), в основном, влияют содержащиеся в нем ошибки и их последствия. Все действия разработчиков по повышению надежности направлены на то, чтобы минимизировать ошибки при разработке программ и постараться выявить и устранить их как можно быстрее после их написания. Можно утверждать, что число ошибок в программе характеризует в первую очередь ее создателей-программистов и используемый ими IT-инструментарий. Также следует отметить большие объемы современных программных проектов и их сложность, что повышает вероятность ошибок в них.

Одним из путей повышения уровня безопасности ПО является использование математических моделей, позволяющих получить гарантированные оценки показателей безопасности программного обеспечения и эффективности технологии его разработки.

Математические модели надежности программного обеспечения

Для количественной оценки показателей надежности ПО используют модели надежности, под которыми понимаются математические модели, построенные для оценки зависимости надежности от заранее известных или определенных в ходе выполнения заданий параметров.

В рамках данной статьи, для проведения исследования, выбраны четыре модели надежности: Шумана, Муса, Джелински-Моранды и Миллса [2-4]. В среде имитационного моделирования Any Logic [1] был проведен ряд вычислительных экспериментов, цель которых – определить, насколько эффективны выбранные модели для получения различных показателей надежности программ на отдельных стадиях жизненного цикла ПО.

Дадим краткую характеристику выбранным моделям.

Модель Шумана [2]: при корректировке новые ошибки не вносятся, интенсивность обнаружения ошибок пропорциональна числу оставшихся ошибок, нахождение первоначального количества ошибок – метод перебора, функция надежности:

$$R_i(t) = e^{-\lambda_i t}, \quad (1)$$

где λ_i – интенсивность отказов на i -м этапе; t – продолжительность этапа.

Модель Муса [3]: надежность программного обеспечения на этапе эксплуатации оценивается по результатам тестирования, первоначальное количество ошибок определяется только при помощи модели Шумана, функция надежности

$$R(t) = e^{-\frac{T}{t}}, \quad (2)$$

где T – суммарное время тестирования; t – средняя наработка до отказа после тестирования.

Модель Джелински-Моранды [4]: время до следующего отказа распределено экспоненциально, интенсивность отказов пропорциональна количеству оставшихся в программе ошибок, нахождение первоначального количества ошибок – метод подбора, функция надежности

$$R(t_i) = e^{-\lambda t_i}, \quad (3)$$

где λ – интенсивность отказов; t_i – среднее время до следующего отказа.

Модель Миллса [3]: необходимо перед началом тестирования внести искусственные ошибки, все ошибки, как естественные, так и искусственные, имеют равную вероятность быть найденными в процессе тестирования, первоначальное количество ошибок

$$N = n \frac{S}{v}, \quad (4)$$

где n – обнаруженные собственные ошибки; S – количество искусственно внесенных ошибок; v – обнаруженные искусственные ошибки.

Вторая часть модели Миллса связана с проверкой гипотезы о первоначальном количестве ошибок.

Результаты моделирования в среде Any Logic

Модель Джелински-Моранды

Согласно данной модели, вероятность безотказной работы ПО как функция времени t , равна

$$P(t_i) = e^{-\lambda t_i}, \quad (5)$$

где λ – интенсивность отказов:

$$\lambda_i = C_D(N - (i - 1)), \quad (6)$$

где N – первоначальное количество ошибок; C_D – коэффициент пропорциональности

$$C_D = \frac{\sum_{i=1}^{k-1} \frac{1}{N - i + 1}}{\sum_{i=1}^{k-1} t_i}, \quad (7)$$

В формуле (5) отсчет времени начинается от момента последнего ($i-1$)-го отказа программы. По методу максимума правдоподобия на основании формулы (5), функция правдоподобия имеет вид

$$F = \prod_{i=1}^{k-1} C_D(N - i + 1) e^{-C_D(N - i + 1)t_i}, \quad (8)$$

где k – номер прогнозируемого отказа.

Логарифмическая функция правдоподобия имеет вид

$$L = \ln F = \sum_{i=1}^{k-1} [\ln(C_D(N - i + 1)) - C_D(N - i + 1)t_i]. \quad (9)$$

Отсюда условия для нахождения экстремума

$$\frac{\partial L}{\partial C_D} = \sum_{i=1}^{k-1} \left[\frac{1}{C_D} - (N - i + 1)t_i \right] = 0, \quad (10)$$

$$\frac{\partial L}{\partial N} = \sum_{i=1}^{k-1} \left[\frac{1}{N-i+1} - C_D t_i \right] = 0. \quad (11)$$

Из формулы (11) находится коэффициент пропорциональности C_D - формула (7).

Для нахождения первоначального количества ошибок используют итеративную процедуру, в результате которой находят значение, обеспечивающее наименьшую ошибку (метод перебора) при решении уравнения

$$(k-1) \frac{\sum_{i=1}^{k-1} t_i}{\sum_{i=1}^{k-1} \frac{1}{N-i+1}} = \sum_{i=1}^{k-1} (N-i+1) t_i, \quad (12)$$

где t_i – интервалы между отказами.



Рис. 1. Метод перебора

Свойства		Консоль	
N1 - Вспомогательная переменная			
Основные	Имя:	N1	<input checked="" type="checkbox"/> Отображать имя <input type="checkbox"/> Исключить
Массив	Цвет:	По умолчанию	
Описание	<input type="checkbox"/> Массив <input type="checkbox"/> Зависимая <input type="checkbox"/> Константа		
N1 =			
$(k-1) * (\tau_1 + \tau_2 + \tau_3) / (1/N + (1/(N-1)) + (1/(N-2)))$			
<input type="checkbox"/> Использовать единицы измерения Единица измерения:			

Рис. 2. Переменная N1

Свойства		Консоль	
N2 - Вспомогательная переменная			
Основные	Имя:	N2	<input checked="" type="checkbox"/> Отображать имя <input type="checkbox"/> Исключить
Массив	Цвет:	По умолчанию	
Описание	<input type="checkbox"/> Массив <input type="checkbox"/> Зависимая <input type="checkbox"/> Константа		
N2 =			
$\tau_1 * N + \tau_2 * (N-1) + \tau_3 * (N-2)$			

Рис. 3. Переменная N2

После нахождения значений параметров модели C_D и N можно найти интенсивность отказов λ (формула (6)), а также время от последнего до следующего отказа t_{k+1} и вероятность безотказной работы через время t_{k+1} после последнего отказа (формула (5)).

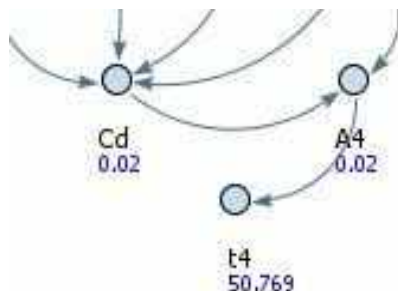


Рис. 4. Связь между коэффициентом пропорциональности C_D , интенсивностью отказов λ и временем от последнего отказа до следующего t_4

Свойства		Консоль	
Cd - Вспомогательная переменная			
Основные	Имя:	<input type="text" value="Cd"/>	<input checked="" type="checkbox"/> Отображать имя <input type="checkbox"/> Исключить
Массив	Цвет:	<input type="text" value="По умолчанию"/>	
Описание		<input type="checkbox"/> Массив <input type="checkbox"/> Зависимая <input type="checkbox"/> Константа	
	Cd =	<input type="text" value="((1/N) + (1/(N-1)) + (1/(N-2))) / (t1+t2+t3)"/>	
		<input type="checkbox"/> Использовать единицы измерения	Единица измерения: <input type="text"/>

Рис. 5. Коэффициент пропорциональности C_D

Свойства		Консоль	
A4 - Вспомогательная переменная			
Основные	Имя:	<input type="text" value="A4"/>	<input checked="" type="checkbox"/> Отображать имя <input type="checkbox"/>
Массив	Цвет:	<input type="text" value="По умолчанию"/>	
Описание		<input type="checkbox"/> Массив <input type="checkbox"/> Зависимая <input type="checkbox"/> Константа	
	A4 =	<input type="text" value="(Cd * (N - (4-1)))"/>	

Рис. 6. Интенсивность отказов λ

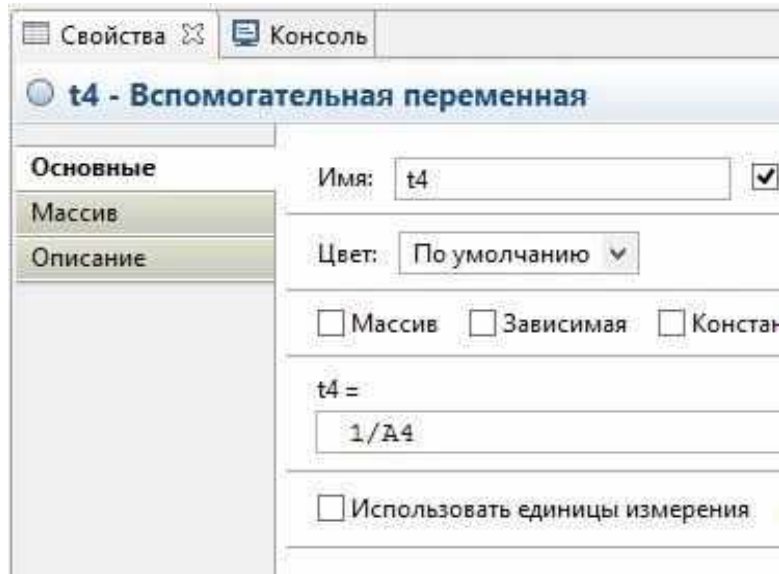
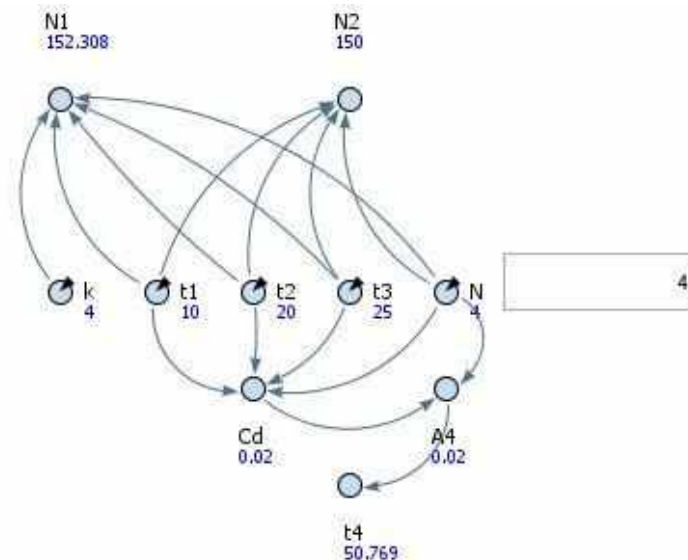
Рис. 7. Время от последнего отказа до следующего t_4 

Рис. 8. Работа модели Желински-Моранды

Основным преимуществом модели является простота расчетов. Недостаток состоит в том, что при неточном определении величины N интенсивность отказов программы может стать отрицательной, что приводит к бессмысленному результату. Кроме того, предполагается, что при исправлении обнаруженных ошибок не вносятся новые ошибки, что тоже не всегда выполняется.

Модель Маркова

Рассмотрим систему, начинающую работу в момент времени $t = 0$. Система работает до появления ошибки в соответствии с предпочтительным критерием. Результаты эксперимента собираются в отрезки времени, за которые могут произойти отказы в работе. Тогда переменная t' времени случайного сбоя может быть определена как:

$$t'(\xi) = \xi, \quad (13)$$

где $\xi \geq 0$ – местоположение точек на дискретной временной оси эксперимента.

Предположим, что случайная переменная t' имеет функцию распределения

$$F(t) = P\{\xi : t(\xi) \leq t\}, \tag{14}$$

и, если она существует, то плотность функции распределения будет

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}. \tag{15}$$

Надежность системы $R(t)$ определяется вероятностью отсутствия сбоя на интервале времени $[0; t]$:

$$R(t) = P\{t' \geq t\}. \tag{16}$$

Под готовностью системы к моменту времени t понимается вероятность того, что система находится в рабочем состоянии во время t , и определяется как результат простого сложения всех вероятностей состояний занятости:

$$A(t) = \sum_{k=0}^{\infty} P_{n-k}(t). \tag{17}$$

Предположим, что в начальный период ($t = 0$) система содержит неизвестное число (n) ошибок. В качестве начала отсчета времени работы системы выбирается начало фазы тестирования. Принимаем также, что процессы обнаружения и исправления ошибок реализуются попеременно и последовательно и зависят от текущего состояния системы.

Предположим, что к моменту t система только что вошла в состояние $(n - k)$, т. е. ошибка k только что устранена. Тогда в интервале времени $(0, t_{k+1})$, где $t = t_{k+1}$ может проявиться ошибка $(k + 1)$ при принятой постоянной интенсивности проявления ошибок λ_k .

На основании формулы функции надежности, порождающей вероятность отсутствия сбоев в интервале времени от 0 до t , получим выражение для надежности:

$$R_k(\tau) = e^{-\lambda_k \tau}, \tag{18}$$

где $0 \leq \tau \leq t_{k+1}; k=0, 1, 2, \dots$

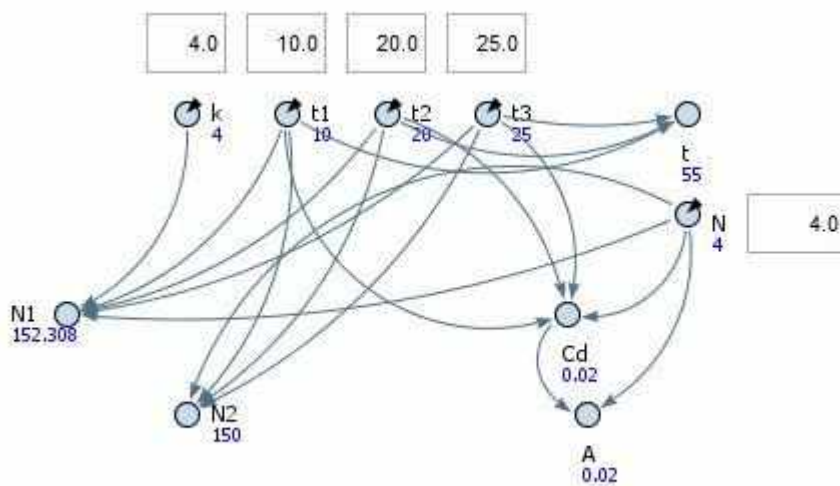


Рис. 9. Работа модели Маркова

Предполагается, что модель в начальный период будет использоваться со значением λ , которое было получено на базе накопления прошлого опыта.

Модель Шумана

В модели Шумана программное обеспечение на i -м этапе тестирования имеет функцию надежности

$$R_i(t) = e^{-\lambda_i t}, \tag{19}$$

где λ_i – интенсивность обнаружения ошибок:

$$\lambda_i = C(N - n_{i-1}), \quad (20)$$

где N – первоначальное количество ошибок; $(N - n_{i-1})$ – количество ошибок, оставшихся к началу i -го этапа; n – общее число обнаруженных и исправленных при тестировании ошибок:

$$n = m_1 + \dots + m_k, \quad (21)$$

n_i – число ошибок, исправленных к началу $(i+1)$ -го этапа тестирования:

$$n_i = m_1 + \dots + m_i, \quad (22)$$

C – коэффициент пропорциональности, равный:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^k \frac{m_i}{N - n_{i-1}}}{\sum_{i=1}^k t_i}, \quad (23)$$

где t_i – длительность этапов тестирования; m_i – число отказов на i -м этапе; k – общее число этапов тестирования.

Для нахождения первоначального количества ошибок в программном обеспечении используется уравнение

$$\sum_{i=1}^k m_i \frac{\sum_{i=1}^k t_i}{\sum_{i=1}^k \frac{m_i}{N - n_i}} = \sum_{i=1}^k (N - n_i) t_i, \quad (24)$$

Уравнение представляет собой метод перебора, с помощью которого находят значение, обеспечивающее наименьшую ошибку при решении данного уравнения.

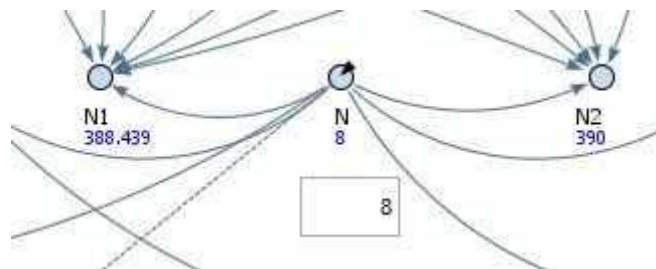


Рис. 10. Метод перебора по уравнению (24)

При известных значениях k (общее число этапов тестирования), t_i (длительность этапов тестирования), m_i (число отказов на i -м этапе) можно найти значения параметров модели C и N по формулам (23) и (24).

Свойства Консоль

C - Вспомогательная переменная

Основные
Имя: C Отображать имя Исключить На верхнем уровне На презентации

Массив
Описание
Цвет: По умолчанию

Массив Зависимая Константа

C =

$((m1/N) + (m2/(N-m1)) + (m3/(N-m1-m2))) / (t1+t2+t3)$

Использовать единицы измерения Единица измерения:

Рис. 11. Коэффициент пропорциональности C

N1 - Вспомогательная переменная

Имя: N1 Отображать имя Исключить На верхнем уровне На презентации

Цвет: По умолчанию

Массив Зависимая Константа

N1 =

$(m1+m2+m3) * (t1+t2+t3) / ((m1/N) + (m2/(N-m1)) + (m3/(N-(m1+m2))))$

Использовать единицы измерения Единица измерения:

Рис. 12. Метод перебора, параметр N1

N2 - Вспомогательная переменная

Имя: N2 Отображать имя Исключить На верхнем уровне На презентации

Цвет: По умолчанию

Массив Зависимая Константа

N2 =

$(t1*N) + t2*(N-m1) + t3*(N-m1-m2)$

Использовать единицы измерения Единица измерения:

Рис. 13. Метод перебора, параметр N2

После чего можно определить показатели:

- число оставшихся ошибок в программном обеспечении:

$$N_T = N - n; \quad (25)$$

- функцию надежности программного обеспечения по завершении тестирования:

$$R(t) = e^{-\lambda t}; \quad (26)$$

- интенсивность обнаружения отказов:

$$\lambda = C(N - n). \quad (27)$$

A - Вспомогательная переменная

Имя: A Отображать имя Исключить На верхнем уровне На презентации

Цвет: По умолчанию

Массив Зависимая Константа

A =

$C * (N-m1-m2-m3)$

Использовать единицы измерения Единица измерения:

Рис. 14. Интенсивность обнаружения отказов λ

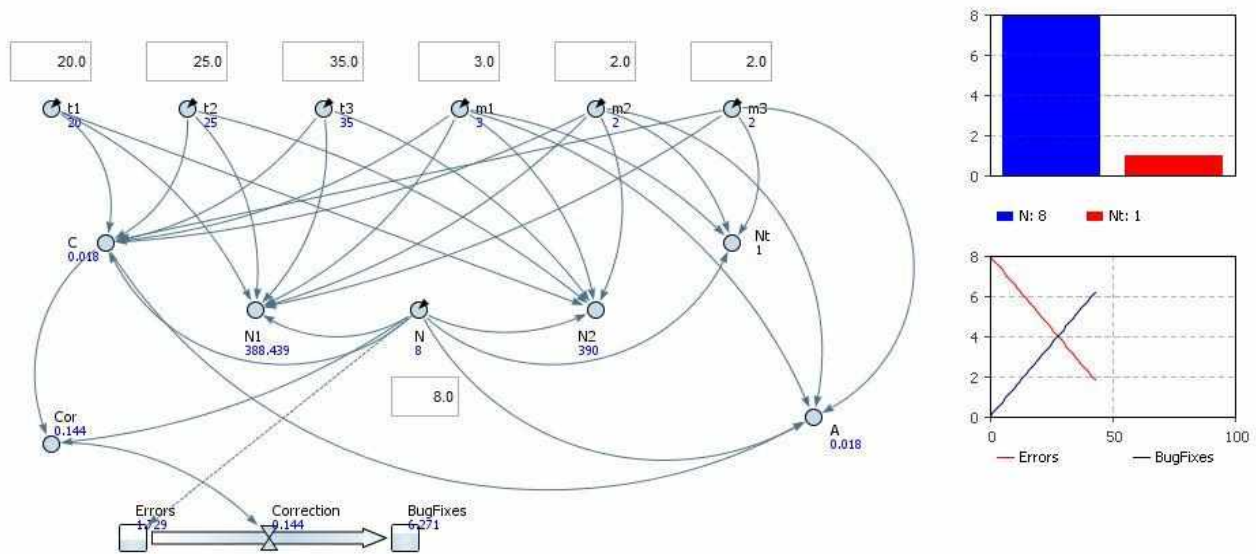


Рис. 15. Работа модели Шумана

Представить наглядно первоначальное количество ошибок и количество оставшихся в программе ошибок позволяют графические инструменты в среде Any Logic. Это столбиковая диаграмма и временной график.

Столбиковая диаграмма отображает несколько элементов данных в виде столбцов, «растущих» в заданном направлении от базовой линии. Размеры столбцов пропорциональны значениям соответствующих элементов данных.

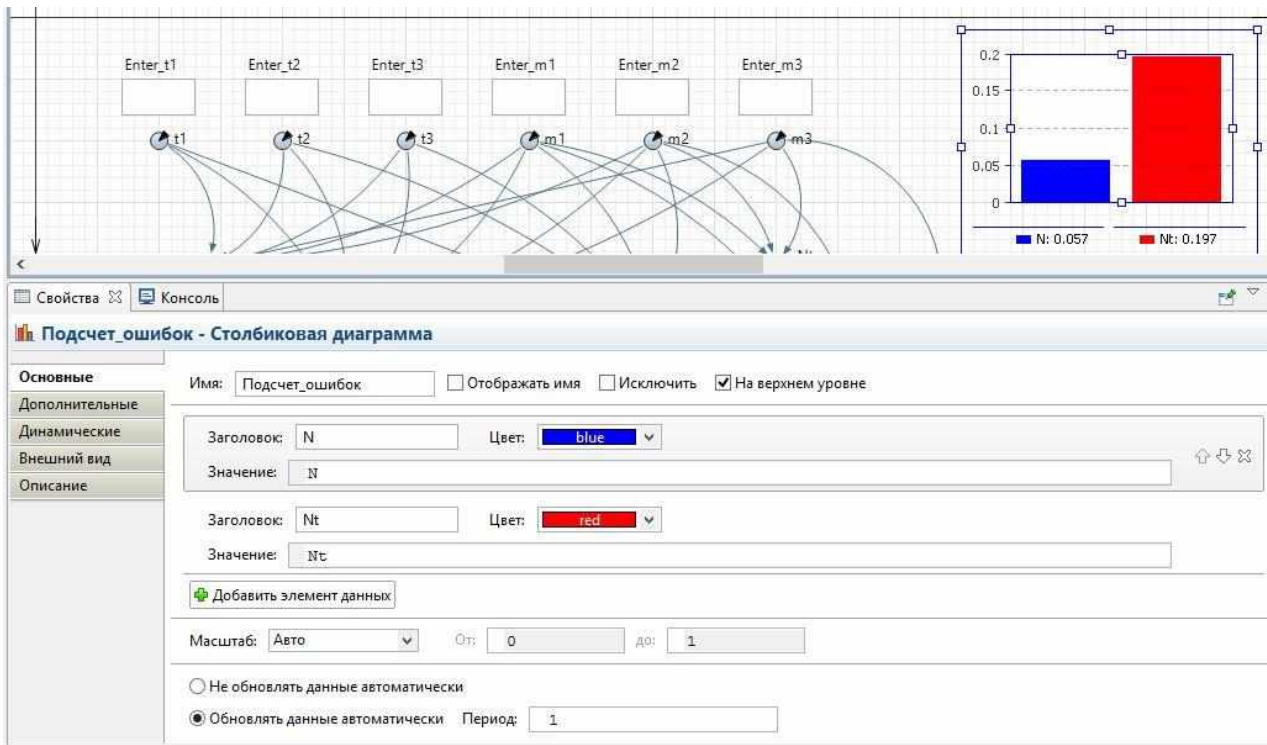


Рис. 16. Столбиковая диаграмма для подсчета ошибок

При разных значениях N , k , t_i и m_i диаграмма подсчитывает ошибки и выдает результат на экран.

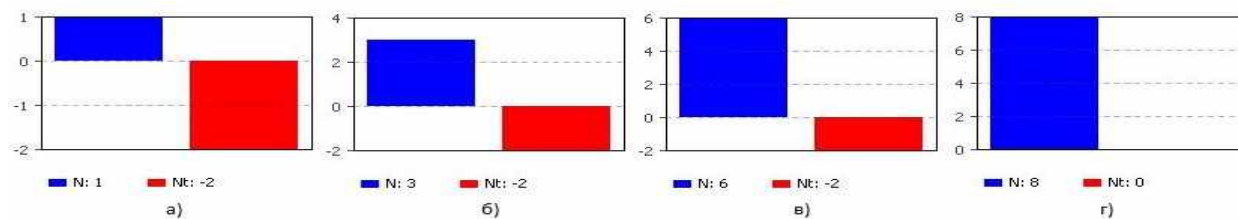


Рис. 17. Подсчет оставшихся ошибок:
a – при $N=1$; *б* – при $N=3$; *в* – при $N=6$; *г* – при $N=8$, когда все ошибки исправлены

Сравнительный анализ имитационных моделей

Для оценки показателей надежности программного обеспечения и выбора эффективной математической модели рекомендуем использовать табл. 1, пользуясь критерием выбора модели

$$K = \max \sum_{i=1}^n \alpha_i \beta_i, \quad (28)$$

где α_i – весовой коэффициент i -го свойства рассматриваемой модели; β_i – коэффициент значимости i -го свойства рассматриваемой модели: $\beta_i=0$, если свойством модель не обладает, $\beta_i=1$, если этим свойством модель обладает.

Таблица 1

Свойства моделей

Свойства моделей	Модели					
	Миллса	Шумана	Джеллински-Моранды	Муса	Маркова	Нельсона-Коркорэна
Машино-независимость	1	0	0	0	0	1
Возможность априорной оценки	0	0	0	0	0	0
Точность оценки	0	1	1	1	1	1
Возможность прогнозирования параметра	0	1	1	1	1	1
Устойчивость к порядку следования тестов	1	0	0	0	1	1
Учет категорий ошибок	0	0	0	0	0	0
Инвариантность к потоку проявления ошибок	1	0	0	0	0	1
Инвариантность к потоку исправления ошибок	0	0	0	0	0	0
Инвариантность к уровню подготовки программиста	0	1	1	1	1	0
Независимость от предыдущего состояния	1	0	0	0	0	1

Рассмотренные модели позволяют оценивать различные свойства ПО.

Выводы

В среде Any Logic были смоделированы основные принципы работы отдельных моделей надежности ПО. Проведен ряд вычислительных экспериментов, результаты которых показали, что на разных стадиях жизненного цикла программы эффективны различные модели надежности, следовательно, выбранные модели не являются универсальными в применении. Сформирована сравнительная таблица, служащая базой для выбора конкретной модели надежности, исходя из различных критериев.

Библиографический список

1. **Боев, В.Д.** Компьютерное моделирование: пособие для практических занятий, курсового и дипломного проектирования в AnyLogic7 / В.Д. Боев. – СПб.: ВАС, 2014. – 432 с.
2. **Фатуев, В.П.** Надежность автоматизированных информационных систем / В.П. Фатуев, В.И. Высоцкий, В.И. Бушинский. – Т.: ТГУ, 1998. – 104 с.
3. **Усенко, О.А.** Модели и методы оценки программного обеспечения информационных систем: учеб. пособие / О.А. Усенко. – Т.: ТТИ ЮФУ, 2008. – 40 с.
4. **Шураков, В.В.** Надежность программного обеспечения систем обработки данных / В.В. Шураков. – М.: Статистика, 1981. – 216 с.

*Дата поступления
в редакцию 22.10.2015*

E. V. Sidorova, O.A. Kotelnikova

**INVESTIGATION OF MODELS OF SOFTWARE RELIABILITY
IN SIMULATION ENVIRONMENT ANY LOGIC**

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

Purpose: Conduct a study of models of software reliability in a simulation tool Any Logic.

Design/methodology/approach: As objects of study chosen theoretical models Dzhelinski reliability, Markov, Schumann, Musa. For selected models conducted a simulation using the Any Logic tool with the following analysis of results of the study.

Finding: As a result, a comparative table is composed of models based on various criteria software.

Research limitation/implication: This study provides the basis for the selection method of calculating the theoretical model of software reliability in various stages of the life cycle.

Key words: software reliability, model software reliability, modeling, simulation environment Any Logic.

УДК 519.6 + 517.983.54

О.В. Матысик

ИТЕРАЦИОННАЯ РЕГУЛЯРИЗАЦИЯ НЕКОРРЕКТНЫХ УРАВНЕНИЙ
ПЕРВОГО РОДА

Брестский государственный университет им. А. С. Пушкина

Рассматривается задача приближенного решения в гильбертовом пространстве некорректного операторного уравнения первого рода. Задача решается итерационным методом неявного типа. Доказана сходимость метода с априорным и апостериорным выбором числа итераций, получены оценка погрешности метода, априорный момент останова и оценка для апостериорного момента останова.

Ключевые слова: регуляризация, неявный итерационный метод, некорректная задача, гильбертово пространство, операторное уравнение первого рода, самосопряженный и несамосопряженный оператор, правило останова по поправкам.

Введение

Встречается большой класс задач, где решения неустойчивы к малым изменениям исходных данных, т. е. сколь угодно малые изменения исходных данных могут приводить к большим изменениям решений. Задачи подобного типа принадлежат к классу некорректных задач.

Значительная часть задач, встречающихся в прикладной математике, физике, технике и управлении, может быть представлена в виде операторного уравнения первого рода

$$Ax = y, \quad x \in X, \quad y \in Y \quad (1)$$

с заданным оператором $A: X \rightarrow Y$ и элементом y , X и Y – метрические пространства, а в особо оговариваемых случаях – банаховы или даже гильбертовы. Ж. Адамаром (J. Hadamard) [1] было введено следующее понятие корректности:

Определение 1. *Задачу отыскания решения $x \in X$ уравнения (1) называют корректной (или корректно поставленной, или корректной по Адамару), если при любой фиксированной правой части $y = y_0 \in Y$ уравнения (1) его решение:*

а) существует в пространстве X ;

б) определено в пространстве X однозначно;

в) устойчиво в пространстве X , т. е. непрерывно зависит от правой части $y \in Y$.

В случае нарушения любого из этих условий задачу называют некорректной (некорректно поставленной); более конкретно при нарушении условия в) ее принято называть неустойчивой.

Из определения видно, что корректность по Адамару эквивалентна однозначной определенности и непрерывности обратного оператора A^{-1} на всем пространстве Y .

На протяжении многих лет в математике считалось, что только корректные задачи имеют право на существование, что только они правильно отражают реальный мир. О некорректных задачах сложилось мнение, что они не имеют физической реальности, поэтому их решение бессмысленно. В результате долгое время некорректные задачи не изучались.

Однако на практике все чаще и настойчивее стала возникать необходимость решать некорректные задачи. К таким задачам относятся задача Коши для уравнения Лапласа, задача решения интегрального уравнения 1-го рода, задача дифференцирования функции, заданной приближенно, численное суммирование рядов Фурье, когда коэффициенты известны приближенно в метрике l_2 , обратная задача гравиметрии, обратная задача теории потенциала, задача спектроскопии, задача аналитического продолжения функции, известной на части области, на всю область. Некорректны также и задача проектирования оптимальных систем,

конструкций, задача создания систем автоматической обработки результатов физического эксперимента, задача Коши для уравнения теплопроводности с обращенным временем и т.д.

Однако обычные методы, применяемые для решения корректных задач, невозможно было применить к некорректным задачам, поэтому необходимо было пересмотреть определение корректности по Адамару. Это было сделано в 1943 году А. Н. Тихоновым [2].

Определение 2. *Задача отыскания решения уравнения (1) называется корректной, по Тихонову, на множестве $M \subset X$, а множество M – ее классом корректности, если:*

- а) точное решение задачи существует в классе M ;*
- б) в классе M решение задачи единственно при любой правой части $y \in F = AM \subset Y$;*
- в) принадлежащее множеству M решение задачи устойчиво относительно правых частей $y \in F$.*

Если $M = X$ и $F = Y$, то корректность по Тихонову совпадает с корректностью по Адамару.

После работ А. Н. Тихонова систематическое изучение некорректных задач и способов их решения началось в 50-х годах, но особенно широкий размах оно приняло в последние 50 лет. Основные результаты отражены в монографиях М. М. Лаврентьева [3], А. Н. Тихонова и В. Я. Арсенина [4], В. К. Иванова, В. В. Васина и В. П. Тананы [5], О. А. Лисковца [6], Г. М. Вайникко и А. Ю. Веретенникова [7].

Наиболее общим из известных в настоящее время подходов к решению некорректных задач является подход, основанный на введенном А. Н. Тихоновым понятии регуляризатора.

Пусть имеется некорректная в классическом смысле задача математической физики.

Определение 3. *Параметрическое семейство операторов $\{R_\alpha\}$, действующих из пространства правых частей Y в пространство решений X , называется регуляризирующим (регуляризирующим алгоритмом, или регуляризатором), если:*

- 1) при любом $\alpha > 0$ оператор R_α определен на всем пространстве Y ;*
- 2) если существует точное решение исходной задачи $x \in X$, то для любого $\delta > 0$ существует $\alpha(\delta)$ такое, что для всех $y_\delta \in Y$, $\|y - y_\delta\| \leq \delta$ имеет место соотношение $\|R_{\alpha(\delta)}y_\delta - x\|_X \rightarrow 0, \delta \rightarrow 0$. Параметр α называется параметром регуляризации, $x_{\alpha,\delta} = R_{\alpha(\delta)}y_\delta$ – регуляризованными решениями.*

Использование регуляризатора задачи дает возможность сколь угодно точного ее решения при достаточно точных исходных данных. В работе [8] А. Н. Тихонов предлагает способ построения регуляризирующих операторов для уравнения (1). Это метод регуляризации решения некорректных задач. Он основан на вариационном принципе. В методе рационально выбирается параметр регуляризации, используется априорный способ выбора и предложены принципы невязки и сглаживающего функционала.

Для решения некорректных задач В. К. Иванов в работе [9] излагает метод квазирешений. Большое применение для регуляризации некорректных задач имеет также и метод невязки, предложенный Д. Л. Филлипсом (D. L. Phillips) [10] и В. К. Ивановым [11].

Особое место среди методов решения некорректных задач занимают итерационные методы, поскольку они легко реализуются на ПЭВМ. Различные итерационные схемы решения некорректно поставленных задач были предложены в работах [12–23].

В настоящей статье предлагается неявный итерационный метод решения некорректных задач, представляющий собой семейство итерационных схем, зависящих от параметра k . Для рассматриваемого метода исследована сходимость в исходной норме гильбертова пространства, получены априорные оценки погрешности и априорный момент останова; обоснована возможность применения к методу правила останова по поправкам.

Выбор параметра k и, следовательно, соответствующей схемы для решения некорректных задач, зависит от степени s истокорпредставимости точного решения ($x = A^s z, s > 0$).

В работе показано, что для $s \leq 5$ целесообразно использовать предложенный метод при $k = 1$, для $6 \leq s \leq 27$ при $k = 2$ и т.д.

Сравнение предлагаемого метода с хорошо известным явным методом итераций [3, 7, 12–14, 16] $x_{n+1,\delta} = x_{n,\delta} + \alpha(y_\delta - Ax_{n,\delta})$, $x_{0,\delta} = 0$ показывает, что порядки их оптимальных оценок одинаковы. Достоинство явных методов в том, что явные методы не требуют обращения оператора, а требуют только вычисления значений оператора на последовательных приближениях. В этом смысле явный метод [3, 7, 12–14, 16] предпочтительнее рассматриваемого неявного метода. Однако предлагаемый неявный метод обладает следующим важным достоинством. В явном методе [3, 7, 12–14, 16] на параметр α накладывается ограничение сверху – неравенство $0 < \alpha \leq \frac{5}{4\|A\|}$, что может привести на практике к необходимости боль-

шого числа итераций. В предлагаемом неявном методе ограничений сверху на $\alpha > 0$ нет. Это позволяет считать $\alpha > 0$ произвольно большим (независимо от $\|A\|$). В связи с чем, оптимальную оценку для неявного метода можно получить уже на первых шагах итераций.

Рассмотренный в статье итерационный метод найдет практическое применение в прикладной математике: он может быть использован для решения задач, встречающихся в теории оптимального управления, математической экономике, геофизике, теории потенциала, синтезе антенн, акустике, диагностике плазмы, в наземной или воздушной геологоразведке, при решении обратной кинематической задачи сейсмологии, космических исследованиях (спектроскопии) и медицине (томографии) [13, 18–19, 21–23].

Работа выполнена в рамках темы «Итерационные процедуры решения операторных уравнений первого рода» (зарегистрирована в Белорусском институте системного анализа от 20.09.2011 № 20113449) и соответствует приоритетному направлению научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 годы: *Методы математического и компьютерного моделирования, компьютерные технологии и интеллектуальные системы поддержки принятия решений*.

1. Постановка задачи. В действительном гильбертовом пространстве H исследуется уравнение первого рода

$$Ax = y, \quad (2)$$

где A – положительно определенный ограниченный и самосопряженный оператор, для которого нуль не является собственным значением, однако принадлежит спектру оператора A , и, следовательно, задача некорректна. Пусть $y \in R(A)$, т.е. при точной правой части y уравнение (2) имеет единственное решение x . Для отыскания этого решения предлагается неявная итерационная процедура

$$(E + \alpha^2 A^{2k})x_{n+1} = (E - \alpha A^k)^2 x_n + 2\alpha A^{k-1} y, \quad x_0 = 0, \quad k \in N. \quad (3)$$

В случае приближенной правой части y_δ ($\|y - y_\delta\| \leq \delta$) соответствующие методу (3) итерации примут вид

$$(E + \alpha^2 A^{2k})x_{n+1,\delta} = (E - \alpha A^k)^2 x_{n,\delta} + 2\alpha A^{k-1} y_\delta, \quad x_{0,\delta} = 0, \quad k \in N. \quad (4)$$

Далее, как обычно, под сходимостью метода (4) понимается утверждение о том, что приближения (4) сколь угодно близко подходят к точному решению уравнения при подходящем выборе n и достаточно малых δ . Иными словами, метод (4) является сходящимся, если

$$\lim_{\delta \rightarrow 0} \left(\inf_n \|x - x_{n,\delta}\| \right) = 0.$$

2. Сходимость метода в случае априорного выбора числа итераций.

Сходимость при точной правой части. Воспользовавшись интегральным представлением положительно определенного самосопряженного оператора A и формулой (3), по индукции получим

$$x - x_n = \int_0^M \lambda^{-1} \frac{(1 - \alpha \lambda^k)^{2n}}{(1 + \alpha^2 \lambda^{2k})^n} dE_\lambda y, \quad \text{где } M = \|A\|, \quad E_\lambda - \text{спектральная функция}$$

оператора A . Отсюда легко выводится сходимость итерационного процесса (3) при $n \rightarrow \infty$ для $\alpha > 0$.

Сходимость при приближенной правой части. Итерационный процесс (4) является сходящимся, если нужным образом выбирать число итераций n в зависимости от уровня погрешности δ . Справедлива

Теорема 1. *Итерационный процесс (4) сходится при $\alpha > 0$, если выбирать число итераций n в зависимости от δ так, чтобы $n^{1/k} \delta \rightarrow 0$ при $n \rightarrow \infty, \delta \rightarrow 0$.*

Доказательство теоремы аналогично доказательству подобной теоремы из [19, 21–22].

При этом, легко показывается оценка $\|x_n - x_{n,\delta}\| \leq 2k(n\alpha)^{1/k} \delta, n \geq 1$.

Оценка погрешности. Скорость сходимости метода (4) будем оценивать при дополнительном предположении о возможности истокообразного представления точного решения x уравнения (2), т.е. $x = A^s z, s > 0$. Тогда $y = A^{s+1} z$ и, следовательно, получим

$$x - x_n = \int_0^M \lambda^s \frac{(1 - \alpha \lambda^k)^{2n}}{(1 + \alpha^2 \lambda^{2k})^n} dE_\lambda z. \quad \text{Для оценки } \|x - x_n\| \text{ найдем максимум модуля подынтегральной}$$

функции $f(\lambda) = \lambda^s \frac{(1 - \alpha \lambda^k)^{2n}}{(1 + \alpha^2 \lambda^{2k})^n}$. Нетрудно показать, что при условии $\alpha > 0$ справедливо

$$\text{неравенство } \|x - x_n\| \leq s^{s/k} (2k n \alpha e)^{-s/k} \|z\|.$$

Таким образом, общая оценка погрешности метода (4) запишется в виде

$$\|x - x_{n,\delta}\| \leq \|x - x_n\| + \|x_n - x_{n,\delta}\| \leq s^{s/k} (2k n \alpha e)^{-s/k} \|z\| + 2k(n\alpha)^{1/k} \delta, n \geq 1.$$

Для минимизации оценки погрешности вычислим ее правую часть в точке, в которой производная от нее равна нулю; в результате получим априорный момент останова

$$n_{\text{опт}} = s^{\frac{s+k}{s+1}} (2k)^{-\frac{s+k}{s+1}} \alpha^{-1} e^{-\frac{s}{s+1}} \delta^{-\frac{k}{s+1}} \|z\|^{\frac{k}{s+1}} \quad \text{и оптимальную оценку погрешности}$$

$$\|x - x_{n,\delta}\|_{\text{опт}} \leq (1+s) \left(\frac{s}{k}\right)^{\frac{s(1-k)}{k(s+1)}} e^{-\frac{s}{k(s+1)}} \delta^{\frac{s}{s+1}} \|z\|^{\frac{1}{s+1}}. \quad (5)$$

Замечание 1. *Оценка погрешности (5) имеет порядок $O(\delta^{s/(s+1)})$ и, как следует из [7], он является оптимальным в классе задач с истокообразно представимыми решениями $x = A^s z, s > 0$.*

Замечание 2. *Оптимальная оценка (5) не зависит от α , но от параметра α зависит $n_{\text{опт}}$, поэтому для уменьшения объема вычислительной работы следует брать α , удовлетворяющим условию $\alpha > 0$ и так, чтобы $n_{\text{опт}} = 1$. Для этого достаточно выбрать*

$$\alpha_{\text{опт}} = s^{\frac{s+k}{s+1}} (2k)^{-\frac{s+k}{s+1}} e^{-\frac{s}{s+1}} \delta^{-\frac{k}{s+1}} \|z\|^{\frac{k}{s+1}}.$$

Приведем погрешность метода (4) при счете с округлениями. Пусть $x_{n,\delta}$ – точное значение, полученное по формуле (4), а z_n – значение, полученное по той же формуле с учетом погрешностей вычисления γ_n , т.е.

$$z_{n+1} = (E + \alpha^2 A^{2k})^{-1} \left[(E - \alpha A^k)^2 z_n + 2\alpha A^{k-1} y_\delta \right] + \alpha \gamma_n, \quad z_0 = 0.$$

Оценка погрешности метода (4) в этом случае имеет вид

$$\|x - z_n\| \leq \|x - x_{n,\delta}\| + \|x_{n,\delta} - z_n\| \leq s^{s/k} (2kn\alpha e)^{-s/k} \|z\| + 2k(n\alpha)^{1/k} \delta + n\alpha\gamma, \quad n \geq 1,$$

где $\gamma = \sup_i |\gamma_i|$.

Оценку $\|x - x_{n,\delta}\|_{\text{опт}}$ можно оптимизировать по k . Для этого производную

по k от $\varphi(k) = (s/k)^{\frac{s(1-k)}{k(s+1)}} e^{\frac{-s}{k(s+1)}}$ приравняем к нулю. Получим $(s/k)^{\frac{s(1-k)}{k(s+1)}} e^{\frac{-s}{k(s+1)}} \cdot \frac{s}{k^2(s+1)}$.

$\left(k - \ln \frac{s}{k}\right) = 0$. Отсюда видно, что оптимальное k должно удовлетворять равенству $k = \ln \frac{s}{k}$.

Но k должно быть целым числом, поэтому, как показывают расчеты, для $s \leq 5$ $k_{\text{опт}} = 1$, для $6 \leq s \leq 27$ $k_{\text{опт}} = 2$.

3. Апостериорный выбор числа итераций.

Априорный выбор числа итераций n получен в предположении, что точное решение x уравнения (2) истокообразно представимо. Однако обычно сведения об истокообразности искомого решения неизвестны и тем самым, приведенные в разделе 2 оценки погрешности оказываются неприменимыми. Тем не менее, метод (4) можно сделать вполне эффективным, если воспользоваться следующим правилом останова по поправкам. Зададим уровень останова $\varepsilon > 0$ и момент m останова метода итераций (4) определим условием [16, 19, 21–22]

$$\left. \begin{aligned} \|z_n - z_{n+1}\| &> \varepsilon, \quad (n < m), \\ \|z_m - z_{m+1}\| &\leq \varepsilon. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Решается уравнение (1) с несамосопряженным положительным ограниченным оператором. Предположим, что $y \in R(A)$, т. е. при точной правой части y уравнение (1) имеет единственное решение x . Будем искать его, используя неявный итерационный метод

$$x_{n+1} = \left(E + \alpha^2 (A^* A)^{2k} \right)^{-1} \left[\left(E - \alpha (A^* A)^k \right)^2 x_n + 2\alpha (A^* A)^{k-1} A^* y \right], \quad x_0 \in H, \alpha > 0, k \in N. \quad (7)$$

В случае, когда правая часть уравнения задана приближенно $\|y - y_\delta\| \leq \delta$, метод итераций (7) примет вид

$$\begin{aligned} z_{n+1} = & \left(E + \alpha^2 (A^* A)^{2k} \right)^{-1} \left[\left(E - \alpha (A^* A)^k \right)^2 z_n + 2\alpha (A^* A)^{k-1} A^* y_\delta \right] + \\ & + \left(E - \alpha (A^* A)^k \right)^2 \left(E + \alpha^2 (A^* A)^{2k} \right)^{-1} u_n, \quad z_0 \in H, \alpha > 0, k \in N, \end{aligned} \quad (8)$$

где u_n – ошибки в вычислении итераций, причем $\|u_n\| \leq \beta$. Обозначим

$C = \left(E + \alpha^2 (A^* A)^{2k} \right)^{-1} \left(E - \alpha (A^* A)^k \right)^2$, $B = \left(E + \alpha^2 (A^* A)^{2k} \right)^{-1} 2\alpha (A^* A)^{k-1} A^*$. Тогда итераци-

онный метод (8) примет вид $z_{n+1} = Cz_n + By_\delta + Cu_n$. Покажем, что метод (8) с правилом останова (6) сходится. Справедливы

Лемма 1. Пусть приближение ω_n определяется условиями

$$\omega_0 = z_0, \quad \omega_{n+1} = C\omega_n + By + Cu_n, \quad n \geq 0. \quad (9)$$

Тогда справедливо неравенство $\sum_{k=0}^n \|\omega_k - \omega_{k+1} + Cu_k\|^2 \leq \|\omega_0 - x\|^2 + \sum_{k=0}^{n-1} \|Cu_k\|^2$.

Лемма 2. При $\forall \omega_0 \in H$ и произвольной последовательности ошибок $\{u_n\}$, удовлетворяющих условию $\|u_n\| \leq \beta$, выполнено неравенство $\lim_{n \rightarrow \infty} \|\omega_n - \omega_{n+1}\| \leq 2\|C\|\beta$.

Леммы 1–2 доказываются аналогично подобным из [21–22].

Обе леммы будут использованы при доказательстве следующей теоремы.

Теорема 2. Пусть уровень останова $\varepsilon = \varepsilon(\delta, \beta)$ выбирается как функция от уровней δ и β норм погрешностей $y - y_\delta$ и u_n . Тогда справедливы следующие утверждения:

а) если $\varepsilon(\delta, \beta) > 2\|C\|\beta$, то момент останова t определен при любом начальном приближении $z_0 \in H$ и любых y_δ и u_n , удовлетворяющих условиям $\|y - y_\delta\| \leq \delta$, $\|u_n\| \leq \beta$;

б) если $\varepsilon(\delta, \beta) > \|B\|\delta + 2\|C\|\beta$, то справедлива оценка

$$m \leq \frac{\|z_0 - x\|^2}{(\varepsilon - \|B\|\delta)(\varepsilon - \|B\|\delta - 2\|C\|\beta)}$$

в) если, кроме того, $\varepsilon(\delta, \beta) \rightarrow 0$, $\delta, \beta \rightarrow 0$ и $\varepsilon(\delta, \beta) \geq d(\|B\|\delta + \|C\|\beta^p)$, где $d > 1$, $p \in (0, 1)$, то $\lim_{\delta, \beta \rightarrow 0} \|z_m - x\| = 0$.

Доказательство. Используя индукцию, можно показать, что

$$z_n = C^n z_0 + C \sum_{k=0}^{n-1} C^k (C^{-1} B y_\delta + u_{n-k-1}). \quad (10)$$

Отсюда

$$\begin{aligned} \omega_n &= C^n \omega_0 + C \sum_{k=0}^{n-1} C^k (C^{-1} B y + u_{n-k-1}) = C^n \omega_0 + (E + C + C^2 + \dots + C^{n-1}) B y + \\ &+ C \sum_{k=0}^{n-1} C^k u_{n-k-1} = C^n \omega_0 + (E - C^n)(E - C)^{-1} (A^* A)^{-1} (E - C) A^* y + \\ &+ C \sum_{k=0}^{n-1} C^k u_{n-k-1} = C^n \omega_0 + A^{-1} (E - C^n) y + C \sum_{k=0}^{n-1} C^k u_{n-k-1}. \end{aligned}$$

Учитывая, что $z_0 = \omega_0$, получим

$$\begin{aligned} z_n - z_{n+1} &= C^n z_0 + A^{-1} (E - C^n) y_\delta + C \sum_{k=0}^{n-1} C^k u_{n-k-1} - C^{n+1} z_0 - A^{-1} (E - C^{n+1}) y_\delta - C \sum_{k=0}^n C^k u_{n-k} = \\ &= C^n \omega_0 + A^{-1} (E - C^n) y - A^{-1} (E - C^n) y + A^{-1} (E - C^n) y_\delta + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &+ C \sum_{k=0}^{n-1} C^k u_{n-k-1} - C^{n+1} \omega_0 - A^{-1}(E - C^{n+1})y + A^{-1}(E - C^{n+1})y - A^{-1}(E - C^{n+1})y_\delta - \\
 &- C \sum_{k=0}^{n-1} C^k u_{n-k} = \omega_n - \omega_{n+1} + A^{-1}C^n(E - C)(y_\delta - y) = \omega_n - \omega_{n+1} + C^n B(y - y_\delta).
 \end{aligned}$$

Следовательно,

$$\|z_n - z_{n+1}\| \leq \|\omega_n - \omega_{n+1}\| + \|C^n B(y - y_\delta)\|. \tag{11}$$

Обозначим $\sigma = B(y - y_\delta)$, тогда

$$\begin{aligned}
 \|C^n B(y - y_\delta)\| &= \|C^n \sigma\| = \left\| \int_0^{\|C\|} \frac{(1 - \alpha \lambda^k)^{2n}}{(1 + \alpha^2 \lambda^{2k})^n} dE_\lambda \sigma \right\| \leq \left\| \int_0^{\varepsilon_0} \frac{(1 - \alpha \lambda^k)^{2n}}{(1 + \alpha^2 \lambda^{2k})^n} dE_\lambda \sigma \right\| + \\
 &+ \left\| \int_{\varepsilon_0}^{\|C\|} \frac{(1 - \alpha \lambda^k)^{2n}}{(1 + \alpha^2 \lambda^{2k})^n} dE_\lambda \sigma \right\| \leq \|E_{\varepsilon_0} \sigma\| + q^n \|\sigma\| \rightarrow 0, \quad n \rightarrow \infty, \quad \varepsilon_0 \rightarrow 0,
 \end{aligned}$$

так как при $\alpha > 0, \lambda \in (0, \|C\|]$ имеем $\frac{(1 - \alpha \lambda^k)^2}{1 + \alpha^2 \lambda^{2k}} \leq q < 1$. Поэтому (см. лемму 2)

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \|z_n - z_{n+1}\| = \lim_{n \rightarrow \infty} \|\omega_n - \omega_{n+1}\| \leq 2\|C\|\beta.$$

Следовательно, условием $\varepsilon(\delta, \beta) > 2\|C\|\beta$ момент останова m определен при любом начальном приближении $z_0 \in H$ и любых $y_\delta, \|y - y_\delta\| \leq \delta$ и $u_n, \|u_n\| \leq \beta$.

а. Рассмотрим последовательность (9) и определим момент останова m' условием

$$\left. \begin{aligned}
 \|\omega_n - \omega_{n+1}\| &> \varepsilon - \|B\|\delta, \quad (n < m'), \\
 \|\omega_{m'} - \omega_{m'+1}\| &\leq \varepsilon - \|B\|\delta.
 \end{aligned} \right\} \tag{12}$$

Из (11) следует, что $m \leq m'$. Из леммы 1 при $n = m'$ получим неравенство

$$\sum_{k=0}^{m'} \|\omega_k - \omega_{k+1} + Cu_k\|^2 \leq \|\omega_0 - x\|^2 + \sum_{k=0}^{m'-1} \|Cu_k\|^2, \text{ поэтому справедливо записать}$$

$$\sum_{k=0}^{m'-1} \|\omega_k - \omega_{k+1} + Cu_k\|^2 \leq \|\omega_0 - x\|^2 + \sum_{k=0}^{m'-1} \|Cu_k\|^2.$$

Отсюда получим

$$\sum_{k=0}^{m'-1} (\|\omega_k - \omega_{k+1}\| - \|C\|\beta)^2 \leq \|\omega_0 - x\|^2 + \sum_{k=0}^{m'-1} \|Cu_k\|^2.$$

Так как по (12) при $n < m'$ имеем $\|\omega_n - \omega_{n+1}\| > \varepsilon - \|B\|\delta$, то $m'(\varepsilon - \|B\|\delta - \|C\|\beta)^2 \leq \|\omega_0 - x\|^2 + m'\|C\|^2\beta^2$. Учитывая, что $\omega_0 = z_0$ и $m \leq m'$, из последнего неравенства получим оценку для момента останова

$$m \leq m' \leq \frac{\|z_0 - x\|^2}{(\varepsilon - \|B\|\delta - 2\|C\|\beta)(\varepsilon - \|B\|\delta)}.$$

б. Докажем, что

$$x = C^n x + \sum_{k=0}^{n-1} BC^k y. \quad (13)$$

Предположим, что (13) верно, тогда $x - C^n x = B(E + C + C^2 + \dots + C^{n-1})y$,
 $(E - C^n)x = B(E - C^n)(E - C)^{-1}y$, $(E - C^n)x = A^{-1}(E - C)(E - C^n)(E - C)^{-1}Ax$,
 $(E - C^n)x = (E - C^n)x$. Следовательно, предположение верно и справедливость формулы (13) доказана. Из (10) вычтем (13), получим

$$z_n - x = C^n(z_0 - x) + C \sum_{k=0}^{n-1} C^k [C^{-1}B(y_\delta - y) + u_{n-k-1}]. \quad (14)$$

Отсюда $\Delta_n = C^n \Delta_0 + C \sum_{k=0}^{n-1} C^k [C^{-1}B(y_\delta - y) + u_{n-k-1}]$, где $\Delta_n = z_n - x$ и $\Delta_0 = z_0 - x$.

Следовательно,

$$\|\Delta_n\| \leq \|C^n \Delta_0\| + (\|B\|\delta + \|C\|\beta)n. \quad (15)$$

В частности, (15) справедливо и при $n = m$. Если $m \rightarrow \infty$ при $\varepsilon, \delta, \beta \rightarrow 0$, тогда, как показано ранее, $\|C^m \Delta_0\| \rightarrow 0, m \rightarrow \infty$. Поэтому для доказательства $\|z_m - x\| \rightarrow 0, \delta \rightarrow 0, \beta \rightarrow 0$ достаточно показать, что $m(\|B\|\delta + \|C\|\beta) \rightarrow 0, m \rightarrow \infty, \delta \rightarrow 0, \beta \rightarrow 0$.

Из (14) получим

$$z_n - z_{n+1} = C^n(E - C)(z_0 - x) - Cu_n - C^n B(y_\delta - y) + C \sum_{k=0}^{n-1} C^k (E - C)u_{n-k-1}. \quad (16)$$

Так как спектр оператора $C = \left(E + \alpha^2(A^*A)^{2k}\right)^{-1} \left(E - \alpha(A^*A)^k\right)^2$ принадлежит $[0, 1]$, то

можно доказать, что $\|C^n(E - C)\| \leq \frac{1}{n+1}$. Поэтому из (16) получим при $n = m - 1$

$$\begin{aligned} \|z_{m-1} - z_m\| &\leq \left\| C^{\frac{m-1}{2}} C^{\frac{m-1}{2}} (E - C)(z_0 - x) \right\| + \|C^{m-1}B(y_\delta - y)\| + \|Cu_{m-1}\| + \\ &+ \left\| C \sum_{k=0}^{m-2} C^k (E - C)u_{m-k-2} \right\| \leq \left\| C^{\frac{m-1}{2}} (E - C) \right\| \left\| C^{\frac{m-1}{2}} (z_0 - x) \right\| + \|C\|\beta + \|B\|\delta + \\ &+ \|C\|\beta \sum_{k=0}^{m-2} \frac{1}{k+1} \leq \frac{2}{m} \left\| C^{\frac{m-1}{2}} (z_0 - x) \right\| + \|B\|\delta + \|C\|\beta(2 + \ln m), \end{aligned}$$

так как $\sum_{k=1}^{m-1} \frac{1}{k} \leq 1 + \ln m$ [21–22].

Так как по условию теоремы $\varepsilon(\delta, \beta) \geq d(\|B\|\delta + \|C\|\beta^p), d > 1, p \in (0, 1)$, то при всех до-

статочных малых δ, β выполняется неравенство $\varepsilon(\delta, \beta) > \|B\|\delta + 2\|C\|\beta$, поэтому из б) получим

$$m \leq \frac{\|z_0 - x\|^2}{(\varepsilon - \|B\|\delta - 2\|C\|\beta)(\varepsilon - \|B\|\delta)}.$$

Поскольку $\|z_{m-1} - z_m\| > \varepsilon$, то $\varepsilon \leq \frac{2}{m} \left\| C^{\frac{m-1}{2}} (z_0 - x) \right\| + \|B\|\delta + \|C\|(2 + \ln m)\beta$. Отсюда по-

лучим, что $m \leq \frac{2 \left\| C^{\frac{m-1}{2}} (z_0 - x) \right\|}{\varepsilon - \|B\|\delta - \|C\|\beta(2 + \ln m)}$. Умножим обе части последнего равенства на

$$\|B\|\delta + \|C\|\beta, \text{ получим } m(\|B\|\delta + \|C\|\beta) \leq \frac{2 \left\| C^{\frac{m-1}{2}} (z_0 - x) \right\| (\|B\|\delta + \|C\|\beta)}{\varepsilon - \|B\|\delta - \|C\|\beta \left[2 + \ln \frac{\|z_0 - x\|^2}{(\varepsilon - \|B\|\delta - 2\|C\|\beta)(\varepsilon - \|B\|\delta)} \right]}.$$

При $m \rightarrow \infty$ множитель $2 \left\| C^{\frac{m-1}{2}} (z_0 - x) \right\| \rightarrow 0$, а $\frac{2(\|B\|\delta + \|C\|\beta)}{\varepsilon - \|B\|\delta - \|C\|\beta \left[2 + \ln \frac{\|z_0 - x\|^2}{(\varepsilon - \|B\|\delta - 2\|C\|\beta)(\varepsilon - \|B\|\delta)} \right]}$

ограничена при $\delta, \beta \rightarrow 0$. Поэтому $m(\|B\|\delta + \|C\|\beta) \rightarrow 0$, при $m \rightarrow \infty, \delta, \beta \rightarrow 0$. Отсюда и из неравенства (15) при $m \rightarrow \infty$

$$\lim_{\substack{\delta \rightarrow 0 \\ \beta \rightarrow 0}} \|\Delta_m\| = \lim_{\substack{\delta \rightarrow 0 \\ \beta \rightarrow 0}} \|z_m - x\| \leq \lim_{\substack{\delta \rightarrow 0 \\ \beta \rightarrow 0}} \left(\|C^m \Delta_0\| + m(\|B\|\delta + \|C\|\beta) \right) = 0.$$

Таким образом, доказано, что $\lim_{\substack{\delta \rightarrow 0 \\ \beta \rightarrow 0}} \|z_m - x\|$ при $m \rightarrow \infty$, т. е. метод итераций (8) с пра-

виллом останова по поправкам б) сходится в исходной норме гильбертова пространства. Теорема 2 доказана.

Библиографический список

1. **Hadamard, J.** Le problème de Cauchy et les équations aux dérivées partielles linéaires hyperboliques / J. Hadamard. – Paris: Hermann et cie, 1932. – 542 p.
2. **Тихонов, А. Н.** Об устойчивости обратных задач // Доклады АН СССР. – 1943. – Т. 39. – № 5. С. 195–198.
3. **Лаврентьев, М. М.** О некоторых некорректных задачах математической физики / М. М. Лаврентьев. – Новосибирск: СО АН СССР, 1962. – 92 с.
4. **Тихонов, А. Н.** Методы решения некорректных задач / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. – М.: Наука, 1979. – 288 с.
5. **Иванов, В. К.** Теория линейных некорректных задач и её приложения / В. К. Иванов, В. В. Васин, В. П. Танана. – М.: Наука, 1978. – 206 с.
6. **Лисковец, О. А.** Вариационные методы решения неустойчивых задач / О. А. Лисковец. – Минск: Наука и техника, 1981. – 342 с.
7. **Вайникко, Г. М.** Итерационные процедуры в некорректных задачах / Г. М. Вайникко, А. Ю. Веретенников. – М.: Наука. – 1986. – 178 с.
8. **Тихонов, А. Н.** О решении некорректно поставленных задач и методе регуляризации // Доклады АН СССР. – 1963. – Т. 151. – № 3. – С. 501–504.

9. **Иванов, В. К.** О некорректно поставленных задачах / В. К. Иванов // Мат. сб. – 1963. – Т. 61 (103). – № 2. – С. 211–223.
10. **Phillips, D. L.** A technique for the numerical solution of certain integral equations of the first kind // J. Assoc. Comput. Mach. 1962. – V. 9. – № 1. – P. 84–97.
11. **Иванов, В.К.** Теория приближённых методов и её применение к численному решению сингулярных интегральных уравнений / В.К. Иванов. – Киев: Навук. думка, 1968. – 287 с.
12. **Константинова, Я. В.** Оценки погрешности в методе итераций для уравнений I рода / Я. В. Константинова, О. А. Лисковец // Вестник Белорус. ун-та. Серия 1. – 1973. – № 1. – С. 9–15.
13. **Самарский, А. А.** Численные методы решения обратных задач математической физики / А. А. Самарский, П. Н. Вабищевич. – М.: УРСС, 2004. – 480 с.
14. **Денисов, А. М.** Введение в теорию обратных задач / А. М. Денисов. – М.: МГУ, 1994. – 207 с.
15. **Vogel, C. R.** Computational methods for inverse problems / C. R. Vogel. – Philadelphia: SIAM, 2002. – 183 p.
16. **Емелин, И. В.** Правило останова в итерационных процедурах решения некорректных задач / И. В. Емелин, М. А. Красносельский // Автоматика и телемеханика. – 1978. – № 12. – С. 59–63.
17. **Gilyazov, S. F.** Regularization of ill-posed problems by iteration methods / S. F. Gilyazov, N. L. Gol'dman. – Dordrecht etc.: Kluwer Acad. Publ., 2000. – 340 p.
18. **Kabanikhin, S. I.** Inverse and Ill-Posed Problems. Theory and Applications / S. I. Kabanikhin. – Deutschland: De Gruyter, 2011. – 459 p.
19. **Савчук, В. Ф.** Регуляризация операторных уравнений в гильбертовом пространстве / В. Ф. Савчук, О. В. Матысик. – Брест: БрГУ им. А.С. Пушкина, 2008. – 196 с.
20. **Matysik, O. V.** M. A. Krasnosel'skii theorem and iterative methods for solving ill-posed linear problems with a self-adjoint operator / O. V. Matysik, P. P. Zabreiko // Comput. Methods Appl. Math. (De Gruyter). – 2015. – V. 15. – N. 3. – P. 373–389.
21. **Матысик, О. В.** Явные и неявные итерационные процедуры решения некорректно поставленных задач / О. В. Матысик. – Брест: БрГУ им. А.С. Пушкина, 2014. – 213 с.
22. **Матысик, О. В.** Итерационная регуляризация некорректных задач / О. В. Матысик. – Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. – 188 с.
23. **Верлань, А. Ф.** Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы / А. Ф. Верлань, В. С. Сизиков. – Киев: Навук. думка, 1986. – 543 с.

*Дата поступления
в редакцию 14.10.2015*

O.V. Matysik

OF THE ITERATION REGULARIZATION OF ILL-POSED EQUATIONS THE FIRST KIND

Brest State University n. a. A. S. Pushkin, Belarus

Purpose: Suggest a regularizing algorithm for ill-posed problems and to compare it with the previously known methods.

Design/methodology/approach: To construct the iteration method used is the most common of the currently known approaches to solving ill-posed problems - an approach based on the entered academician A.N. Tikhonov regularizer concept, as well as the general theory of ill-posed problems, the theory of functional analysis and computational mathematics.

Findings: Designed and studied effective implicit iteration method for ill-posed problems described by operator equations of the first kind.

Research limitation/implication: There are some unresolved questions - the study of convergence of the method in the case is not exactly given operator.

Originality/value: The research results can be applied for solving applied incorrect problems encountered in spectroscopy and tomography, geophysical, engineering and management.

Key words: Regularization, implicit iteration method, ill-posed problem, Hilbert-space, operator equation of the first kind, self-adjoint and non self-adjoint operator, stopping rule for amendments.

УДК 621.396.96

А.В. Мякинъков, Д.М.Смирнова, С.В. Шишанов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ЦЕЛЕЙ В МНОГОПОЗИЦИОННОЙ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОЙ РЛС

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены методы определения координат целей в многопозиционной сверхширокополосной радиолокационной системе. Предложен способ уменьшения вычислительной сложности алгоритма измерения координат. Для уменьшения размерности векторов первичных измерений предложен алгоритм сортировки первичных измерений, который позволяет исключить избыточную информацию после предварительной локализации цели. Приведены результаты математического моделирования.

Ключевые слова: многопозиционная радиолокационная система, метод измерения координат, точечная отметка цели, ложная отметка, вектор первичных измерений.

Введение

Сверхширокополосные радиолокационные системы (СШП РЛС) обеспечивают высокую разрешающую способность по дальности и точность измерения координат целей [1,2]. Это играет определяющую роль при построении систем ближнего действия, в задачи которых входит, например, обнаружение и определение координат объектов (людей) в закрытом помещении [3, 4]. Дополнительные преимущества по разрешающей способности и точности определения координат объектов обеспечиваются применением многопозиционной конфигурации СШП РЛС [1, 5]. Многопозиционная сверхширокополосная РЛС, обеспечивающая радиолокационный обзор вокруг автомобиля, может применяться для решения задач обеспечения безопасности дорожного движения [6].

В многопозиционных СШП РЛС для формирования совместной зоны обнаружения нескольких разнесенных позиций на расстояниях, сравнимых с расстоянием между позициями, могут применяться слабонаправленные антенны [5,6]. При использовании короткоимпульсного СШП сигнала на каждой из позиций такой системы можно измерить только дальность до объекта. Используя измерения дальностей, полученные различными позициями до одного и того же объекта, можно различными способами вычислить его координаты.

Для определения координат цели дальномерным методом необходимо не менее двух приемных позиций, каждая из которых позволяет измерить время задержки отраженного сигнала и оценить дальность до цели [7]. Однако в многоцелевой ситуации дальномерный метод не позволяет однозначно измерить координаты целей [5].

В условиях многоцелевой обстановки для однозначного измерения координат целей необходимо использовать не менее трех позиций многопозиционной РЛС [5,7]. В качестве первой группы оценок координат целей можно найти точки пересечения линий положения (окружностей), соответствующих крайним приемным позициям. Затем из полученной группы точек следует отобрать те, которые находятся на таких дальностях от фазового центра приемной позиции, в окрестности которых в центральном приемном канале также обнаружены цели. Недостатком описанного метода является то, что в центральном канале в окрестности той же дальности может быть обнаружен другой объект, находящийся в другой азимутальной позиции.

Постановка задачи

Местоположение целей определяется по пересечению линий положения. При наличии случайных ошибок измерения дальностей вместо линий положения получим области конечной ширины. Увеличение числа целей и среднеквадратического отклонения (СКО) ошибок

измерения координат пересечение этих областей неопределенности приводит к появлению ложных отметок. Описанная ситуация иллюстрируется на рис. 1, где дугами окружностей показаны линии положения, кружками положение целей, а крестами – локализация ложных отметок. Среднее число возникающих ложных отметок целей тем больше, чем больше целей в зоне обнаружения и больше СКО ошибок измерения дальности каждой из позиций.

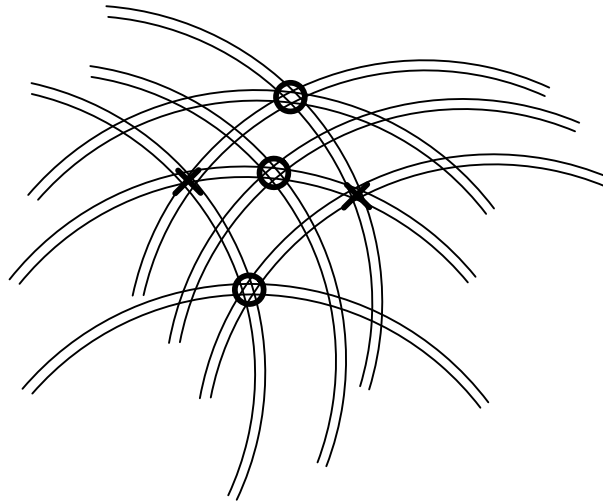


Рис. 1. Формирование ложных отметок целей

В работе [5] предложен способ уменьшения вероятности появления ложных отметок, основанный на межобзорной идентификации точечных отметок целей. Способ заключается в вычислении координат целей двумя различными методами и выборе совпадающих результатов.

При наличии трех измерений дальностей до цели, полученных в трех разнесенных позициях, координаты цели можно определить пеленгационно-дальномерным, дальномерно-суммарно-дальномерным и разностно-дальномерным методами [6,7]. Однако при малом, по сравнению с дальностью до цели, расстоянии между приемными позициями точность определения координат дальномерно-суммарно-дальномерным и разностно-дальномерным методами оказывается неудовлетворительной [3].

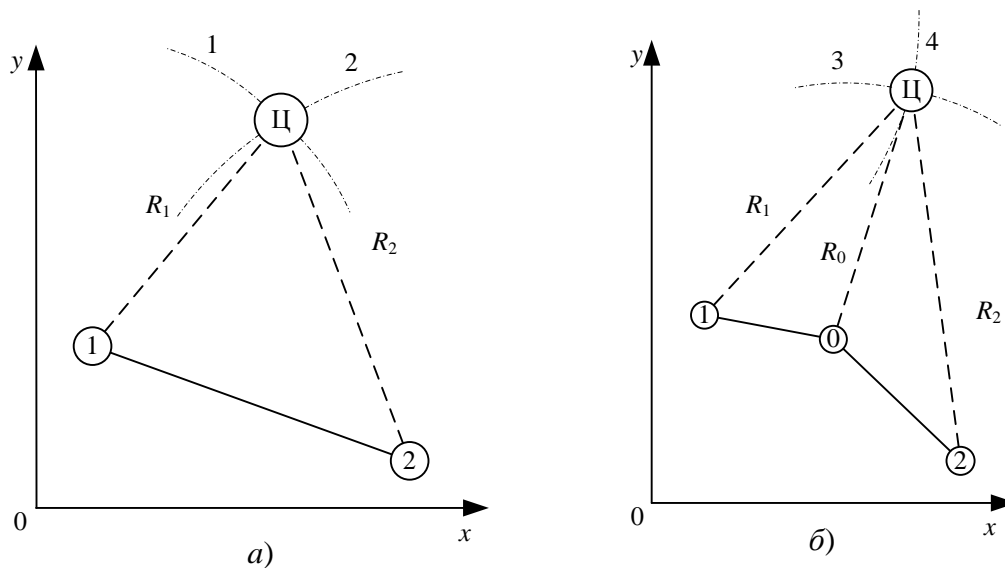


Рис. 2. Геометрия системы

При использовании алгоритма объединения векторов, описанном в [5], в качестве первой группы отметок могут использоваться точки пересечения линий положения, постро-

енных по измерениям дальностей R_1 и R_2 до цели в крайних приемных позициях системы (рис. 2, а), а в качестве второй группы – оценки местоположения целей, полученные по измерениям разности дальностей в крайних позициях и дальности R_0 в центральной приемной позиции (рис. 2, б).

На рис. 2 цифрами 1 и 2 показаны фрагменты линий положения для дальномерного метода измерения координат (окружности), цифрами 3 и 4 – фрагменты линий положения для пеленгационно-дальномерного метода (окружность и гипербола).

В многоцелевой ситуации каждая группа точек будет содержать как правильные, так и ложные отметки целей. Обозначим две группы отметок векторами:

$$\vec{G}_1 = \begin{bmatrix} x_1^{(1)} & y_1^{(1)} \\ x_2^{(1)} & y_2^{(1)} \\ \dots & \dots \\ x_{N_1}^{(1)} & y_{N_1}^{(1)} \end{bmatrix} = \mathbf{F}_1 \begin{bmatrix} r_{11}, r_{21} \\ r_{11}, r_{22} \\ \dots \\ r_{1N}, r_{2N} \end{bmatrix}, \quad \vec{G}_2 = \begin{bmatrix} x_1^{(2)} & y_1^{(2)} \\ x_2^{(2)} & y_2^{(2)} \\ \dots & \dots \\ x_{N_2}^{(2)} & y_{N_2}^{(2)} \end{bmatrix} = \mathbf{F}_2 \begin{bmatrix} r_{11}, \Delta r_{21} \\ r_{11}, \Delta r_{22} \\ \dots \\ r_{1N}, \Delta r_{2N} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где \vec{G}_1 – вектор отметок, полученных дальномерным методом, \vec{G}_2 – вектор отметок, полученных пеленгационно-дальномерным методом, $r_{11} \dots r_{1N}, r_{21} \dots r_{2N}$ – оценки соответствующих дальностей от приемных позиций до целей, $\Delta r_{21} \dots \Delta r_{2N}$ – оценки разности дальностей от крайних приемных позиций до целей, \mathbf{F}_1 и \mathbf{F}_2 – нелинейный векторный функционал, который реализует операцию оценки координат целей соответствующим методом, N – число целей, $x_1^{(1)} \dots x_{N_1}^{(1)}$ и $y_1^{(1)} \dots y_{N_1}^{(1)}$ – координаты цели, вычисленные дальномерным методом, $x_1^{(2)} \dots x_{N_2}^{(2)}$ и $y_1^{(2)} \dots y_{N_2}^{(2)}$ – координаты цели, вычисленные пеленгационно-дальномерным методом, N_1 – размерность вектора \vec{G}_1 , N_2 – размерность вектора \vec{G}_2 .

В качестве оценок местоположения объектов следует выбирать те элементы векторов \vec{G}_1 (\vec{G}_2), для которых выполняется условие $d_{ij} < R_{ij}$, где d_{ij} – евклидово расстояние между отметками, i, j – номера отметок цели, полученных дальномерным и разностно-дальномерным методами, R_{ij} – радиус области неопределенности в точках $\vec{r}_i^{(1)}, \vec{r}_j^{(2)}$, который зависит от величины флуктуационных ошибок измерения дальности:

$$d_{ij} = D(\vec{r}_i^{(1)}, \vec{r}_j^{(2)}) = \sqrt{(x_i^{(1)} - x_j^{(2)})^2 + (y_i^{(1)} - y_j^{(2)})^2},$$

$$R_{ij} = k \sqrt{\sigma_x^2(\vec{r}_i^{(1)}, \vec{r}_j^{(2)}) + \sigma_y^2(\vec{r}_i^{(1)}, \vec{r}_j^{(2)})},$$

где x_i, y_i – элемент вектора \vec{G}_1 с номером i , x_j, y_j – элемент вектора \vec{G}_2 с номером j , величина k выбирается исходя из допустимых вероятностей появления ложной отметки и пропуска истинной, σ_x^2, σ_y^2 – дисперсии ошибок измерения координат объектов в окрестности предполагаемого местоположения.

Способ уменьшения размерности анализируемых векторов

С увеличением числа целей резко возрастают размерности векторов \vec{G}_1 и \vec{G}_2 . Для дальномерного метода размерность вектора \vec{G}_1 увеличивается пропорционально N^2 , для пеленгационно-дальномерного метода размерность вектора \vec{G}_2 увеличивается пропорционально $2 \cdot N^3$, где N – число целей, обнаруженных в центральной позиции [1]. Поэтому в многоцелевой обстановке становится актуальной задача уменьшения вычислительной сложности алгоритма измерения координат. Для решения этой задачи предлагается алгоритм предварительной сортировки первичных измерений, позволяющий сократить размерность векторов \vec{G}_1 и \vec{G}_2 .

При вычислении координат дальномерным методом можно учесть, что если дальность до некоторой цели от левой приемной позиции равна R_1 , то дальность до этой же цели из правой приемной позиции будет лежать в области, ограниченной максимально и минимально возможными дальностями R_{\max} и R_{\min} , которые определяются как длины отрезков от правой приемной позиции до точек пересечения окружности радиуса R_1 с границами зоны обнаружения (рис. 3, а).

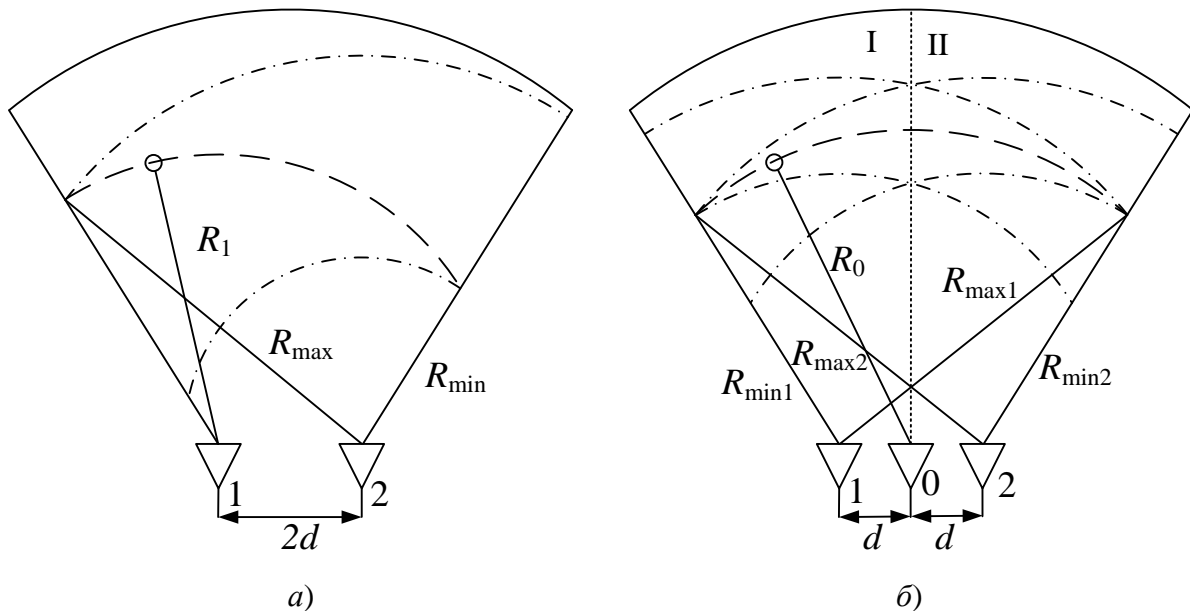


Рис. 3. Пояснение принципа уменьшения числа ложных отметок

При вычислении координат пеленгационно-дальномерным методом можно учесть, что если дальность до цели от центральной приемной позиции равна R_0 , то дальности до этой же цели из крайних позиций, аналогично, будут лежать в соответствующих областях, ограниченных максимально и минимально возможными дальностями $R_{\max1}$ и $R_{\min2}$, $R_{\max2}$ и $R_{\min1}$, которые определяются как длины отрезков от соответствующих крайних приемных позиций до точек пересечения окружности с радиусом R_0 с границами зоны обнаружения (рис. 3, б).

Таким образом, для уменьшения размерности векторов \vec{G}_1 и \vec{G}_2 , при оценке координат целей необходимо учитывать только те значения дальностей, которые принадлежат соответственно следующим интервалам:

$$R_{1\min} < R_1 < R_{1\max},$$

$$R_{2\min} < R_2 < R_{2\max}.$$

Для каждой пары разности дальностей до цели $\Delta R = R_1 - R_2$ и дальности до цели в центральной позиции R_0 пеленгационно-дальномерный метод дает две оценки координат [6]. При вычислении координат цели можно исключить часть ложных отметок целей, определив положение цели относительно центральной приемной позиции (рис. 3, б). Если разность дальностей ΔR отрицательная, то цель располагается в левой полуплоскости (I), если разность дальностей ΔR положительная, то в правой полуплоскости (II).

Таким образом, при использовании пеленгационно-дальномерного метода измерения координат, размерность вектора измерений (\vec{G}_2) можно сократить в два раза.

В пределе размерность векторов \vec{G}_1 и \vec{G}_2 уменьшается до N - числа обнаруженных целей в центральной приемной позиции.

Результаты математического моделирования

Предложенный способ уменьшения числа ложных отметок исследовался методом математического моделирования. При этом полагали, что расстояние между приемными позициями $d = 1$ м, сектор обзора равен 120° , максимальная дальность обнаружения равна 30 м. Результаты усреднялись по 100 реализациям случайного размещения целей в зоне обнаружения.

На рис. 4 приведены графики зависимости размерностей N_1 и N_2 векторов \vec{G}_1 и \vec{G}_2 от числа целей N . Кривые 1 и 3 соответствуют исходной размерности векторов \vec{G}_1 и \vec{G}_2 , кривые 2 и 4 – после применения предложенного способа уменьшения числа ложных отметок, N – число целей.

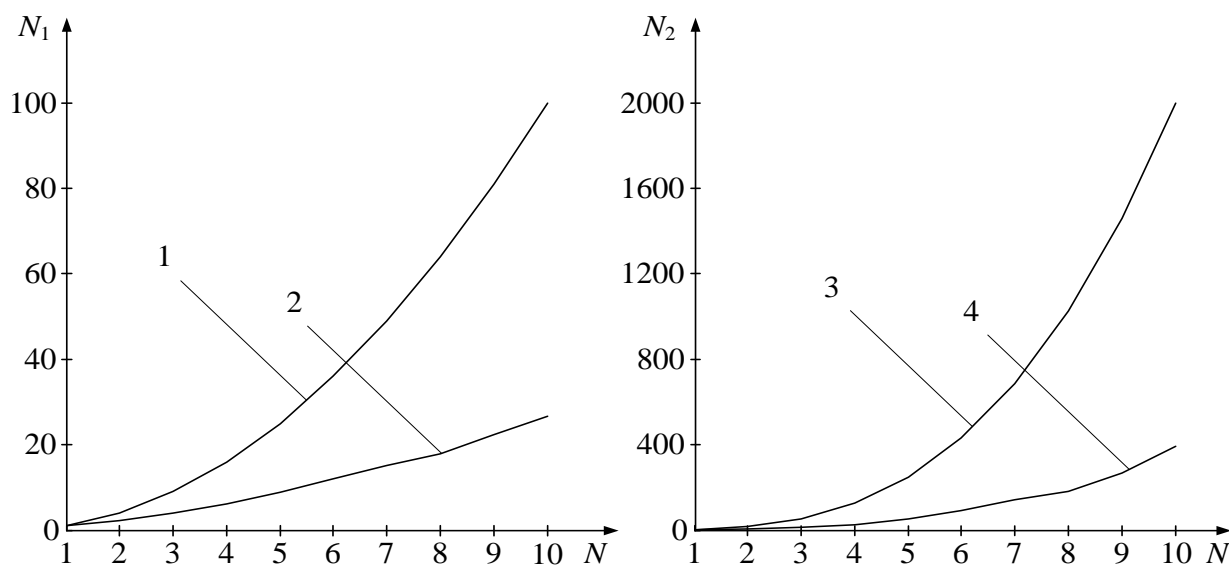


Рис. 4. Размерность векторов \vec{G}_1 и \vec{G}_2 при различном числе целей до и после использования алгоритма

Из рис. 4 видно, что предложенный способ снижения вычислительной сложности алгоритма определения координат целей позволяет уменьшить размерности объединяемых векторов \vec{G}_1 и \vec{G}_2 . При числе обнаруженных целей $N=10$ способ обеспечивает сокращение размерности векторов \vec{G}_1 и \vec{G}_2 в среднем в пять раз.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-37-20383 мол_а_вед.

Библиографический список

1. **Чапурский, В.В.** Избранные задачи теории сверхширокополосных радиолокационных систем / В.В. Чапурский. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 279 с.
2. **Иммореев, И.Я.** Сверхширокополосные радары. Особенности и возможности // Радиотехника и электроника. – 2009. – Т. 54. – № 1. – С. 5–31.
3. **Андрянов, А.В.** Устройства для обнаружения и мониторинга живых движущихся объектов с использованием короткоимпульсных сверхширокополосных измерительных сигналов / А.В. Андрянов [и др.] // Успехи современной радиоэлектроники. – 2009. – Вып. 1–2. – С. 73–82.
4. **Андрянов, А.В.** Обработка сигналов сверхширокополосного радара с антенной решеткой / А.В. Андрянов, А.В. Мякинков // Радиотехника. – 2011. – № 6. – С. 31–36.
5. **Myakinkov, A. V.** Measurement of coordinates of the targets placed behind of radio-transparent

- barrier with multi-static ultra-wide band radar / A. V. Myakinkov, D. M. Smirnova // Ultrawideband and ultrashort impulse signals. Ukraine: Sevastopol, 6-12 September 2010. – P. 1–3.
6. **Шишанов, С. В.** Система кругового обзора транспортных средств на основе сверхширокополосных датчиков / С. В. Шишанов, А. В. Мякинков // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2015. – №2. – С. 55–60.
 7. **Кондратьев, В. С.** Многопозиционные радиотехнические системы / В.С. Кондратьев, А.Ф. Котов, Л. Н. Марков; под ред. В. В. Цветнова. – М.: Радио и связь, 1986. – 264 с.

*Дата поступления
в редакцию 22.10.2015*

A.V. Myakinkov, D.M. Smirnova, S.V. Shishanov

TARGET COORDINATE MEASUREMENT IN MULTI-STATIC ULTRA WIDEBAND RADAR

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

Purpose: The purpose is to develop approach providing reduction of required computational power for target tracking in multi-static ultra wideband radar when observing multiple targets via omni-directional antennas.

Approach/method: To reduce the sizes of vectors of primary parameters used for target identification, the algorithm of preliminary sorting of measurements is used. This algorithm allows excluding of excess information after specifying of possible location of target inside of observation area.

Findings: When big quantity of targets is observed, the proposed technique provides significant reduction of computational complexity of target identification. For the case when more than ten targets are detected, five times reduction takes place.

Research implications: The proposed algorithm can be applied in ultra wideband multi-static radars aimed for detection of targets placed behind of radio-transparent barrier as well as in automotive radars providing observation of targets around the vehicle.

Key words : multi-radar system, method of measuring coordinates, point, mark target, the mark is false, the vector of primary measurements.

УДК 519.17+51-73

Э.О. Душкина, С.К. Игнатов, А.Г. Разуваев

АНАЛИЗ ИНВАРИАНТОВ В ЗАДАЧЕ РАЗДЕЛЕНИЯ НЕИЗОМОРФНЫХ ОРГРАФОВ

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Институт информационных технологий, математики и механики

Использование инвариантов орграфов в задаче разделения ориентационных стереоизомеров кластеров воды $(H_2O)_n$. Метод базируется на теории групп и состоит в построении специальных функций (инвариантов), определенных на орграфах, задающих сетку водородных связей кластера $(H_2O)_n$. Предлагаемый метод проиллюстрирован построением схемы разделения стереоизомеров в гексагональной ячейке кристаллического льда $(H_2O)_6$. Анализ инвариантов может служить перспективным методом расчета энергий кластеров $(H_2O)_n$, что является актуальной проблемой в физике и химии атмосферы.

Ключевые слова: орграфы, группы симметрии, инварианты, стереоизомеры.

Введение

Работа является иллюстрацией применения теоретико-групповых методов в решении некоторых задач физики и химии атмосферы. В газовой (пары воды) или твердой фазе (лед) молекулы воды образуют кластеры $(H_2O)_n$ – структуры, где n молекул воды связаны между собой водородными связями. При данной сетке таких связей положение протонов на них может быть различным. Такие стереоизомеры обладают своими свойствами и особенностями взаимодействия с другими молекулами.

В статье на примере гексагонального кластера $(H_2O)_6$ с диэдральной группой симметрии D_4 кислородного остова показано, как введенные в [1] инварианты группы симметрии кластера могут быть использованы в задаче разделения стереоизомеров.

В данной статье рассматривается гексагональная структура кристалла льда $(H_2O)_6$, которая имеет различные ориентационные изомеры. Атомы кислорода находятся в вершинах бипирамиды, а водородные связи идут по ребрам бипирамиды (рис. 1, а).

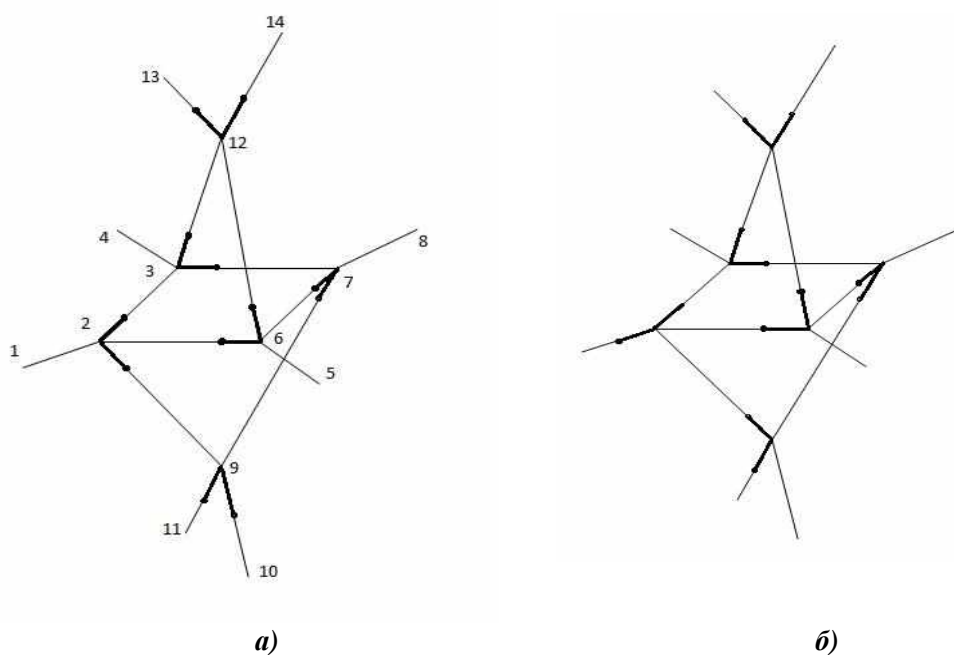


Рис. 1

Направление двух атомов водорода, связанных с одним кислородным центром (кислородом) может меняться. Для кристалла льда имеет место правило *Бернала-Фаулера*: в любую вершину степени четыре входит две дуги и выходит две дуги. Для элементарной ячейки может быть другое расположение атомов водорода, также удовлетворяющие правилу Бернала-Фаулера (рис. 1, б). Если структуру (а) нельзя перевести поворотами и отражениями в структуру (б) (рис. 1), то, по определению это два разных ориентационных изомера.

Физико-химические свойства ориентационно различных изомеров различны, поэтому актуальной является задача подсчета числа ориентационно различных изомеров.

Поставленная задача может быть решена в рамках перечисления орграфов, построенных на данном неориентированном графе.

Пусть γ есть неориентированный граф. Всюду далее считаем, что γ – связный граф без петель и кратных ребер, число которых m . Группу $\text{Aut} \gamma$ всех автоморфизмов графа γ считаем известной, и пусть $G \subset \text{Aut} \gamma$ ее некоторая подгруппа. Выбор подгруппы G диктуется постановкой решаемой задачи. Например, если граф γ задает некоторую молекулярную систему, то в качестве G обычно выступает точечная группа симметрии системы, которая, как правило, является собственной подгруппой группы $\text{Aut} \gamma$. Всюду далее считаем, что группа G состоит из n элементов: $G = \{g_1, \dots, g_n\}$.

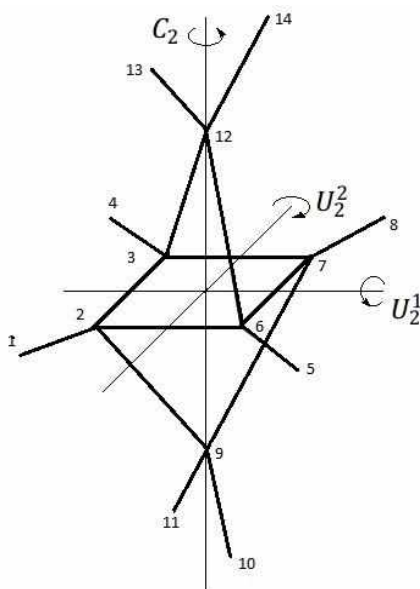


Рис. 2

Рассмотрим граф γ на рис. 2, который имеет $m = 16$ ребер и $\text{Aut} \gamma$ – диэдральную подгруппу D_4 элементы которой есть повороты и отражения: G_2 – поворот вокруг вертикальной оси на угол π против часовой стрелки, U_2^1, U_2^2 – повороты вокруг горизонтальных осей на угол π , δ_1 и δ_2 – симметрия относительно двух вертикальных плоскостей, проходящих через вершины 2, 7 и 3, 6, соответственно, $S_4^1 = U_2^1 \delta_1$, $S_4^2 = U_2^2 \delta_2$ – зеркально-поворотные оси, то есть $D_4 = \{E, C_2, U_2^1, U_2^2, \delta_1, \delta_2, S_4^1, S_4^2\}$

Элементы группы G можно задать в виде подстановок вершин графа γ :

$$E = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 \end{pmatrix};$$

$$C_2 = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 \\ 8 & 7 & 6 & 5 & 4 & 3 & 2 & 1 & 9 & 11 & 10 & 12 & 14 & 13 \end{pmatrix};$$

$$U_2^1 = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 \\ 4 & 3 & 2 & 1 & 8 & 7 & 6 & 5 & 12 & 14 & 13 & 9 & 11 & 10 \end{pmatrix};$$

$$\begin{aligned}
 U_2^2 &= \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 \\ 5 & 6 & 7 & 8 & 1 & 2 & 3 & 4 & 12 & 13 & 14 & 9 & 10 & 11 \end{pmatrix}; \\
 \delta_1 &= \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 \\ 1 & 2 & 6 & 5 & 4 & 3 & 7 & 8 & 9 & 11 & 10 & 12 & 13 & 14 \end{pmatrix}; \\
 \delta_2 &= \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 \\ 8 & 7 & 3 & 4 & 5 & 6 & 2 & 1 & 9 & 10 & 11 & 12 & 14 & 13 \end{pmatrix}; \\
 S_4^1 &= \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 \\ 4 & 3 & 7 & 8 & 1 & 2 & 6 & 5 & 12 & 13 & 14 & 9 & 11 & 10 \end{pmatrix}; \\
 S_4^2 &= \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 \\ 5 & 6 & 2 & 1 & 8 & 7 & 3 & 4 & 12 & 14 & 13 & 9 & 10 & 11 \end{pmatrix}.
 \end{aligned}$$

Пусть (i, j) – ребро, соединяющее i и j . Так как граф неориентированный, то $(i, j) = (j, i)$. Представление каждого $g \in G$ подстановкой вершин определяет действие G на ребра графа $g(i, j) = (g(i), g(j))$.

Каждому ребру (i, j) приписываем символ b_{ij} и ориентацию ребер на γ определяем по правилу $b_{ij} = +1$, если ориентация ребра (дуга) направлена от i к j и $b_{ij} = -1$ в противном случае. Очевидно $b_{ij} = -b_{ji}$. Все m дуг b_{ij} , где $i < j$, выбранных в любой последовательности, будем обозначать X_1, \dots, X_m .

Зададим на γ некоторую фиксированную ориентацию ребер (рис. 3), удовлетворяющую правилу Бернала-Фаулера.

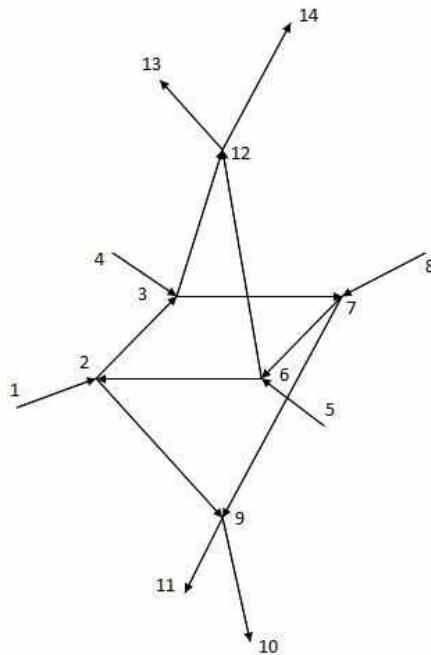


Рис. 3

Для нашего примера зададим ориентацию: $X_1 = b_{23}$, $X_2 = b_{37}$, $X_3 = b_{76}$, $X_4 = b_{62}$, $X_5 = b_{29}$, $X_6 = b_{79}$, $X_7 = b_{6,12}$, $X_8 = b_{3,12}$, $X_9 = b_{9,10}$, $X_{10} = b_{9,11}$, $X_{11} = b_{12,13}$, $X_{12} = b_{12,14}$, $X_{13} = b_{1,2}$, $X_{14} = b_{4,3}$, $X_{15} = b_{8,7}$, $X_{16} = b_{5,6}$. Если $b_{ij} = X_k$, то $b_{ji} = -X_k$.

Тогда элементам группы G будут отвечать следующие подстановки на множестве ребер:

$$E = \begin{pmatrix} X_1 & X_2 & X_3 & X_4 & X_5 & X_6 & X_7 & X_8 & X_9 & X_{10} & X_{11} & X_{12} & X_{13} & X_{14} & X_{15} & X_{16} \\ X_1 & X_2 & X_3 & X_4 & X_5 & X_6 & X_7 & X_8 & X_9 & X_{10} & X_{11} & X_{12} & X_{13} & X_{14} & X_{15} & X_{16} \end{pmatrix};$$

$$C_2 = \begin{pmatrix} X_1 & X_2 & X_3 & X_4 & X_5 & X_6 & X_7 & X_8 & X_9 & X_{10} & X_{11} & X_{12} & X_{13} & X_{14} & X_{15} & X_{16} \\ X_3 & X_4 & X_1 & X_2 & X_6 & X_5 & X_8 & X_7 & X_{10} & X_9 & X_{12} & X_{11} & X_{15} & X_{16} & X_{13} & X_{14} \end{pmatrix};$$

$$U_2^1 = \begin{pmatrix} X_1 & X_2 & X_3 & X_4 & X_5 & X_6 & X_7 & X_8 & X_9 & X_{10} & X_{11} & X_{12} & X_{13} & X_{14} & X_{15} & X_{16} \\ -X_1 & -X_4 & -X_3 & -X_2 & X_8 & X_7 & X_6 & X_5 & X_{12} & X_{11} & X_{10} & X_9 & X_{14} & X_{13} & X_{16} & X_{15} \end{pmatrix};$$

$$U_2^2 = \begin{pmatrix} X_1 & X_2 & X_3 & X_4 & X_5 & X_6 & X_7 & X_8 & X_9 & X_{10} & X_{11} & X_{12} & X_{13} & X_{14} & X_{15} & X_{16} \\ -X_3 & -X_2 & -X_1 & -X_4 & X_7 & X_8 & X_5 & X_6 & X_{11} & X_{12} & X_9 & X_{10} & X_{16} & X_{15} & X_{14} & X_{13} \end{pmatrix};$$

$$\delta_1 = \begin{pmatrix} X_1 & X_2 & X_3 & X_4 & X_5 & X_6 & X_7 & X_8 & X_9 & X_{10} & X_{11} & X_{12} & X_{13} & X_{14} & X_{15} & X_{16} \\ -X_4 & -X_3 & -X_2 & -X_1 & X_5 & X_6 & X_8 & X_7 & X_{10} & X_9 & X_{11} & X_{12} & X_{13} & X_{16} & X_{15} & X_{14} \end{pmatrix};$$

$$\delta_2 = \begin{pmatrix} X_1 & X_2 & X_3 & X_4 & X_5 & X_6 & X_7 & X_8 & X_9 & X_{10} & X_{11} & X_{12} & X_{13} & X_{14} & X_{15} & X_{16} \\ -X_2 & -X_1 & -X_4 & -X_3 & X_6 & X_5 & X_7 & X_8 & X_9 & X_{10} & X_{12} & X_{11} & X_{15} & X_{14} & X_{13} & X_{16} \end{pmatrix};$$

$$S_4^1 = \begin{pmatrix} X_1 & X_2 & X_3 & X_4 & X_5 & X_6 & X_7 & X_8 & X_9 & X_{10} & X_{11} & X_{12} & X_{13} & X_{14} & X_{15} & X_{16} \\ X_2 & X_3 & X_4 & X_1 & X_8 & X_7 & X_5 & X_6 & X_{11} & X_{12} & X_{10} & X_9 & X_{14} & X_{15} & X_{16} & X_{13} \end{pmatrix};$$

$$S_4^2 = \begin{pmatrix} X_1 & X_2 & X_3 & X_4 & X_5 & X_6 & X_7 & X_8 & X_9 & X_{10} & X_{11} & X_{12} & X_{13} & X_{14} & X_{15} & X_{16} \\ X_4 & X_1 & X_2 & X_3 & X_7 & X_8 & X_6 & X_5 & X_{12} & X_{11} & X_9 & X_{10} & X_{16} & X_{13} & X_{14} & X_{15} \end{pmatrix}.$$

Задания всех подстановок запишем в табл. 1.

Таблица 1

Действие группы $G = D_4$ на дуги орграфа								
	E	C_2	U_2^1	U_2^2	δ_1	δ_2	S_4^1	S_4^2
X_1	X_1	X_3	$-X_1$	$-X_3$	$-X_4$	$-X_2$	X_2	X_4
X_2	X_2	X_4	$-X_4$	$-X_2$	$-X_3$	$-X_1$	X_3	X_1
X_3	X_3	X_1	$-X_3$	$-X_1$	$-X_2$	$-X_4$	X_4	X_2
X_4	X_4	X_2	$-X_2$	$-X_4$	$-X_1$	$-X_3$	X_1	X_3
X_5	X_5	X_6	X_8	X_7	X_5	X_6	X_8	X_7
X_6	X_6	X_5	X_7	X_8	X_6	X_5	X_7	X_8
X_7	X_7	X_8	X_6	X_5	X_8	X_7	X_5	X_6
X_8	X_8	X_7	X_5	X_6	X_7	X_8	X_6	X_5
X_9	X_9	X_{10}	X_{12}	X_{11}	X_{10}	X_9	X_{11}	X_{12}
X_{10}	X_{10}	X_9	X_{11}	X_{12}	X_9	X_{10}	X_{12}	X_{11}
X_{11}	X_{11}	X_{12}	X_{10}	X_9	X_{11}	X_{12}	X_{10}	X_9
X_{12}	X_{12}	X_{11}	X_9	X_{10}	X_{12}	X_{11}	X_9	X_{10}
X_{13}	X_{13}	X_{15}	X_{14}	X_{16}	X_{13}	X_{15}	X_{14}	X_{16}
X_{14}	X_{14}	X_{16}	X_{13}	X_{15}	X_{16}	X_{14}	X_{15}	X_{13}
X_{15}	X_{15}	X_{13}	X_{16}	X_{14}	X_{15}	X_{13}	X_{16}	X_{14}
X_{16}	X_{16}	X_{14}	X_{15}	X_{13}	X_{14}	X_{16}	X_{13}	X_{15}

Произвольный орграф Γ на γ записываем в виде $\Gamma(X_1, \dots, X_m)$, а задание конкретного орграфа состоит в присвоении переменным X_k , конкретных значений ± 1 . Последнее приводит к записи конкретного орграфа в виде вектора-строки с компонентами ± 1 .

Пусть Ψ есть некоторое множество орграфов, определенных на данном γ . От Ψ требуем условия: если $\Gamma \in \Psi$, то $g\Gamma \in \Psi$, то есть G действует на Ψ . Для каждого $\Gamma_\alpha \in \Psi$ определена орбита: $\Gamma_\alpha = \{g_1(\Gamma_\alpha), \dots, g_n(\Gamma_\alpha)\}$ и $\Psi = \Psi_1 \cup \dots \cup \Psi_s$. По определению каждая орбита – множество орграфов изоморфных относительно группы G , а s – число неизоморфных орграфов в Ψ .

Возьмем оргграф Γ_1 , которому отвечает вектор-строка $[1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]$, то есть $\Gamma_1 = [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]$. Действие G на ребра γ определяет действие G на дугах оргграфа: $g\Gamma(X_1, \dots, X_m) = \Gamma(g(X_1), \dots, g(X_m))$. Согласно заданию группы G как подстановок $E, C_2, U_2^1, U_2^2, \delta_1, \delta_2, S_4^1, S_4^2$ на вершинах γ и введенным обозначениям для дуг оргграфа $\Gamma(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{15}, X_{16})$, действие G на Γ будет определено таблицей 1. То есть

$$E\Gamma_1 = [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1];$$

$$C_2\Gamma_1 = [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1];$$

$$U_2^1\Gamma_1 = [-1, -1, -1, -1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1];$$

$$U_2^2\Gamma_1 = [-1, -1, -1, -1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1];$$

$$\delta_1\Gamma_1 = [-1, -1, -1, -1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1];$$

$$\delta_2\Gamma_1 = [-1, -1, -1, -1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1];$$

$$S_4^1\Gamma_1 = [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1];$$

$$S_4^2\Gamma_1 = [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1].$$

Следовательно, оргграфу Γ_1 отвечает орбита длины 2.

Далее берется другая комбинация, которая не встречалась в ранее найденных оргграфах. В процессе работы был разработан алгоритм нахождения всех неизоморфных оргграфов и реализован в виде компьютерной программы. В результате работы программа выдает файл со списком всех неизоморфных оргграфов.

Итог: 27 ориентационных изомеров.

$$\Gamma_1 = [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1];$$

$$\Gamma_2 = [1, 1, 1, 1, -1, 1, 1, 1, -1, 1, 1, 1, -1, 1, 1, 1];$$

$$\Gamma_3 = [-1, -1, -1, -1, -1, 1, 1, 1, -1, 1, 1, 1, -1, 1, 1, 1];$$

$$\Gamma_4 = [-1, -1, 1, 1, 1, -1, 1, 1, -1, 1, 1, 1, -1, 1, 1, 1];$$

$$\Gamma_5 = [-1, -1, -1, 1, 1, 1, -1, 1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, 1];$$

$$\Gamma_6 = [-1, -1, -1, 1, 1, 1, -1, 1, 1, 1, 1, -1, -1, 1, 1, 1];$$

$$\Gamma_7 = [1, -1, 1, 1, -1, -1, 1, 1, -1, -1, 1, 1, -1, -1, 1, 1];$$

$$\Gamma_8 = [1, -1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, -1, 1, 1];$$

$$\Gamma_9 = [1, 1, 1, 1, -1, 1, 1, -1, -1, 1, -1, 1, -1, -1, 1, 1];$$

$$\Gamma_{10} = [-1, -1, -1, -1, -1, 1, 1, -1, -1, 1, -1, 1, -1, -1, 1, 1];$$

$$\Gamma_{11} = [-1, -1, 1, 1, 1, -1, 1, -1, -1, 1, -1, 1, -1, -1, 1, 1];$$

$$\Gamma_{12} = [1, -1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, -1, -1, 1, -1, -1, 1, 1];$$

$$\Gamma_{13} = [1, 1, 1, 1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, -1, 1, -1, -1, 1, 1];$$

$$\Gamma_{14} = [1, -1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, -1, -1, -1, 1, 1];$$

$$\Gamma_{15} = [1, 1, 1, 1, -1, 1, 1, -1, -1, 1, 1, -1, -1, -1, 1, 1];$$

$$\Gamma_{16} = [1, 1, 1, 1, -1, -1, 1, 1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1];$$

$$\Gamma_{17} = [1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1];$$

$$\Gamma_{18} = [-1, -1, -1, 1, 1, -1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1];$$

$$\Gamma_{19} = [-1, 1, -1, -1, -1, 1, 1, -1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1];$$

$$\Gamma_{20} = [-1, 1, 1, 1, 1, -1, 1, -1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1];$$

$$\Gamma_{21} = [-1, 1, -1, 1, 1, 1, -1, -1, 1, 1, -1, -1, -1, 1, -1, 1];$$

$$\Gamma_{22} = [1, -1, -1, 1, -1, -1, -1, 1, -1, -1, -1, 1, -1, -1, -1, 1];$$

$$\Gamma_{23} = [1, 1, 1, 1, -1, -1, 1, -1, -1, -1, -1, 1, -1, -1, -1, 1];$$

$$\Gamma_{24} = [-1, -1, -1, -1, -1, -1, 1, -1, -1, -1, -1, 1, -1, -1, -1, 1];$$

$$\Gamma_{25} = [1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, -1, -1, 1, -1, -1, -1, -1, -1, 1];$$

$$\Gamma_{26} = [1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, -1, 1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, 1];$$

$$\Gamma_{27} = [1, 1, 1, 1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1]$$

Все найденные ориентационные изомеры изображены на рис. 4.

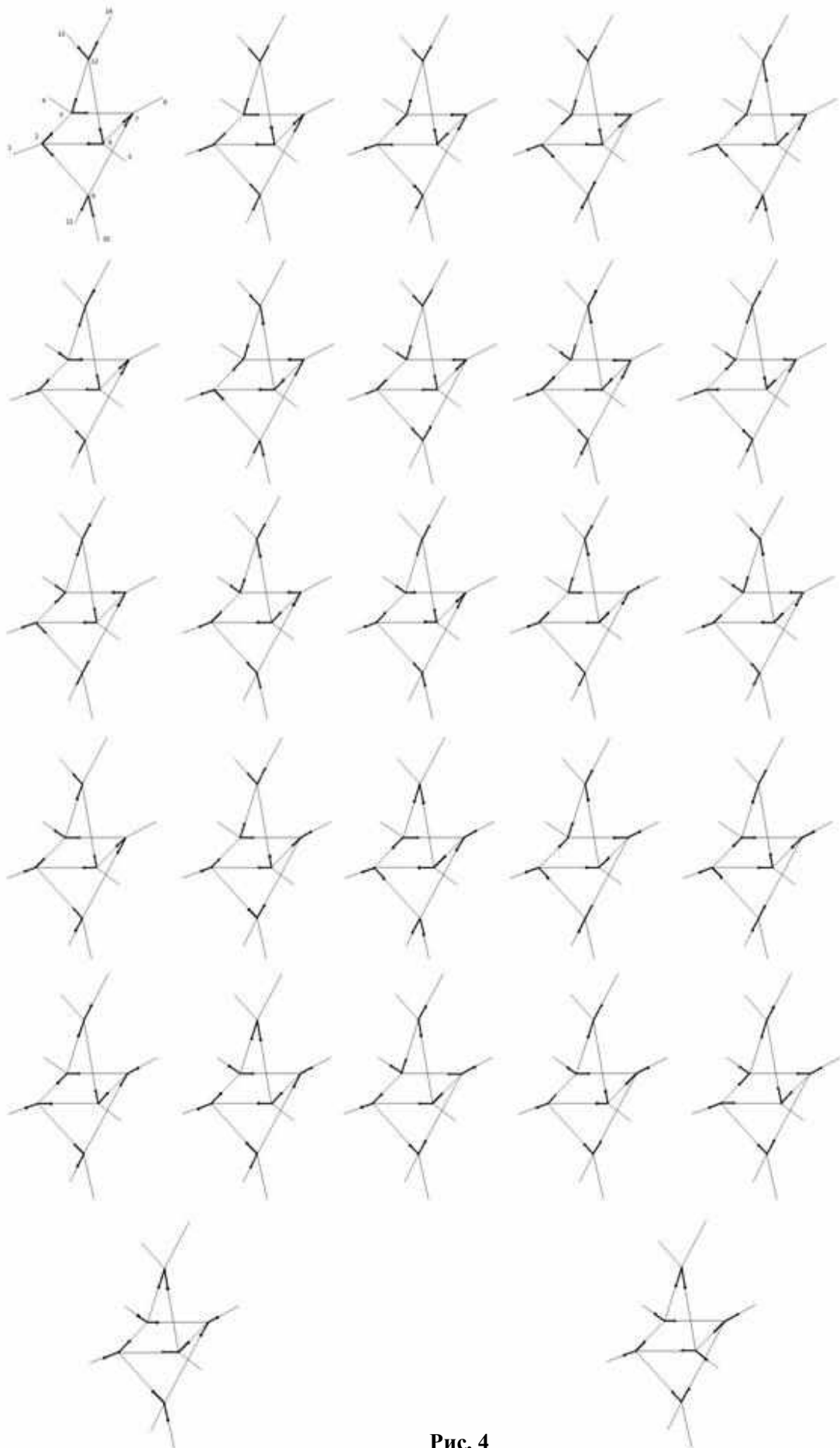


Рис. 4

Для произвольного орграфа $\Gamma(X_1, \dots, X_m) \in \Psi$ определим функции $J = J(X_1, \dots, X_m)$ как суммы:

$$J_i = \sum_{g \in G} g(x_i), \quad J_{ij} = \sum_{g \in G} g(x_i)g(x_j),$$

$$J_{ijk} = \sum_{g \in G} g(x_i)g(x_j)g(x_k), \dots, \quad J_{ijk\dots l} = \sum_{g \in G} g(x_i)g(x_j)g(x_k)\dots g(x_l), \quad (1)$$

которые являются полилинейными функциями своих аргументов. Инварианты J_i, J_{ij}, J_{ijk} , и так далее будем называть инвариантами 1, 2, 3-го и т. д. порядков.

Каждая функция из (1) преобразуется по единичному представлению группы G : $gJ(X_1, \dots, X_m) = J(g(X_1), \dots, g(X_m)) = J(X_1, \dots, X_m)$. Саму систему (1) назовем системой полилинейных инвариантов.

Инварианты (1) – легко вычисляемые функции. Для их вычисления применяется табл. 1.

Далее представлены инварианты, необходимые для дальнейшего решения задачи.

$$J_5 \sum_{g \in G} g(X_1) = X_5 + X_6 + X_6 + X_5 + X_7 + X_8 + X_8 + X_7,$$

$$J_{21} = 2(X_1X_2 + X_1X_4 + X_2X_3 + X_3X_4),$$

$$J_{31} = 4(X_1X_3 + X_2X_4),$$

$$J_{61} = X_6X_1 + X_5X_3 - X_5X_2 - X_6X_4 - X_8X_3 - X_7X_1 + X_7X_2 + X_8X_4,$$

$$J_{91} = X_9X_1 + X_{10}X_3 - X_9X_2 - X_{10}X_4 - X_{11}X_3 - X_{12}X_1 + X_{11}X_2 + X_{12}X_4,$$

$$J_{65} = 4(X_5X_6 + X_7X_8),$$

$$J_{11,5} = 2(X_{11}X_5 + X_{12}X_6 + X_9X_7 + X_{10}X_8),$$

$$J_{921} = 2(X_9X_2X_1 + X_{10}X_4X_3 + X_{11}X_2X_3 + X_{12}X_1X_4),$$

$$J_{951} = X_9X_5X_1 + X_{10}X_6X_3 - X_9X_6X_2 - X_{10}X_5X_4 - X_{11}X_7X_3 - X_{12}X_8X_1 + X_{11}X_8X_2 + X_{12}X_7X_4.$$

Ссылаясь на найденные ориентационные изомеры, вычислим значения инвариантов на заданных 27 орграфах. Эти значения представлены в виде табл. 2, где представлены значения инвариантов на $\Gamma_1 - \Gamma_{27}$.

Таблица 2

	J_5	J_{21}	J_{31}	J_{61}	J_{91}	J_{65}	$J_{11,5}$	J_{921}	J_{951}
Γ_1	8								
Γ_2	4	8	8	8	0	0	0	4	4
Γ_3	4	8	8	8	0	0	0	4	-4
Γ_4	4	0	-8	-8					
Γ_5	4	0	0	0	0				
Γ_6	4	0	0	0	-4				
Γ_7	0	0	0	-4					
Γ_8	0	0	-8	-8	-4	-4	8		
Γ_9	0	8	8	8	8	-8	0	0	8
Γ_{10}	0	8	8	8	8	-8	0	0	-8
Γ_{11}	0	0	-8	-8	4	4	-8		
Γ_{12}	0	0	-8	-8	4	4	0		
Γ_{13}	0	8	8	8	8	-8	8		
Γ_{14}	0	0	-8	-8	-4	-4	0		
Γ_{15}	0	8	8	8	8	-8	-8		
Γ_{16}	0	8	8	8	8	8			
Γ_{17}	0	0	0	4	-4				
Γ_{18}	0	0	0	4	0	0	0	-8	
Γ_{19}	0	0	0	4	0	0	0	8	

Окончание табл. 2

Γ_{20}	0	0	0	4	4				
Γ_{21}	0	-8							
Γ_{22}	-4	0	-8						
Γ_{23}	-4	8	8	8	0	0	0	-4	4
Γ_{24}	-4	8	8	8	0	0	0	-4	-4
Γ_{25}	-4	0	8	8	-4				
Γ_{26}	-4	0	8	8	0				
Γ_{27}	-8								

Система инвариантов называется полной относительно действия группы G на Ψ , если для любой пары $\Gamma_i \not\cong \Gamma_j$ из Ψ найдется такая функция J из этой системы, что $J(\Gamma_i) \neq J(\Gamma_j)$.

В результате решения поставленной задачи для конкретного примера (рис. 1) было найдено 27 ориентационных изомеров, которые разделяются с помощью системы инвариантов, состоящей из одного инварианта 1-го порядка, шести инвариантов 2-го порядка и двух инвариантов 3-го порядка. Процедура разделения представлена на рис. 5.

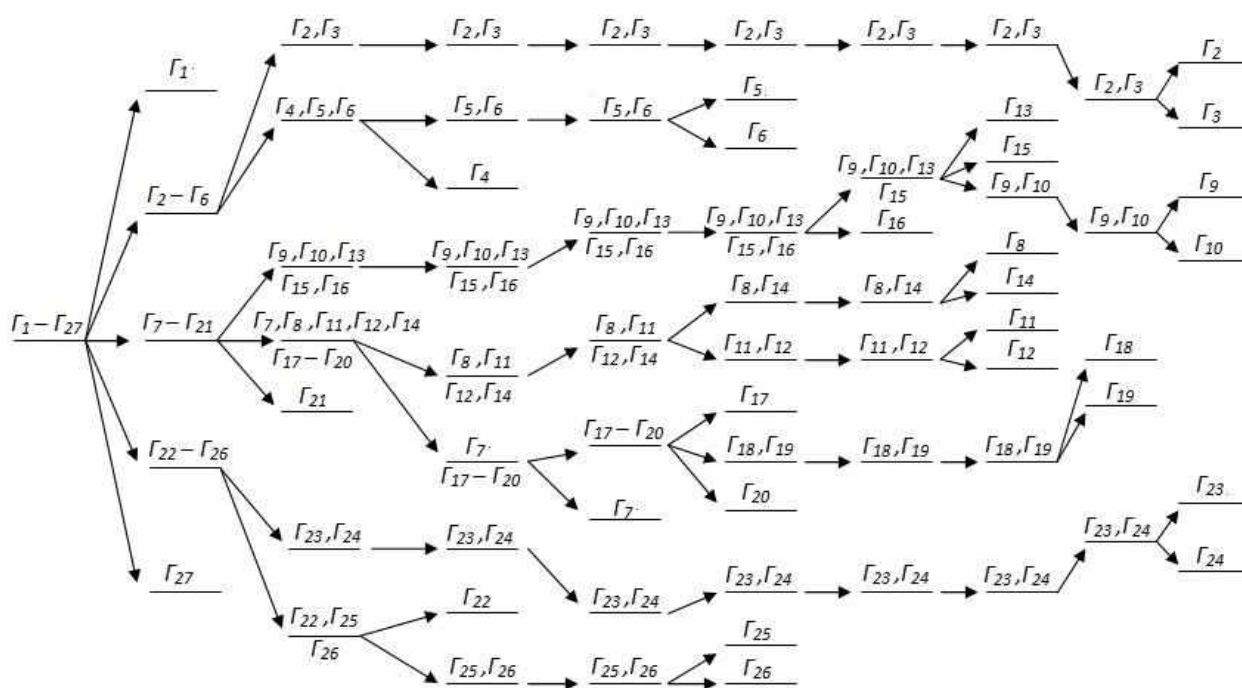


Рис. 5

Библиографический список

1. **Jer-Lai Kuo.** Singer: On the use of graph invariants for efficiently generating hydrogen bond topologies and predicting physical properties of water clusters and ice / Jer-Lai Kuo, James V. Coe, J. Sherwin // Journal of chemical physics. – 2001. – № 6.
2. **Разуваев, А. Г.** Полнота системы полилинейных инвариантов орграфов / А. Г. Разуваев, С. К. Игнатов // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. – 2010. – №3(1). – С. 148–153.

Дата поступления
в редакцию 26.10.2015

E.O. Dushkina, S.K. Ignatov, A.G. Razuvaev

**AN ANALYSIS OF THE INVARIANTS IN THE TASK OF SEPARATION
OF NONISOMORFIC ORIENTED GRAPHS**

Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod,
Institute of Information Technology, Mathematics and Mechanics

Purpose: To describe the method of invariants of graphs in the task of separation of orientational stereoisomers of water clusters $(\text{H}_2\text{O})_n$.

Design/methodology/approach: The usage of The method is based on the theory of groups and consists of building up special functions (invariants), determined by digraphs defining the network of cluster hydrogen bonds $(\text{H}_2\text{O})_n$. The suggested method is illustrated by building up the scheme of separation of stereoisomers in a hexagonal cell of crystalline ice $(\text{H}_2\text{O})_6$.

Findings: The solution for the problem is important for the study of physical and chemical interaction processes of ice crystal molecules which are located in the upper atmosphere.

Research/limitations/implications: The analysis of invariants may serve as a promising method of calculating the energy clusters $(\text{H}_2\text{O})_n$, which is the burning problem in the physics and chemistry of the atmosphere.

Originality/value: It is the first time when the usage of invariants was examined in the problem of nonisomorphic oriented graph partition.

Key words: oriented graphs, symmetry groups, invariants, stereoisomers.

УДК 621.376

В.В. Бирюков, М.И. Курзенков, Р.В. Мауль

СТАБИЛИЗАЦИЯ ЧАСТОТЫ ГЕНЕРАТОРА СИГНАЛОВ Г4-207

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Предложен способ улучшения характеристик серийно выпускаемого генератора сигналов Г4-207. Приведены результаты моделирования. Показано существенное повышение характеристик генератора при синхронизации кольцом фазовой автоподстройки частоты.

Ключевые слова: генератор сигналов, фазовая автоподстройка частоты, нестабильность частоты, фазовые шумы.

Измерительные генераторы сигналов применяются в качестве источников колебаний в режимах НГ, ИМ, АМ, ЧМ при настройке, регулировке, испытаниях радиотехнических устройств. Они обеспечивают калибровку измерителей мощности, измерение потерь, ослаблений, КСВН, параметров антенн и антенных трактов. Могут быть использованы в составе автоматизированных измерительных систем, а также в качестве свип-генераторов при панорамных измерениях параметров цепей.

Одним из таких приборов является серийно выпускаемый отечественной промышленностью генератор сигналов Г4-207. Это многофункциональный, малогабаритный генератор с калиброванным уровнем выходной мощности в диапазоне 17,44-25,86 ГГц (рис. 1).

**Рис. 1**

Встроенная однокристалльная микроЭВМ полностью автоматизирует процесс управления прибором, производит набор и установку параметров, исключает установку запрещенных режимов, устанавливает отсчет параметров в заданных единицах, обеспечивает управление прибором по каналу общего пользования (КОП).

Автоматическая калибровка нуля усилителя постоянного тока системы АРМ позволяет существенно увеличить динамический диапазон ее работы и свести к минимуму температурную погрешность уровня выходной мощности.

Технические характеристики характеристики генератора:

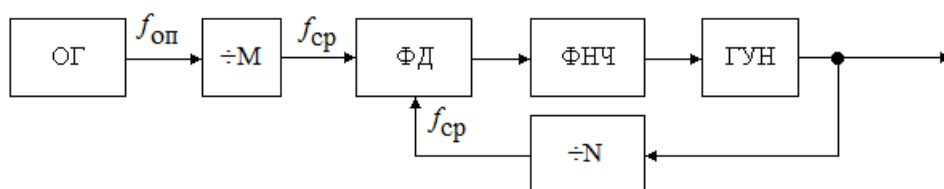
- диапазон частот: 17,44-25,86 ГГц;
- погрешность установки частоты $\pm 0,45\%$;
- уровень выходной мощности: 40 мВт;
- пределы регулирования уровня выходной мощности: 28 дБ;
- погрешность установки уровня выходной мощности, не более $\pm 1,5$ дБ;
- относительный уровень гармоник и субгармоник, не более: -30 дБ (3/2f, 2f);
- уровень мощности с дополнительного выхода (пределы регулирования 20 дБ), не менее 1 мВт.

- Частотная модуляция:
 - диапазон модулирующих частот 0,05-100 кГц;
 - девиация частоты до 50 МГц.
- Амплитудная модуляция:
 - диапазон модулирующих частот 0,05-5 кГц;
 - коэффициент модуляции 0-50 %.
- Импульсная модуляция:
 - частота повторения импульсов 0,05-200 кГц;
 - длительность импульсов 0,1 мкс-10,0 мс;
 - подавление сигнала в паузе, не менее 60 дБ.
- Свипирование:
 - полоса свипирования от 10 МГц до полного диапазона рабочих частот;
 - время автоматического свипирования 20 мс, 80 мс; 1 с.

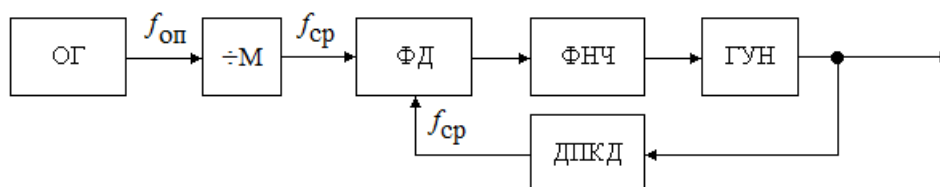
Диапазон рабочих температур $-10\text{--}+50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Относительная влажность воздуха при $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ не более 98 %. Питание от сети переменного тока $220 \pm 22\text{ В}$, $50 \pm 0,5\text{ Гц}$; $115 \pm 5,75\text{ В}$, $400 \pm 10\text{ Гц}$. Потребляемая мощность не более 60 ВА. Габариты; масса: $240 \times 120 \times 390\text{ мм}$; 9,5 кг.

Основными недостатками данного прибора являются низкая стабильность частоты и высокая погрешность установки частоты. Эти недостатки могут быть устранены путем стабилизации частоты генератора с помощью кольца фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) [1]. Система ФАПЧ может быть выполнена с целочисленным или дробно-переменным коэффициентом деления частоты.

В схеме с целочисленным коэффициентом деления синхронизируемый генератор, управляемый напряжением (ГУН), охвачен кольцом автоматической подстройки частоты, содержащим фазовый дискриминатор (ФД), опорный делитель частоты $\div M$, делители частоты в кольце $\div N$ и $\div P$ и цепь обратной связи с фильтром нижних частот (ФНЧ) (рис. 2, а). Делитель частоты $\div P$ работает на частоте f выходного сигнала ГУН с фиксированным коэффициентом деления, кратным степени 2, а делитель $\div N$ работает как управляемый счетчик с произвольным коэффициентом деления.



а)



б)

Рис. 2

Фазовый детектор на частоте сравнения $f_{\text{ср}} = \frac{f_0}{M}$ сравнивает приведенные фазы опорного (ОГ) и подстраиваемого генераторов. Если в кольце ФАПЧ установился режим фазовой

синхронизации, приведенные частоты совпадают, и тогда разность фаз колебаний на ФД, напряжение на его выходе и напряжение на выходе ФНЧ постоянны. Коэффициент пропорциональности частот опорного генератора и ГУН представляет собой отношение целых чисел:

$$f = \frac{N}{M} f_0.$$

При различных значениях M и N частота ГУН может принимать дискретные значения с шагом $\Delta f = \frac{f_0}{M}$. Для перехода на другую рабочую частоту необходимо переключить коэффициенты M и/или N . Это вызывает переходный процесс в кольце авторегулирования ФАПЧ, длительность которого τ равна 30–50 периодам частоты сравнения,

$$\tau \approx (30 \div 50) \frac{M}{f_0}.$$

Таким образом, возникает противоречие между требованием иметь малый шаг сетки частот Δf для уменьшения погрешности установки частоты и длительностью процесса ее установления τ , обратно пропорциональной шагу. Кроме того, при уменьшении Δf затрудняется фильтрация ближайших к несущей частоте паразитных дискретных компонент спектра.

Для разрешения этого противоречия используется более сложная схема делителя частоты в кольце – делитель с дробно-переменным коэффициентом деления (рис. 2, б).

В этом случае средняя частота выходного сигнала f дробным образом связана с частотой опорного генератора:

$$f = \left(N + \frac{q}{R} \right) \frac{f_0}{M}.$$

Шаг сетки частот $\Delta f = \frac{f_0}{MR}$ значительно меньше, чем в схеме на рис. 2, так как значение R может составлять 2^6 – 2^{12} . При этом длительность переходного процесса в кольце ФАПЧ, как и в схеме на рис. 2, определяется частотой сравнения $f_{cp} = \frac{f_0}{M}$.

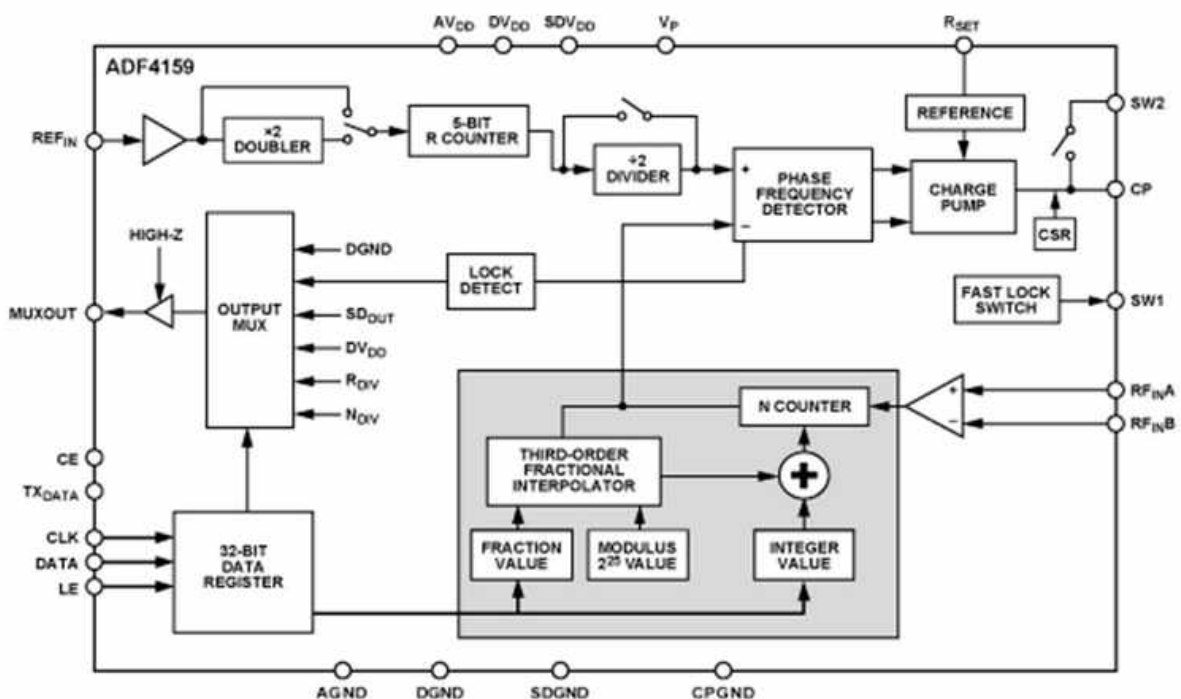


Рис. 3

В настоящее время существует широкий выбор микросхем фазовой автоподстройки частоты, включающих в себя все основные элементы кольца ФАПЧ [2]. Наиболее подходящей из них в рассматриваемом случае является микросхема ADF4159.

ADF4159 – это синтезатор частот с дробным коэффициентом деления и функцией модуляции, который обладает полосой 13 ГГц и обеспечивает разрешение установки частоты менее 1 Гц. Генератор Г4-207 имеет дополнительный выход, частота сигнала которого равна половине частоты основного сигнала. Это позволяет обойтись без дополнительного делителя частоты.

ADF4159 включает в себя малощумящий цифровой фазочастотный детектор, прецизионную схему накачки заряда, программируемый делитель опорной частоты, программируемый делитель с дробным коэффициентом (рис. 2).

Управление всеми внутренними регистрами осуществляется через простой трехпроводный интерфейс. ADF4159 работает с напряжением питания аналоговой части в диапазоне от 2.7 до 3.45 В и напряжением питания цифровой части в диапазоне от 1.62 до 1.98 В. Когда компонент не используется, его можно переключить в режим пониженного энергопотребления.

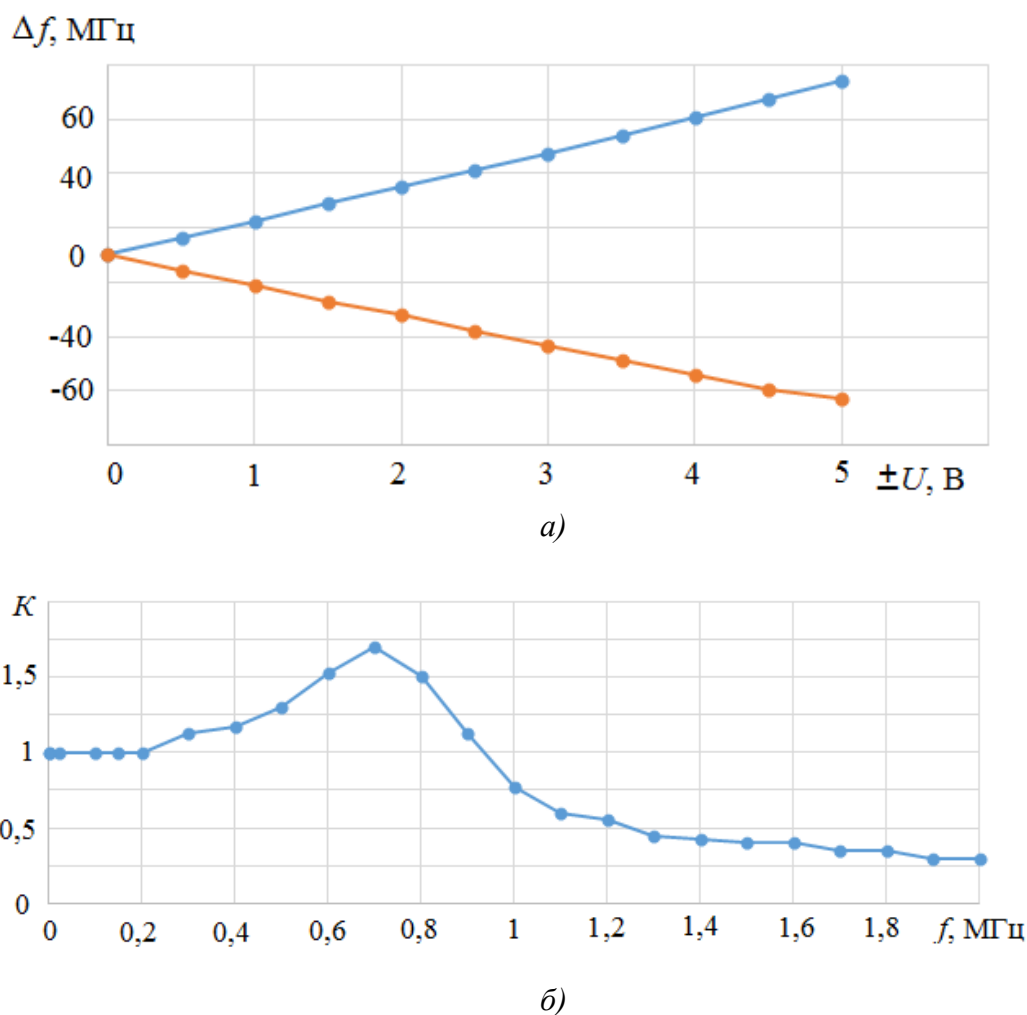


Рис. 4

В настоящее время наиболее близким отечественным аналогом является микросхема 1508ПЛ9Т, обладающая следующими параметрами:

- входная частота до 3 ГГц;
- частота работы фазового детектора не более 75 МГц;

- коэффициенты деления предделителя 4/5, 8/9, 16/17 и 32/33;
- режимы работы с целочисленным и дробным коэффициентом деления;
- устройство рандомизации помех дробности;
- последовательный порт управления SPI;
- возможность управления коэффициентом деления по параллельной шине;
- потребление не более 80 мВт.

Использование данной микросхемы затруднено её низкой входной частотой, что требует применения дополнительных делителей частоты.

По отношению к микросхеме ФАПЧ синхронизируемый генератор выступает в качестве генератора, управляемого напряжением.

В случае генератора Г4-207 управляющее напряжение может подаваться на вход ЧМ генератора, предназначенный для реализации режима внешней частотной модуляции сигнала. Основные характеристики цепи управления по этому входу приведены на рис. 4.

Как видно из приведённых зависимостей при изменении управляющего напряжения от -5 до +5 В частота генератора меняется на 130 МГц. Этой величины достаточно для компенсации уходов частоты генератора во всех рабочих условиях. Попадание частоты в полосу захвата обеспечивается имеющейся в генераторе системой установки частоты по основной катушке ЖИГ-генератора.

Амплитудно-частотная характеристика цепи управления (рис. 4, б) постоянна в диапазоне частот до 200 КГц, что позволяет не учитывать её при частоте среза петлевого фильтра порядка 20 кГц. Для обеспечения малого времени установления частоты генератора частота сравнения выбрана равной 1 МГц. В качестве ФНЧ взят активный пропорционально-интегрирующий ФНЧ с частотой среза 20 кГц, позволяющий улучшить фильтрацию шумов и паразитных составляющих спектра.

Полученные в результате моделирования характеристики синхронизированного генератора приведены на рис. 5 и 6. Как видно из этих зависимостей при частотах отстройки от несущей менее 10 кГц фазовые шумы определяются опорным кварцевым генератором, а при частотах более 100 кГц совпадают с шумами «свободного» (несинхронизированного) генератора. Время установления частоты составляет менее 100 мкс.

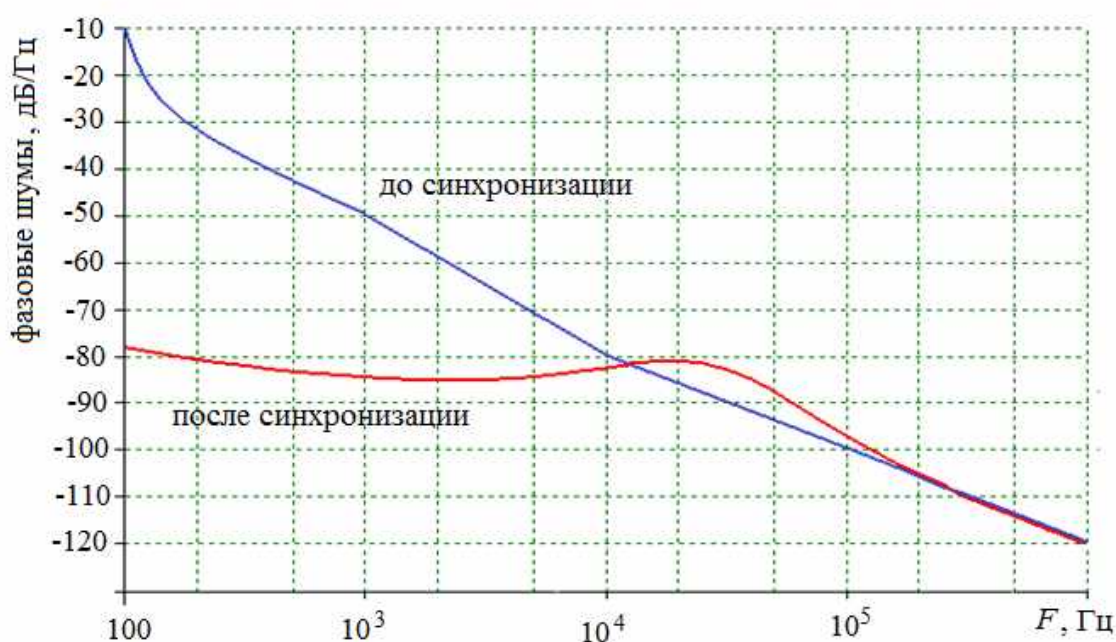


Рис. 5

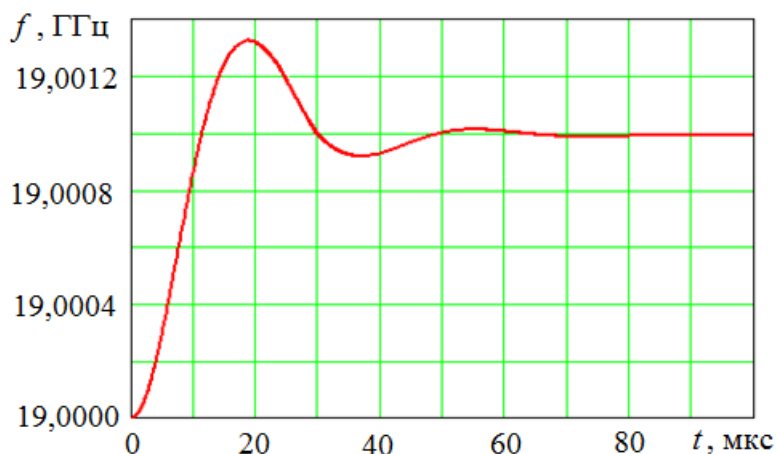


Рис. 6

Таким образом, предлагаемая система синхронизации генератора сигналов Г4-207 существенно понижает его фазовые шумы вблизи несущей частоты, на несколько порядков уменьшает погрешность установки и нестабильность частоты выходного сигнала генератора.

Библиографический список

1. Белов, Л.А. Синтезаторы частот и сигналов / Л.А. Белов. – М.: САЙНС ПРЕСС, 2002. – 80 с.
2. РАДИОКОМП – радиокомпоненты мировых производителей. <http://www.radiocomp.ru>

Дата поступления
в редакцию 30.09.2015

V.V. Biryukov, M.I. Kurzenkov, R.V. Maul

FREQUENCY STABILIZATION OF THE SIGNALS GENERATOR G4-207

Nizhniy Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: The article describes a method for improving the characteristics of the signal generator G4-207 using ring a phase locked loop (PLL).

Design/methodology/approach: The characteristics of generator are presented. Its shortcomings are identified. The simulations of the ring oscillator phase-locked loop with a fractional-N division are carried out.

Finding: The possibility of significant improving generator characteristics is shown.

Research limitations/implications: The proposed method of improving the characteristics uses commercially available chip PLL. The justification of chip PLL selection is provided.

The characteristics of engulfed ring of the generator PLL are given.

Originality/value: It is shown that the proposed system synchronization signals generator G4-207 significantly reduces its phase noise near the carrier frequency.

Instability and the inaccuracy of installation of the output frequency of the generator are reduced in several orders.

Key words: generator of signals, phase-locked loop, instability of frequency, phase noises.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК. 621.752.3

Б.А. Гордеев^{1,2}, С.Н. Охулков^{1,2}, А.С. Плехов²

ОСОБЕННОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ВОЛНОВЫХ МЕТОДОВ ПРИ ТАРИРОВКЕ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ¹

Институт проблем машиностроения Российской Академии наук (ИПМ РАН)¹,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

Объект исследования: Демпфер ударных нагрузок с магнитореологическим трансформатором.

Цель: Оценка погрешностей при измерении деформаций в магнитореологических трансформаторах, в которых дроссельные каналы заменены цилиндрическим зазором между двумя коаксиальными цилиндрами. При действии ударных нагрузок измерение перемещений волновыми методами связано с рядом особенностей, которые рассматриваются в данной статье

Результаты: Ошибка измерения фазы, а, следовательно, и виброперемещения, обусловлена соотношением скоростей зондирующего сигнала и исследуемых деформаций объекта - магнитореологического демпфера.

Область применения: Системы демпфирования ударных нагрузок силовых электромеханических установок и механического оборудования.

Ключевые слова: деформации и микроперемещения в магнитореологических трансформаторах; ультразвуковой фазовый измеритель; отраженный и излученный акустические сигналы; граница раздела сред; ошибки измерения фазы; точность и оценка погрешностей измерений; релаксация магнитореологической жидкости.

Введение

В статье анализируются причины ошибки измерения фазы, обусловленные соотношением скоростей зондирующего сигнала и исследуемых деформаций объекта - демпфера с магнитореологическим трансформатором (МРТ). При действии ударных нагрузок на демпфер с МРТ из-за проявления кавитационных процессов в его рабочей магнитореологической жидкости (МРЖ) задача повышения точности измерений его деформаций волновыми методами становится актуальной.

Процесс измерения деформаций (перемещений) демпфера с магнитореологическим трансформатором волновыми методами заключается в следующем (рис. 1) [1, 7, 8].

Продольные смещения излучаемой источником ультразвуковой волны U_t зондирующего сигнала определяются уравнением

$$U_t - c^2 U_x = 0,$$

где U_x – исходное смещение зондирующего сигнала; $c = \sqrt{E/\rho}$ - скорость звука в реологической среде, в качестве которой могут быть газы и жидкости; E - модуль упругости среды; ρ - удельная плотность среды.

Положим, что на границу раздела сред действуют ультразвуковые колебания от источника излучения и, отражаясь от поверхности исследуемого объекта, они принимаются согласованным приемником. Тогда условие непрерывности на границе раздела сред запишется в виде

$$Z_0 U_t(0,t) - E U_x(0,t) = \mu(t),$$

где $Z_0 = \sqrt{E\rho}$ - волновое сопротивление среды; $\mu(t)$ - заданная функция смещения.

Считая движущуюся границу непроницаемой для зондирующего сигнала, второе граничное условие при $x = L + l(t)$ запишется в виде

$$U[L + l(t)] = l(t),$$

где L - расстояние от источника до неподвижной границы; $l(t)$ - закон движения границы.

В качестве примера рассмотрим случай движения границы с постоянной скоростью V . В этом случае $l(t) = L_1 + Vt$, где L_1 - начальное расстояние от источника излучения до границы раздела сред, и тогда закон движения границы запишется в виде [7, 8]

$$f(t) = -h \left[\frac{1-V/c}{1+V/c} - \frac{2L_1}{c(1+V/c)} \right].$$

Отсюда видно, что для гармонического источника

$$h(t) = A \sin \omega_0 t,$$

$$f(t) = -A \sin(\omega_1 t + \varphi),$$

где A - амплитуда, ω_0, ω_1 частоты излученного $h(t)$ и отраженного $f(t)$ акустических сигналов, φ - постоянный набег фаз.

Постоянный набег фаз определяется как:

$$\varphi = \frac{2\omega L_1}{c(1+V/c)}.$$

Между частотами отраженного и излученного акустических сигналов имеется следующая зависимость, которая соответствует двойному эффекту Доплера:

$$\omega_1 = \omega_0 \frac{1-V/c}{1+V/c}.$$

Следует иметь в виду, что и амплитуды падающего и отраженного сигналов в средах с реологическими свойствами не равны. Однако в данном случае информативными признаками будут девиация частоты за счет эффекта Доплера и модуляция фазы [7, 8].

В общем случае при произвольном движении границы раздела сред, если источник гармонический, принимаемый сигнал можно представить в следующем виде

$$f(t) = -A \sin \omega(t - 2l(t)R(t)/c), \quad (1)$$

где $R(t)$ - функция, характеризующая погрешность измерения фазы в данный момент времени.

При $R(t) = 0$ фаза отраженного сигнала относительно падающего (опорного) всегда имеет постоянное значение, так как в этом случае выражение (1) примет вид:

$$f(t) = A \sin \omega t,$$

где ω - частота отраженного акустического сигнала.

Если $R(t) < 0$, или $R(t) > 0$, то погрешность измерения фазы в данный момент времени обусловлена временем распространения акустического сигнала от объекта к приемнику. Так при виброскоростях, имеющих среднеквадратичное значение порядка 1 м/с, она соответствует 0,3% при расстояниях от объекта исследований 1 м.

Для извлечения информации о законе движения границы исследуемого объекта отраженный сигнал умножается на опорный $A_0 \sin(\omega t + \varphi)$, после которого обычно выделяют низкочастотную часть спектра, то есть рассматривают составляющую спектра:

$$f_n(t) = -\frac{AA_0 \cos(2\omega l(t)R(t)/c + \varphi)}{2},$$

откуда выделяется закон движения $l(t)$, считая в квазистатическом приближении $R(t) = 0$.

В данном методе измерения микроперемещений информативным параметром является-

ся индекс $m = \omega_d / \Omega$ – частотной модуляции отраженного зондирующего акустического сигнала, где ω_d – девиация частоты отраженного акустического сигнала; Ω_0 – частота вибраций.

На (рис. 1) представлена функциональная схема экспериментальной установки с ультразвуковым фазовым измерителем микроперемещений 1 по выявлению виброперемещений, обусловленных соотношением скоростей зондирующего сигнала и исследуемых деформаций магнитореологического демпфера 5-6-9 [1, 7, 8].

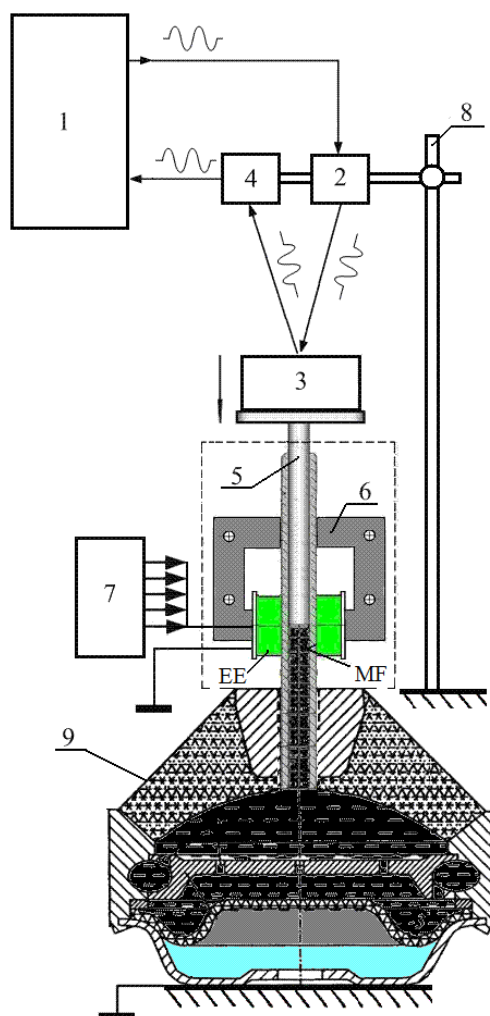


Рис. 1. Функциональная схема экспериментальной установки по выявлению виброперемещений МРТ

На функциональной схеме (рис. 1) показано: 1 – фазовый измеритель микроперемещений, 2 и 4 – пьезоэлектрические преобразователи, 3 – нагрузка с массой m , 5 – шток-поршень (материалы: сталь, феррит, латунь), 6 – возбуждающий электромагнит ортогонального магнитного поля, 7 – источник постоянного тока, 8 – консоль; 9 – гидропора поршневого типа.

В магнитореологическом демпфере цилиндрический зазор, а также объемы рабочих камер заполнены МРЖ. Такая конструкция магнитореологических демпферов предпочтительна для демпфирования ударных нагрузок. На рис. 1 в магнитореологический демпфер с цилиндрическим зазором входит: коаксиальная внутренняя поверхность латунной проходной втулки, внешняя поверхность штока-поршня 5, возбуждающий электромагнит 6 и объемы основной и компенсационной камер гидропоры поршневого типа 9 с МРЖ [3].

Пьезоэлектрические преобразователи – излучатель 2 и приёмник 4 акустических колебаний закреплены на консоли 8 и настроены на колебания механического и электрического резонансов с частотой 30 кГц [1, 7, 8].

При помощи ультразвукового фазового измерителя измерялись микроперемещения рабочего штока-поршня 5 с нагрузкой 3.

В работе [1] была выявлена линейная зависимость скорости перемещения латунного штока-поршня в цилиндрическом зазоре с МРЖ от величины магнитной индукции (рис. 2). Замедление скорости перемещения латунного штока-поршня после снятия воздействия магнитного поля в ортогональном магнитном поле возбуждающего электромагнита не зафиксировано.

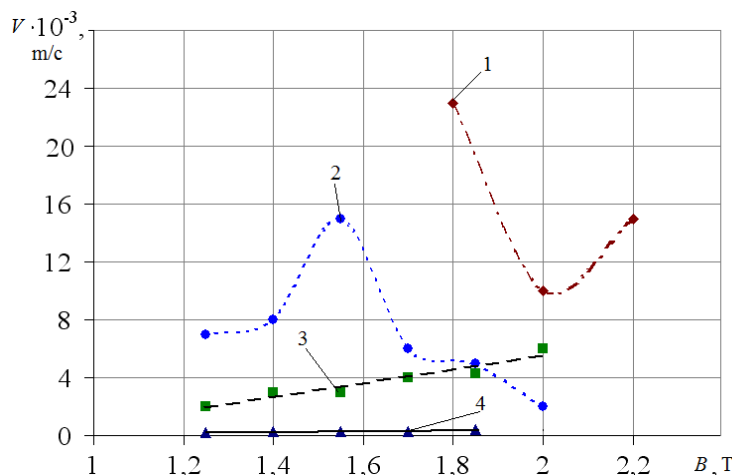


Рис. 2. Скорость релаксации МРЖ от начальной индукции ортогонального магнитного поля: скорости релаксации МРЖ в поперечном (1, 2, 3) и продольном (4) магнитных полях в зависимости от начальной индукции магнитного поля и материала штоков-поршней; 1 – сталь; 2 – феррит; 3, 4 – латунь

В работе [1] установлено замедление скорости перемещения ферритового и стального штоков-поршней после снятия воздействия магнитного поля в ортогональном магнитном поле возбуждающего электромагнита до и после прохождения ими своих экстремумов. Этот результат объясняется магнитореологическим эффектом и релаксацией МРЖ после снятия магнитного поля и остаточной намагниченностью сердечника магнитопровода возбуждающего электромагнита [4, 5].

Увеличение скорости для стального штока-поршня обусловлено ростом температуры магнитной жидкости (свыше 40°C) в цилиндрическом зазоре [1, 2].

При ударных нагрузках скорость движения штоков-поршней резко меняется [6], и, если она становится одного порядка со скоростью распространения зондирующего сигнала, то спектральный состав отраженного сигнала насыщается высокочастотными гармониками, отсутствующими в реальном процессе [1, 7, 8].

Метод обработки отраженного сигнала должен учитывать абсолютную ошибку в измерении смещения границы $l(t)$, равную

$$\Delta = [l(t)R(t) - l(t)] / l(t) = R(t) - 1. \quad (2)$$

Из (2), задаваясь относительной ошибкой измерения

$$\delta = \Delta l(t) / l(t),$$

где $\Delta l(t)$ - погрешность измерения.

Получаем следующее условие применимости квазистатического представления:

$$\Delta = R(t) - 1 \leq \delta,$$

и для второго приближения

$$|l(t)| \leq c\delta.$$

Так, для $\delta = 10^{-2}$ получаем, что скорость движения вибрирующей границы не должна превышать порядка 3 м/с при измерениях в воздухе.

Выводы

Результаты работы показали, что ошибка измерения фазы, а следовательно, и виброперемещения, обусловлена соотношением скоростей зондирующего сигнала и исследуемых деформаций объекта - магнито-реологического демпфера. В тех случаях, когда при ударных воздействиях скорость штока-поршня превышает 3 м/с, выделение фазы отраженного сигнала как информативного параметра связано с возрастающими погрешностями.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект №15-19-10026).

Библиографический список

1. Гордеев, Б.А. К вопросу создания цилиндрического магнито-реологического трансформатора в ортогональных магнитных полях / Б.А. Гордеев [и др.] // Проблемы машиностроения и надёжности машин. – 2014. – №2. – С. 15–21.
2. Гордеев, Б.А. Влияние температуры рабочей жидкости на динамические характеристики гидропор / Б.А. Гордеев [и др.] // Вестник машиностроения. – 2012. – № 12. – С. 56–62.
3. Системы виброзащиты с использованием инерционности и диссипации реологических сред / Б.А. Гордеев [и др.]. – М.: Физматлит, 2004. – 175 с.
4. Шульман, З.П. Магнито-реологический эффект / З.П. Шульман, В.И. Кордонский. – Минск: Наука и техника, 1982. – 184 с.
5. Гордеев, Б.А. Течение и релаксация магнито-реологической жидкости в дроссельных каналах гидропор / Б.А. Гордеев [и др.] // Вестник машиностроения. – 2015. – №7. – С. 59–63.
6. Гордеев, Б.А. Применение магнито-реологических жидкостей в машиностроении / Б.А. Гордеев [и др.] // Приволжский научный журнал. – 2014. – № 4. – С. 29–42.
7. Гордеев Б.А., Измерения параметров вибрации конструкций акустическими методами / Б.А. Гордеев, И.Г. Куклина, А.Н. Осмехин // Приволжский научный журнал. – 2009. – №2(10). – С. 13–20.
8. Пат. № 2472109 на изобретение «Ультразвуковой фазовый вибропреобразователь» по заявке №2011130282/28(044754) от 18 июля 2012 г. / Гордеев Б.А., Куклина И.Г., Голубева К.В., Гордеев А.Б. Опубликовано 10.01.2013. Бюл. №1.

*Дата поступления
в редакцию 15.10.2015*

B. A. Gordeev^{1,2}, S. N. Okhulkov^{1,2}, A. S. Plekhov²

EVALUATION OF POGRESHNOSTEI AT CALIBRATION METHODS MAGNETORHEOLOGICAL WAVE TRANSFORMER

Institute of problems of mechanical engineering Russian Academy of Sciences" (KIAM RAS)¹,
Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alexeev²

The object of study: a shock damper with magnetorheological transformation.

Objective: to assess errors in the measurement of deformation in magnetorheological transformers, in which a throttle channels made cylindrical gap between two coaxial cylinders. Under the action of shock loads from the displacement measurement methods related to the wave number of features that are discussed in this article

Results: measurement error phase, and, consequently, the vibration displacement caused by the ratio of the speeds of the probing signal and the investigated strain of an object - magnetorheological damper.

Application field: system damping shock loads power electro-mechanical installations and mechanical equipment.

Key words: deformation and micromovings in magnetorheological transformers; ultrasonic phase meter; reflected and radiated acoustic signals; the interface; the measurement error phase; accuracy and evaluation of measurement errors; relaxation of magnetorheological fluid.

УДК. 621.752.3

Б.А. Гордеев^{1,2}, А.Б. Дарьенков², С.Н. Охулков^{1,2}, А.С. Плехов²**ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ
ДЛЯ ВИБРОЗАЩИТЫ ОТ СТОХАСТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК**Институт проблем машиностроения Российской Академии наук (ИПМ РАН)¹,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²**Объект исследования:** демпфер стохастических нагрузок с магнитоологическим трансформатором.**Цель:** применение магнитоологических жидкостей в системах демпфирования стохастических нагрузок силовых электромеханических установок и механического оборудования.**Результаты:** Рассмотрены процессы, возникающие в магнитоологических жидкостях при действии стохастических нагрузок. Рассмотрены физические предпосылки управления характеристиками магнитоологических жидкостей с учетом внутренних электромагнитных полей.**Область применения:** магнитоологические жидкости применяются в системах демпфирования стохастических нагрузок силовых электромеханических установок и механического оборудования.*Ключевые слова:* магнитоологический трансформатор; магнитоологическая жидкость; дроссельный канал; обмотка соленоида; индуцированные импульсы; внутреннее управляющее магнитное поле.**Введение**

Постоянное повышение мощностей силовых электромеханических установок и механического оборудования приводит к возрастанию уровней и расширению вибрационного спектра колебаний, влияющих на надежность и безопасность их функционирования, что обуславливает необходимость совершенствования виброзащитных систем и внедрение новых технических решений. Перспективной в настоящее время является разработка демпферов колебаний стохастических нагрузок с магнитоологическими трансформаторами (МРТ). В них диссипация энергии колебаний происходит в магнитоологических средах [1, 2, 3].

В работе рассматривается подход к решению актуальной задачи по исследованию свойств магнитоологических жидкостей (МРЖ) под действием стохастических нагрузок с учетом действия внутренних и внешних электромагнитных полей [4, 5]. Рассмотрены процессы, возникающие в МРЖ при действии стохастических нагрузок, также физические предпосылки управления характеристиками МРЖ с учетом внутренних электромагнитных полей. Ограничением выбора МРЖ для данных задач является появление индуцированных электромагнитных импульсов на обмотке соленоида, предназначенного для создания внутреннего управляющего магнитного поля. Амплитуда и длительность этих импульсов являются функцией стохастических нагрузок. Их влияние необходимо учитывать при разработке магнитоологических демпферов. Приводится схема экспериментальной установки для стохастических испытаний одноканального индукционного магнитоологического демпфера стохастических нагрузок, обсуждаются полученные результаты исследований.

Процесс создания интегральных демпферов (гидроопор) связан с применением МРЖ, в инерционных МРТ систем демпфирования вибрации и ударов для электротехнических комплексов [1– 3]. Поэтому одной из актуальных задач является исследование свойств МРЖ под действием нестационарных виброн нагрузок. Возможность управления магнитной вязкостью МРЖ в дроссельных каналах МРТ под действием внутренних и внешних электромагнитных полей подтверждено экспериментально [4, 5].

При описании движения магнитоологических и электроологических сред при действии магнитного поля принимаются следующие условия [4, 6, 7]:

$$\omega_0 \tau \ll 1,$$

где ω_0 - ларморова частота прецессии для ионизированных молекул рабочей жидкости; τ – среднее время свободного пробега ионизированной частицы, электропроводность - γ - велика, следовательно

$$\frac{\varepsilon}{4\pi} \cdot \frac{\omega}{\gamma} \ll 1, \quad (1)$$

где ω - частота внешнего сигнала, ε - относительная диэлектрическая проницаемость среды.

При дросселировании электрореологической жидкости в магнитном поле возникает индукционный ток с плотностью:

$$J = \frac{\gamma}{c} [VH], \quad (2)$$

где c – скорость света; H - напряженность внешнего магнитного поля; V - скорость протекания электрореологической жидкости [4, 7].

С целью проверки действия стохастического механического импульса на одноканальный индукционный МРТ была создана экспериментальная установка для стохастических испытаний. Функциональная схема установки представлена на рис. 1.

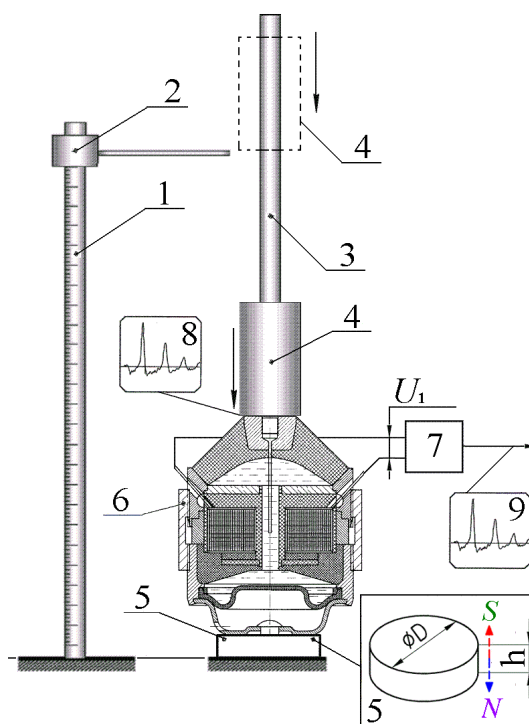


Рис. 1. Функциональная схема экспериментальной установки для стохастических испытаний одноканального индукционного магнитореологического демпфера в момент механического удара падающего груза

На рис. 1 показано: 1 – измерительная линейка; 2 – указатель высоты с нониусом; 3 – шток; 4 – цилиндрический диамагнитный латунный груз; 5 – нижнее основание – силовой постоянный неодимовый магнит; 6 – индукционный МРТ с соленоидом; 7 – электронный запоминающий осциллограф; 8 – виброграмма механического удара; 9 – электрический индуцированный сигнал

Особенностью установки стохастических испытаний магнитореологического демпфера с индукционным МРТ является применение соленоида, в обмотке которого индуцируются электрические токи при перемещении стальной стержневой части винта-пробки в дроссельном канале. В качестве нижнего основания применён неодимовый постоянный магнит, создающий неоднородное магнитное поле и пронизывающее магнитореологический демпфер.

Неодимовые постоянные магниты обладают магнитной силой и магнитной индукцией до 1,45 Тл [8].

Были проведены эксперименты по выявлению на выходе соленоида МРТ разности потенциалов U_1 , возникающей в результате удара. При проведении экспериментов применялась МРЖ, с частицами магнетита (Fe_3O_4) в неоднородном магнитном поле неодимового постоянного магнита. Размер частиц МРЖ d в пределах 60–100 нм.

Под действием ударного (рис. 1) механического импульса при движении МРЖ и перемещения стержневой части винта-пробки в дроссельном канале МРТ и воздействия постоянного магнитного поля неодимового постоянного магнита 5 в соленоиде МРТ наводятся - индуцируются электрические токи, которые на разомкнутой обмотке соленоида создают разность потенциалов U_1 . Разность потенциалов фиксируется электронным запоминающим осциллографом (рис. 1).

При проведении экспериментов были зафиксированы индуцированные электрические сигналы с экрана запоминающего осциллографа, что указывало на индукционные электрические токи, возникающие в соленоиде МРТ вследствие ударов цилиндрического парамагнитного (латунного) груза (рис. 1).

На рис. 2 приведена осциллограмма индуцированного электрического сигнала на выходе индукционного МРТ соответствующая поглощённой энергии удара в 2,5 Дж. Это происходит при механическом ударе груза массой в 1,0 кг. Положительная амплитуда сигнала – 620 мВ; отрицательная амплитуда – 800 мВ; период электрического импульса – 2,0 мс.

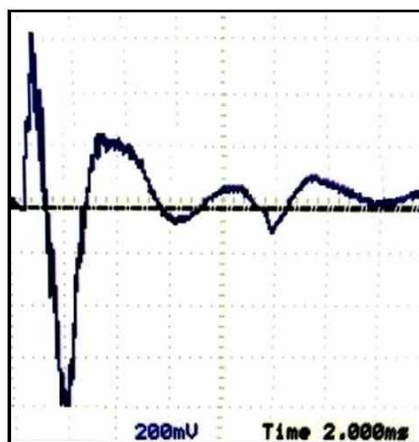


Рис. 2. Осциллограмма индуцированного электрического сигнала на выходе индукционного МРТ при механическом ударе, высота падения груза 100 мм, масса груза 1,0 кг

Положительная и отрицательная амплитуды индуцированного электрического напряжения при механическом ударе зависят от высоты падения груза (рис. 3). Таким образом, высоты падения груза определяют величину энергии удара, которая гасится виброопорой с индукционным МРТ.

Наибольшая отрицательная амплитуда индуцированного электрического сигнала (рис. 3) после падения груза с высоты в 225 мм объясняется отдачей резинометаллической обечайки индукционного МРТ. Жидкостное магнитное трение МРЖ оказывает малое сопротивление течению МРЖ и перемещению внутри дроссельного канала стержневой части винта-пробки МРТ (рис. 1), так как скорость возврата рабочего объема МРТ в исходное состояние большая. В этом случае скорость течения МРЖ в дроссельном канале МРТ наибольшая, а при наибольшей скорости течения МРЖ в дроссельном канале при действии постоянного магнитного поля в соленоиде индуцируется наибольшая отрицательная амплитуда электрического сигнала.

Магнитная сила, создаваемая движением МРЖ в дроссельном канале МРТ с проница-

емостью μ от давления в рабочей камере и магнитной индукцией внешнего магнитного поля постоянного магнита, определяется как $\mathbf{J} \times \mathbf{B} = -\text{grad } p_M$, где \mathbf{B} – индукция магнитного поля, p_M – магнитное давление [6, 7].

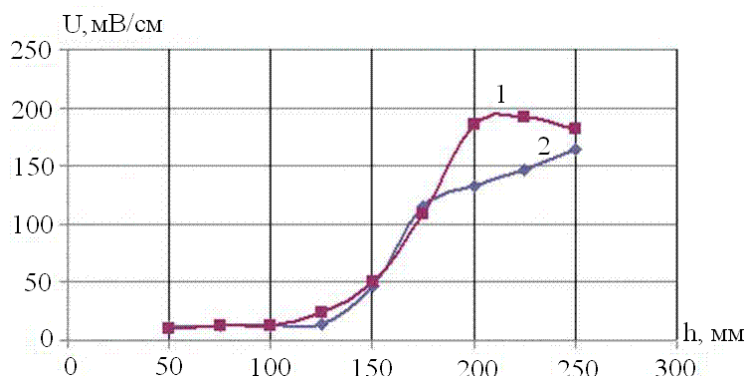


Рис. 3. Зависимости положительной и отрицательной амплитуд индуцированного электрического сигнала при механическом ударе груза от высоты H падения груза. Масса груза 1,0 кг:
 1 - отрицательная максимальная амплитуда сигнала;
 2 - положительная максимальная амплитуда сигнала

Магнитное давление представлено в виде

$$p_M = \left| -\frac{\mu}{8\pi} H^2 \right|, \quad (3)$$

где μ – относительная магнитная проницаемость МРЖ. Для статических условий из уравнения следует, что

$$p + p_M = 0 \quad \text{и} \quad p = -p_M.$$

Это означает, что в условиях статического равновесия любое изменение механического давления p МРЖ должно компенсироваться противоположным изменением магнитного давления p_M , что должно быть отражено через единицы измерения в системе СИ.

В МРЖ создается градиент давления [7], уравнивающий составляющую электромагнитной силы

$$\gamma \cdot v \cdot \mu \cdot B^2 = \frac{\partial p}{\partial z}, \quad (4)$$

где единицы измерения в системе СИ [6]: γ [См] – электропроводность МРЖ, $1 \text{ См} = \text{А}/\text{В} = \text{с}^3 \cdot \text{А}^2 / (\text{кг} \cdot \text{м}^3)$; v [м/с] – скорость МРЖ в дроссельном канале; B [Тл] – магнитная индукция, $1 \text{ Тл} = \text{В} \cdot \text{с} / \text{м}^2 = \text{кг} / (\text{с}^2 \cdot \text{А})$; p [Па] = $\text{Н} / \text{м}^2 = \text{кг} / (\text{с}^2 \cdot \text{м})$; z [м] – длина дроссельного канала; $\mu = 10$ – относительная магнитная проницаемость МРЖ.

Для магнитореологического демпфера «упругое» действие внешнего магнитного поля на МРЖ основано на его силовом воздействии. Здесь созданное им магнитное давление велико, по сравнению с остальными динамическими факторами: гидравлическим динамическим давлением и инерциальными силами [7], создаваемыми при течении МРЖ в дроссельном канале, когда

$$\frac{\mu \cdot H^2}{8\pi} \gg \frac{\rho \cdot v^2}{2}, \quad \frac{\mu \cdot H^2}{8\pi} \gg p, \quad (5)$$

где ρ – плотность МРЖ.

Далее оценим магнитную силу магнитного поля в дроссельном канале соленоида, которая препятствует механическому давлению МРЖ в дроссельном канале при действии механического удара по МРТ.

Сила падающего груза массой $m = 1,0$ кг с высоты в $H = 0,6$ м при скорости падения

$v_r = 0,6$ м/с, ускорении свободного падения $g = 9,81$ м/с² и длительности удара взятой из осциллограммы, равной $t_{и} = 1,0$ мс (рис. 2) определена как [6]:

$$F = \frac{m \cdot v_r}{t_{и}} = \frac{1,0 \cdot 0,6}{1,0 \cdot 10^{-3}} = 600 \text{ Н.}$$

При такой силе удара груза создаваемое давление на опорную плиту обечайки МРТ (рис.1) площадью $S_{оп} = 0,707 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ определяется как [6]:

$$P = \frac{F}{S_{оп}} = \frac{600 \text{ Н}}{0,707 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2} \cong 848 \cdot 10^3 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}.$$

Определим магнитную силу – магнитное давление, создаваемое в дроссельном канале МРТ [7], при минимальной напряжённости магнитного поля $H = 20 \cdot 10^3$ А/м (рис. 4).

$$P_M = \left| -\frac{\mu}{8\pi} H^2 \right| = \frac{\mu}{8\pi} (20 \cdot 10^3)^2 \cong 160 \cdot 10^6 \text{ А}^2/\text{м}^2.$$

Именно такое магнитное давление и создает магнитную силу, которая и препятствует механическому давлению МРЖ на входе/выходе дроссельного канала МРТ при действии магнитного поля постоянного магнита, и оно превышает гидравлическое давление МРЖ.

Тогда отношение давлений P_M и P будет равно:

$$\frac{P_M}{P} = \frac{160 \cdot 10^6}{0,848 \cdot 10^6} = 188,6. \quad (6)$$

Здесь магнитное давление P_M от магнитного поля постоянного магнита в 188,6 раз больше гидравлического давления P от действия инерционной нагрузки падающего груза, что составляет 45 дБ.

Отношение давлений P_M и P показывает, что при работе магнитореологического демпфера желательна наибольшая намагниченность МРЖ.

На рис. 4 представлены зависимости динамической вязкости образцов МРЖ (МРЖ-1 и МРЖ-2) для различных значений напряженности магнитного поля H .

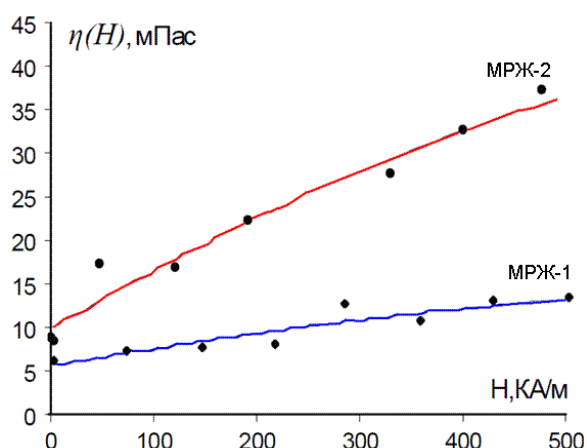


Рис. 4. Зависимости изменения динамической вязкости для МРЖ-1 и МРЖ-2 от напряженности магнитного поля

Выводы

В работе рассмотрен подход к решению актуальной задачи по исследованию свойств магнитореологических жидкостей под действием стохастических, в том числе ударных, нагрузок и действия внутренних и внешних электромагнитных полей в магнитореологическом демпфере. Приведена схема экспериментальной установки испытаний магнитореологи-

ческого демпфера случайных нагрузок. Получены результаты исследований. Определена магнитная сила – магнитное давление магнитного поля в дроссельном канале соленоида МРТ, препятствующее механическому давлению МРЖ в дроссельном канале при действии механического удара по МРТ, что позволило оценить демпфирование механического удара.

Проведённый анализ положительной и отрицательной амплитуд индуцированного электрического сигнала при механическом ударе груза позволяет выбрать соответствующую МРЖ для различных МРТ электротехнических комплексов.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект №15-19-10026).

Библиографический список

1. Системы виброзащиты с использованием инерционности и диссипации реологических сред / Б.А. Гордеев [и др.]. – М., 2004. – 175 с.
2. Гордеев, Б.А. К вопросу создания цилиндрического магнитореологического трансформатора в ортогональных магнитных полях / Б.А. Гордеев [и др.]. // Проблемы машиностроения и надёжности машин. – 2014. – №2. – С. 15–21.
3. Гордеев, Б.А. Применение магнитореологических жидкостей в машиностроении / Б.А. Гордеев [и др.] // Приволжский научный журнал. – 2014. – № 4. – С. 29–42.
4. Гордеев, Б.А. Влияние внешнего магнитного поля на плотность потока энергии в магнитореологическом трансформаторе / Б.А. Гордеев [и др.] // Проблемы машиностроения и надёжность машин. – 2004. – №4. – С. 100–104.
5. Гордеев, Б.А. Течение и релаксация магнитореологической жидкости в дроссельных каналах гидроопор / Б.А. Гордеев [и др.] // Вестник машиностроения. – 2015. – №7. – С. 59–63.
6. Яворский, Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф. – М.: Наука, 1964.
7. Кухаркин, Е. С. Инженерная электрофизика. Техническая электродинамика: учебник для вузов / Е. С. Кухаркин; под ред. П. А. Ионкина. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1982. – 520 с.
8. Михайлин, С.В. Постоянные магниты из магнитопластов / С.В. Михайлин, В.Д. Житковский // Справочник. – 1999. – №9(30). – С. 8–9.

*Дата поступления
в редакцию 15.10.2015*

Gordeev, B. A.^{1,2}, Darenkov A. B.², Okhulkov S. N.^{1,2}, Plekhov A. S.²

STUDY OF MAGNETORHEOLOGICAL FLUIDS FOR VIBRATION ISOLATION BEARINGS UNDER SHOCK NAGRUZKAKH

Institute of problems of mechanical engineering Russian Academy of Sciences" (KIAM RAS)¹,
Nizhny Novgorod state technical University n. a. R. E. Alexeev²

The object of study: a shock damper with magnetorheological transformation.

Objective: the use of magnetorheological fluids in systems for damping of shock loads of power electromechanical installations and mechanical equipment.

Results: the processes that occur in magnetorheological fluids under the action of shock loads. The physical background of the management characteristics of magnetorheological fluids with regard to the internal electromagnetic fields.

Application field: magneto-rheological fluid used in the systems of damping of shock loads of power electro-mechanical installations and mechanical equipment.

Key words: magnetorheological transformer; magnetorheological fluid; throttle channel; the winding of the solenoid; induced pulses; controlling the internal magnetic field.

УДК 621.314

Н.Н. Вихорев¹, А.И. Чивенков¹, И.С. Панфилов², С.Ю. Панфилов¹**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ АВТОНОМНОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ
В СРЕДЕ MATLAB/SIMULINK**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
ОАО «НПП «Полет», Нижний Новгород²

Разработана и исследована модель гибридной энергосистемы, позволяющая сформировать требования к параметрам аккумуляторной батареи и емкостного накопителя для обеспечения бесперебойности электропитания потребителя. Рассмотрена работа энергосистемы при различных соотношениях генерируемой и потребляемой мощностей. Показано, что за счет сочетания режимов работы буферного накопителя электроэнергии возможно обеспечить постоянный уровень потребляемой мощности от первичного источника, что позволяет эксплуатировать твердооксидный топливный элемент при максимальном коэффициенте использования (расход энергоносителя на единицу генерируемой мощности) независимо от девиаций нагрузки.

Ключевые слова: стабилизатор мощности, NiCd, DC/DC преобразователь.

В системах электропитания автономных объектов (СЭАО) перспективным направлением является применение твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ), обладающих рядом преимуществ перед другими (дизель-генераторными, солнечными и т.п.) источниками электроэнергии [1]. В качестве буферных накопителей в таких системах электропитания используются никель-кадмиевые аккумуляторы (рис. 1). Этот тип аккумуляторных элементов допускает глубокий разряд аккумуляторных батарей, длительное время хранения в полностью разряженном состоянии с сохранением номинальной емкости, большое число перезарядов

Кроме того, СЭАО включает в себя три повышающих преобразователя постоянного напряжения в постоянное (DC/DC) без гальванической развязки (рис. 2), работающие в режиме непрерывных токов. Преобразователь DC/DC-2 осуществляет преобразование напряжения 50 В, формируемым ТОТЭ, в напряжение 100 В, являющееся рабочим для аккумуляторной батареи, преобразователь DC/DC-1 - в напряжение 400 В, которое является номинальным для нагрузки и емкостного накопителя. Преобразователь DC/DC-3 служит для согласования напряжения аккумуляторной батареи и емкостного накопителя.

Для исследования работы СЭАО, согласно структурной схеме (рис. 1), в среде MATLAB 2014b/Simulink разработана его имитационная модель (рис. 3).

В качестве первичного источника электропитания (ТОТЭ) применен блок Fuel Cell Stack (Simulink/Simscape/electricdrivelib/Extra Sources/), с вольт-амперной характеристикой и зависимостью выходной мощности от тока нагрузки, приведенными на рис. 4.

Модели преобразователей DC/DC-1, DC/DC-2 и DC/DC-3 (рис. 5) выполнены, согласно рис. 2, с параметрами, приведенными в табл. 1.

Емкостный накопитель представлен блоком C (Series RLC Branch) с заданным начальным напряжением 400 В и емкостью 0,1 Ф.

NiCd аккумуляторная батарея моделируется блоком Battery (Specialized Technology/Electrical Sources), емкостью - 5 А*ч, уровнем заряда - 50%, номинальным напряжением 100 В.

Для сокращения времени моделирования преобразователь DC/AC и потребитель за-

менены на модель нагрузки, которая обеспечивает постоянство потребляемой мощности в энергосистеме с ТОТЭ и представлена блоком Load (SubSystem) (рис. 6) и его составной частью – блоком SubSystem (рис. 7).

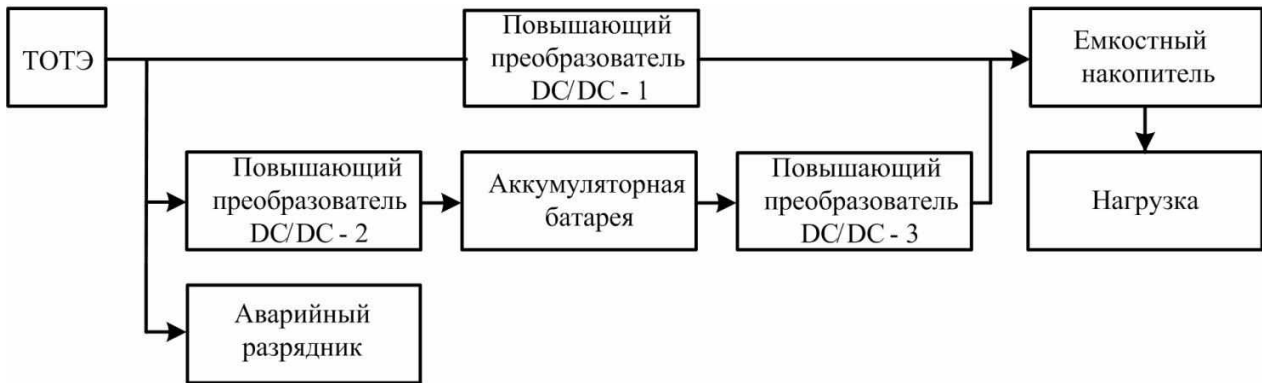


Рис. 1. Структурная схема СЭАО с ТОТЭ

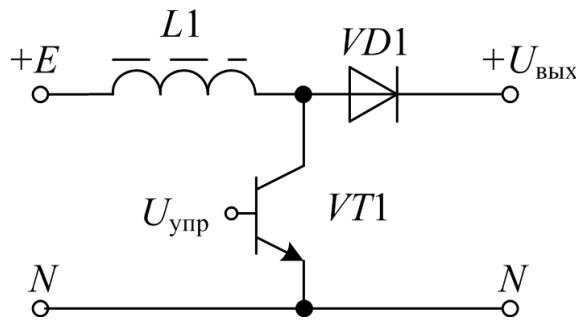


Рис. 2. Принципиальная схема силовой части преобразователей DC/DC

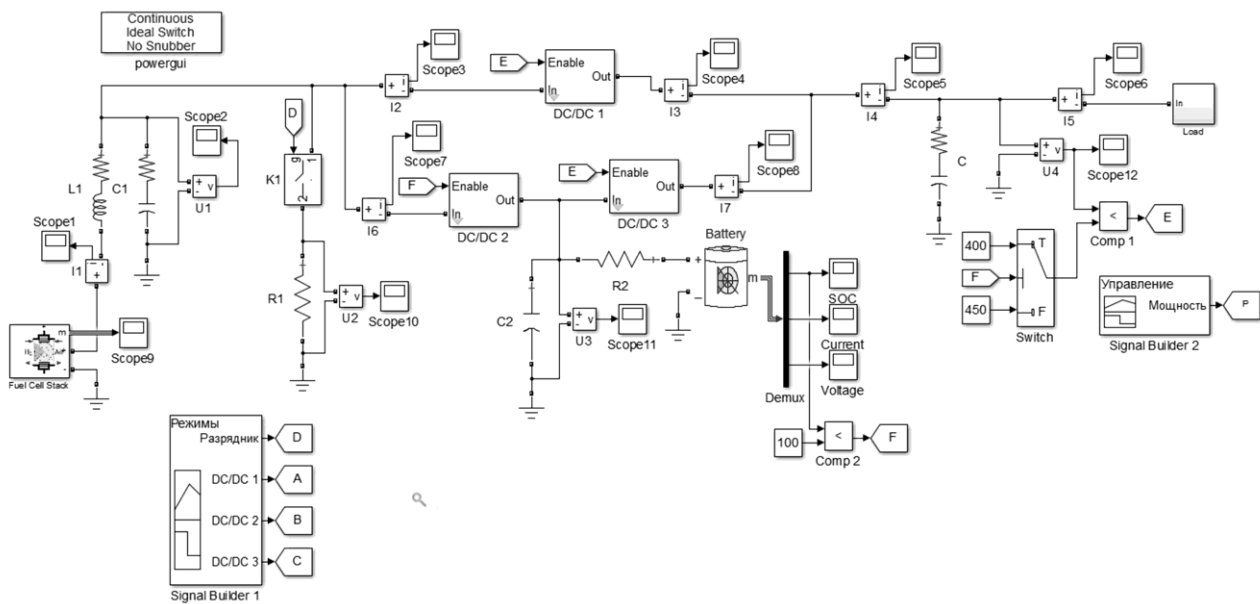


Рис. 3. Имитационная модель СЭАО с ТОТЭ

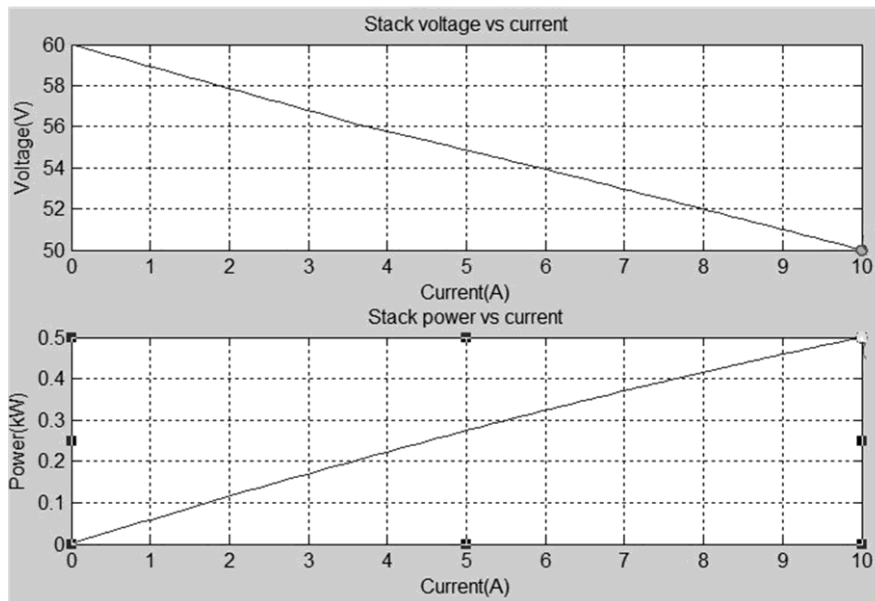


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика и зависимость выходной мощности ТОТЭ от тока нагрузки

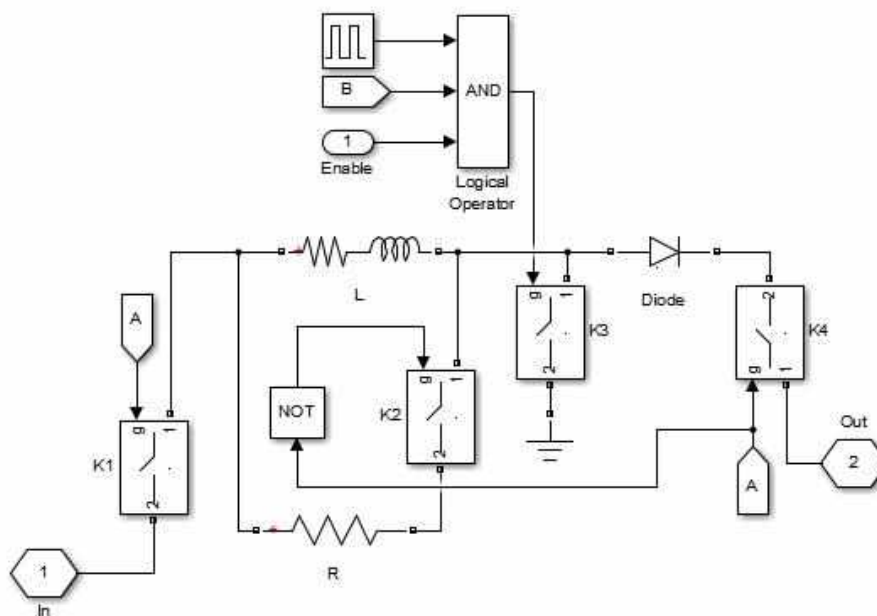


Рис. 5. Модель повышающих преобразователей DC/DC

Таблица 1

Параметры преобразователей

Наименование преобразователя	Относительная длительность управляющих импульсов	Индуктивность дросселя, мГн	Частота преобразования, кГц
DC/DC-1	0,88	3,828	1,0
DC/DC-2	0,3	1,74	
DC/DC-3	0,76	3,828	

Блок Load включает в себя вольтметр U , показания которого являются входными данными для блока Subsystem, и управляемый источник тока (Controlled Current Source) [2]. Источник тока обеспечивает протекание значения тока в соответствии с управляющим сигналом, формируемым блоком Subsystem.

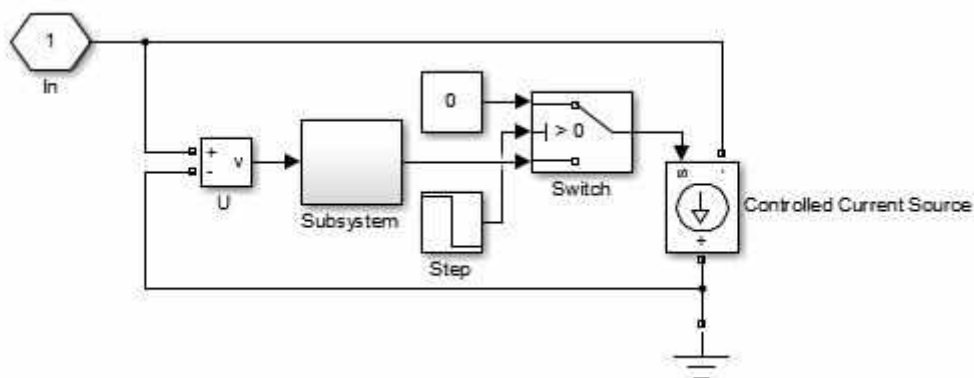


Рис. 6. Блок Load

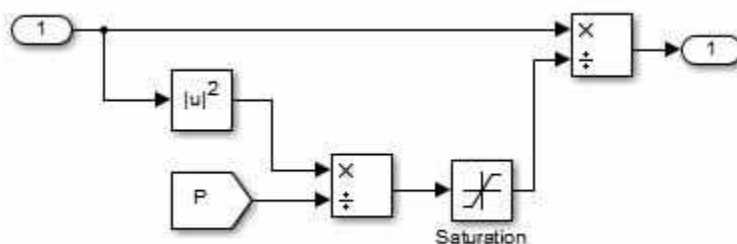


Рис. 7. Блок Subsystem

На начальном этапе моделирования (с 0 по 0,5 с) задается нулевой ток, что соответствует отключенной нагрузке. Это обеспечивается блоками Step, Switch и Constant. В дальнейшем ток нагрузки задается выходными сигналами блока Subsystem.

Блок Subsystem выполнен на базе математических блоков библиотеки Simulink/Math Operations, с применением блоков пересылки данных (In, Out) из библиотеки Simulink/Signal Routing.

Блок реализует следующие функции:

$$I = U / R, \quad (1)$$

$$R = U^2 / P. \quad (2)$$

Блок Saturation необходим для устранения неопределенности при делении на ноль в начальный момент моделирования.

В модели СЭАО с ТОТЭ компаратор Comp 1 (Relation Operator) обеспечивает ограничение заряда емкостного накопителя С. Максимальное напряжение конденсатора С задается блоком Constant. При достижении максимального уровня напряжения сигнал Enable (на входе логического элемента AND) принимает нулевое значение. Компаратор Comp 2 выполняет аналогичную функцию – контроль уровня заряженности аккумуляторной батареи (SOC). При достижении 100% заряда формируется сигнал F, отключающий преобразователь DC/DC 2 и изменяющий уставку компаратора Comp 1 (400 на 450 В).

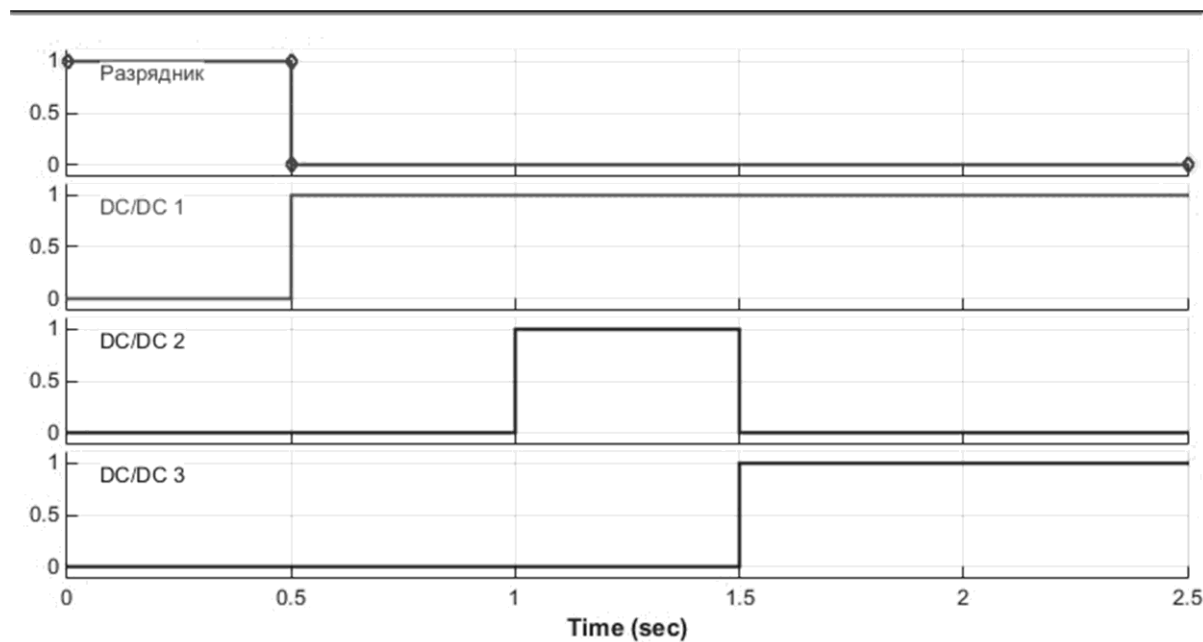
При моделировании работы СЭАО с ТОТЭ использовались различные сочетания одновременной и раздельной работы преобразователей DC/DC и аварийного разрядника при различной мощности нагрузки.

Алгоритм (режимы) работы модели СЭАО с ТОТЭ определяются управляющими сигналами, формируемыми блоками Signal Builder 1 (рис. 8, а) и Signal Builder 2 (рис. 8, б). Блок Signal Builder 1 осуществляет управление работой преобразователей DC/DC и аварийного разрядника R1, а блок Signal Builder 2 – изменение мощности нагрузки.

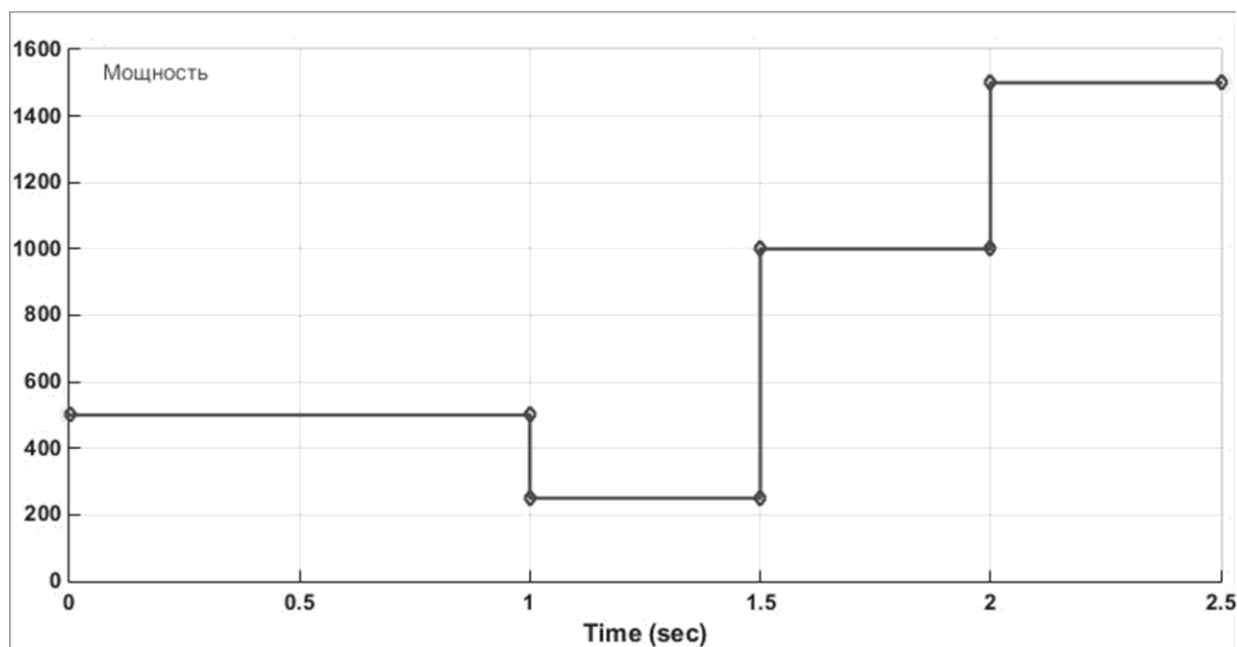
Работа источника разделена на несколько интервалов времени:

- с 0 по 0,5 с – работа ТОТЭ на аварийный разрядник;
- с 0,5 по 1 с – работа ТОТЭ на номинальную нагрузку;

- с 1 по 1,5 с – работа ТОТЭ на 0,5 номинальной нагрузки и заряд аккумуляторной батареи (степень заряженности аккумуляторной батареи контролируется компаратором Comp 2);
- с 1,5 по 2 с – работа ТОТЭ и аккумуляторной батареи на удвоенную номинальную нагрузку (разряд аккумуляторной батареи);
- с 2 по 2,5 с и более – работа ТОТЭ и аккумуляторной батареи на утроенную нагрузку (разряд аккумуляторной батареи емкостного накопителя).



а)



б)

Рис. 8. Диаграммы управляющих сигналов, формируемых блоками Signal Builder 1 (а) и Signal Builder 2 (б)

Результаты моделирования на временном промежутке с 0 по 2,5 с приведены на рис. 9–11, на интервале времени с 0 по 20 при разных значениях емкости накопителя С – на рис. 12–13.

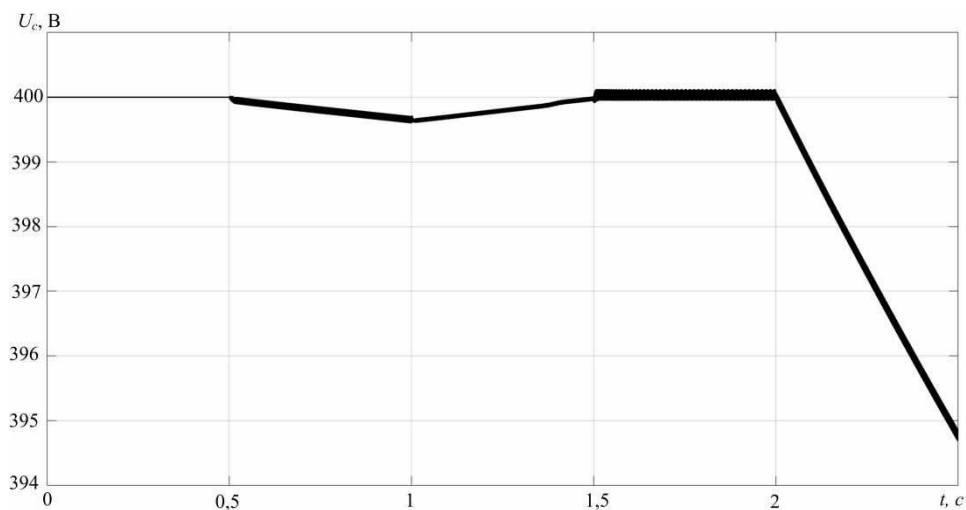


Рис. 9. Напряжение на емкостном накопителе С

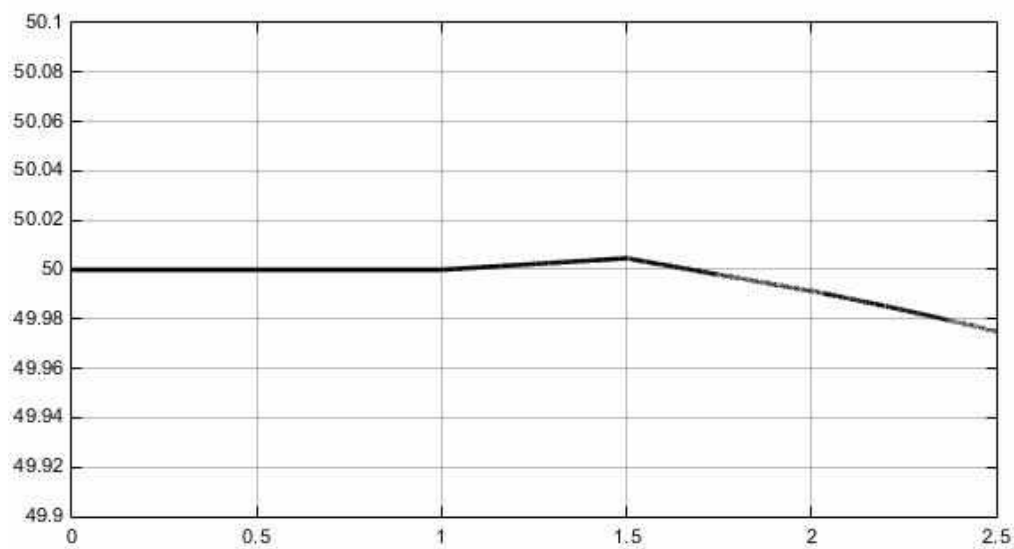


Рис. 10. Уровень заряженности аккумуляторной батареи/ State of charge (SOC) в процентах от номинального

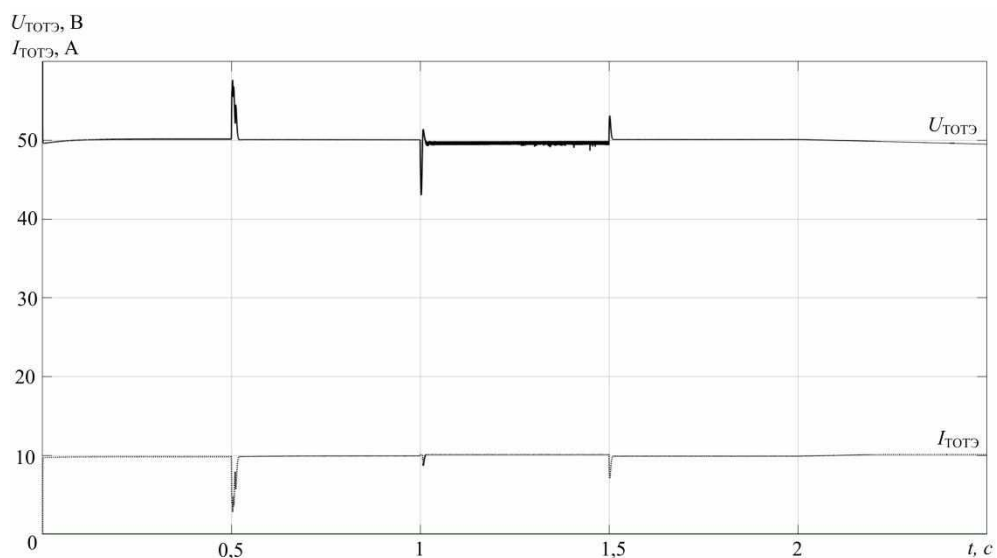
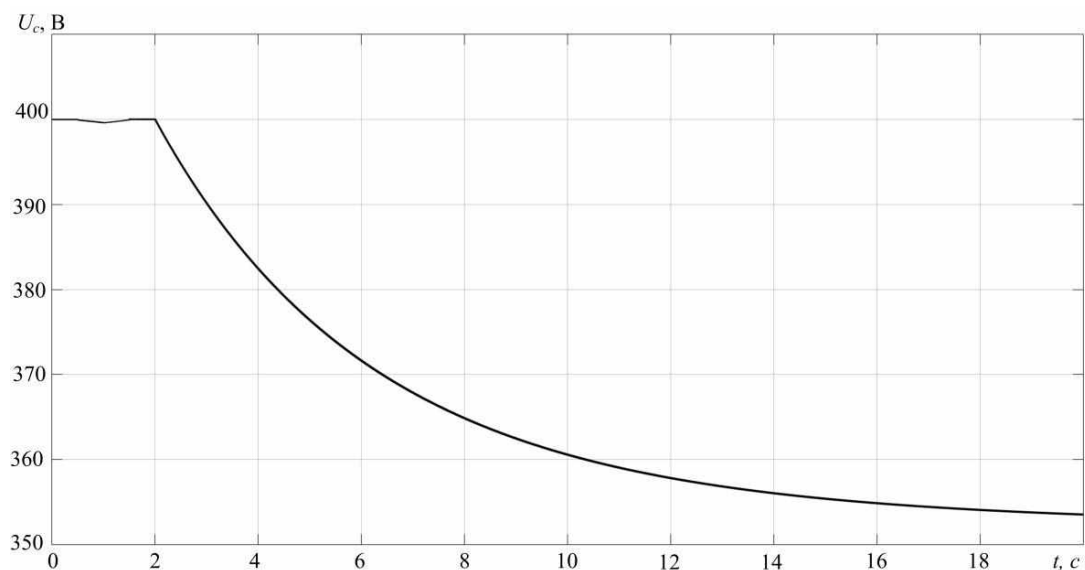
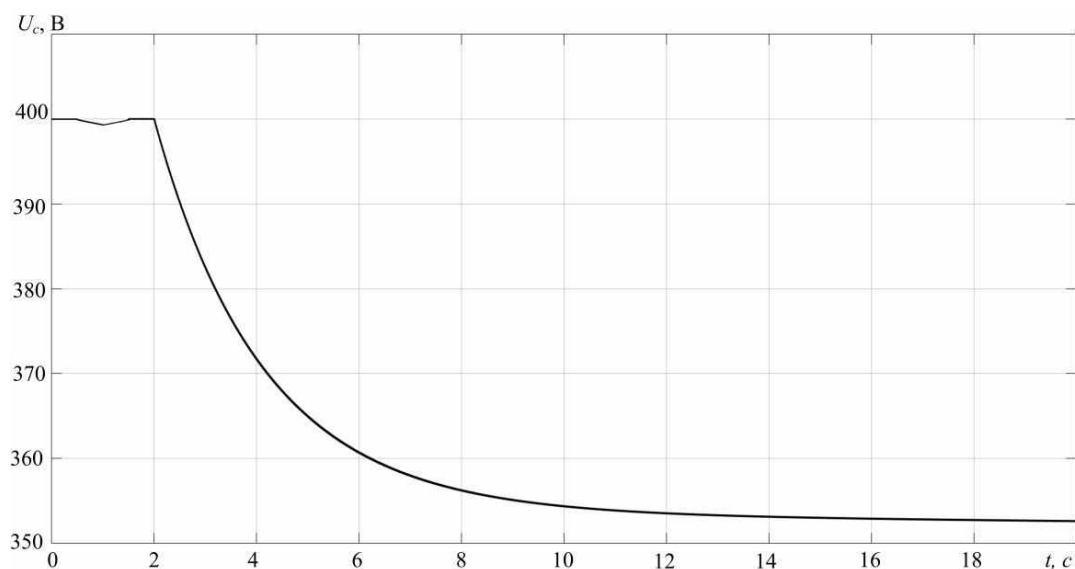


Рис. 11. Ток (пунктир) и напряжение (сплошная) ТОТЭ

Рис. 12. Напряжение на емкостном накопителе при $C=0,1$ ФРис. 13. Напряжение на емкостном накопителе при $C=0,05$ Ф

Выводы

В результате моделирования было установлено, что принципиально возможно:

- обеспечить постоянство уровня потребляемой от первичного источника электроэнергии мощности, что позволяет эксплуатировать ТОГЭ при максимальном коэффициенте использования (расход энергоносителя на единицу генерируемой мощности) при различных режимах работы нагрузки (рис. 12);
- поддерживать заданный уровень напряжения на выходе гибридного источника электропитания при набросе нагрузки выше номинальной (рис. 9);
- сформировать требования к параметрам аккумуляторной батареи (рис. 11) и емкостного накопителя (рис. 13, 14) для обеспечения бесперебойности электропитания потребителя.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение №14.577.21.0073 о предоставлении субсидии от 05.06.2014, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57714X0073).

Библиографический список

1. **Вихорев, Н.Н.** Система автономного электропитания с топливным элементом и буферным накопителем / Н.Н. Вихорев [и др.] // Актуальные проблемы электроэнергетики: материалы научно-технической конференции / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород. – 2014.
2. **Алтунин, Б.Ю.** Электротехнические расчеты в системе компьютерной математики MATLAB SIMULINK: учеб. пособие / Б.Ю. Алтунин [и др.]; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2005.

*Дата поступления
в редакцию 15.10.2015*

N.N. Vikhorev¹, A.I. Chivenkov¹, I.S.Panfilov², S.J.Panfilov¹

**MODELING WORK OF AN AUTONOMOUS POWER
SOURCE IN MATLAB / SIMULINK**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev¹,
JSC «SIE «POLET»²

Purpose: To ensure optimal operating conditions of the fuel cell hybrid power source.

Design/methodology/approach: To study the methods used to accomplish the task a number of simulation models in an interactive system.

Findings: It is shown that is possible in principle to provide a consistent level of consumed power from a primary power source that allows SOFCs operate at the maximum duty cycle (consumption of energy per unit of generated power) under different operating loads to maintain a predetermined voltage level at the output of the hybrid power supply lashed out at above rated load and shape requirements to the parameters of the battery and the storage capacitor to provide uninterrupted power consumer.

Research limitations/implications: Defining the parameters of the hybrid system of autonomous power.

Originality/value: Urgency is to ensure the constancy of the power consumption of the fuel cell during the changing load.

Key words: power stabilizer, NiCd, DC / DC converter.

УДК 53.083.8

Ф.И. Мамедов, А.Г. Аббасов, П.Н. Шахбазов**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКА
С ПРОВОЛОЧНЫМИ СОПРОТИВЛЕНИЯМИ**

Азербайджанская Республика, Сумгаитский государственный университет

Рассматривается вопрос создания новой конструкции датчика с проволочными сопротивлениями (ДПС) для измерения температуры, обладающего сравнительно малыми инерционностью и погрешностью гистерезисной характеристики, а также имеющего улучшенные динамические свойства.

Ключевые слова: датчик, измерения, регулирования, моста постоянного тока.

Производство ткани и шёлка требует многочисленных новых разработок измерительных устройств, позволяющих контролировать технологические параметры по количественным показателям со сравнительно высокой точностью. Для удовлетворения таких требований возникает необходимость либо усовершенствовать существующие измерительные устройства неэлектрических величин, либо создать совершенно новые измерительные приборы. Повышение точности таких измерительных устройств больше связано с точностью их первичных преобразователей-датчиков.

Внимание уделяется выбору, разработке и проектированию проволочных датчиков сопротивлений, используемых для измерения и регулирования температуры технологических установок производства шёлка и различных тканей. В связи с этим, был произведен анализ конструкции существующих проволочных датчиков для их усовершенствования и разработки новых проволочных датчиков сопротивлений, обладающих оптимальными конструктивными, метрологическими и экономическими параметрами. Учитывая производственные требования, разработан датчик проволочного сопротивления для измерения температуры в технологических установках производства ткани. Датчик состоит из медной проволоки, намотанной в продольном направлении на стержневом каркасе, размещенном в цилиндрическом стеклянном баллоне.

В существующих технологических установках производства ткани используемые датчики не полностью удовлетворяют современным требованиям. В Сумгаитском государственном университете разработано и исследовано устройство для измерения и регулирования температуры в технологических установках производства ткани.

В данной работе рассматривается вопрос создания новой конструкции датчика с проволочными сопротивлениями с учетом внутреннего нагрева, позволяющего для измерения, регулирования температуры с необходимой точностью и определение рабочих характеристики датчика, обладающего сравнительно малыми инерционностью и гистерезисной погрешностью, а также имеющего улучшенные динамические свойства [2, 3, 4].

Рассматриваемый датчик состоит из проволочного сопротивления из меди. Созданный датчик подключен к одному из плеч чепи моста постоянного тока (рис. 1). При этом через цепи датчика протекает ток, который по закону Джоуля-Ленца выделяет тепло, нагревающее внутри провод датчика. Кроме внутреннего тепла, на обмотку датчика воздействует также и внешняя температура Δt_2 , которая подлежит к измерению. В соответствии с этим сопротивление провода датчика определяется по формуле [1]

$$R_t = \frac{R_{do}(1 + \alpha \Delta t_2)}{1 - \frac{K\alpha R_{do} I^2 \tau}{cm}} \quad (1)$$

где R_{d0} - сопротивление обмотки датчика при нулевом значении температуры; α - температурный коэффициент материала (меди) провода датчика; τ - время протекания тока через обмотки датчика; I - ток, проходящий через датчик сопротивления; K - коэффициент пропорциональности; c - удельная теплоемкость материала обмотки датчика.

Величина тока, входящего в формуле (1), косвенным образом зависит от R_t . Для нахождения аналитической зависимости $I=F(R_t)$ удобно применять метод эквивалентного генератора. Путем исследования электрической схемы, приведенной на рис. 1, относительно зажимов сопротивления, производя некоторые преобразования и обозначений для тока I получим

$$R_t^3 + a_{4R}R_t^2 + a_{5R}R_t - a_{6R} = 0 \tag{2}$$

где a_{4R}, a_{5R}, a_{6R} - коэффициенты, зависящие от $a_{1R}, a_{2R}, a_{3R}, m, c, E$.

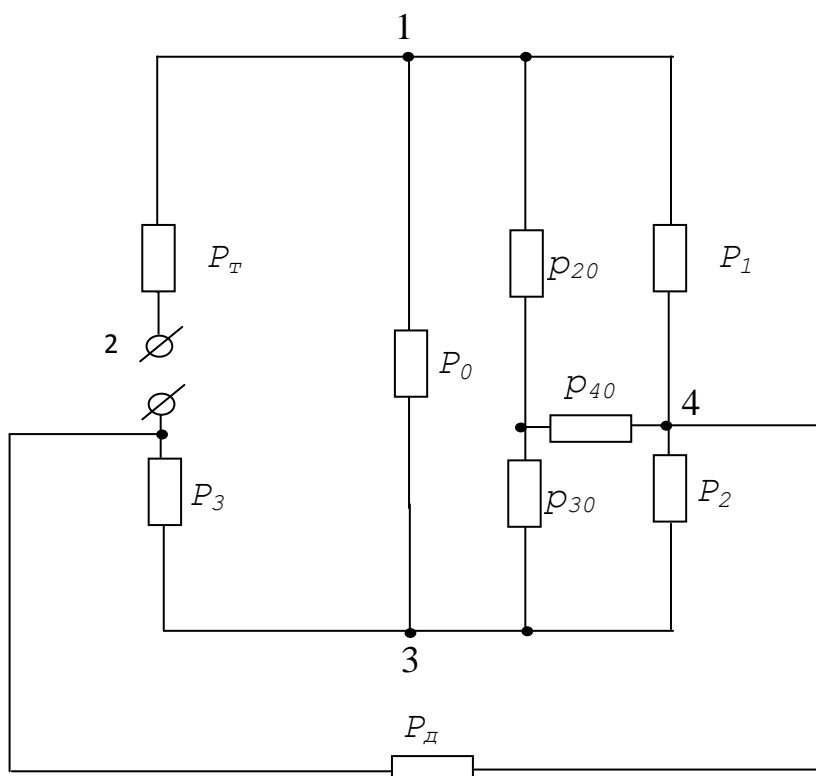


Рис. 1

Полученное выражение (2) представляет собой уравнение с третьей степени и может быть решено по формуле Кардано [6, 7], где

$$a_{4R} = \frac{2a_{2R}a_{3R} - a_{2R}^2R_{d0}(1 + \alpha\Delta t_2)}{a_{2R}^2} \tag{3}$$

$$a_{5R} = \frac{2a_{3R}^2 - k_1E^2a_{1R}^2 - 2a_{2R}a_{3R}R_{d0}(1 + \alpha\Delta t_2)}{a_{2R}^2} \tag{4}$$

$$a_{6R} = \frac{a_{3R}^2R_{d0}(1 + \alpha\Delta t_2)}{a_{2R}^2} \tag{5}$$

$$k_1 = (R\alpha R_{d0}\tau)/(cm)$$

Получаемый (1) по отношению R_t определяется по формуле Кардано [6, 7]:

$$R_t = \sqrt[3]{\Delta + \frac{a_{6R} + \frac{1}{3}a_{4R}a_{5R}}{2}} + \sqrt[3]{\frac{a_{6R} + \frac{1}{3}a_{4R}a_{5R}}{2} - \Delta - \frac{a_{4R}}{3}} \quad (6)$$

где

$$\Delta = \sqrt{\left[\frac{a_{6R} + \frac{1}{3}a_{4R}a_{5R}}{4} \right]^2 + \left[\frac{a_{5R} - \frac{5}{9}a_{4R}^2}{27} \right]^3} \quad (7)$$

Для получения рабочей характеристики используются (4) и (5)

$$a_{4R} \cdot a_{5R} = m_0 [1 - (m_1 + m_2)\Delta t_2 + m_1 m_2 \Delta t_2^2]; \quad (8)$$

где

$$m_0 = \frac{2a_{3R}}{2a_{2R}} \left(1 - \frac{a_{2R}R_{d0}}{2a_{3R}}\right) \left(1 - \frac{2R_{3R}a_{3R}R_{d0}}{a_{3R}^2 - k_1 E_M^2 a_{2R}^2}\right) \cdot \frac{a_{3R}^2 - k_1 E_M^2 a_{1R}^2}{a_{2R}^2} \quad (9)$$

$$m_1 = \frac{1}{1 - \frac{a_{2R}R_{d0}}{2a_{3R}}} \cdot \frac{a_{2R}R_{d0}\alpha}{2a_{3R}} \quad (10)$$

$$m_2 = \frac{1}{1 - \frac{2a_{2R}a_{3R}R_{d0}}{a_{3R}^2 - k_1 E_M^2 a_{1R}^2}} \cdot \frac{2\alpha a_{2R}a_{3R}R_{d0}}{a_{3R}^2 - k_1 E_M^2 a_{1R}^2} \quad (11)$$

$$[1 - (m_1 + m_2)\Delta t_2] \gg m_1 m_2 \Delta t_2^2 \quad (12)$$

$$a_{4R} a_{5R} = m_0 (1 - m_3 \Delta t_2) \quad (13)$$

где $m_3 = m_1 + m_2$.

Посмотрим зависимость $a_6 + \frac{1}{3}a_{4R}a_{5R}$ от Δt_2

$$a_6 + \frac{1}{3}a_{4R}a_{5R} = m_4 + m_5 \Delta t_2, \quad (14)$$

где

$$m_4 = \frac{a_{3R}^2 R_{d0}}{a_{2R}^2} + \frac{1}{3} m_0; \quad m_5 = \frac{\alpha a_{3R}^2 R_{d0}}{a_{2R}^2} - \frac{1}{3} m_0 m_3.$$

Тогда

$$\frac{1}{4} \left(a_{6R} + \frac{1}{3} a_{4R} a_{5R} \right)^2 = \frac{1}{4} m_4^2 \left(1 + m_6 \Delta t_2 + \frac{m_5^2}{m_4^2} \Delta t_2^2 \right). \quad (15)$$

Здесь

$$m_6 = \frac{2m_5}{m_4} ; [1 + m_6\Delta t_2] \gg \frac{m_5^2}{m_4^2} \Delta t_2^2$$

$$\frac{1}{4}(a_{6R} + \frac{1}{3}a_{4R}a_{5R})^2 = \frac{1}{4}m_4^2(1 + m_6\Delta t_2) \quad (16)$$

$$\frac{5}{9}a_{4R}^2 = m_7(1 - 2m_8\Delta t_2 + m_8^2\Delta t_2^2) \quad (17)$$

$$m_7 = \frac{20}{9} \cdot \frac{a_{3R}^2}{a_{2R}^2} (1 - \frac{a_{2R}R_{d0}}{2a_{3R}}); \quad m_8 = \frac{\alpha a_{2R}R_{d0}}{2a_{3R}(1 - \frac{a_{2R}R_{d0}}{2a_{3R}})}$$

После некоторых преобразований получим

$$\frac{1}{27} \left[a_{5R} - \frac{5}{9}a_{4R}^2 \right]^3 = \frac{1}{27}(m_9 - m_7)^3(1 + 3m_{11}\Delta t_2), \quad (18)$$

где

$$a_9 = \frac{a_{3R}^2 - k_1 E_M^2 a_{1R}^2}{a_2^2} (1 - \frac{2a_{2R}a_{3R}R_{d0}}{a_{3R}^2 - k_1 E_M^2 a_{1R}^2}); \quad m_{11} = 2m_7m_8 - m_9m_{10}$$

$$m_{10} = \frac{1}{1 - \frac{2a_{2R}a_{3R}R_{d0}}{a_{3R}^2 - k_1 E_M^2 a_{1R}^2}} \cdot \frac{2\alpha a_{2R}a_{3R}R_{d0}}{a_{3R}^2 - k_1 E_M^2 a_{1R}^2}$$

$$\Delta = \sqrt{m_{12} + m_{13}\Delta t_2}, \quad (19)$$

где

$$m_{12} = \frac{1}{4}m_4^2 + \frac{(m_9 - m_7)^3}{27}; \quad m_{13} = \frac{1}{4}m_4^2m_6 + \frac{m_{11}}{9}(m_9 - m_7)^3$$

$$\Delta = \sqrt{m_{12}} \cdot (1 + m_{14}\Delta t_2); \quad m_{14} = \frac{m_{13}}{2m_{12}} \quad (20)$$

$$R_t = \sqrt[3]{m_{15}}(1 + \frac{1}{3}m_{16}\Delta t_2) + \sqrt[3]{m_{17}}(1 + \frac{1}{3}m_{18}\Delta t_2) - \frac{a_{4R}}{3}, \quad (21)$$

где

$$m_{15} = m_{12} + \frac{1}{2}m_4 \quad ; \quad m_{16} = \frac{m_{12}m_{14} + \frac{m_5}{2}}{m_{12} + \frac{1}{2}m_4};$$

$$m_{17} = \frac{1}{2}m_4 - m_{12}; \quad m_{18} = \frac{\frac{1}{2}m_5 - m_{12}m_{14}}{\frac{1}{2}m_4 - m_{12}};$$

$$R_t = m_{21}(1 + m_{22}\Delta t_2), \quad (22)$$

где

$$m_{21} = \sqrt[3]{m_{15}} + \sqrt[3]{m_{17}}; \quad m'_{22} = \frac{\frac{1}{3}(m_{16}\sqrt[3]{m_{15}} + m_{18}\sqrt[3]{m_{27}}) + a_{19}a_{20}}{m_{21}};$$

$$m_{19} = \frac{2a_{3R}}{a_{2R}} \left(1 - \frac{a_{2R}R_{d0}}{2a_{3R}}\right); \quad m_{20} = \frac{\alpha a_{2R}R_{d0}}{2a_{3R} \left(1 - \frac{a_{2R}R_{d0}}{2a_{3R}}\right)}.$$

Полученная формула (21) позволяет определить показанную на рис. 2 рабочую характеристику с проволочными сопротивлениями.

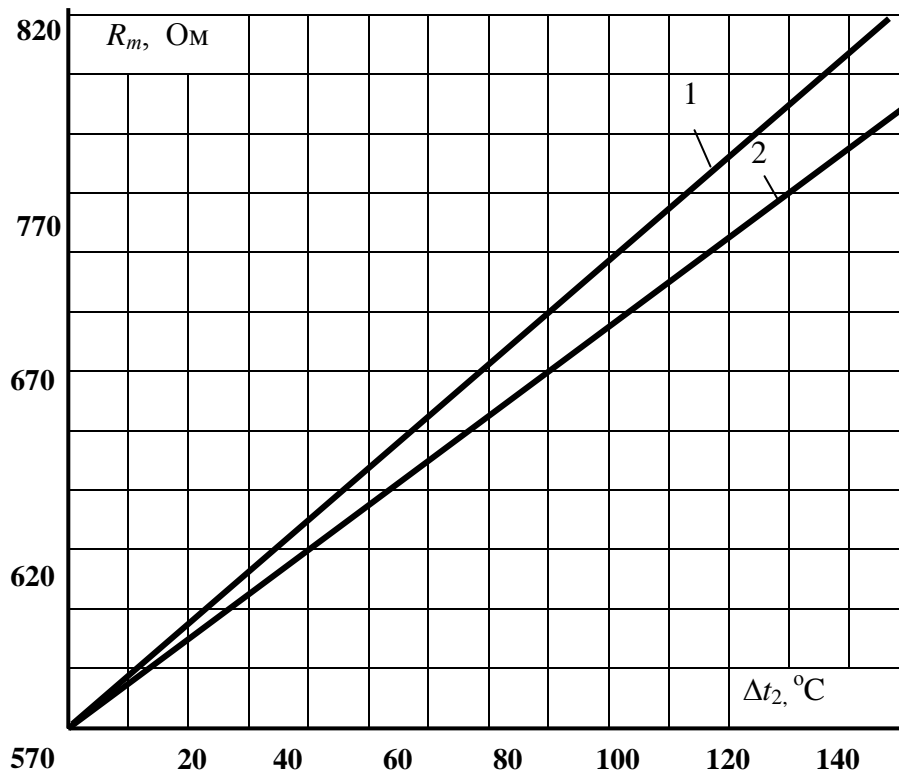


Рис. 2

Таким образом, из (21) видно что сопротивление R_i от измеряемой температуры Δt_2 имеет линейную зависимость. На рис. 2 даны 1 - теоретическая, 2 - экспериментальная характеристики датчика. Исследованием определено, что теоретическая характеристика, полученная по (21) совпадает с экспериментальной с точностью (5-6)%, приемлемой для проектирования таких и подобных датчиков и устройств.

Разработанный датчик с проволочными сопротивлениями эксплуатируется в текстильной фирме «Ипек» (г. Шеки, Азербайджанская Республика). Он может быть применен также в других отраслях и получен патент [5].

Библиографический список

1. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники / Л.А. Бессонов. – М. Высшая школа, 1964. – 750 с
2. Мамедов, Ф.И. Определение параметров датчика температуры / Ф.И. Мамедов, Р.Б. Дадашова, А.К. Аббасов // Автоматизация и современные технологии. – 2001. – №11. – С. 8–9.

3. **Мамедов, Ф.И.** Определение характеристик устройства для измерения температуры в технологических установках производства ткани / Ф.И. Мамедов, Р.Б. Дадашова, А.К. Аббасов // Автоматизация и современные технологии. – 2001. – №12. – С. 13–15.
4. **Мамедов, Ф.И.** Определение параметров проволочного датчика при включении его в плечо моста постоянного тока / Ф.И. Мамедов [и др.] // Приборы и системы. Управления, контроль, диагностика. – 2001. – №7. – С. 57–59.
5. **Məmmədov F.İ., Dadaşova R.B., Abbasov Ə.Q., Məmmədov S.F.** Patent № İ 20100117, Müqavimət termometri, Azərbaycan Respublikası, Standartlaşdırma Metrologiya və Patent üzrə Dövlət Komitəsi, 19.11.2010.
6. **Смирнов, В.И.** Курс высшей математики / В.И. Смирнов. Т. 1. ГНИД 1971. – 420 с
7. **Фихтенгольц, Г.М.** Курс дифференциального и интегрального начисления / Г.М. Фихтенгольц. – М.: Наука, 1969. – 656 с.

*Дата поступления
в редакцию 02.09.2015*

F.I. Mammadov, A.G. Abbasov, P.N. Shahbazov

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THE DEVICE OF MEASUREMENT AND REGULATION OF TEMPERATURE FOR CONTROL SYSTEMS

The Republic Of Azerbaijan, Sumgait State University

Elaboration and investigation of measurement devices and regulation of temperature for system management of fields light industry.

In consequence of analysis conducting of long standing literature source has placed in industry of silk clothes are of great use of technological equipment, made in foreign countries.

System of management with technological processes having foreign equipment has special demands.

Proceeding from indicating reasons are appeared the necessity of elaboration and investigation of new measuring and regulating devices, that is of actual matter in now days. Having set with the investigation that for measuring and regulating of temperature in the range $(0\div 200)^{\circ}\text{C}$ in cars, made by German firm (Zrelnik firm Stork) in painting and washing silk clothes are necessary to create a new device for controlling and regulating of technical parameters.

On the base of semi-conductor elements created the devices of measurement and regulating of temperature, placed its theoretical investigation with the account of parameter transistors, have been got the dependence of exiting voltage device from measuring temperature. Device allows measurement of temperature for 1% damagement. Creating device measurement and regulating temperature has been put info production working correctly in the workshop of evaporation and painting of silk clothes of «Sheki-Ipek», in which we can put it into production.

Key words: sensor, measurement, control, DC bridge.

УДК 621.039

А.В. Мамаев, С.М. Дмитриев, Р.Р. Рязанов, А.Е. Соборнов, А.В. Котин

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАКРУЧЕННОГО ТЕЧЕНИЯ В КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ С ВНУТРЕННЕЙ СПИРАЛЬНО НАВИТОЙ ТРУБОЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приводятся результаты трехмерного моделирования закрученного течения в кольцевом канале с внутренней спиральнонавитой трубой в пакетах прикладных программ вычислительной гидродинамики ЛОГОС и ANSYS CFX.

Ключевые слова: закрученные течения, спиральнонавитая труба, вычислительная гидродинамика, математическая модель, численное моделирование

Введение

Исследование особенностей процессов гидродинамики является важным этапом как при проектировании конструкций теплообменных аппаратов, так и на стадии обоснования эксплуатационных параметров и режимов работы ЯЭУ. Наиболее часто в инженерной практике возникает задача расчета гидродинамических характеристик течений в каналах, которая сводится к определению полей скорости и давления потока рабочей среды. Особое внимание вызывают внутренние закрученные течения жидкости и газа, которые ввиду своих специфических особенностей получили широкое применение в современном теплоэнергетическом оборудовании.

Данный тип течений характеризуется полем скорости с соизмеримыми значениями составляющих компонент. Наличие поперечных составляющих скорости обуславливает применение закрутки потока рабочих сред в каналах теплоэнергетических установок для достижения необходимой интенсификации протекающих в них тепло- и массообменных процессов [1, 2]. Одним из наиболее эффективных способов интенсификации теплообмена, основанных на закрутке потока, является использование каналов, выполненных по принципу «труба в трубе», с внутренней спирально навитой трубой.

Применение каналов такой конструкции в высоконапряженном теплообменном оборудовании, в частности в парогенераторном блоке ядерных энергетических установок малой мощности, обеспечивает интенсификацию процессов теплопереноса как со стороны греющей, так и нагреваемой сред, что позволяет существенно уменьшить массу и габариты установки и повысить технико-экономические показатели в целом [3]. Сложная структура течения в таких каналах, трудоемкость и высокие затраты на проведение модельных экспериментов, ограниченный характер существующих эмпирических зависимостей вызывают трудности при выборе наиболее рационального подхода для проведения гидродинамических расчетов.

Быстрый рост производительности многопроцессорных вычислительных систем делает возможным применение методов вычислительной гидродинамики (Computational fluid dynamics, CFD) для моделирования сложных течений, в частности закрученных потоков, что позволяет получить гидродинамические характеристики с приемлемой для практических целей точностью и избежать проведения дорогостоящих экспериментов. Существующие методы численного исследования процессов аэродинамики и тепломассообмена реализованы как в зарубежных, так и в отечественных программных средствах, и основаны на конкретных предположениях о структуре турбулентности, требующих проверки применительно к каждому отдельному классу исследовательских задач [4, 5].

В настоящее время ведущую роль в решении ряда практических задач атомной энергетики играют зарубежные программные коды. В сложившейся ситуации особенно важным является направление, связанное с разработкой, адаптацией и внедрением отечественных про-

грамм инженерного анализа в рамках импортозамещения, а также с целью создания конкуренции на мировом рынке.

Таким образом задача создания надежных расчётных моделей для анализа конкретного типа закрученных течений на базе CFD-технологий, реализованных в пакетах отечественного ПО, является весьма актуальной как с научной, так и с практической точки зрения.

Описание объекта и цели исследования

В качестве базы данных для верификации расчетной модели были использованы результаты экспериментального исследования гидродинамических характеристик однофазного потока воздуха в кольцевом канале, выполненном по принципу «труба в трубе» с внутренней спирально навитой трубой.

Экспериментальное исследование было проведено на стенде, входящем в состав научно-исследовательской лаборатории НГТУ им. Р.Е. Алексеева и представляющем собой аэродинамически разомкнутый контур, через который прокачивается воздух.

Экспериментальная модель, представленная на рис. 1, состоит из обсадной трубы 1 с внутренним диаметром 57 мм, оборудованной координатометром с установленным в нем термоанемометром 5 для замеров скорости и угла набегания потока, отборами статического давления 3 и 4 и специальным транспортиром с нитяным датчиком. Исследования проводились на модели с внутренним спирально навитыми вытеснителем 2 с наружным диаметром 40 мм и с шагом навивки 200 мм.

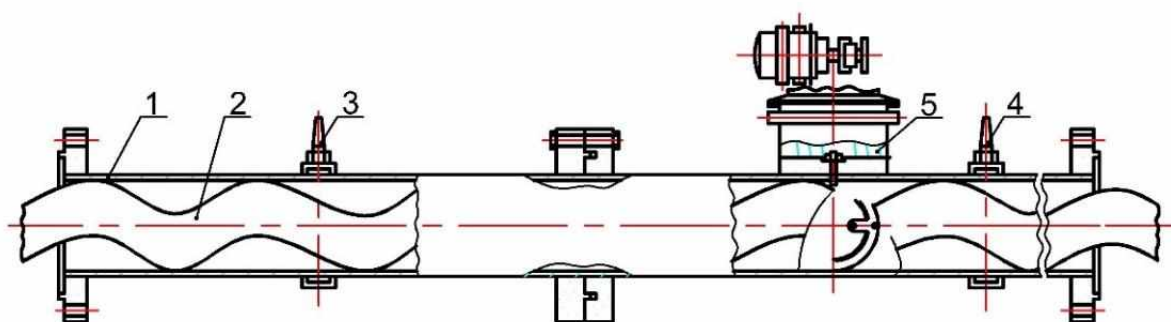


Рис. 1. Экспериментальная модель

В результате эксперимента были получены гидравлическое сопротивление канала и распределения осевой и тангенциальной составляющей скорости однофазного закрученного потока в диапазоне чисел $Re=4 \times 10^3 \div 10^5$. На рис. 2 приведена схема поперечного канала с обозначением азимутальных углов, в которых проводились замеры скорости потока. Отсчет по радиусу r канала производился от стенки внутренней трубы.

Целью исследования является оценка применения CFD-методов, реализованных в отечественном трехмерном коде ЛОГОС, для моделирования закрученного течения воздушного потока в кольцевом канале с внутренней спирально навитой трубой, а также разработка рекомендаций для построения надежных расчетных моделей, позволяющих получать решения с достаточной для инженерной практики точностью. В соответствии с целью можно выделить следующие задачи – это:

- разработка расчетной модели способной описывать структуру закрученного течения, реализованного в кольцевом канале с внутренней спирально навитой трубой;
- проведение численного исследования;
- оценка адекватности полученных результатов.

Для проведения расчетного исследования использовался отечественный код ЛОГОС 4.0.6, разработанный в Институте теоретической и математической физики Российского федерального ядерного центра (Саров). Создание расчетной модели также осуществлялось при

помощи коммерческого ПО ANSYS CFX 14, широко используемого на территории России и зарекомендовавшего себя эффективным инструментом для решения задач данного класса.

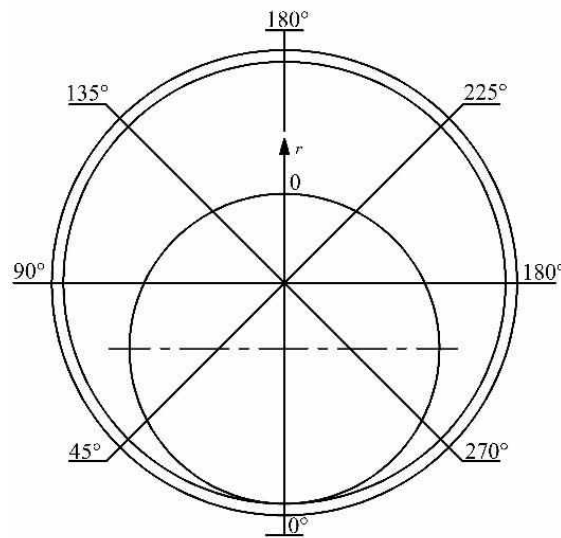


Рис. 2. Схема поперечного сечения канала с обозначением азимутальных углов

Математическая модель

В настоящее время одним из перспективных подходов к численному исследованию закрученных потоков является решение осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса (Reynolds-averaged Navier–Stokes, RANS). В результате операции осреднения характеристики течения представляются в виде средней и пульсационной составляющих, а в уравнении движения появляются шесть новых неизвестных компонент, образующих тензор турбулентных напряжений Рейнольдса. Полученная система уравнений является незамкнутой, что требует введения дополнительных соотношений для ее разрешения. Одним из способов замыкания является использование полуэмпирических моделей, основанных на концепции о турбулентной вязкости [6]. В рамках данного подхода для анализа многих аэродинамических течений, ввиду своей относительной простоты и возможности получения достаточно точных результатов, положительно зарекомендовала себя однопараметрическая модель Спаларта–Аллмареса (SA).

Модель SA, как и все модели турбулентной вязкости, предполагает изотропный характер турбулентности, что не всегда позволяет учесть возникающие при закрутке потока эффекты без введения специальных поправок. Модификация модели SA с поправкой на кривизну линий тока и вращение, получившая название SARC, имеет более широкий диапазон применения касательно задачи анализа закрученных течений. Данная модель получила реализацию в программном коде ЛОГОС и была использована для проведения расчетов в данной работе.

Для замыкания уравнений Рейнольдса в ANSYS CFX была выбрана модель BSL RSM (Reynolds Stress Model BaseLine), использующая нелинейные соотношения для каждой из компонент тензора напряжений, что позволяет с помощью нее описывать структуру сложных течений, принципиально неразрешимую моделями турбулентной вязкости. Данная модель предполагает совместное решение уравнений, соответствующих модели Ментера $k-\omega$ BSL, и дополнительных дифференциальных уравнений переноса для Рейнольдсовых напряжений [7]. Повышенное требование к вычислительным ресурсам модели BSL RSM, по сравнению с моделью SARC, продиктовано необходимостью решения большего числа уравнений, что также негативно влияет на сходимость расчета в целом.

Расчетная модель

На начальном этапе разработки расчетной модели осуществлялась подготовка трехмерной геометрии исследуемого канала для дальнейшего построения расчетных сеток. Построение расчетной сетки на исходную геометрию усложнялось наличием большого числа некачественных элементов в области касания вытеснителя и обсадной трубы. Для достижения необходимого качества сеточной модели задача контакта двух поверхностей была упрощена: вдоль линии касания поверхностей была отсечена область. Размер отсеченной области продиктован условием соответствия элементов расчетной сетки основным критериям оценки ее качества.

Для построения сеточной модели был использован программный комплекс ANSYS ICEM CFD, предусматривающий трансляцию сетки из формата сеточного генератора в универсальный формат CGNS (CFD General Notation System). Формат CGNS поддерживается многими вычислительными пакетами, в том числе и кодом ЛОГОС.

Для моделирования закрученных течений предпочтительным является использование гексаэдрических блочных сеток, так как при этом линии тока и сеточные линии ориентированы одинаково. Применение неструктурированных тетраэдрических сеток той же размерности вызывает потерю точности решения, а необходимое дополнительное измельчение расчетной области для достижения приемлемых результатов приводит к увеличению времени сходимости решения.

Выбранные для проведения расчета модели турбулентности не используют функцию стенки, что потребовало сгущения сетки у наружной и внутренней поверхности канала с толщиной первого элемента, соответствующей рекомендациям по выбору параметра $Y^+ \sim 1$. Построение сеточной модели осуществлялось для режима, соответствующего большей среднерасходной скорости, таким образом обеспечивалось необходимое значение параметра Y^+ для всех моделируемых режимов.

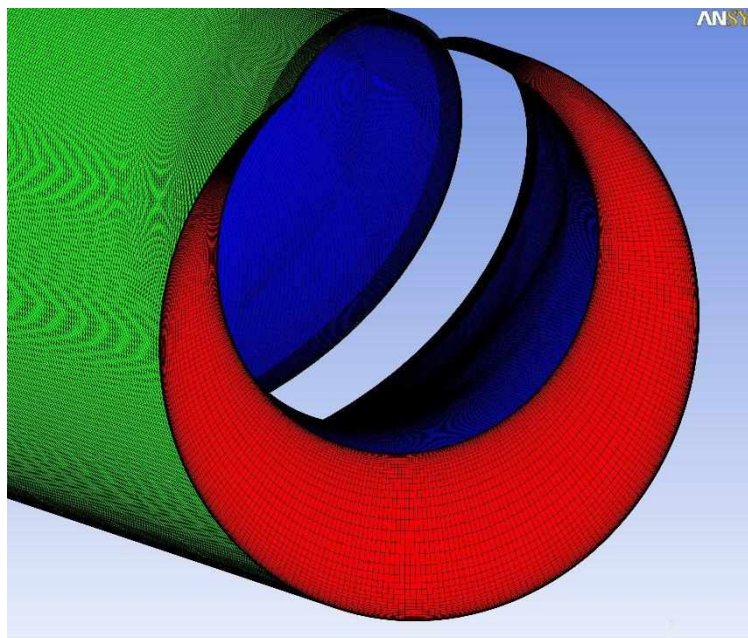


Рис. 3. Внешний вид гексаэдрической сетки

На основании упрощенной геометрии исследуемого канала была сгенерирована сеточная модель, содержащая 7,2 млн элементов и 6,9 млн расчетных узлов, с коэффициентом сгущения у стенки равным 1,2. Внешний вид разработанной гексаэдрической сетки представлен на рис. 3. Значительная размерность сеточной модели продиктована ее локальным измельчением, в связи с возрастающим затеснением канала в направлении к месту касания.

С целью экономии временных затрат наложение сетки производилось на геометрию, соответствующую l шагу навивки, с последующим копированием и склейкой для обеспечения необходимой длины расчетной модели.

На основании математической и сеточной была разработана расчетная модель течения идеального газа (воздуха), реализованная в программных пакетах ANSYS CFX И ЛОГОС. Расчеты проводились в стационарной постановке с использованием модели идеального газа (Air Ideal Gas) для описания свойств рабочей среды. Свойства среды, соответствующие эксперименту, были заданы плотностью и динамической вязкостью. Граничные условия задавались на соответствующих поверхностях геометрической модели исходя из режимных параметров экспериментальных исследований. На входе в расчетную область задавалась нормальная составляющая скорости, на выходе из расчетной области - относительное (избыточное) давление равное 0 кПа, на остальных поверхностях - условия непроницаемости и прилипания.

Результаты расчетного исследования

В результате численного исследования были получены поля скорости и давления в асимметричном кольцевом канале при течении закрученного потока воздуха. На основании полученных данных производилась оценка выбранных для проведения расчета моделей турбулентности, а также разработанной расчетной модели в целом.

1. Профили осевой и тангенциальной составляющей скорости.

Для сравнения с результатами эксперимента были построены распределения осевой и тангенциальной составляющей скорости в областях, соответствующих ее замеру. Для обеспечения наилучшей наглядности профили скоростей вывоились на диаграммы, повторяющие форму сечения канала. Профили относительных осевой и тангенциальной составляющей для среднерасходной скорости $\bar{v}=17,4$ м/с представлены на рис. 4 – рис. 5.

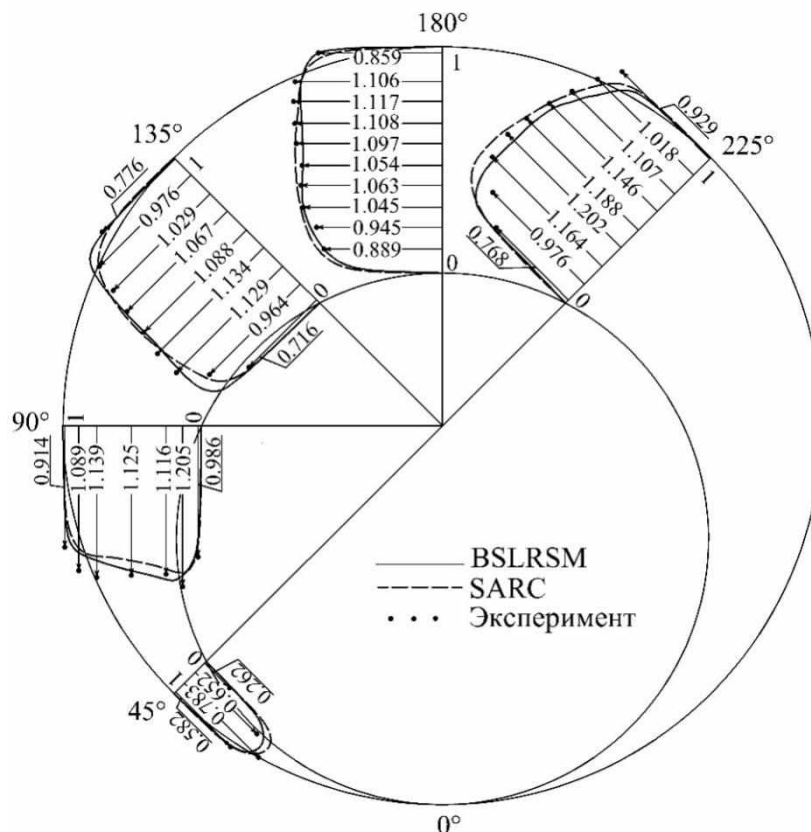


Рис. 4. Распределение осевой составляющей скорости по сечению исследуемого канала для среднерасходной скорости $\bar{v}=17,4$ м/с

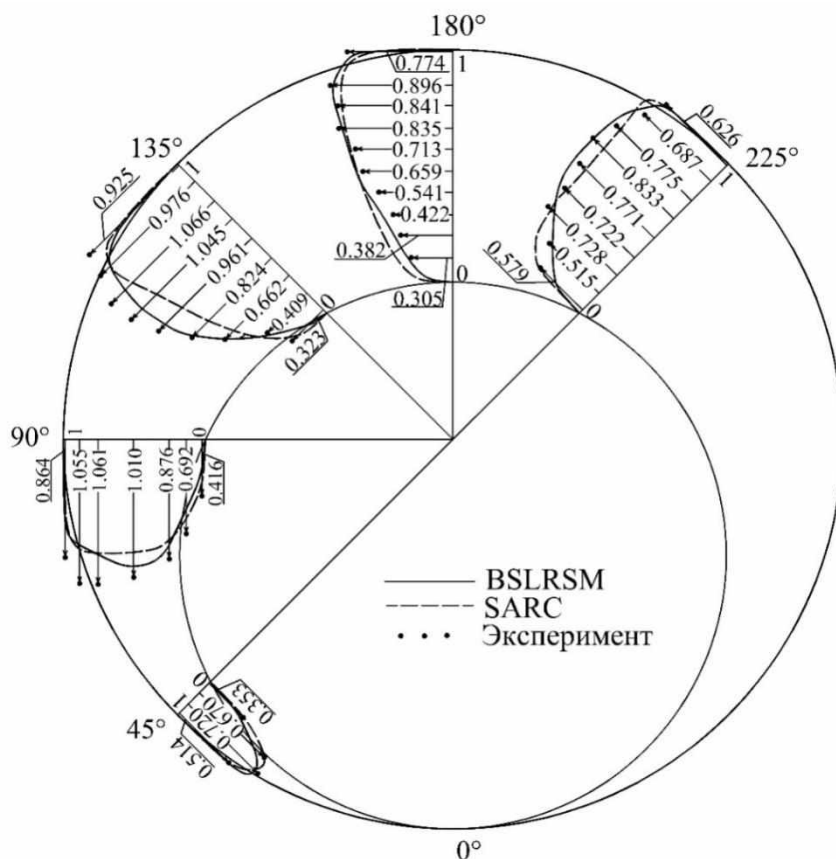


Рис. 5. Распределение тангенциальной составляющей скорости по сечению исследуемого канала для среднерасходной скорости $\bar{v}=17,4$, м/с

Наилучшее совпадение расчетных и экспериментальных профилей скорости в поперечном сечении канала получено для осевой составляющей, как при использовании модели SARC, так и модели BSL RSM. Важно отметить схожий характер распределений, полученных на обеих моделях. Качественные отличия расчетных профилей отмечаются на углах 135° и 225° , при этом ближе к экспериментальным данным находятся значения, соответствующие модели BSL RSM.

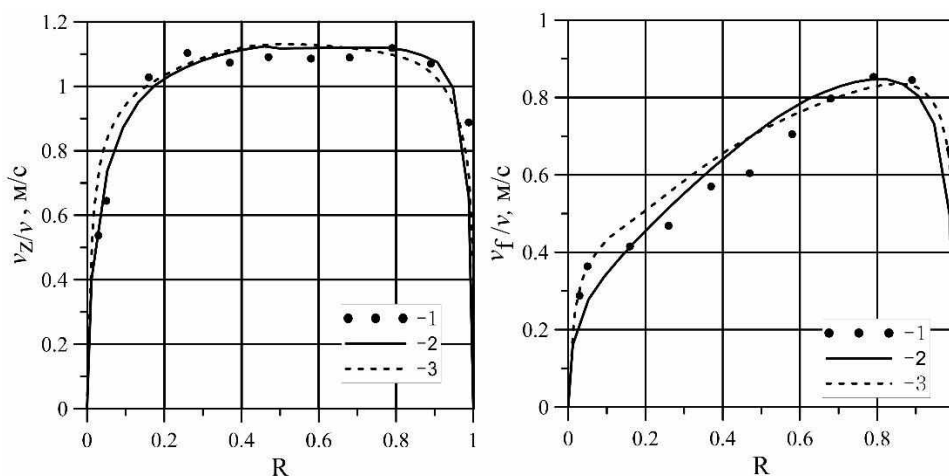


Рис. 6. Распределение в радиальном направлении канала для азимутального угла 180° и среднерасходной скорости $\bar{v}=11,8$, м/с:
 а – осевой составляющей скорости v_z ; б – тангенциальной составляющей скорости v_f ;
 1 - эксперимент; 2 - BSL RSM; 3 - SARC

Распределение скоростей в поперечном сечении канала является определяющим фактором, влияющим на теплообмен и гидравлическое сопротивление однофазных потоков в парогенерирующих каналах со спирально-навитой трубой, поэтому важным является точное моделирование закрученных течений в широком диапазоне режимных параметров. На рис. 6 – рис. 8 приведены расчетные и экспериментальные распределения относительных осевой и тангенциальной составляющих скорости для режимов, соответствующих различным значениям среднерасходной скорости \bar{v} , м/с, где R – относительный радиус.

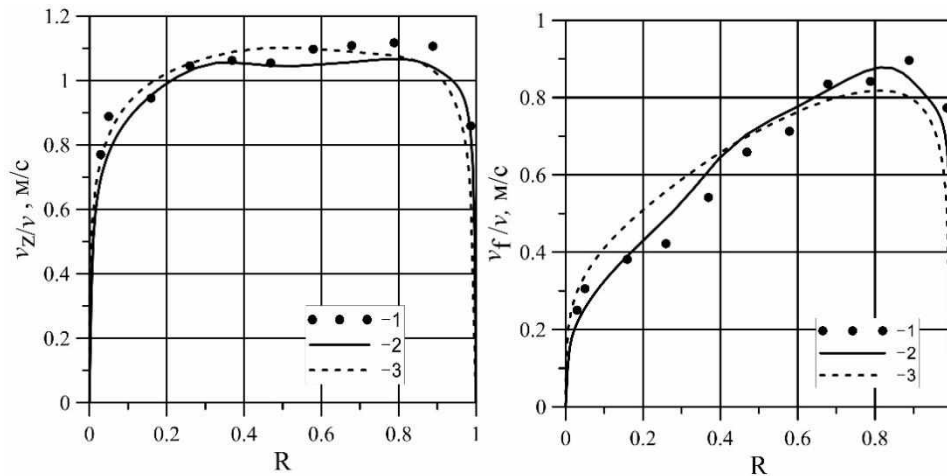


Рис. 7. Распределение в радиальном направлении канала для азимутального угла 180° и среднерасходной скорости $\bar{v}=17,4$, м/с:
 а – осевой составляющей скорости v_z ; б – тангенциальной составляющей скорости v_f ;
 1 - эксперимент; 2 - BSL RSM; 3 - SARC

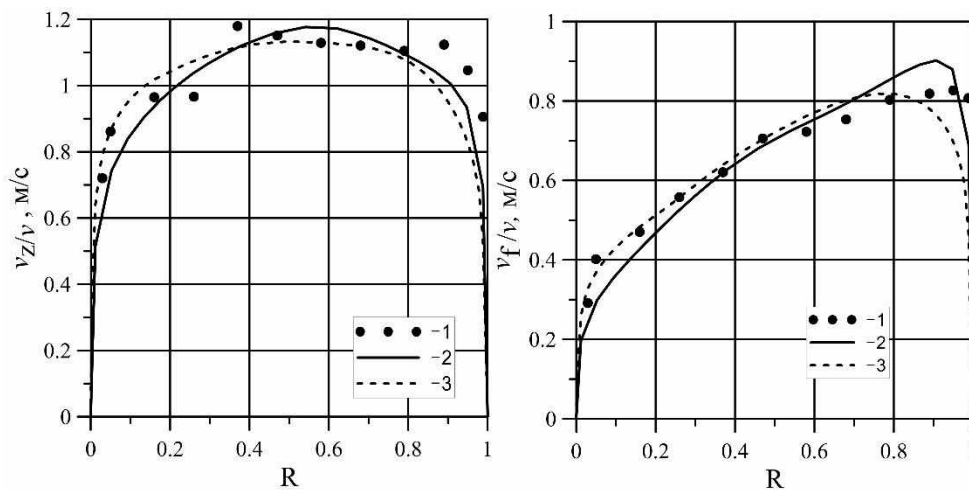


Рис. 8. Распределение в радиальном направлении канала для азимутального угла 180° и среднерасходной скорости $\bar{v}=22,3$, м/с:
 а – осевой составляющей скорости v_z ; б – тангенциальной составляющей скорости v_f ;
 1 - эксперимент; 2 - BSL RSM; 3 - SARC

В рассмотренном диапазоне изменения среднерасходной скорости расчетные распределения, полученные на обеих моделях турбулентности, качественно согласуются с экспериментальными данными. В пристенной области внутренней и наружной поверхности канала модель SARC дает соответственно незначительно завышенные и заниженные значения, по сравнению с BSL RSM, что наиболее ярко проявляется при увеличении среднерасходной скорости.

2 Гидравлическое сопротивление.

Большое внимание при проектировании теплообменных аппаратов, в каналах которых применяются закручивающие устройства, уделяется величине коэффициента гидравлического сопротивления ξ . Для определения ξ в результате численного моделирования были получены распределения статического давления по длине исследуемой модели. На рис. 9 представлены расчетные и экспериментальные зависимости ξ канала от числа Re.

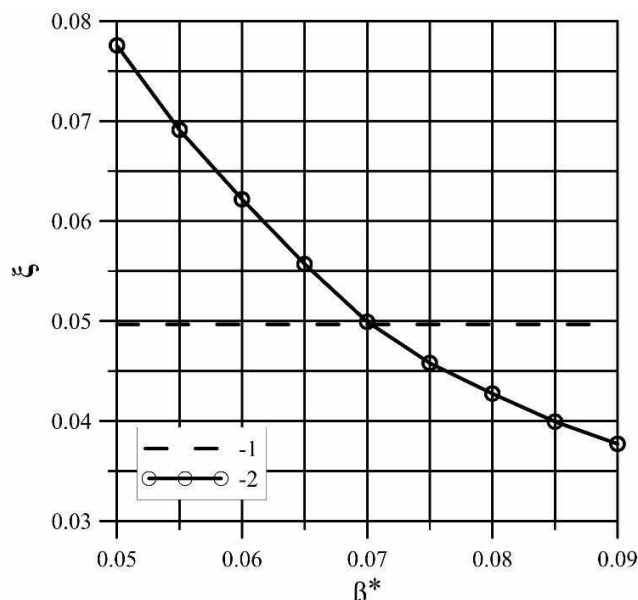


Рис. 9. Экспериментальные и расчетные зависимости коэффициента гидравлического сопротивления:
1 - эксперимент; 2 - BSL RSM; 3 - SARC

Для достижения необходимой точности расчета на модели BSL RMS производилось варьирование коэффициента β^* (BetaStar), входящего в соотношение корреляции давления и скорости деформации в уравнении для тензора турбулентных напряжений Рейнольдса и отвечающего за перераспределение энергии между компонентами тензора. Подбор необходимого значения коэффициента проводился для режима, соответствующего наибольшей среднерасходной скорости, в диапазоне изменения параметра: 0,05-0,09. Зависимость коэффициента β^* от ξ представлена на рис. 10.

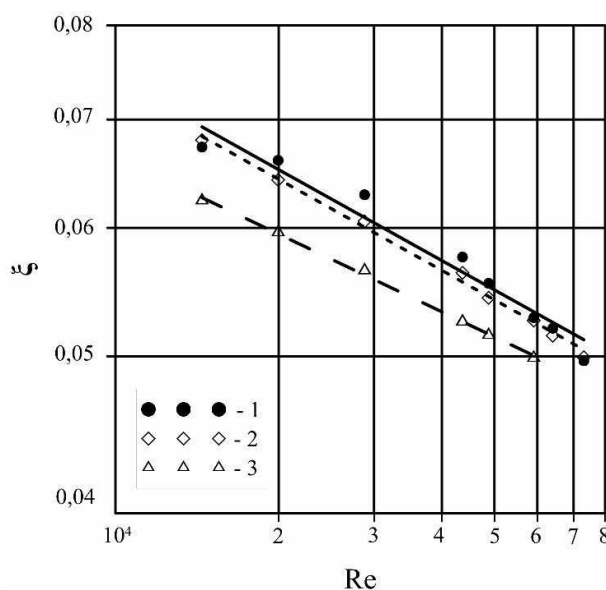


Рис. 10. Зависимость ξ от коэффициента β^* для среднерасходной скорости $\bar{v}=53,8$, м/с

Полученная зависимость ξ от коэффициента β^* , позволила определить его необходимое значение равное 0,07 и провести расчеты во всем диапазоне исследуемых режимов. В результате CFD-моделирования на модели BSL RMS были получены расчетные величины ξ , отличающиеся от экспериментальных, не более чем на 3%. Модель SARC также позволила получить приемлемые результаты: отклонение от эксперимента не превысило 8%.

Выводы

В результате численного моделирования были исследованы особенности течения в канале с внутренней спиральнонавитой трубой в программных пакетах ЛОГОС и ANSYS CFX. Разработка расчетной модели осуществлялась на основании сгенерированной тетраэдрической сетки, соответствующей требованиям к выбранным моделям турбулентности. Полученные в результате расчета поля скорости позволили построить профили ее осевой и тангенциальной составляющих по сечению канала в направлении различных азимутальных углов. Распределения скорости, полученные на моделях турбулентности RSM BSL и SARC, имеют схожий характер с качественным отличием, наблюдаемым на углах 130° и 225° . Обе модели показали наилучшее совпадение для осевой составляющей скорости. На основании распределений статического давления по длине канала были определены зависимости для коэффициента гидравлического сопротивления. Для достижения необходимой точности расчета был определен параметр β^* модели BSL RMS равный 0,07. Отклонение расчетных значений коэффициента гидравлического сопротивления от эксперимента составило: модель BSL RSM – не более 3%, модель SARC – не более 8%.

Достаточное согласование данных численного исследования, полученных на разработанной расчетной модели, с экспериментальными позволяет судить о ее применимости для описания течения в канале с внутренней спиральнонавитой трубой. В данной работе лучше себя показала модель BSL RSM, однако модель SARC также позволила получить удовлетворительные результаты. Кроме того, модель SARC, реализованная в программном пакете ЛОГОС, являясь менее требовательной к вычислительным ресурсам, гораздо выгоднее для проведения расчетов на мелких сетках. Таким образом с использованием кода ЛОГОС для проведения гидродинамических расчетов каналов с внутренней спиральнонавитой трубой, в особенности теплообменных каналов перспективных реакторных установок, возможно получение характеристик закрученных течений с достаточной для практических целей точностью.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках договора № 02.G25.31.0124 от 3 декабря 2014 г. (в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218).

Библиографический список

1. **Щукин, В.К.** Теплообмен, массообмен и гидродинамика закрученных потоков в осесимметричных каналах / В.К. Щукин, А.А. Халатов. – М.: Машиностроение, 1982. – 200 с.
2. **Митрофанова, О.В.** Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок / О.В. Митрофанова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 288 с.
3. **Будов, В.М.** Форсированные теплообменники ЯЭУ / В.М. Будов, С.М. Дмитриев. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 176 с.
4. **Харламов, С.Н.** Алгоритмы при моделировании гидродинамических процессов / С.Н. Харламов. – Томск: ТПУ, 2008. – 80 с.
5. **Козелков, А.С.** Математические модели и алгоритмы для имитационного моделирования задач гидродинамики и аэродинамики: учеб. пособие / А.С. Козелков [и др.]; НГТУ. – Нижний Новгород, 2014. – 164 с.

6. **Снегирёв, А.Ю.** Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений / А.Ю. Снегирёв. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 143 с.
7. ANSYS CFX Solver Modeling Guide / ANSYS Inc. – ANSYS CFX Release 15. – 2013.

*Дата поступления
в редакцию 25.10.2015*

A. V. Mamaev, S. M. Dmitriev, R. R. Ryazapov, A. E. Sobinov, A.V. Kotin

**NUMERICAL SIMULATION OF SWIRLING FLOW IN THE RING-
THE FIRST CHANNEL WITH AN INNER PIPE SPIRIDONOVICH**

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

The scientific paper presents the results of three-dimensional modelling of swirling flow in annular channel with an inner pipe Spiridonovich in the software of computational fluid dynamics LOGO and ANSYS CFX.

Key words: swirling flow, Spiridonovich pipe, computing guide-urodinamiki, mathematical model, numerical simulation

УДК 621.039

**П.В. Арсенов, А.В. Варенцов, Д.В. Доронков, Е.Н. Полозкова,
А.Н. Пронин, А.Е. Хробостов**

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПОТОКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ТВСА РЕАКТОРА ВБЭР

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты экспериментальных исследований локальной гидродинамики теплоносителя за перемешивающей решеткой в ТВСА реактора ВБЭР. Исследования проводились моделированием течения потока в ТВСА на аэродинамическом стенде методом диффузии трассера при помощи пневмометрических зондов. Целью работы являлось определение влияния перемешивающей решетки на гидродинамические характеристики потока в области стандартных ячеек и в районе направляющего канала. По результатам проведенных исследований было получено распределение локальных полей скорости за дефлекторами перемешивающей решетки, распределение расходов теплоносителя и концентрации трассера по ячейкам экспериментальной модели. Полученные данные позволили определить закономерности и выявить особенности течения теплоносителя за перемешивающей решеткой ТВСА.

Ключевые слова: тепловыделяющая сборка, дистанционирующая и перемешивающие решетки, направляющий канал, гидродинамика, тепломассоперенос.

Введение

В АО «ОКБМ Африкантов» разработан проект атомной станции средней мощности с реактором типа ВБЭР. В качестве прототипа реактора принята судовая реакторная установка, зарекомендовавшая себя длительной безаварийной эксплуатацией на российских судах и кораблях. Внедрение таких станций в энергосистему позволит не только обеспечить тепловой и электрической энергией регионы, не имеющих централизованного энергоснабжения, но и заменить со временем устаревшие энергоблоки, работающие на органическом топливе.

В качестве топлива в активной зоне реактора предполагается использовать бесчехловые ТВСА каркасной конструкции с интенсификаторами теплообмена – перемешивающими решетками типа «порядная прогонка». Силовой каркас ТВС, обеспечивающий жесткость и прочность конструкции, составлен из дистанционирующих решеток, приваренных к уголкам жесткости. Частью силового каркаса являются также направляющие каналы, которые, помимо размещения в них органов системы управления и защиты, воспринимают нагрузки при транспортно-технологических операциях [1]. Применение перемешивающих решеток в ТВС позволяет дополнительно турбулизовать поток в пределах отдельных ячеек и тем самым повысить запас до кризиса теплоотдачи.

Для обоснования теплотехнической надежности активных зон ядерных реакторов ВБЭР с ТВСА необходимо определить влияние перемешивающей решетки на поток теплоносителя. Ввиду особенностей конструкции решетки в поперечном сечении кассеты можно выделить области двух типов: область стандартных ячеек и область направляющих каналов. Различие между ними заключается в том, что ячейки около направляющих каналов имеют меньшее проходное сечение и в этих ячейках отсутствуют турбулизирующие дефлектора перемешивающей решетки.

В НГТУ им. Р.Е. Алексеева был проведен комплекс исследований, направленных на изучение особенностей течения теплоносителя за перемешивающей решеткой в характерных областях ТВСА реактора ВБЭР.

Экспериментальный стенд

Исследования локальных гидродинамических и массообменных характеристик теплоносителя проводились на аэродинамическом стенде на масштабных моделях фрагментов ТВСА. Экспериментальный стенд представляет собой разомкнутый контур. Циркуляция воз-

духа в экспериментальной установке осуществляется за счет работы вентилятора высокого давления. Для обеспечения постоянного давления на входе в экспериментальную модель и сглаживания пульсаций расхода воздуха, возникающих при работе вентилятора, в состав стенда включена ресиверная емкость. Поток воздуха из ресиверной емкости, пройдя участок стабилизации, попадает в экспериментальную модель, после которой выбрасывается в атмосферу. Для проведения исследований было изготовлено две модели, выполненные в полном геометрическом подобии с натурной ТВСА. Первая модель представляет собой фрагмент ТВСА, который включает в себя пояса дистанционирующих решеток, пояс перемешивающей решетки типа «порядная прогонка» и имитаторы твэлов. Вторая модель включает в себя, помимо поясов дистанционирующих решеток, пояса перемешивающей решетки и имитаторов твэлов один имитатор направляющего канала (рис. 1).

Перемешивающая решетка типа «порядная прогонка» представляет собой набор пластин, на верхних кромках с которой расположены турбулизирующие дефлектора. Конструкция данной решетки позволяет организовать поперечные конвективные течения теплоносителя по рядам ячеек ТВС, причем в соседних рядах эти направления противоположны.

Исследования локальных гидродинамических характеристик потока заключались в измерении модуля вектора скорости в каждой ячейке и углов набегания потока. Исследование межъячеечного массообмена потока осуществлялось методом диффузии примесей. Данный метод основан на регистрации поперечного потока массы по некоторой переносимой субстанции. В качестве примеси выбран пропан, поскольку он обладает близкими к воздуху свойствами [2].

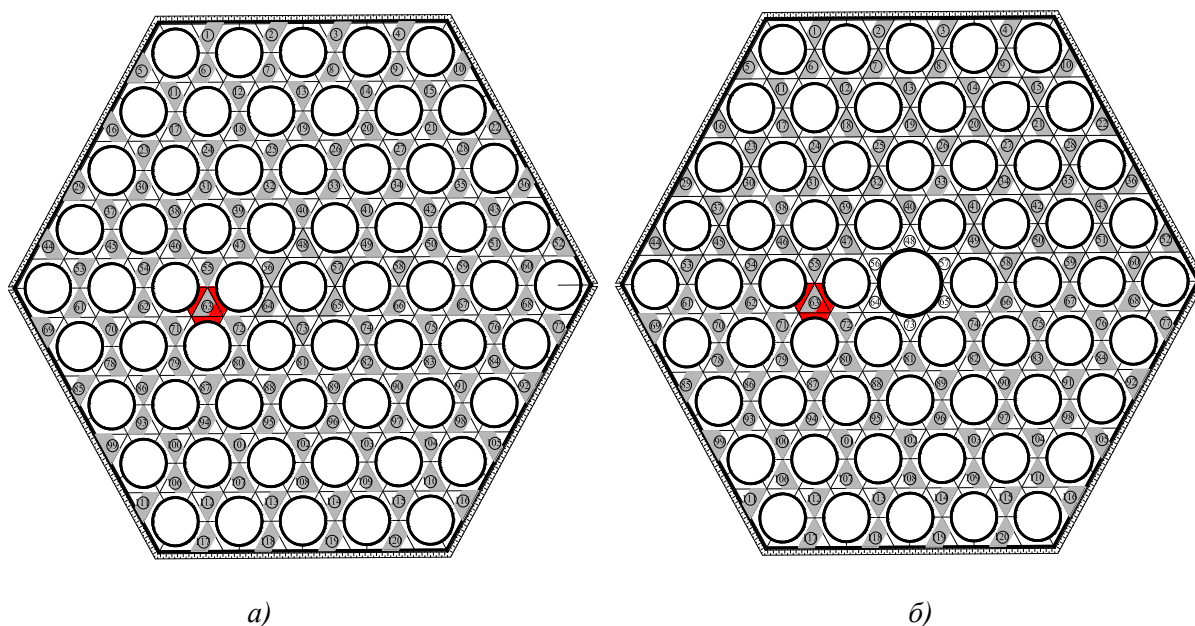


Рис. 1. Экспериментальная модель фрагмента ТВСА:

a – без направляющего канала;
б – с направляющим каналом

Измерительный комплекс

При проведении исследований использовались следующие средства измерения: пятиканальный пневмометрический зонд, трубка Пито–Прандтля, блок аналоговых преобразователей давления, газоанализатор, расходомер газа, ЭВМ с программным обеспечением.

Для измерения направления и вектора скорости потока теплоносителя использовался пятиканальный пневмометрический зонд. Предельные отклонения проекций абсолютной скорости на оси X , Y , Z не превышали 7% [3].

Для снятия показаний с каналов пневмометрического зонда использовались аналого-

вые преобразователи давления, собранные в единый блок. Погрешность данных преобразователей давления составляет $\pm 0,25\%$ [4].

Концентрация пропана в газо-воздушной смеси определялась при помощи газоанализатора. Данный газоанализатор позволяет измерять концентрацию углеводородов до 10000 ppm, при этом, если концентрация газа находится в диапазоне 0–1000 ppm, то погрешность измерения составляет ± 15 ppm, при значении концентрации 1000–10000 ppm погрешность составляет $\pm 1,5\%$ [5].

Для обеспечения постоянного расхода трассера через модель использовался расходомер газа. Данный расходомер позволяет устанавливать расход трассера через модель с точностью 0,5%.

Методика исследований

Исследования локальных гидродинамических характеристик заключались в измерении локальных полей скорости потока за перемешивающей решеткой и определении расходов теплоносителя по ячейкам экспериментальной модели. Поле скорости измерялось пятиканальным пневмометрическим зондом в стандартных ячейках, область измерения включала в себя два соседних ряда ячеек (рис. 2). Ориентация турбулизирующих дефлекторов в ячейках измерения такова, что под их воздействием в соседних рядах твэлов образуются конвективные поперечные течения, которые направлены в противоположные стороны. Для определения длины затухания возмущений потока теплоносителя за перемешивающей решеткой измерения проводились в нескольких сечениях на различном расстоянии от решетки.

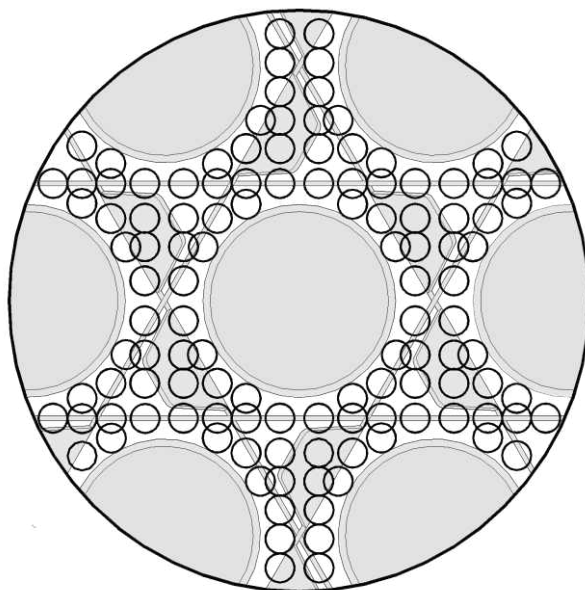


Рис. 2. Точки измерения при исследовании поля скорости за перемешивающей решеткой в области стандартных ячеек

При исследовании процессов межъячеечного массопереноса потока трассер подавался в ячейку инъекции до перемешивающей решетки. Ячейка инъекции трассера была выбрана таким образом, чтобы при проведении исследований была обеспечена возможность изучения межъячеечного перемешивания теплоносителя как в области стандартных ячеек, так и в районе направляющего канала. Количество подаваемого пропана выбрано таким образом, чтобы скорость трассера при выходе из впускного зонда была равна скорости потока.

Таким образом, введение трассера в экспериментальную модель не приводит к изменению профиля скорости в ячейке инъекции. Отбор газовой смеси из потока производился при помощи отборного зонда, по которому он направлялся в газоанализатор для определения значения концентрации пропана. В пределах одной ячейки концентрация изме-

рялась в четырех точках (в центре и на границе с соседними ячейками), после чего значение усреднялось. Концентрация измерялась по всему поперечному сечению экспериментальной модели в двадцати сечениях на различных расстояниях от решетки. По полученным данным была получена подробная картина течения теплоносителя в области стандартных ячеек и в районе направляющего канала.

Представительность экспериментальных исследований

Для обеспечения возможности применения полученных опытных данных при расчетах штатного устройства необходимо подтверждение представительности экспериментальных исследований. Согласно теории гидродинамического подобия профиль относительной скорости $w_{\text{лок}}/w_{\text{ср.расх}}$ ($w_{\text{лок}}$ – локальная скорость потока в заданной точке, $w_{\text{ср.расх}}$ – средняя скорость потока через экспериментальную модель) в зоне автомодельного течения остается практически неизменным [5].

Следовательно, при моделировании воздухом течения теплоносителя в активной зоне реактора, исследования необходимо проводить в области автомодельного течения. Это позволит получить экспериментальные данные, которые можно будет перенести на натурные условия течения теплоносителя.

Был проведен ряд исследований, направленных на изучение режимов течения потока в экспериментальной модели. Основная цель этих исследований – поиск нижней границы зоны автомодельности. Было установлено, что область автомодельного течения теплоносителя в экспериментальной модели начинается при достижении числа $Re=55000$ (рис. 3). Все исследования проводились на участке стабилизированного течения при числе $Re=101000$ и, следовательно, полученные данные могут быть перенесены на натурные условия течения теплоносителя в ТВС.

Также были проведены исследования по определению коэффициентов местного гидравлического сопротивления перемешивающих и дистанционирующих решеток. Установлено, что эти коэффициенты для решеток экспериментальной модели равны коэффициентам местного гидравлического сопротивления соответствующих решеток в натурной конструкции ТВС. Подтверждение этого равенства также является необходимым условием при обосновании представительности проводимых исследований.

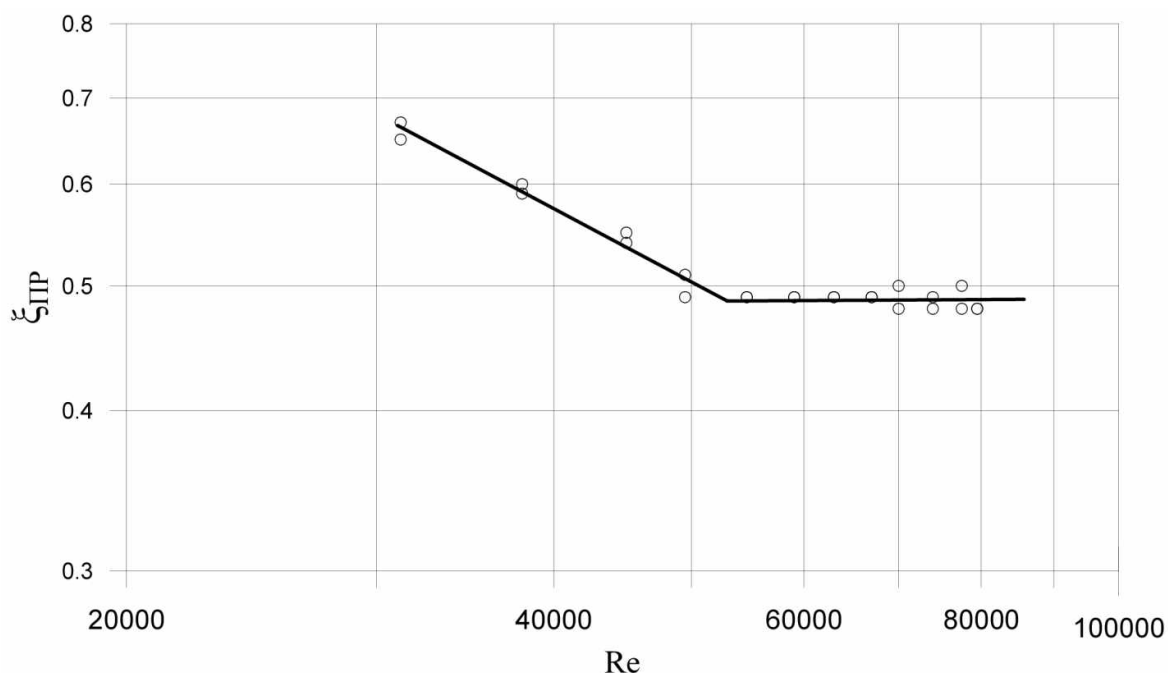


Рис. 3. Зависимость коэффициента местного гидравлического сопротивления перемешивающей решетки типа «порядная прогонка» от числа Re

Результаты экспериментальных исследований гидродинамических и массообменных характеристик потока за перемешивающей решеткой

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что в области стандартных ячеек за перемешивающей решеткой максимальное значение поперечной скорости наблюдается сразу за решеткой и составляет 40 % от аксиальной. Необходимо отметить, что на расстоянии $\Delta l/d_r \approx 3$ (Δl – расстояние до перемешивающей решетки, d_r – гидравлический диаметр) за перемешивающей решеткой происходит резкое снижение поперечных скоростей, которые уже не превышают 25% от аксиальной. При дальнейшем удалении от решетки затухание поперечных скоростей замедляется (рис. 4). Было выявлено, что в межъячейковом зазоре, где дефлектора направлены в противоположные стороны по отношению друг к другу, наблюдается вихревой характер движения, который имеет протяженность $\Delta l/d_r \approx 3$ (рис. 5).

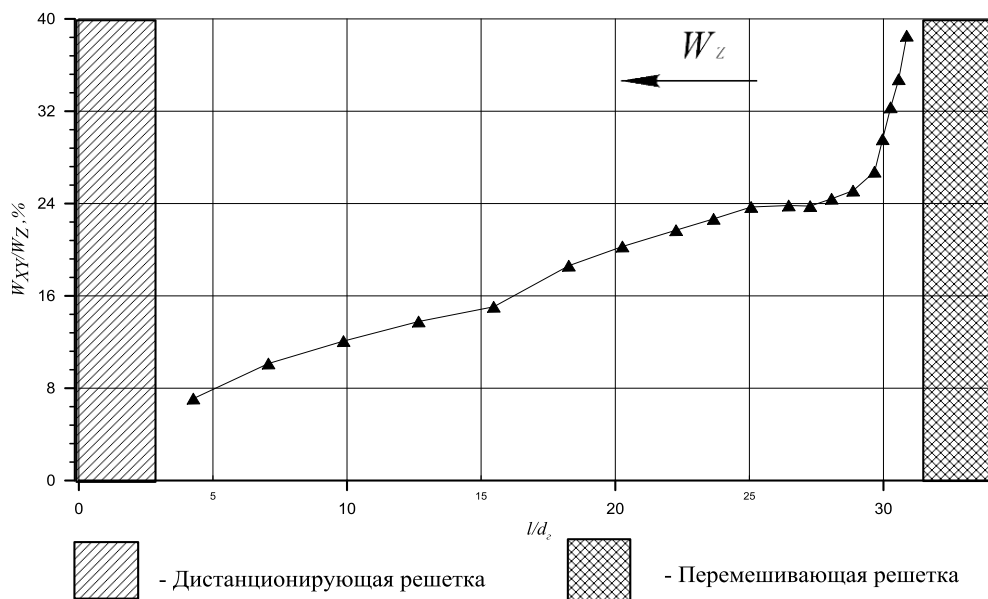


Рис. 4. Распределение поперечной скорости по длине модели за перемешивающей решеткой «порядная прогонка» в области стандартных ячеек ($Re=101000$, $w_{ср,расх}=37,5$ м/с)

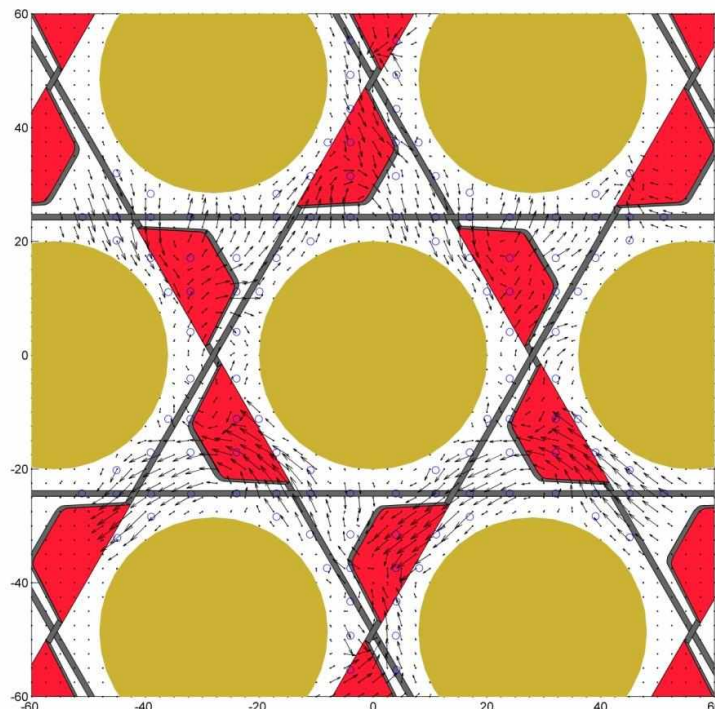


Рис. 5. Векторное поле поперечных составляющих скорости на расстоянии $\Delta l/d_r=2$ от перемешивающей решетки в области стандартных ячеек ($Re=101000$, $w_{ср,расх}=37,5$ м/с)

При исследовании процессов межячеечного массопереноса было установлено, что в области стандартных ячеек за перемешивающей решеткой «порядная прогонка» организованы направленные поперечные конвективные течения теплоносителя. Основной расход трассера перемещается из ячейки в ячейку в соответствии с ориентацией турбулизирующих дефлекторов перемешивающей решетки (рис. 6). Перемешивание теплоносителя между соседними рядами ячеек, в которых поток из-за влияния перемешивающей решетки движется в противоположных направлениях, обусловлено естественной турбулентностью потока и является незначительным.

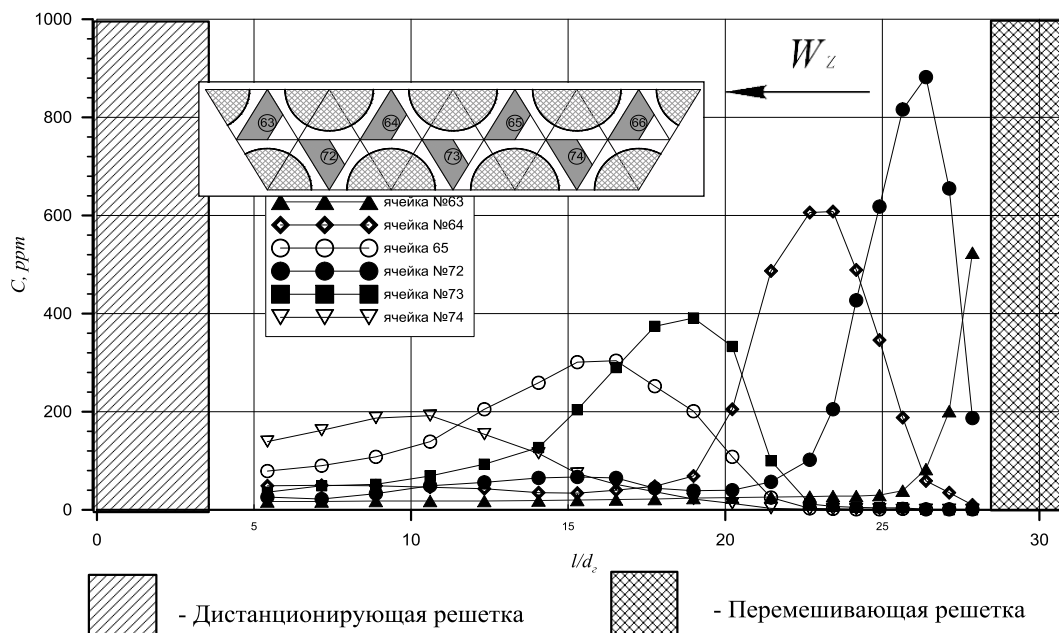


Рис. 6. График распределения концентрации трассера по длине экспериментальной модели за перемешивающей решеткой в модели без направляющих каналов ($Re=101000$, $w_{ср.расх}=37,5$ м/с)

Анализ распределения трассера в экспериментальных моделях позволил сделать заключение, что интенсивность массообменных процессов в районе направляющего канала ниже, чем в области стандартных ячеек. Глубина распространения трассера из ячейки инжекции при наличии направляющего канала меньше, чем в стандартных ячейках. Так, на расстоянии $\Delta l/d_r=25$ от перемешивающей решетки в модели без направляющего канала трассер распространился в 17 ячеек, а в модели с направляющим каналом – в 9 ячеек (рис. 7).

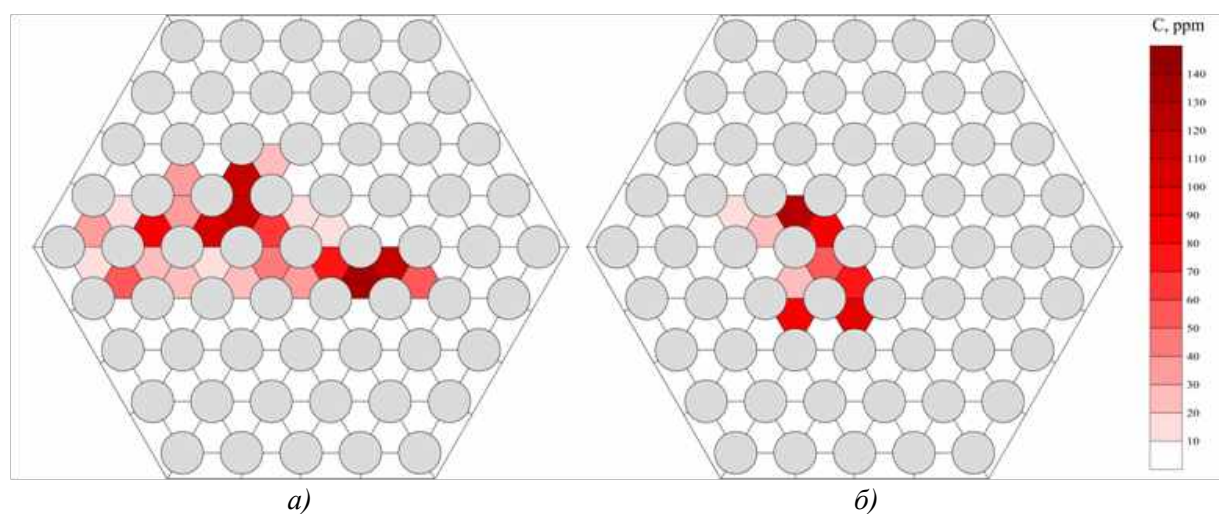


Рис. 7. Распределение трассера на расстоянии $\Delta l/d_r=25$ от перемешивающей решетки ($Re=101000$, $w_{ср.расх}=37,5$ м/с):
 а – модель без направляющего канала; б – модель с направляющим каналом

Наличие в конструкции ТВСА направляющих каналов приводит к тому, что направленное поперечное конвективное течение теплоносителя, вызванное воздействием перемешивающей решетки, нарушается. Поток теплоносителя, попавший из стандартных ячеек в область направляющего канала, разделяется на две равные части. Одна часть продолжает движение в исходном направлении. Вторая часть, попав в соседний ряд твэлов, начинает перемещаться в противоположном направлении согласно ориентации турбулизирующих дефлекторов перемешивающей решетки (рис. 8).

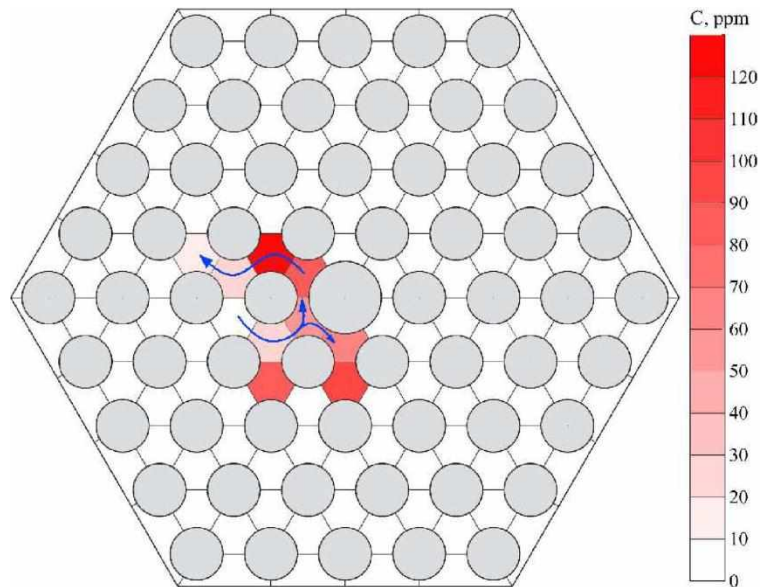


Рис. 8. Направления распространения трассера в области направляющего канала ($Re=101000$, $w_{ср,расх}=37,5$ м/с)

Анализ распределения скоростей теплоносителя по ячейкам экспериментальной модели позволил установить, что расход теплоносителя через ячейки, прилегающие к НК, на 25% меньше, чем через ячейки стандартной области.

Выводы

При анализе результатов экспериментальных исследований течения теплоносителя за перемешивающей решеткой типа «порядная прогонка» для характерных областей ТВСА реактора ВБЭР было установлено, что:

1) непосредственно за перемешивающей решеткой в области стандартных ячеек поперечные скорости составляют 40% от аксиальной, причем на расстоянии $\Delta l/d_r \approx 5$ от решетки их значения уже не превышают 25%. При дальнейшем удалении от решетки скорость затухания поперечных скоростей снижается;

2) в зазорах между соседними ячейками, в которых дефлекторы направлены в противоположные стороны, происходит образование вихрей, исчезающих на расстоянии $\Delta l/d_r \approx 3$ от решетки;

3) затеснение ячеек, прилегающих к направляющему каналу, приводит к перераспределению расходов теплоносителя по ячейкам ТВСА. Расход теплоносителя через ячейки около направляющего канала на 25% меньше чем через ячейки стандартной области;

4) перемешивание теплоносителя в области направляющего канала происходит хуже, чем в области стандартных ячеек ввиду отсутствия турбулизирующих дефлекторов перемешивающей решетки;

5) в области направляющего канала происходит «разрушение» направленного конвективного течения теплоносителя, сформированного в стандартных ячейках под действием дефлекторов перемешивающей решетки.

На основании результатов экспериментальных исследований создан банк данных для верификации CFD-кодов и программ детального поэлементного расчета активных зон ядерных реакторов с ТВСА. Полученные данные приняты для практического использования в АО «ОКБМ Африкантов».

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках договора № 02.G25.31.0124 от «03» декабря 2014 г. года (в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218).

Библиографический список

1. Основное оборудование АЭС с корпусными реакторами на тепловых нейтронах: учебник / С.М. Дмитриев [и др.] – М.: Машиностроение, 2013. – 415 с.
2. **Дмитриев, С.М.** Экспериментальные исследования гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВСА ВВЭР / С.М. Дмитриев [и др.] // Атомная энергия. – 2012. – Т. 113, Вып. 5. – С. 252–256.
3. **Дмитриев, С.М.** Расчетно-экспериментальные исследования локальной гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в ТВС-Квадрат реакторов PWR с перемешивающими решетками / С.М. Дмитриев [и др.] // Теплоэнергетика. – 2014. – №8. – С. 20–27.
4. **Дмитриев, С.М.** Расчетно-экспериментальные исследования гидродинамики и массообмена теплоносителя за дистанционирующей решеткой тепловыделяющей сборки реактора плавучего энергоблока / С.М. Дмитриев [и др.] // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2014. – №4. – С. 60–68
5. **Дмитриев, С.М.** Экспериментальные и расчетные исследования гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в модели ТВС реактора КЛТ–40С / С.М. Дмитриев [и др.] // Научно-технический вестник Поволжья. Казань. – 2013. №3. – С. 114–119.
6. **Гухман, А.А.** Введение в теорию подобия / А.А. Гухман. – 2-е изд. доп. и перераб. – М.: Высшая школа, 1973.

*Дата поступления
в редакцию 30.09.2015*

P.V. Arsenov, A.V.Varentsov, D.V. Doronkov, E.N. Polozkova, A.N. Pronin, A.E. Khrobostov

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF COOLANT FLOW IN FA VBER

The Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: The main objectives of the research was to investigate the characteristics of local hydrodynamics and of the coolant flow behind MG in FA of VBER reactors and to determine influence of MG on hydrodynamic characteristics of flow in the area of standard cells and in the area of guide channel.

Design/methodology/approach: The main method of hydrodynamics in the nuclear reactor FA investigation is an experimental research of a full-size cassette model and active zones of aero- and hydrodynamics stands using the admixture diffusion method by means of pneumometric probe.

Findings: Experimental researches of hydrodynamics in the nuclear reactor FA were organized. According to results of investigations local velocity fields distribution behind MG, distribution of coolant flow and tracer concentration in experimental model have been received. The obtained results allowed to reveal the trends and features of coolant flow behind MG FA.

Research limitations/implications: The special databank was created on the base of the experiment results. The data are used for verifying CFD-codes to reduce conservatism on esteeming the PWR reactor heat engineering reliability. The results of the research were accepted are now used by Joint Stock Company OKBM Afrikantov.

Originality/value: Topically of this article is in local hydrodynamics of the coolant flow in fuel assemblies of VBER reactors to physical laws. Therefore, we can prove heat engineering reliability of the VBER reactor active zone and to reveal the trends and features of coolant flow behind MG FA.

Key words: fuel assembly (FA), spacer and mixing grids, guide channel, hydrodynamics, heat mass-transfer.

УДК 621.039

**П.В. Арсенов, А.А. Добров, Д.В. Доронков, Е.Н. Полозкова,
В.Д. Сорокин, А.Е. Хробостов**

ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ТЕЧЕНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ЗА ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕЙ РЕШЕТКОЙ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ДЕФЛЕКТОРОВ В ОБЛАСТИ НАПРАВЛЯЮЩЕГО КАНАЛА ТВС-КВАДРАТ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Статья посвящена исследованию влияния перемешивающих дистанционирующих решеток с различными типами дефлекторов на течение теплоносителя в ТВС–Квадрат реактора PWR. Актуальность работы обусловлена необходимостью всестороннего исследования закономерностей течения потока теплоносителя в тепловыделяющих сборках западного дизайна, разработанных отечественными компаниями. В статье кратко описаны стенд и экспериментальная модель, представлены методики проведения исследований, обоснование представительности испытаний и их результаты. Полученные результаты используются для обоснования теплотехнической надежности активных зон реакторов PWR с ТВС–Квадрат и верификации трехмерных CFD-программ и в прикладных пояснительных документах.

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

Введение

Тепловыделяющие сборки для активных зон энергетических реакторов доступны на мировом рынке в двух основных конструктивных исполнениях: кассеты квадратного сечения для американских и европейских установок и шестигранные – для российских. Ядерное топливо отечественного дизайна способно охватить около 17% глобального рынка. Поэтому дальнейшее увеличение доли присутствия российских компаний на рынке мирового ядерного топлива связано с созданием и экспортом отечественных разработок топлива западного дизайна за рубеж.

Для осуществления данной программы АО «ОКБМ Африкантов» был разработан продукт, ориентированный на западный рынок – тепловыделяющая сборка квадратного сечения (ТВС–Квадрат).

В основе конструкции ТВС–Квадрат использованы решения по каркасу и дистанционирующим решеткам (ДР), показавшие свою надежность для реакторов ВВЭР. Также в конструкции предусмотрено наличие пластинчатых перемешивающих дистанционирующих решеток (ПДР) и дополнительно устанавливаемых перемешивающих решеток (ПР). Решетки снабжаются дефлекторами типа «split vane», позволяющими одновременно создавать круговые поперечные течения теплоносителя вокруг ТВЭЛов и закрутку потока в межТВЭЛном пространстве. Это позволяет снизить неравномерности теплогидравлических характеристик теплоносителя, выровнять температуру теплоносителя по поперечному сечению сборки, а также повысить запас до кризиса теплоотдачи. Таким образом, становится возможным увеличить удельную тепловую мощность реактора путем повышения критического теплового потока.

Однако наличие турбулизирующих элементов может привести к нежелательному повышению гидравлического сопротивления самой сборки, поэтому особое внимание следует уделить профилю дефлекторов и выбору угла их отгиба относительно осевого направления движения теплоносителя, так как эти факторы в значительной степени влияют на гидравлическое сопротивление сборки. Таким образом, создание оптимальной конструкции решетки требует поиска решения, обеспечивающего наиболее удачное сочетание таких параметров, как интенсивность перемешивания, гидравлические потери и запасы до кризиса теплоотдачи.

Исследования проводились в области направляющего канала (НК), отличающейся от стандартных ячеек геометрическими характеристиками, параметрами теплового потока, и, как следствие, закономерностями течения теплоносителя.

Обоснование теплотехнической надежности активных зон реакторов PWR с ТВС-Квадрат является обязательным условием успешного внедрения нового продукта на весьма консервативном рынке ядерного топлива. Поэтому экспериментальное исследование формирования локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя в пучках твэлов ТВС-Квадрат является актуальной задачей.

Описание экспериментального стенда

Исследования проводились на экспериментальном стенде, представляющем собой аэродинамический разомкнутый контур.

Экспериментальная модель, входящая в состав стенда, представляет собой фрагмент ТВС-Квадрат реактора типа PWR и выполняется в полном геометрическом подобии натурной ТВС [5]. Модель состоит из твэл-имитаторов, имитаторов направляющих каналов, поясов перемешивающих и дистанционирующих решеток, снабженных дефлекторами. В работе рассматривались три варианта дефлекторов типа «split vane»:

1) первоначальный вариант дефлектора выполнен высотой 9 мм, углом отгиба 25° и параллельной линиейгиба относительно верхней кромки пластины (9/25) (рис. 1, а);

2) усовершенствованный дефлектор 9/25 увеличенной площадью на 8% по отношению к первоначальному варианту и профилем, повернутым к центру ячейки согласно линиигиба в 15° относительно верхней кромки пластины (9/25/8/15) (рис. 1, б);

3) усовершенствованный дефлектор 9/25 увеличенной площадью на 21% по отношению к первоначальному варианту и профилем, повернутым к твэлу согласно линиигиба в 15° относительно верхней кромки пластины (9/25/21/15) (рис. 1, в).

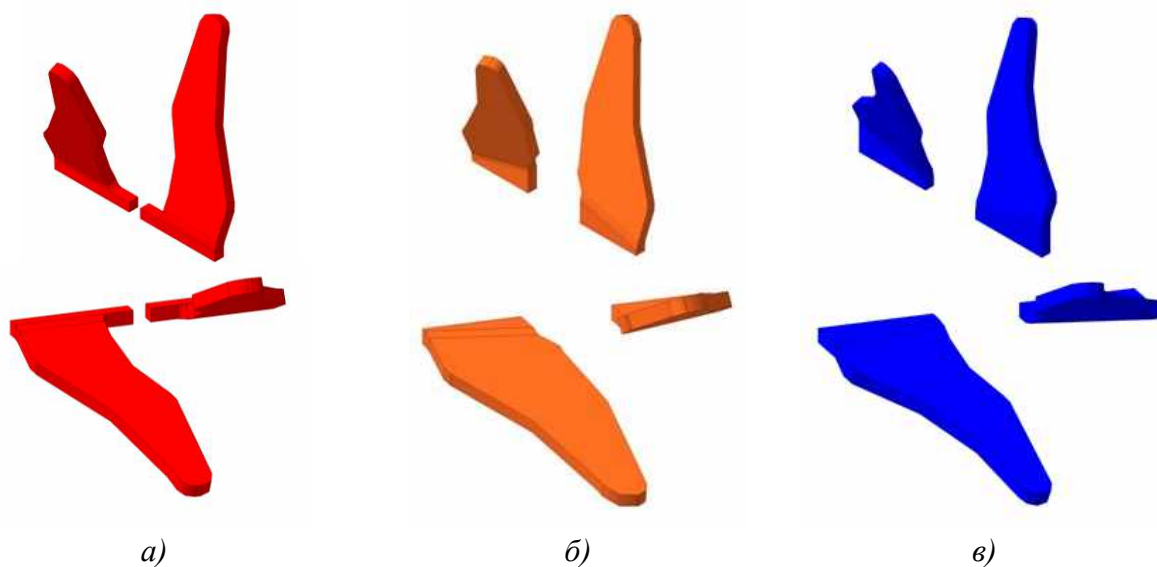


Рис. 1. ПДР ЭМ с различными типами дефлекторов:

- а – ПДР с дефлектором типа «прямой гиб»;
- б – ПДР с дефлектором типа «обратный гиб»;
- в – ПДР с дефлектором типа «обратный гиб»

Измерительный комплекс

Для измерения вектора скорости за дефлекторами ПДР используется измерительный комплекс, в состав которого входят: пятиканальный пневмометрический зонд, блок аналоговых преобразователей давления, координатное устройство; базовый блок коммутации/измерения, ПЭВМ с соответствующим программным обеспечением.

Измерение вектора скорости потока теплоносителя осуществлялось пятиканальным пневмометрическим зондом. Предельные отклонения проекций абсолютной скорости на оси X , Y , Z не превышают 7,5% от абсолютной скорости. Снятие показаний с зонда осуществлялось с помощью блока аналоговых преобразователей давления, представляющего собой набор преобразователей избыточного давления и разности давлений.

Обоснование представительности проводимых исследований

Важным этапом любых исследований является подтверждение их представительности. Проведение исследований течения теплоносителя для штатных ТВС в лабораторных условиях крайне сложно осуществить, так как в активной зоне реактора PWR число Рейнольдса достигает $4,5 \cdot 10^5$. Однако можно моделировать течения воды высокого давления воздухом на основе теории гидродинамического подобия. Согласно данной теории, форма безразмерных полей скорости ($W_{\text{лок}}/W_{\text{ср.расх}}$) остается неизменной на протяжении всей зоны автомодельности [8]. Следовательно, результаты, полученные при числах Re меньше штатных и на воздухе в области автомодельности, могут быть перенесены на реальные условия течения теплоносителя в штатных ТВС.

Соответственно, для обоснования представительности исследований были проведены эксперименты по определению участков гидродинамической стабилизации потока [5] и границ зон автомодельного течения.

Начало зоны автомодельного течения воздуха в ЭМ было определено на основе результатов измерения гидравлического сопротивления поясов ПДР с различными типами дефлекторов. На рис. 2 показан массив точек коэффициента гидравлического сопротивления ПДР ЭМ в зависимости от числа Re . Из рисунка видно, что переходная область турбулентного течения наблюдается при числах Re до $7 \cdot 10^4$. При числах Re свыше $7 \cdot 10^4$ начинается автомодельное течение теплоносителя.

Также необходимым условием обоснования представительности испытаний является равенство коэффициента гидравлического сопротивления (КГС) ПДР ЭМ и ПДР натуральных ТВС–Квадрат. Анализ результатов показал, что КГС перемешивающих дистанционирующих решеток ЭМ в области автомодельного течения соответствует гидравлическому сопротивлению натуральных перемешивающих дистанционирующих решеток ТВС–Квадрат реактора PWR.

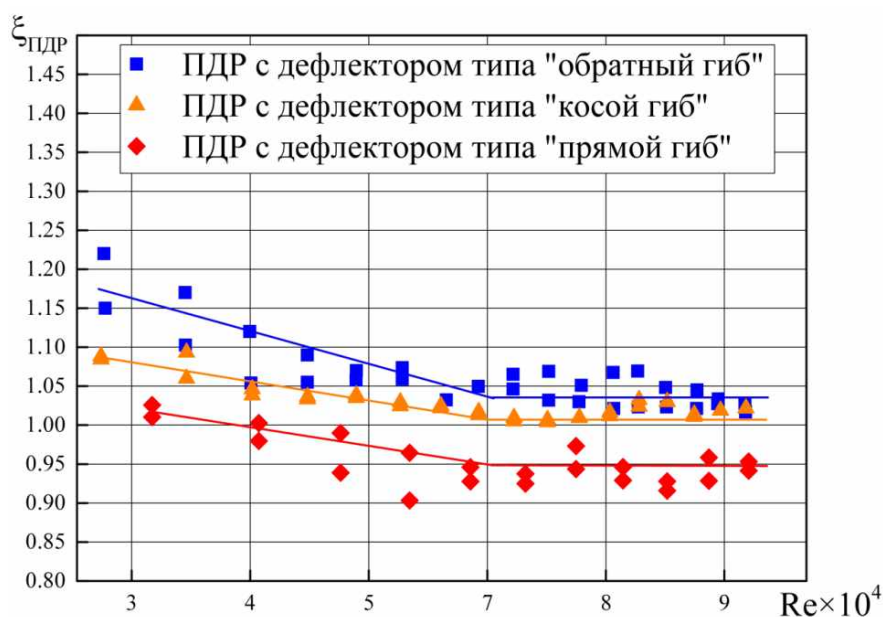


Рис. 2. Зависимость коэффициента местного гидравлического сопротивления поясов перемешивающих дистанционирующих решеток с различными дефлекторами

Методика проведения экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя за перемешивающей дистанционирующей решеткой заключались в измерении модуля и направления вектора скорости в исследуемой точке пучка стержней модели. В качестве характерных ячеек для определения влияния различных типов дефлекторов ПДР на течение потока теплоносителя в области направляющего канала были выбраны ячейки № 27, 28. Для получения полной пространственной картины течения теплоносителя за дефлекторами ПДР ячейки были разделены на зоны измерения, в каждой из которых вектор скорости измерялся в 15 сечениях по длине модели.

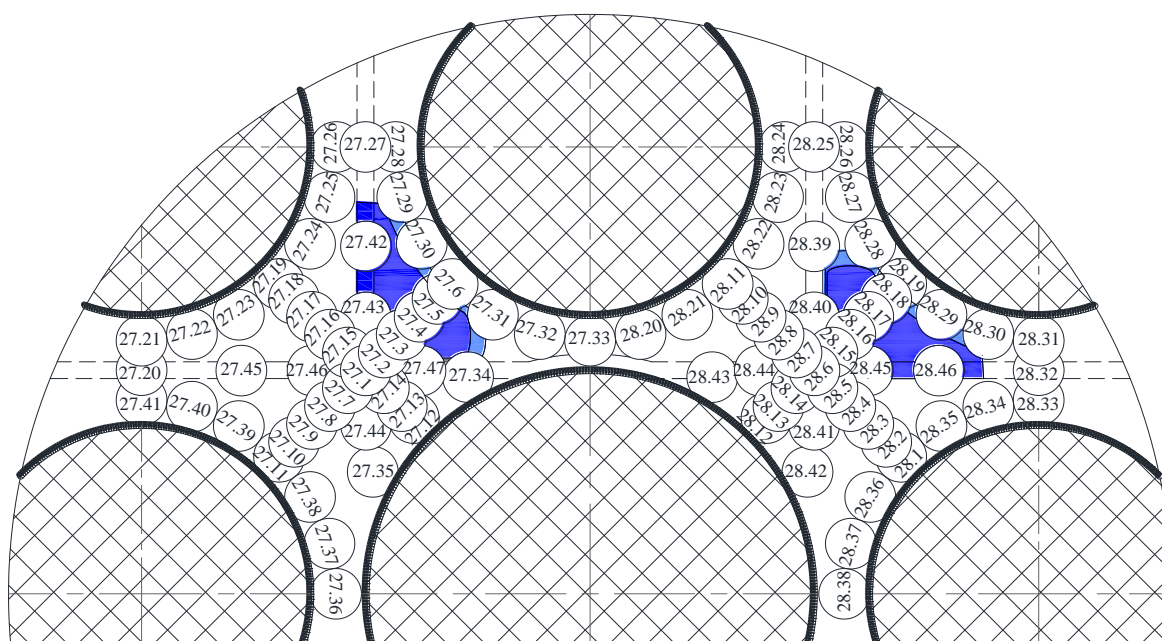


Рис. 3. Расположение зон измерений гидродинамических характеристик в поперечном сечении ЭМ

Результаты исследований

На основе результатов измерения вектора скорости за ПДР в области НК ТВС–Квадрат сделаны следующие выводы:

1. По векторным полям, представленным на рис. 4–9 видно, что в ячейках, где дефлекторы направляют теплоноситель в аналогичные ячейки области НК, за всеми из исследуемых типов дефлекторов, в части, прилежащей непосредственно к направляющему каналу, образуется вихрь, который затухает на расстоянии $\Delta l/d_T \approx 3$ от ПДР.

2. В ячейках НК, где дефлекторы направляют поток в стандартные ячейки, за ПДР с дефлекторами типа «косой гиб» и «прямой гиб» возникает вихрь с длиной затухания $\Delta l/d_T \approx 5-8$ от решетки, омывающий поперечным потоком два прилежащих твэла. При постановке решетки с дефлекторами типа «обратный гиб», вихрь в этой же области затухает на расстоянии $\Delta l/d_T \approx 14$ за ПДР.

3. Длина затухания возмущений, вызванных ПДР в ячейках, прилежащих к НК, с дефлекторами типа «прямой гиб», «косой гиб» и «обратный гиб» заканчивается на расстоянии $\Delta l/d_T \approx 10-14$.

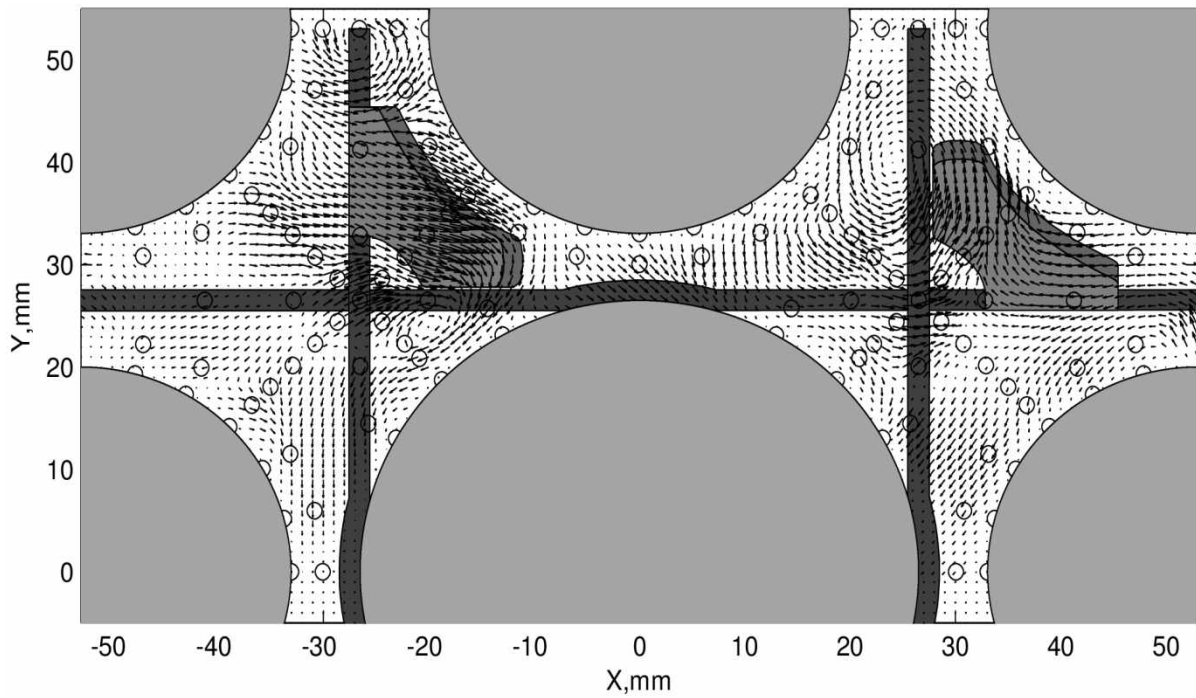


Рис. 4. Векторное поле в области НК при постановке ПДР с дефлекторами типа «прямой гиб» при $l/d_1=27,52$ ($\bar{W} = 37,90$ м/с, $Re = 96000$)

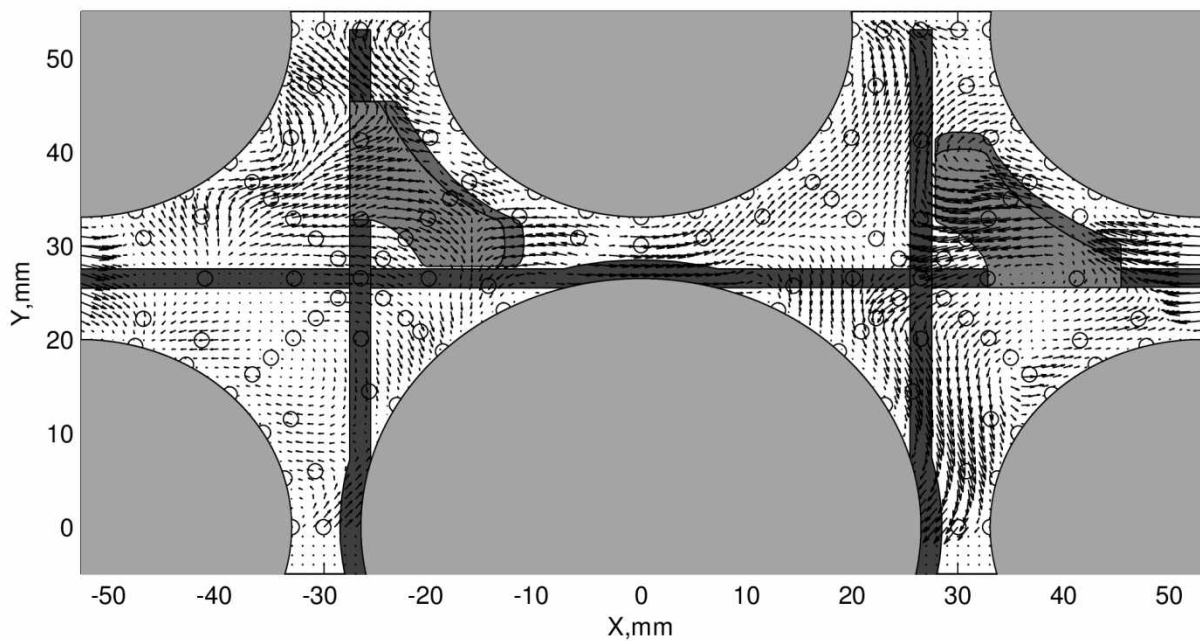


Рис. 5. Векторное поле в области НК при постановке ПДР с дефлекторами типа «прямой гиб» при $l/d_1=5,24$ ($\bar{W} = 37,90$ м/с, $Re = 96000$)

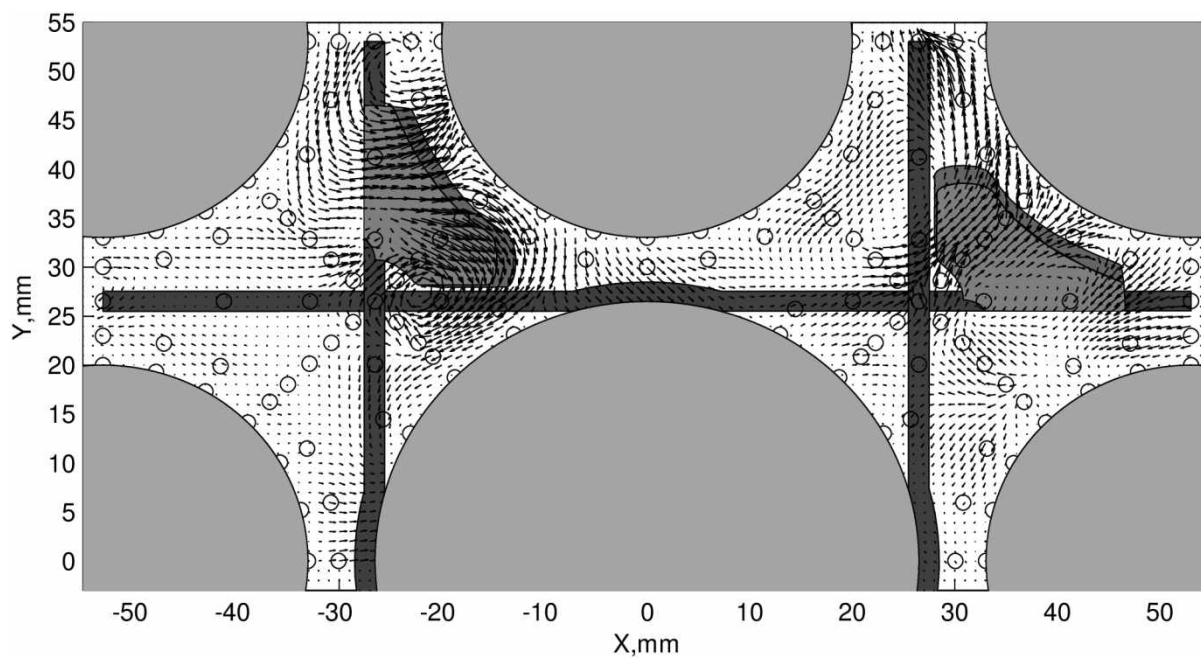


Рис. 6. Векторное поле в области НК при постановке ПДР с дефлекторами типа «косой гиб» при $l/d_z=27,52$ ($\bar{W} = 41,50$ м/с, $Re = 105000$)

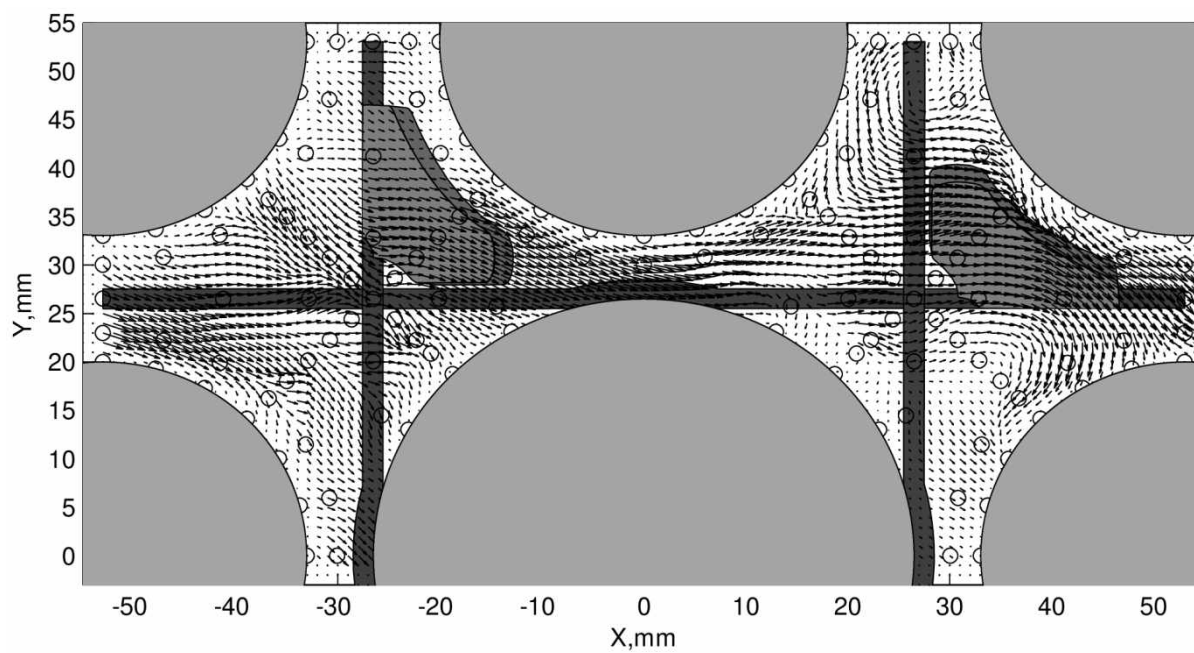


Рис. 7. Векторное поле в области НК при постановке ПДР с дефлекторами типа «косой гиб» при $l/d_z=5,24$ ($\bar{W} = 41,50$ м/с, $Re = 105000$)

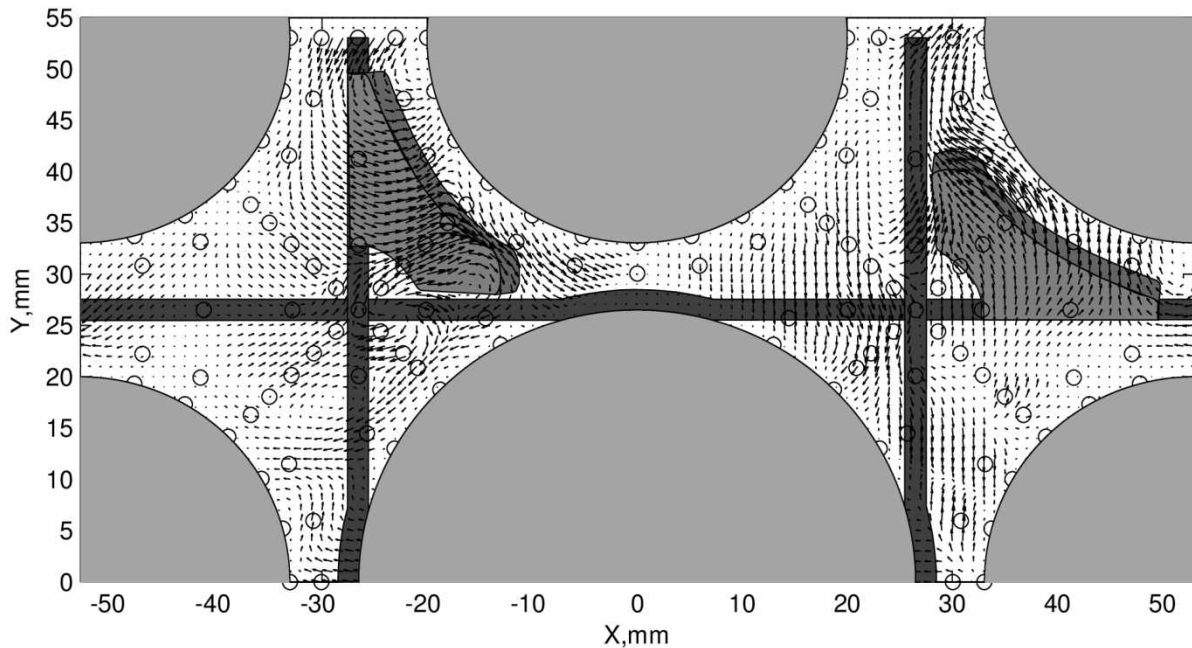


Рис. 8. Векторное поле в области НК при постановке ПДР с дефлекторами типа «обратный гиб» при $l/d_z=27,52$ ($\bar{W} = 37,50$ м/с, $Re = 95700$)

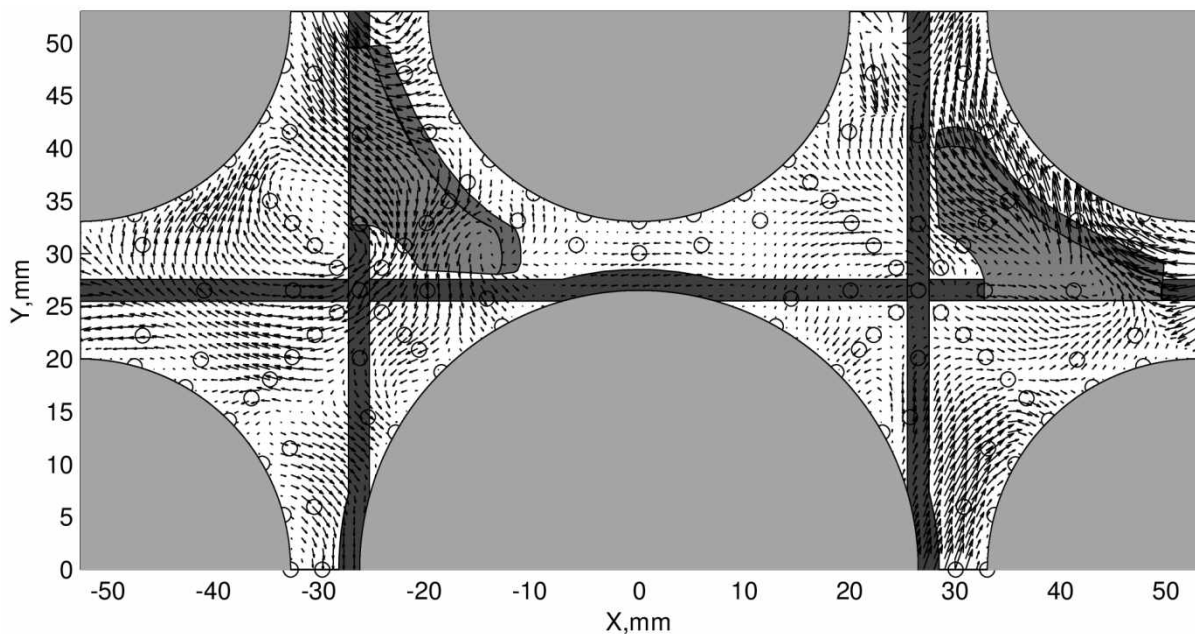


Рис. 9. Векторное поле в области НК при постановке ПДР с дефлекторами типа «обратный гиб» при $l/d_z=5,24$ ($\bar{W} = 37,50$ м/с, $Re = 95700$)

Экспериментальные исследования локальных полей скорости позволили определить распределение расхода теплоносителя в исследуемой области. Различия ориентации дефлекторов и площадей проходных сечений ячеек, прилежащих к НК, и стандартных ячеек ТВС-КВАДРАТ приводит к перераспределению расходов теплоносителя за ПДР. Непосредственно за ПДР с дефлекторами типа «косой гиб» наблюдается вытеснение расхода, которое достигает 30% по отношению к расходу через стандартную ячейку, и на выходе из модели различие расходов между данными ячейками составляет 10% (рис. 10). В случае установки ПДР с дефлекторами типа «обратный гиб» и «прямой гиб» происходит изменение расхода теплоносителя через эти ячейки на 15-20% по сравнению с расходом через стандартную ячейку и остается практически неизменным на всей длине исследуемого участка (рис. 11, 12).

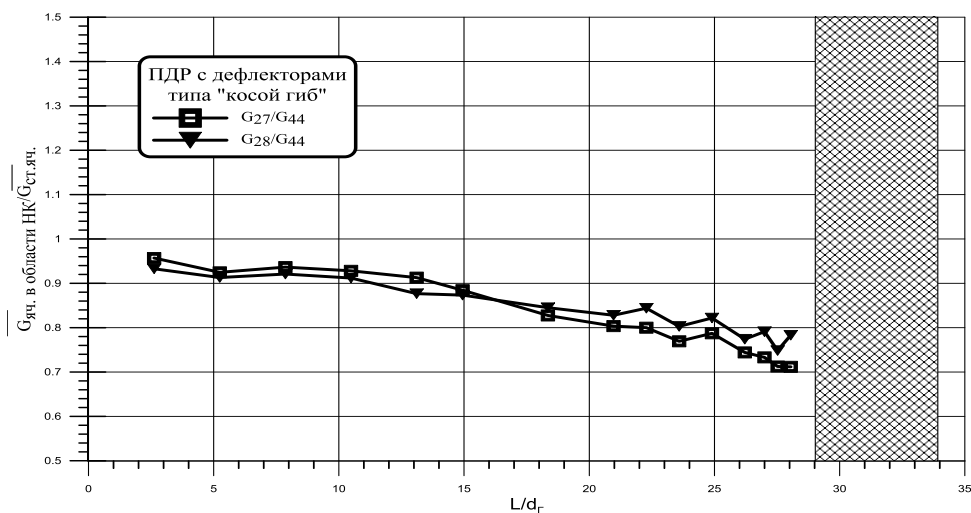


Рис. 10. Отношение распределения расхода теплоносителя через ячейки №27 и №28 (прилежащие к НК) к стандартной ячейке №44 при постановке ПДР с дефлекторами типа «косой гиб»

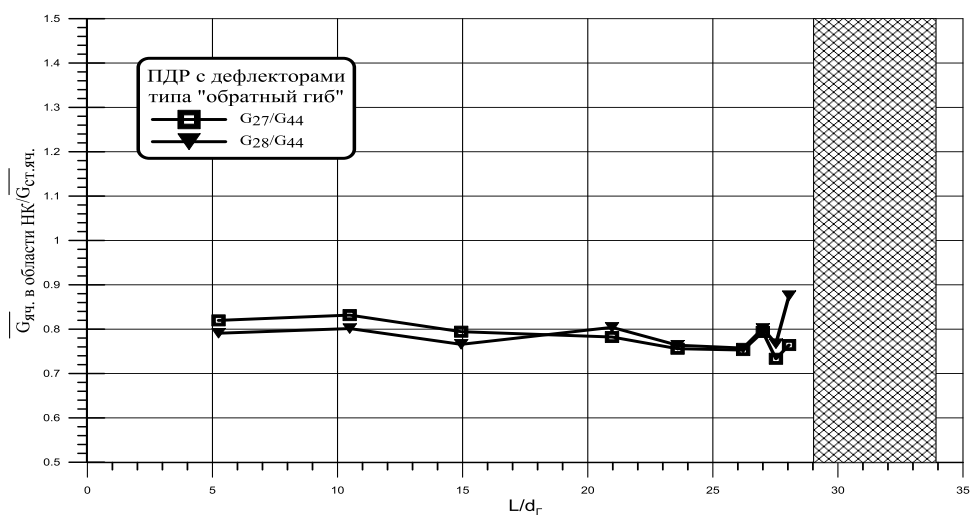


Рис. 11. Отношение распределения расхода теплоносителя через ячейки №27 и №28 (прилежащие к НК) к стандартной ячейке №44 при постановке ПДР с дефлекторами типа «обратный гиб»

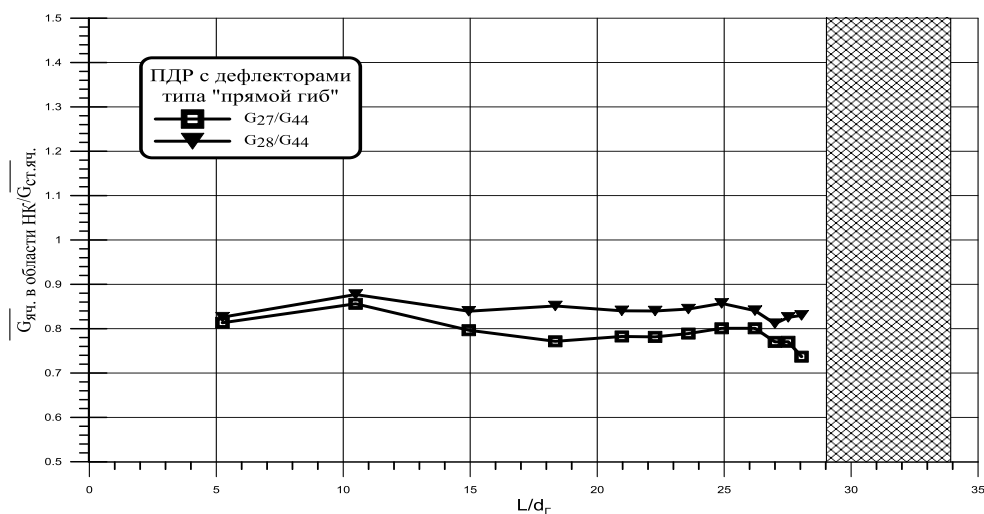


Рис. 12. Отношение распределения расхода теплоносителя через ячейки №27 и №28 (прилежащие к НК) к стандартной ячейке №44 при постановке ПДР с дефлекторами типа «прямой гиб»

Экспериментальные исследования локальной гидродинамики теплоносителя за перемешивающими дистанционирующими решетками ТВС–Квадрат с дефлекторами типа «прямой гиб», «косой гиб» и «обратный гиб» показали, что на интенсивность межъячеечного обмена помимо угла отгиба влияет площадь профиля дефлектора, которая перекрывает проходное сечение ячеек ТВС, а на структуру и форму вихря в центре ячейки ключевое влияние оказывает линиягиба дефлектора.

Выводы

По результатам проведенных комплексных исследований по определению локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя за перемешивающими дистанционирующими решетками в области НК ТВС-Квадрат реактора PWR были выявлены следующие закономерности.

1. Установка перемешивающих дистанционирующих решеток, снабженных дефлекторами, вносит возмущения в поток теплоносителя, одновременно создавая круговые поперечные течения теплоносителя вокруг твэлов и закрутку потока в межтвэльном пространстве:

- в ячейках, где дефлекторы направляют теплоноситель в аналогичные ячейки области НК, за всеми из исследуемых типов дефлекторов образуется вихрь, затухающий на расстоянии $\Delta l/d_r \approx 3$ от ПДР;
- в ячейках НК, где дефлекторы направляют поток в стандартные ячейки, за ПДР с дефлекторами типа «косой гиб» и «прямой гиб» возникает вихрь с длиной затухания $\Delta l/d_r \approx 5-8$ от решетки, омывающий поперечным потоком два прилежащих твэла, при постановке решетки с дефлекторами типа «обратный гиб» вихрь затухает на расстоянии $\Delta l/d_r \approx 14$ за ПДР;
- длина затухания возмущений, вызванных ПДР в ячейках, прилежащих к НК, с дефлекторами типа «прямой гиб», «косой гиб» и «обратный гиб» заканчивается на расстоянии $\Delta l/d_r \approx 10-14$.

2. Различие ориентации дефлекторов и площадей проходных сечений ячеек, прилежащих к НК, и стандартных ячеек ТВС-квадрат приводит к перераспределению расходов теплоносителя за ПДР:

- непосредственно за ПДР с дефлекторами типа «косой гиб» наблюдается вытеснение расхода, достигающее 30% по отношению к расходу через стандартную ячейку; на выходе из модели различие расходов между данными ячейками составляет 10%;
- в случае установки ПДР с дефлекторами типа «обратный гиб» и «прямой гиб» расход теплоносителя через данные ячейки изменяется на 15-20% по сравнению с расходом через стандартную ячейку и остается практически неизменным на всей длине исследуемого участка.

Полученные результаты работы используются для верификации трехмерных CFD-программ и в прикладных ячейковых кодах, а также являются базой данных при расчетах теплотехнической надежности активных зон реакторов PWR с ТВС-Квадрат.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках договора № 02.G25.31.0124 от «03» декабря 2014 г. (в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218).

Библиографический список

1. **Балыбердин, А.С.** Особенности гидродинамики и массообмена теплоносителя в ТВСА-АЛЬФА реактора ВВЭР / А.С. Балыбердин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2010. – № 1. – С. 42–48.
2. **Дмитриев, С.М.** Экспериментальные исследования гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВСА ВВЭР / С.М. Дмитриев [и др.] // Атомная энергия. – 2012. – Т. 113. – № 5. – С. 252–256.

3. **Варенцов, А.В.** Экспериментальные исследования локального массообмена и эффективности перемешивания теплоносителя дистанционирующими решетками В ТВС реактора КЛТ-40С / А.В. Варенцов [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2012. – № 1 (94). – С. 107–113.
4. **Дмитриев, С.М.** Расчетно-экспериментальные исследования локальной гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в тепловыделяющих сборках реакторов типа PWR / С.М. Дмитриев [и др.] // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4–3. – С. 751–753.
5. **Дмитриев, С.М.** Расчетно-экспериментальные исследования локальной гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в ТВС-КВАДРАТ реакторов PWR с перемешивающими решетками / С.М. Дмитриев [и др.] // Теплоэнергетика. – 2014. – № 8. – С. 20–27.
6. **Бородин, С.С.** Расчетно-экспериментальные исследования локальных гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВСА реакторов ВВЭР с перемешивающими решетками / С.С. Бородин [и др.] // Тепловые процессы в технике. – 2015. – № 4. – С. 177–182.
7. **Дмитриев, С.М.** Экспериментальные исследования поля скорости потока теплоносителя в ТВСА реакторов ВВЭР и ВБЭР / С.М. Дмитриев [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – № 1 (102). – С. 113–118.
8. **Гухман, А.А.** Введение в теорию подобия / А.А. Гухман. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Высш. шк., 1973.

*Дата поступления
в редакцию 30.09.2015*

P.V. Arsenov, A.A. Dobrov, D.V. Doronkov, E.N. Polozkova, V.D. Sorokin, A.E. Khrobostov

INVESTIGATION OF COOLANT FLOW BEHIND the MIXING GRID HAVING VARIOUS TYPE OF VANES IN THE REGION OF THE CONTROL ROD IN TVS-KVADRAT FUEL ASSEMBLY

The Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: The main objective of the research was to investigate the characteristics of local hydrodynamics of the coolant flow in Kvadrat_Type fuel assemblies of PWR reactors.

Design/methodology/approach: The main method of hydrodynamics in the nuclear reactor FA investigation is an experimental research of a full-size cassette model and active zones of aero- and hydrodynamics stands.

Findings: Experimental researches of hydrodynamics in the nuclear reactor FA were organized. The heat carrier flow features in Kvadrat_Type fuel assemblies of PWR reactors were revealed.

Research limitations/implications: The special databank was created on the base of the experiment results. The data are used for verifying CFD-codes to reduce conservatism on esteeming the PWR reactor heat engineering reliability. The results of the research were accepted are now used by Joint Stock Company OKBM Afrikantov.

Originality/value: Topically of this article is in local hydrodynamics of the coolant flow in Kvadrat_Type fuel assemblies of PWR reactors to physical laws. Therefore, we can prove heat engineering reliability of the PWR reactor active zone with Kvadrat_Type fuel assemblies.

Key words: nuclear reactor, core, fuel assembly, spacing grid, coolant hydrodynamics.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

УДК 629.113

П.О. Береснев, А.В. Михеев, А.М. Беляев, А.В. Папунин,
З.А. Кострова, В.Е. Колотилин, А.А. Еремин, В.С. Макаров,
Д.В. Зезюлин, В.В. Беляков, А.А. Куркин

СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЫБОРА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ, МАССО-ИНЕРЦИОННЫХ, МОЩНОСТНЫХ И СКОРОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГООСНЫХ КОЛЕСНЫХ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматривается влияние грузоподъемности на мощность двигателя и скорость движения многоосных колесных транспортно-технологических машин, которые обуславливают их подвижность, производительность и эффективность. Приводится методика рационального выбора типа машины, систем управления маневренностью, обеспечение общей потребной мощности, грузоподъемности, максимальной скорости движения.

Ключевые слова: колесо, тип шины, диаметр и ширина колеса, колесный движитель, колесная машина, мощность и масса многоосной колесной машины.

В общем количестве транспортно-технологических машин (ТТМ) парк колесной техники составляет более 70%. Колесный движитель (КД) является наиболее распространенной тягово-опорной системой, которая применяется на ТТМ (рис. 1).

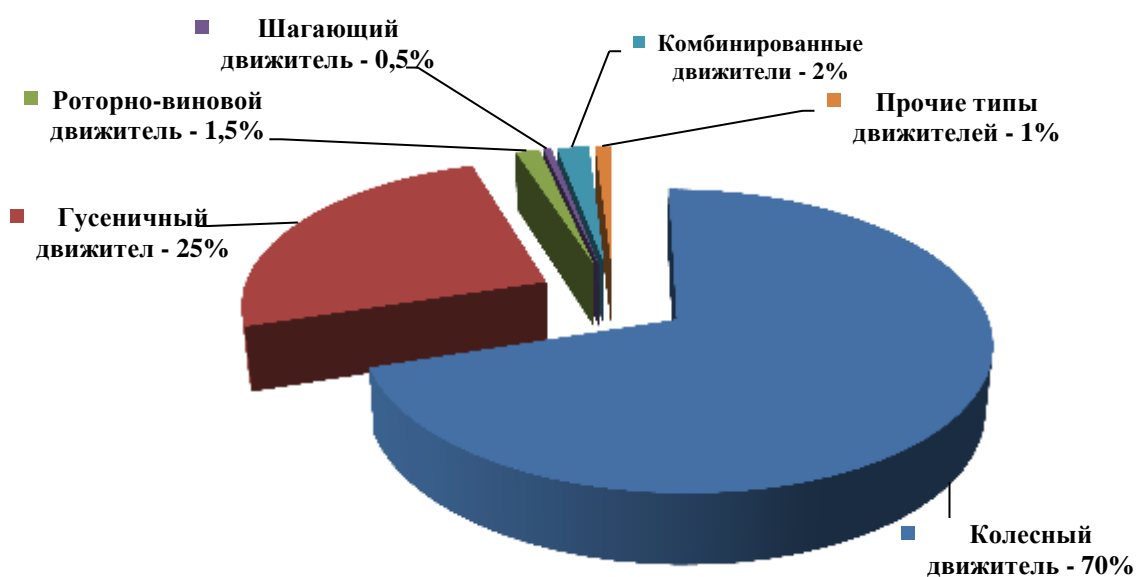


Рис. 1. Распределение в процентах типов движителей, применяемых на транспортно-технологических машинах

Колесо было изобретено в середине IV тыс. до н. э. К тому времени человеческая цивилизация проходила стадию «бронзового века». Люди уже умели создавать сплавы, строили каналы и корабли, играли на сложных музыкальных инструментах. Однако напрашивается вопрос, почему колесо было изобретено так поздно? Ответ на этот вопрос сформулировал антрополог Дэвид Энтони из Хартвик-колледжа (США): *«Дело не столько в круглых чурках, сколько в присоединении их к стационарной платформе посредством оси»*. Решение этой задачи осложнялось тем, что в природе не существует прототипа шарнира, как подшипника качения. Все естественные шарниры, реализующие вращательное движение, представляют собой сферические соединения, то есть натурального образца шарнира качения в природе нет. Таким образом, человечеству пришлось абстрактно решить проблему, состоящую из ряда технических задач. Во-первых, для соединения неподвижной оси с вращающимися колёсами, концы оси должны быть гладкими и круглыми, как и отверстия в центре колеса, иначе - избыток трения, и колесо будет плохо вращаться. Во-вторых, ось должна плотно прилегать к отверстию в колесе, но не слишком - иначе опять же не будет свободного вращения. В-третьих, успех создания колесного опорно-тягового устройства в значительной степени зависит и от размера оси. Тонкая способна снизить силу трения, но не выдержит большую нагрузку. Толстая чересчур увеличит трение. Древние люди решили эту проблему, сделав первые телеги очень узкими, чтобы ось была короткой и не слишком толстой. Как отмечается в работе [«Изобретение колеса», интернет источник: science.compulenta.ru]: *«Сложность и чувствительность системы говорят о том, что она не могла быть разработана в несколько этапов. Её надо было изобрести всю сразу... Изобрести систему «ось - колёса» было настолько сложно, что, скорее всего, это произошло лишь однажды и в каком-то одном месте»*.

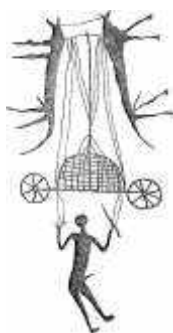
По словам Аско Парполы, индолога Хельсинкского университета (Финляндия): *«настоящим телегам предшествовали миниатюрные модели, которые обычно встречаются археологам в степях Евразии»* (рис. 2, а).



а)



б)



в)



Рис. 2. Первые колесные опорные элементы:

а – миниатюрные культовые фигурки американских индейцев [<http://science.compulenta.ru>, дата доступа 23.07.2015 г.]; б – одно из первых колес (6000 лет назад) [источник: <http://pozmir.ru/?cat=7>, дата доступа 23.07.2015 г.]; в – наскальные изображения колесных повозок

Другие источники [1] утверждают, что колесо изобрели 6000 лет назад жители Месопотамии. Первые колеса были сделаны из толстых срезов древесных стволов (рис. 2, б). Они были очень крепкими и прочными, но слишком тяжелыми. Позднее стали делать более легкие колеса, состоявшие из обода и спиц. Изобретение колеса было большим скачком в развитии техники, и племена, которые им пользовались, стали быстро развиваться. При помощи колесных тачек и повозок стало легче перевозить грузы; на основе колеса был создан гончарный круг, позволивший делать красивую и качественную глиняную посуду, а также прялка и различные виды мельниц. Есть ряд опровержений данной теории, в частности: «Многие ошибочно полагают, что колесо придумали в конце IV тысячелетия до н. э. в Месопотамии. Однако, скорее всего, колесо - дитя не Востока, а Запада: задолго до шумеров его открыли в Европе. Самый древний образец, возрастом около 6,2 тысячи лет, найден в Румынии» [интернет источник: <http://ftp.galileo-tv.com/node/8281>, дата доступа 23.07.2015 г.].

Таким образом, применительно к опорно-тяговым системам, получившим дальнейшее значительное развитие в транспортных системах, наряду с волокушами, снегоступами (лыжами) было колесо. Эволюция колеса прошла длинный путь от простых деревянных катков до безвоздушных эластичных и гранулонаполненных колес (рис. 3). При этом технико-технологическая эволюция колес затронула не только само колесо, но и колесный движитель в целом. Наряду с традиционными, чисто колесными движителями (рис. 4), появились не традиционные движители (рис. 5): некруглые колеса, катковогусеничный, планетарноколесный, пневмошагающая опорно-тяговая система Мецкерле, сферические и конические колеса, а также ряд других конструкций.

Несмотря на разнообразие функциональных назначений колесных машин (КМ) и многообразии их конструктивных решений и компоновок ходовых частей возможны классификационные обобщения. Опуская классификации колесных машин по назначению (транспортные и специальные), можно классифицировать машины по конструктивным особенностям [2-5]: по грузоподъемности, типу энергитической (двигатель) и силовой (трансмиссия) установок, по способу курсовой ориентации (управляемые колеса, оси, бортовой способ), по расположению колес по базе машины, по колесной формуле, определяющей число ведущих колес в общем их числе.

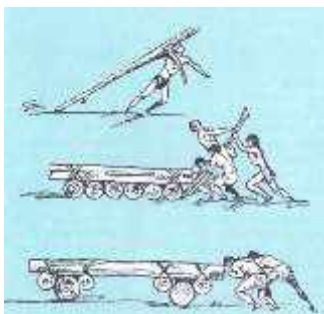
В данной статье рассматриваются соотношения конструктивных параметров только для многоосных полноприводных колесных машин: 4x4, 6x6, 8x8. Регрессионные уравнения представлены в табл. 1.

Таблица 1

Регрессионные уравнения соотношения конструктивных параметров колесных машин

Зависимости	Тип машины	Колесная формула		
		4x4	6x6	8x8
Мощность двигателя от полной массы машины, [кВт - т]	Вездеходы	$P_e = 22 M_a + 55$	$P_e = 40 M_a$	$P_e = 15 M_a + 13$
	Грузовые		$P_e = 12 M_a + 81$	$P_e = 4 M_a + 135$
	Специальные		$P_e = 7,7 M_a + 235$	$P_e = 13 M_a + 21$
Удельная мощность двигателя от полной массы машины, [кВт/т - т]	Вездеходы	$p_e = 75 M_a^{-0,45}$	$p_e = 47 - 9 \ln(M_a)$	$p_e = 27 - 5 \ln(M_a)$
	Грузовые			
	Специальные			
Грузоподъемность от полной массы машины, [т - т]	Вездеходы	$M_r = 0,2 M_a$	$M_r = 0,3 M_a$	$M_r = 0,3 M_a$
	Грузовые	$M_r = 0,3 M_a$	$M_r = 0,7 M_a - 3,3$	$M_r = 0,8 M_a - 9,1$
	Специальные		$M_r = 0,14 M_a$	$M_r = 1$
Максимальная скорость от полной массы машины, [км/ч - т]	Вездеходы	$V_a = 75$	$V_a = 7 M_a + 35$	$V_a = 38 M_a^{0,3}$
	Грузовые	$V_a = 130 M_a^{0,15}$	$V_a = 80$	$V_a = 80$
	Специальные		$V_a = 100$	$V_a = 38 M_a^{0,3}$

Производительность и эффективность колесной машины определяется количеством транспортно-технологической работы, выполненной ей в типичных условиях её эксплуатации (транспортных, технологических, дорожных и природно-климатических).



Бревенчатые катка древнего мира



Колесо из Румынии (возрастом 6,2 тыс. лет)



Колесо из Месопотамии (возрастом 6 тыс. лет)



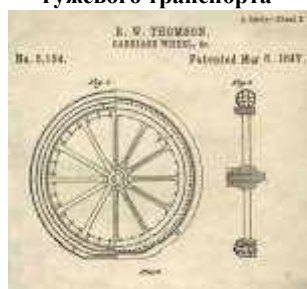
Классическое колесо гужевого транспорта



Паровозное колесо



Жесткие тракторные колеса



Первый автомобильный пневматик



Пневматические автотракторные колеса



Колеса оснащенные защитой



Непневматические колеса



Металлоупругое колесо Лунногохода



Металлоупругое колесо Лунного Ровера



Гранулированные колеса «iRings»



Нетрадиционные типы колес

Рис. 3. Эволюция колеса



Легковые автомобили



Автобусы



Грузовые автомобили



Тракторы, сельскохозяйственные, землеройные и специальные машины



Мотоциклы



Военные машины

Рис. 4. Традиционные колесные движители



4x4



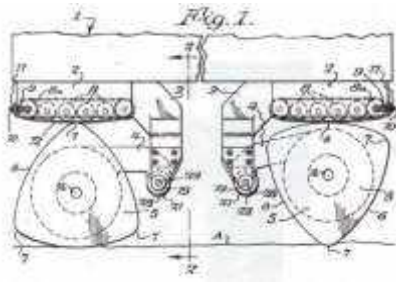
6x6



8x8



Рис. 4. Традиционные колесные движители (окончание)



Shark Wheel

Некруглые колеса



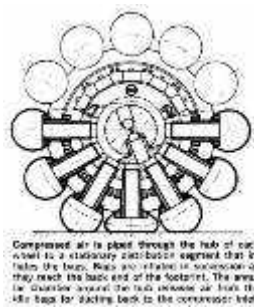
Трактор М7 с эллипсоидными колёсами (испытания 1946 год). [Фото из архива LIFE]



Планетарно-колесный движитель: самоходная гаубица М101 и машина «Terrastar» фирмы Lockheed Ground Vehicle Systems



Движитель катково-гусеночный «АЭРОЛ»



Активный пневмошагающий движитель Мецкерле

Рис. 5. Нетрадиционные колесные движители



Полусферические полые колеса изобретателя Elie P. Aghnides



Металлоупругие колеса планетоходов



Нетрадиционный движитель погрузчика

Рис. 5. Нетрадиционные колесные движители (окончание)

Транспортные условия эксплуатации предусматривают вид, объем и расстояния перевозок грузов и/или пассажиров, условия погрузки (посадки) разгрузки (высадки), организацию перевозок, условия обслуживания, ремонта и хранения подвижного состава, а также определяют выбор типа и конструкцию транспортно-технологической машины (ТТМ).

Технологические условия эксплуатации предусматривают вид, объем, сложность и организацию технологических операций, которые выполняются ТТМ, а также условия обслуживания, ремонта и хранения ТТМ и технологического оборудования, и определяют выбор типа и конструкцию транспортно-технологической машины.

Дорожные условия определяются типом, видом опорного основания, рабочей среды и местности, на которых и где выполняются транспортно-технологические операции. Дорожные условия являются одним из важнейших факторов, оказывающих непосредственное влияние на технико-экономические показатели работы, технические характеристики и конструкцию колесных машин.

Природно-климатические условия эксплуатации существенно регламентируют состояние местности (географические условия, температура, осадки и т.п.) и опорно-рабочей среды (влажность, заснеженность, обледенелость, заболоченность и т.д.). Эти условия во многом определяют мощностные, скоростные и экономические показатели колесных ТТМ.

Совокупность транспортных, технологических, дорожных и природно-климатических условий эксплуатации определяют **нагрузочные режимы** деталей, узлов и агрегатов колесных машин, что в значительной степени влияет на собственную массу машины, грузоподъемность, скорость движения, а следовательно, и на их подвижность и производительность.

На основании анализа и обработки параметров основных характеристик существующих транспортно-технологических машин (ТТМ), оснащенных колесными двигателями, были получены основные соотношения базовых массогабаритных, мощностных и скоростных характеристик (см. табл. 1), которые представлены на рис. 6–9.

Используя представленные данные и зависимости, можно выбрать начальные параметры колесных транспортно-технологических машин. Дальнейшее уточнение выбранных параметров и характеристик возможно произвести только после тягово-скоростного расчета, компоновочных и инженерно-проектных работ, проведенных для конкретного объекта проектирования.

Представленные в табл. 1 и на рис. 6–9 зависимости предназначены для расчета параметров колесных машин, выполненных по традиционным схемам (рис. 4). Для нетрадиционных схем машин оснащенных оригинальными колесными двигателями (рис. 5), требуется получение уникальных зависимостей для определения исходных массогабаритных, мощностных и скоростных характеристик. Подобные зависимости приводятся в специальной технической литературе [6–12].

Характеристики энерговооруженности и максимальной скорости (рис. 8) функции грузоподъемности КМ показывают, что сегодня, в отличие от гусеничных или шнекороторных машин, возможно создать оптимальную (рациональную) колесную транспортную систему в отношении её грузоподъемности и подвижности как на дорогах, так и вне дорог (на бездорожье). Причем выделяются три взаимно непересекающиеся группы транспортных средств: колесные вездеходы, грузовые (автомобили) и специальные колесные машины. Исключение составляют многоосные машины с числом осей более трех, для которых становится несущественным различие между понятием специальная машина или вездеход (рис. 8, в).

Различие по типу колесных машин наиболее существенно прослеживается на уровне определения грузоподъемности и полной массы (рис. 6).

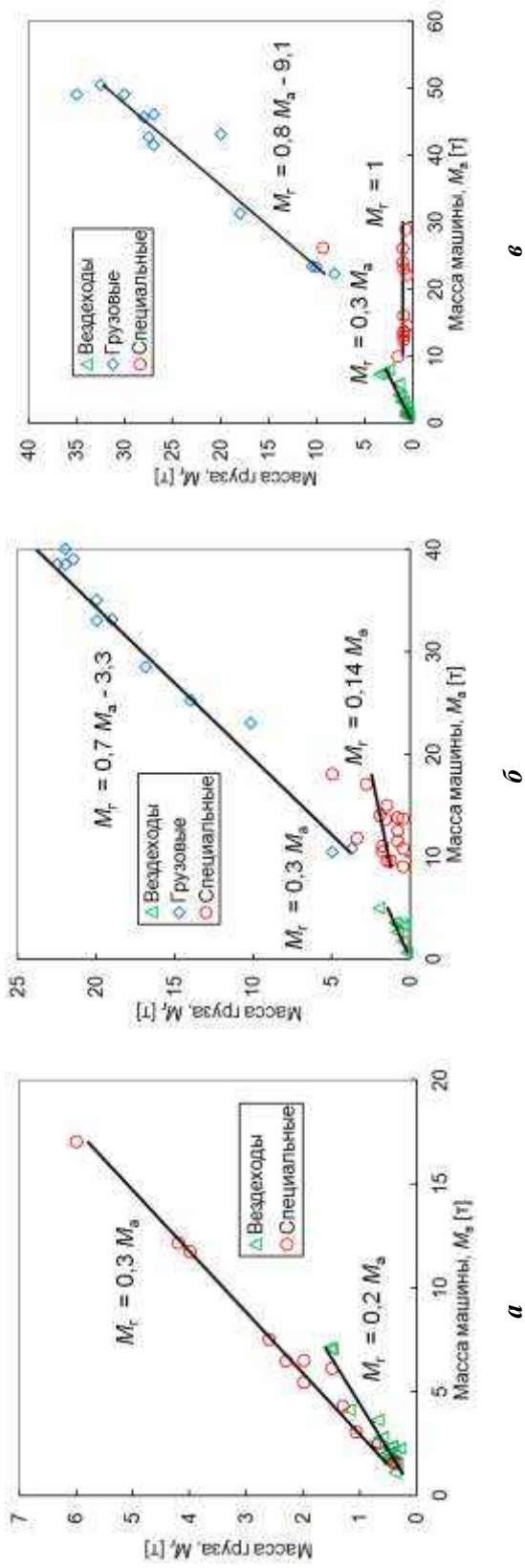


Рис. 6. Грузопоемкость: а – 4х4; б – 6х6; в – 8х8

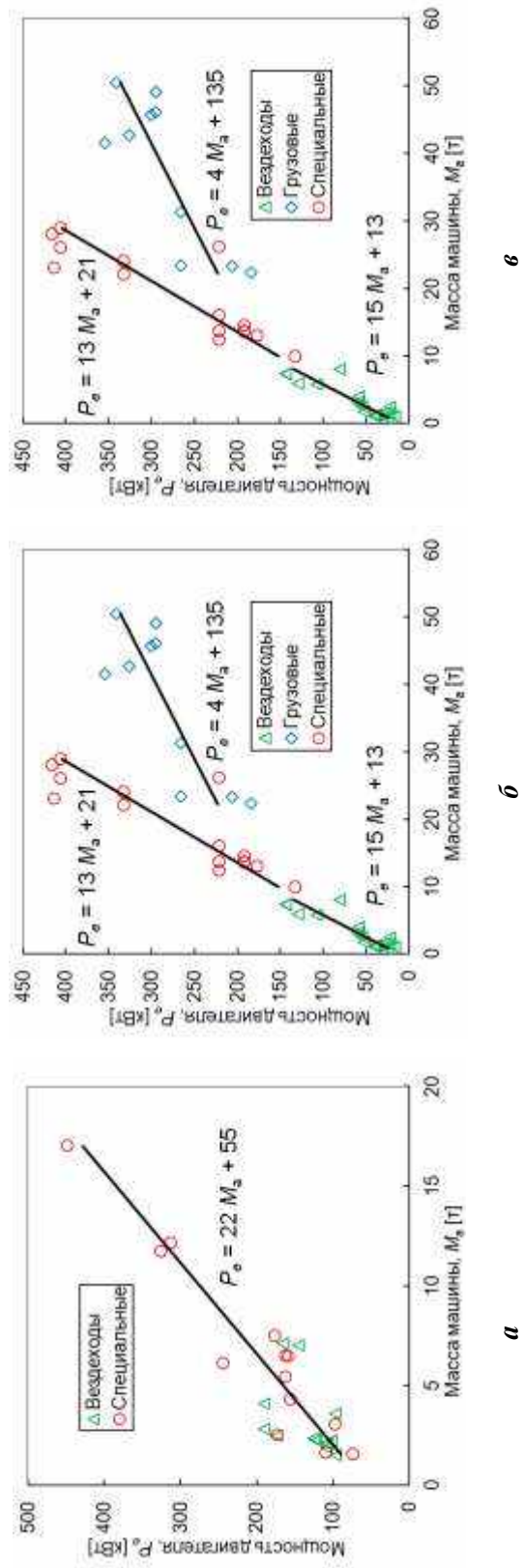


Рис. 7. Мощность двигателя: а – 4х4; б – 6х6; в – 8х8

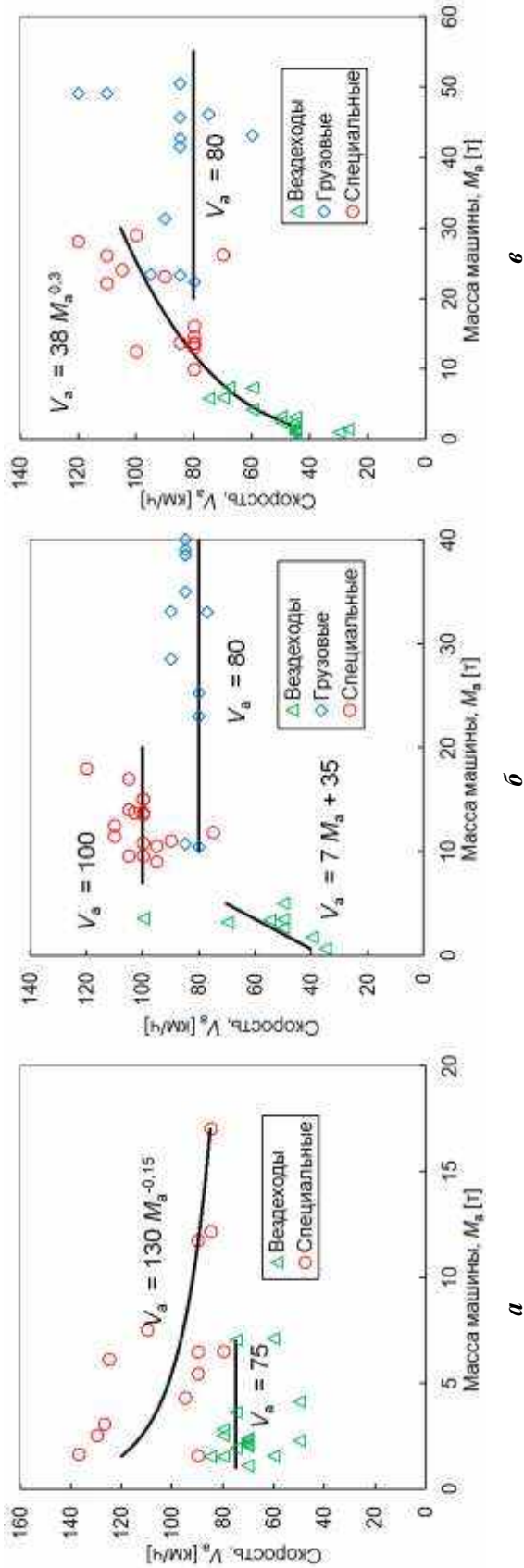


Рис. 8. Максимальная скорость движения: а – 4х4; б – 6х6; в – 8х8

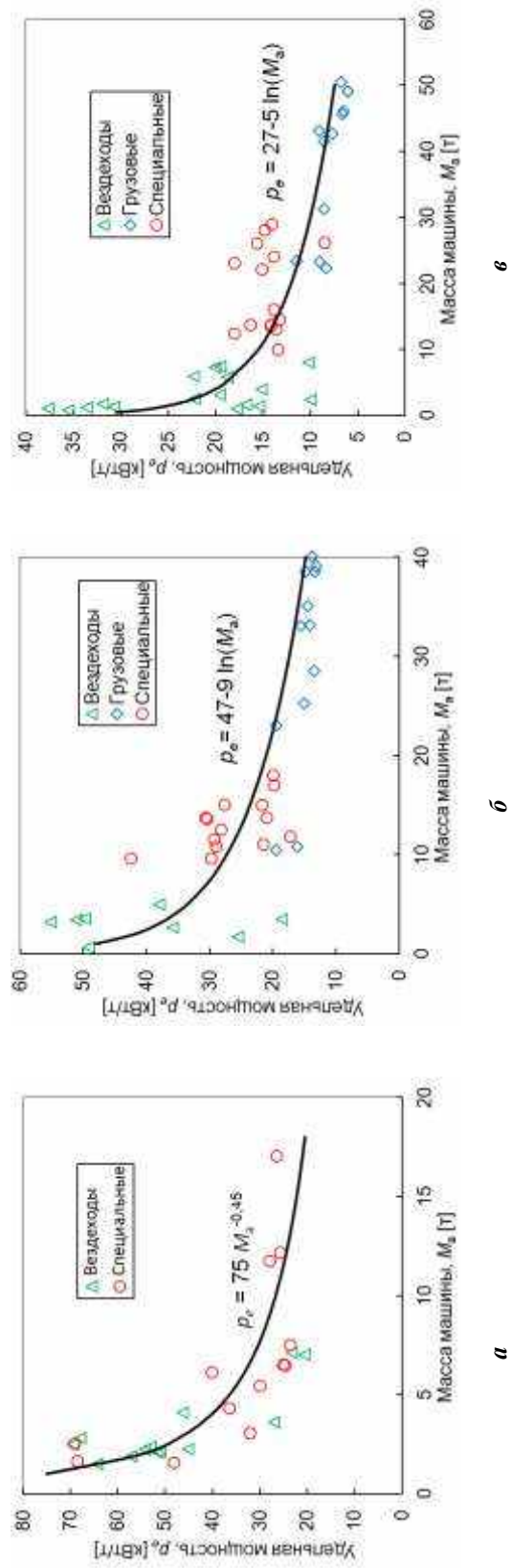


Рис. 9. Удельная мощность двигателя: а – 4х4; б – 6х6; в – 8х8

На рис. 9 показана зависимость удельной мощности двигателя машины от её поной массы. Как видно из рисунка, вездеходные машины требуют большей мощности двигателя, чем специальные или грузовые транспортно-технологические средства. Это связано с необходимостью обеспечения подвижности вездеходных колесных транспортно-технологических средств в более тяжелых дорожных и природно-климатических условиях эксплуатации, чем для грузовых и специальных машин.

Итогом выполненного графического анализа, представленного на рис. 6-9, предполагается то, что после выбора исходных параметров возможно будет провести математическое моделирование движения транспортно-технологических машин, оснащенных колесными движителем, в условиях пересеченной местности с учетом разработанных моделей местности и полотна пути, представленных в работах [13-40]. Это может послужить основой для расчета оценки подвижности и производительности ТТМ на колесном движителе по методикам, представленным в работах [41-53].

Представленные результаты получены в ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» в рамках реализации ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы» (соглашение № 14.574.21.0089 (уникальный идентификатор соглашения - RFMEFI57414X0089))

Библиографический список

1. **Новоженков, В.А.** Чудо коммуникаций и древнейший колесный транспорт Евразии / В.А. Новоженков; под ред. Е. Е. Кузьминой. – М.: Таус, 2012. – 500 с.
2. Грузовые автомобили / М.С. Высоцкий [и др.]. – М. Машиностроение 1973. – 394 с.
3. Армейские автомобили / А.С. Антонов [и др.]. – М., Воениздат, 1970 – 479 с.
4. **Осепчугов В.В.** Автобусы / В.В. Осепчугов. – М.: Машиностроение, 1971. – 312 с.
5. **Родионов, В.Ф.** Легковые автомобили / В.Ф. Родионов, Б.М. Фиттерман. – М.: Машиностроение, 1971. – 504 с.
6. **Беляков В.В.** Взаимодействие со снежным покровом эластичных движителей специальных транспортных машин: дисс. ... на соискание ученой степени доктора технических наук / Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 1999.– 485 с.
7. **Беляков В.В.** Методика расчета и анализ путей повышения проходимости многоосных колесных машин по снегу: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М., 1992. – 16 с.
8. **Козлов, В.С.** Шагающие аппараты. Развитие теории взаимодействия движителя с грунтом / В.С. Козлов, В.В. Беляков. – Нижний Новгород, 1999. – 140 с.
9. **Беккер, М.Г.** Введение в теорию систем местность-машина / М.Г. Беккер. – М.: Машиностроение, 1973. – 520 с.
10. **Кошарный, Н.Ф.** Техничко-эксплуатационные свойства автомобилей высокой проходимости / Н.Ф. Кошарный. – Киев.: Высш. шк., 1981. – 208 с.
11. Движители специальных строительных и дорожных машин / В.Е. Колотилин [и др.]; НГТУ. – Н. Новгород., 1995. – 208 с.
12. Вездеходные транспортно-технологические машины Основы теории движения / В.В. Беляков [и др.]; под общ. ред. В. В. Белякова и А. П. Куляшова. Н. Новгород, 2004.
13. **Беляков В.В.** Концепция подвижности наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – № 3 (100). – С. 145–174.
14. **Беляков, В.В.** Подвижность наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – № 4. – С. 72–77.
15. **Макаров, В.С.** Многоуровневая модель снега как полотна пути для транспортно-технологических машин на примере территории Российской Федерации / В.С.Макаров, Д.В.Зезюлин, В.В. Беляков // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10–2. – С. 270–276.
16. **Вахидов, У.Ш.** Математическое описание дорог типа «stone-road» / У.Ш. Вахидов, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 3. – С. 151.

17. **Вахидов, У.Ш.** Определение характеристик микропрофиля в поймах рек северного кавказа / У.Ш. Вахидов, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Интеллектуальные системы в производстве. – 2011. – № 1. – С. 82–88.
18. **Макаров, В.С.** Определение характеристик микропрофиля дорог, предназначенных для движения транспортно-технологических машин / В.С. Макаров [и др.] // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 5. – С. 113.
19. **Макаров, В.С.** Характер изменения снежного покрова как полотна пути с учетом неравномерности его залегания на местности / В.С. Макаров [и др.] // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 4. – С. 33.
20. **Гончаров, К.О.** Проведение замеров микропрофиля поверхности движения типа ровное поле / К.О. Гончаров, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Леса России и хозяйство в них. – 2012. – Т. 1–2. – № 42–43. – С. 29–30.
21. **Беляков, В.В.** К вопросу выбора экспериментальных данных для составления статистических моделей снежного покрова как полотна пути для транспортно-технологических машин / В.В. Беляков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексева. – 2014. – № 1 (102). – С. 136–141.
22. **Макаров, В.С.** Снег как полотно пути для транспортных средств / В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, В.В. Беляков // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 4. – С. 21–24.
23. **Редкозубов, А.В.** О целесообразности моделирования дорог при помощи фрактального исчисления / А.В. Редкозубов, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Леса России и хозяйство в них. – 2012. – Т. 1–2. – № 42–43. – С. 87–88.
24. Полотно пути транспортно-технологических машин (справочные материалы к теории «машина – местность») / В.В. Беляков [и др.]; под общей ред. В.В. Белякова и А.А. Куркина. – Нижний Новгород, 2014. – 447 с.
25. **Барахтанов, Л. В.** Проходимость автомобиля / Л. В. Барахтанов, В. В. Беляков, В. В. Кравец; НГТУ. – Н. Новгород., 1996. – 200 с.
26. **Куркин, А.А.** Новые тенденции в обследовании цунами / А.А. Куркин [и др.] // Экологические системы и приборы. 2014. № 12. С. 40–55.
27. **Папунин, А.В.** О влиянии ландшафта местности на характеристики снежного покрова и на проходимость транспортных средств / А.В. Папунин [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексева. – 2014. – № 4 (106). – С. 331–335.
28. **Беляков, В.В.** Многокритериальная оптимизация в задачах подвижности, конкурентоспособности автотракторной техники и диагностики сложных технических систем / В.В. Беляков, М.Е. Бушуева, В.И. Сагунов; НГТУ. – Н. Новгород, 2001. – 271 с.
29. **Папунин, А.В.** О влиянии характерных участков ландшафта местности подвижность транспортных средств / А.В. Папунин, А.В. Редкозубов, В.В. Беляков // Актуальные вопросы образования и науки: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 11 частях. – 2014. – С. 112–113.
30. **Федоренко, А.В.** Анализ изменения плотности снежного покрова в зимний период / А.В. Федоренко, В.В. Беляков // Актуальные вопросы образования и науки: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 11 частях. – 2014. – С. 140–142.
31. **Беляев, А.М.** Анализ изменения высот снежного покрова в зимний период / А.М. Беляев, В.В. Беляков // Актуальные вопросы образования и науки: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 11 частях. – 2014. – С. 28–30.
32. **Гончаров, К.О.** Характер изменения жесткости, связности и угла внутреннего трения снега в зависимости от плотности и продолжительности залегания снежного покрова / К.О. Гончаров, В.В. Беляков // Актуальные вопросы образования и науки: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 11 частях. – 2014. – С. 48–50.
33. **Макаров, В.С.** Анализ данных для составления статистических моделей снежного покрова как полотна пути для транспортных средств / В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, В.В. Беляков // Актуальные вопросы образования и науки: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 11 частях. – 2014. – С. 96–97.
34. **Макаров, В.С.** Обзор исследований по влиянию местности на характеристики снежного по-

- крова / В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, В.В. Беляков // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – № 3 (105). – С. 154–162.
35. **Папунин, А.В.** О влиянии ландшафта местности на характеристики снежного покрова и на проходимость транспортных средств / А.В. Папунин, В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, В.В. Беляков // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – №4(106). – С. 331–335.
 36. **Редкозубов А.В.** Математическая модель поверхности движения лесных дорог / А.В. Редкозубов [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – №4(106). – С. 348–352.
 37. **Макаров В.С., Зезюлин Д.В., Беляков В.В.** О влиянии влажности снега на изменение характеристик снежного покрова и на проходимость транспортных средств / В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, В.В. Беляков // Международный журнал экспериментального образования. – 2014. – №8-2. – С. 62.
 38. **Макаров, В.С.** Об изменении характеристик снежного покрова в течение зимы и их влияние на проходимость транспортных средств / В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, В.В. Беляков // Международный журнал экспериментального образования. – 2014. – №8-2. – С. 89–90.
 39. **Макаров, В.С.** Учет особенностей ландшафта при построении характеристик снежного покрова в течение зимы / В.С. Макаров [и др.] // Перспективы развития науки и образования: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 8 частях. – 2013. – С. 87–88.
 40. **Михеев, А.В.** Оценка деформации колеса, оснащенного непневматической шиной при компьютерном моделировании вертикального статического нагружения / А.В. Михеев [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2015. – №2(109). – С. 162–169.
 41. **Макаров, В.С.** Обзор существующих конструкций сочлененных гусеничных машин и рекомендации по выбору их параметров / В.С. Макаров [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2015. – №2(109). – С. 170–176.
 42. **Колотилин, В.Е.** Статистическая модель выбора геометрических параметров, массово-инерционных и мощностных характеристик транспортно-технологических машин на роторно-винтовых движителях / В.Е. Колотилин [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2015. – №3(110).
 43. **Макаров, В.С.** Методика расчета и оценка проходимости колесных машин при криволинейном движении по снегу: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03. – Н. Новгород, 2009. – 161 с.
 44. **Гончаров, К.О.** Оценка влияния экскавационно-бульдозерных эффектов на проходимость многоосных колесных машин при криволинейном движении по снегу: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03. – Н. Новгород, 2010. – 259 с.
 45. **Зезюлин, Д. В.** Разработка методики выбора конструктивных параметров движителей, обеспечивающих эффективность движения колесных машин по снегу: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03. – Н. Новгород, 2013. – 218 с.
 46. **Зезюлин, Д.В.** К вопросу определения эффективности транспортных средств в зимний период / Д.В. Зезюлин, В.В. Беляков // Актуальные вопросы образования и науки: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 11 частях. – 2014. – С. 74–75.
 47. **Куркин, А.А.** Новые тенденции в обследовании цунами / А.А. Куркин [и др.] // Экологические системы и приборы. – 2014. – № 12. – С. 40–55.
 48. **Зезюлин, Д.В.** Методика расчета сопротивления качению колеса по снежному полотну пути с учетом неравномерности распределения давлений в зоне контакта / Д.В. Зезюлин, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – №3. – С. 52.
 49. **Макаров В.С.** Оценка эффективности колесных машин в течение зимы с учетом изменчивости характеристик снежного покрова / В.С. Макаров [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – № 4 (106). – С. 342–347.
 50. **Тесленко, Д.С.** Использование метода конечных элементов для решения задач террамеханики / Д.С. Тесленко, В.В. Беляков, В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – №5. – С. 52–58.
 51. **Беляков В.В.** Шасси Робототехнического комплекса мониторинга прибрежной зоны / В.В. Беляков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – №4(106). – С. 353–357.

52. **Папунин, А.В.** Оценка проходимости колесных машин с учетом изменчивости характеристик снежного покрова в течение зимы / А.В. Папунин, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Наука и образование в XXI веке: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 34 частях. – 2013. – С. 115–116.
53. **Зезюлин Д.В.** Метод повышения эффективности движения колесных машин по снегу путем выбора рациональных параметров движителей / Д.В. Зезюлин [и др.] // Фундаментальные исследования. – 2013. – №10–6. – С. 1203–1208.

*Дата поступления
в редакцию 30.09.2015*

**P.O. Beresnev, A.V. Miheev, A.M. Belyaev, A.V. Papunin, Z.A. Kostrova, V.E. Kolotilin,
A.A. Eremin, D.V. Zeziulin, V.S. Makarov, V.V. Belyakov, A.A. Kurkin**

**STATISTICAL MODEL OF SELECTION OF GEOMETRIC PARAMETERS,
MASS- INERTIA AND POWER CHARACTERISTICS OF MULTI-WHEELED
TRANSPORTATION AND TECHNOLOGICAL VEHICLES**

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

The article deals with dependencies and conclusions about the correlation between load capacity, engine power and speed of multi-wheeled transportation and technological vehicles that determine their mobility, productivity and efficiency. The methodology of rational choice of vehicles type, maneuverability control system, provision of total power, load capacity, maximum speed is given. The presented results were obtained in Nizhny Novgorod state technical university n.a. R. E. Alexeev in the framework of the Federal Target Program «Research and development on priority directions of scientific-technological complex of Russia for 2014 - 2020 years» (agreement № 14.574.21.0089 (unique identifier of agreement - RFMEFI57414X0089)).

Key words: wheel, tire type, diameter and width of wheel, wheeled mover, wheeled vehicle, power and the mass of the multi-wheeled vehicle.

УДК 620.179.16

А.Л. Углов, А.А. Хлыбов, А.Д. Макаров, Р. Р. Рязанов, А.Е. Соборнов

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ
ПРИ ТЕРМОПУЛЬСАЦИЯХ АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Показано, что для контроля повреждений при термоусталости могут быть использованы упругие волны. Предлагается методика контроля физико-механических характеристик накопленной поврежденности акустическим методом. Приводятся данные по оценке экспериментальной погрешности. Экспериментальная проверка работоспособности предлагаемого алгоритма контроля осуществлялась в трубном образце из аустенитной стали при создании в нем термопульсаций. Предлагаемая методика контроля позволяет обеспечить контроль физико-механических характеристик материала и тем самым повысить безопасность контролируемых элементов конструкций, подвергаемых воздействию термопульсаций.

Ключевые слова: термоусталость, упругие волны, аустенитная сталь, поврежденность, физико-механические характеристики.

Введение

На работоспособность и ресурс элементов энергетического оборудования существенное влияние оказывают локальные температурные воздействия, вызываемые пульсациями температур [1, 2]. Многократно повторяющееся изменение температуры в материале трубы вызывает появление переменных напряжений, величина которых пропорциональна перепаду температуры. Переменные напряжения приводят к изменению физико-механических характеристик (ФХМ), к зарождению и развитию повреждений в материале образца. Возникает задача предотвращения разрушения и повышения безопасной эксплуатации оборудования, подвергаемого термопульсациям. Одним из направлений решения данной проблемы является своевременный неразрушающий контроль механических характеристик, накопленных повреждений на стадии до появления видимых трещин.

Известно, что скорость распространения продольных, сдвиговых и поверхностных волн, затухание, амплитудный спектр являются параметрами, чувствительными к структурным изменениям, протекающим в материале. В данной работе в качестве структурно-чувствительного параметра использовалась скорость распространения упругих волн.

В работе [3] в рамках структурно-механической модели, базирующейся на представлениях механики среды с повреждениями [4] и динамической теории упругости микронеоднородных сред [5, 6], показано, что скорость распространения упругих волн зависит от уровня накопленных повреждений в материале.

В работе использовали три типа упругих волн, распространяющихся в материале исследуемого образца:

- 1) упругие поперечные волны, распространяющиеся в радиальном направлении и поляризованные в осевом направлении;
- 2) упругие поперечные волны, распространяющиеся в радиальном направлении и поляризованные в кольцевом направлении;
- 3) упругие продольные волны, распространяющиеся в радиальном направлении.

Обозначим скорость распространения названных волн соответственно через V_1 , V_2 , V_3 .

В соответствии с [7, 8] в качестве безразмерного акустического параметра будем использовать следующий:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}, \quad (1)$$

где $d_1 = \frac{V_3}{V_1}$, $d_2 = \frac{V_2}{V_1}$.

Нами использовался эхо-импульсный метод, в связи с чем параметры d_1 и d_2 определялись через задержки многократно отраженных импульсов волн соответствующих типов t_{1n} , t_{2n} , t_{3n} , где n – номер отраженного импульса:

$$d_1 = \frac{t_{1n}}{t_{3n}}, d_2 = \frac{t_{2n}}{t_{3n}}. \quad (2)$$

Таким образом, безразмерный параметр d выражается через измеряемые характеристики следующим образом:

$$d = \frac{1}{2} \left(\frac{t_{1n}}{t_{3n}} + \frac{t_{2n}}{t_{3n}} \right). \quad (3)$$

В практических задачах удобнее использовать вместо скорости распространения упругих волн время распространения. Пройденный путь x_n при работе с одним датчиком (в режиме излучения и приема) может быть записан в виде:

$$x_n = 2V_0 t_n, \quad (4)$$

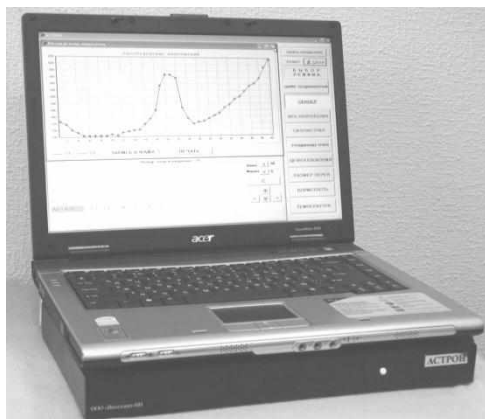
где t_n – время распространения (задержка) соответствующего импульса, с; V_0 – скорость упругих волн (используемого типа упругой волны), м/с.

Методика измерений физико-механических характеристик акустическим методом

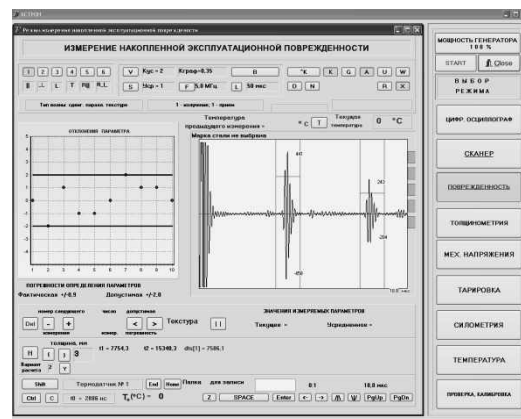
В процессе испытаний с помощью измерительно-вычислительного комплекса (ИВК) «АСТРОН» [7, 8] периодически измерялась задержка (время распространения упругих волн). Основные характеристики (ИВК) «АСТРОН»:

- диапазон частот резонансного возбуждения преобразователей 0.5-30 МГц;
- диапазон измеряемых задержек между отраженными импульсами до 600 мкс;
- погрешность измерения задержек отраженных импульсов 10^{-9} с;
- погрешность измерения коэффициента затухания не более $\pm 5\%$.

«Астрон» (рис. 1) предназначен для решения широкого класса научных и инженерных задач, связанных с исследованием структурных особенностей конструкционных материалов и оценкой физико-механических параметров материала ответственных деталей и узлов с целью принятия решения о возможности их безопасной эксплуатации. В основу работы системы положен импульсный метод акустической структурометрии. Конструктивно «Астрон» выполнен в виде модуля, совмещенного с переносным компьютером типа «Notebook». Программное обеспечение является открытым, допускает наращивание по мере расширения круга решаемых задач диагностики, расширения номенклатуры исследуемых материалов.



а)



б)

Рис. 1. Измерительно-вычислительный комплекс «АСТРОН»:

а – общий вид; б – рабочий экран

Определение физико-механических характеристик материала деталей и узлов основано на использовании полученных в ходе обучающих экспериментов зависимостей акустических параметров от определяемых физико-механических характеристик.

Примечание. Под обучающими экспериментами понимают комплекс экспериментальных исследований, в ходе которых устанавливают вид функциональных или регрессионных связей акустических параметров с физико-механическими характеристиками материала объекта контроля.

Алгоритмы, используемые в «АСТРОНе», позволяют определять следующие характеристики материала:

- объемный модуль упругости K , МПа;
 - модуль Юнга E , МПа;
 - коэффициент Пуассона ν ;
 - предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа;
 - предел прочности σ_B , МПа;
 - накопленную поврежденность (выраженная через акустический параметр d).
- Относительная погрешность измерения указанных величин приведена в табл. 1.

Таблица 1

Относительная погрешностей измерений ФМХ

ФМХ	K	E	ν	$\sigma_{0,2}$	σ_B	d
Относительная погрешность δ , %	10	10	10	15	15	15

В качестве примера рассмотрим определение коэффициента Пуассона и модуля Юнга.

Определение коэффициента Пуассона:

1. В точке контроля устанавливают датчики сдвиговых и продольных волн. Проводят измерение задержек t_1, t_2, t_3 не менее 5 раз. Полученные результаты усредняют.
2. Рассчитывают коэффициент Пуассона по формуле:

$$\nu = \frac{1-2\Delta^2}{2(1-\Delta^2)}, \tag{5}$$

где $\Delta = \frac{2t_3}{t_1+t_2}$.

Определение модуля Юнга:

1. Определяют значение толщины материала в точке контроля h .
2. По справочным данным или экспериментально с помощью пикнометра определяют величину плотности материала ρ .
3. Проводят измерение задержек t_1, t_2, t_3 не менее 5 раз.
4. Рассчитывают скорость продольной волны по формуле:

$$V_3 = \frac{2h}{t_3}. \tag{6}$$

5. Рассчитывают усредненную скорость сдвиговой волны V_{12} по формуле:

$$V_{12} = \frac{4h}{t_1 + t_2}. \tag{7}$$

6. Определяют константы Ламэ μ и λ по формулам:

$$\mu = V_{12}^2 \rho, \tag{8}$$

$$\lambda = \rho (V_3^2 - 2V_{12}^2). \tag{9}$$

7. Модуль Юнга рассчитывают по формуле:

$$E = \frac{\mu(3\lambda+2\mu)}{\lambda+\mu}. \quad (10)$$

Определение предела текучести, предела прочности и поврежденности разрушения по задержкам поверхностных волн:

1. Измеряют задержки рэлеевских волн вдоль направления главных напряжений t_{R1} , t_{R2} .

2. Рассчитывают усредненное значение задержки импульса рэлеевской волны при $T=20\pm 10^0$ С.

$$\bar{t}_R = \frac{t_{R1}+t_{R2}}{2}. \quad (11)$$

3. Если температура контролируемого материала T отличается от 20°C более чем на 10°C , параметр \bar{t}_R рассчитывают по формуле:

$$\bar{t}_R = \frac{(t_{R1}+t_{R2})[1-K_{TR}(T-20)]}{2}. \quad (12)$$

4. Предел текучести, предел прочности и поврежденность рассчитываются по формулам:

$$\sigma_{02} = A_0^R(\sigma_{02}) + A_1^R(\sigma_{02})\bar{t}_R, \quad (13)$$

$$\sigma_B = A_0^R(\sigma_B) + A_1^R(\sigma_B)\bar{t}_R, \quad (14)$$

$$d = A_0^R(K_{1C}) + A_1^R(K_{1C})\bar{t}_R. \quad (15)$$

В уравнения (13), (14), (15) входят коэффициенты регрессии для предела текучести, предела прочности и вязкости разрушения, соответственно.

Построение регрессионных соотношений между используемыми акустическими параметрами и физико-механическими характеристиками

Как правило, в качестве регрессионных соотношений между используемым акустическим параметром A (\bar{d} или \bar{t}_R в зависимости от конкретной ситуации) и физико-механической характеристикой используют регрессионные уравнения линейного вида:

$$M_R = A_0 + A_1 A, \quad (16)$$

где

$$A_0 = \bar{M}_F - A_1 \bar{A};$$

$$A_1 = \frac{\sum_{j=1}^N (\bar{M}_F - M_{jF})(\bar{A} - A_j)}{\sum_{j=1}^N (\bar{A} - A_j)^2};$$

$$\bar{M}_F = \frac{\sum_{j=1}^N M_{jF}}{N};$$

$$\bar{A} = \frac{\sum_{j=1}^N A_j}{N},$$

где \bar{M}_F - среднее значение физико-механических характеристик образцов, испытанных при установлении регрессионной зависимости; N - число образцов, испытанных при установлении регрессионной зависимости; M_{jF} , A_j - единичные значения фактической величины ФМХ и акустического параметра, для j -й серии образцов.

Корректировку установленной регрессионной зависимости проводят путем отбраковки единичных результатов испытаний, не удовлетворяющих условию:

$$\frac{|M_{jR}-M_{jF}|}{S} \leq 2, \tag{17}$$

где S - среднее квадратическое отклонение, определенное по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (M_{jF}-M_{jR})^2}{N-2}}. \tag{18}$$

Определение задержек при оценке поврежденности материала

Величины задержек определялись методом перехода сигнала через ноль, поскольку данный метод в настоящее время считается одним из наиболее точных.

На ошибку измерения существенное влияние оказывает выбор импульса n , используемого при измерениях. Величина n определяется из следующих соображений.

Из формулы (2) следует выражение для абсолютной погрешности определения параметра d :

$$\Delta d = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{\bar{t}_{1n}}{\bar{t}_{3n}}\right)^2 \left[\left(\frac{\Delta t_{1n}}{\bar{t}_{1n}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t_{3n}}{\bar{t}_{3n}}\right)^2\right] + \left(\frac{\bar{t}_{2n}}{\bar{t}_{3n}}\right)^2 \left[\left(\frac{\Delta t_{2n}}{\bar{t}_{2n}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t_{3n}}{\bar{t}_{3n}}\right)^2\right]}, \tag{19}$$

где $\Delta t_{1n}, \Delta t_{2n}, \Delta t_{3n}$ - абсолютные погрешности измерений соответствующих задержек, $\bar{t}_{1n}, \bar{t}_{2n}, \bar{t}_{3n}$ - усредненные по всему массиву измерений значения этих задержек.

В силу незначительной анизотропии упругих свойств исследуемой стали для оценки погрешности можно полагать, что $\bar{t}_{1n} \approx \bar{t}_{2n}$, в связи с чем значение погрешности Δd можно записать в виде:

$$\Delta d \approx \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\bar{t}_t}{\bar{t}_l} \sqrt{(\delta t_t)^2 + (\delta t_l)^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{V_l}{V_t} \sqrt{(\delta t_t)^2 + (\delta t_l)^2}, \tag{20}$$

где \bar{t}_t, \bar{t}_l - средние значения задержек импульсов поперечных и продольных упругих волн соответственно; V_t, V_l - скорости их распространения; $\delta t_t, \delta t_l$ - относительные погрешности определения задержек.

Из формулы (20) видно, что абсолютная погрешность определения параметра d определяется относительными погрешностями определения задержек импульсов упругих волн различных типов. Таким образом, чем больше количество отраженных импульсов n , по которым рассчитываются задержки, тем точнее определяется параметр d . Однако при увеличении n уменьшается соотношение «сигнал/шум» для n -го отраженного импульса и случайная погрешность определения координаты точки пересечения сигнала с нулевым уровнем увеличивается.

Экспериментально установлено, что измерения задержек являются достоверными при отношении сигнала и шума не менее 10 дБ. Величина n выбиралась как предельное значение, превышение которого приводит к уменьшению отношения сигнала и шума до значения, меньшего 10 дБ.

На рис. 3 приведена типичная осциллограмма импульсов с приемлемым соотношением «сигнал/шум».



Рис. 3. Осциллограмма принятых акустических импульсов с приемлемым соотношением «сигнал/шум»

Анализ полученных осциллограмм позволил определить оптимальное значение видимых на экране прибора $n=6$.

При распространении упругих импульсов в реальном поликристаллическом материале вследствие частотно зависимого затухания упругих волн и наличия дисперсии скорости звука происходит изменение формы огибающей импульса. Вследствие этого отсчетные точки (точки пересечения сигнала с нулевым уровнем) для 1-го и n -го отраженных импульсов могут смещаться на один и более периодов основной частоты импульса и измерение задержек импульсов может происходить по несинфазным точкам. Это приводит к значительным систематическим погрешностям определения задержек импульсов, кратных периоду несущей частоты. Сказанное иллюстрируется приведенными на рис. 4 осциллограммами.

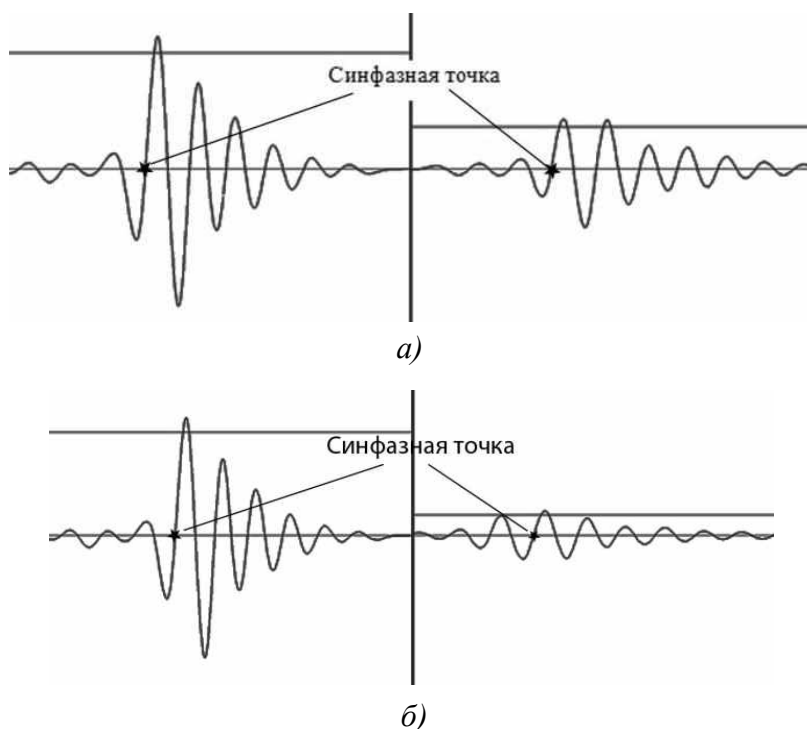


Рис. 4. Измерение задержки:

а - по синфазным точкам; *б* - по точкам, сдвинутых на период колебаний

На рис. 4, *а*, *б* горизонтальные линии изображают пороги срабатывания, по достижении которых программное обеспечение ИВК «АСТРОН» определяет точку пересечения сигнала с нулевым уровнем, находящуюся слева от пересечения сигнала с порогом. При поиске этой точки используется сплайн-аппроксимация сигнала в области его нулевого значения.

Из рисунков видно, что при одних и тех же относительных значениях порогов срабатывания во втором случае измерение проведено по несинфазным точкам, что приводит к систематической ошибке, равной периоду несущей.

Для типичных ультразвуковых частот порядка 5 МГц систематическая ошибка определения задержки в этом случае составит порядка 200 нс. Задержка 3-го импульса относительно 1-го в нашем случае составляет: для поперечных волн порядка 10 мкс, для продольных – порядка 5 мкс. Таким образом, величины соответствующих относительных погрешностей составляют соответственно 2 и 4 %.

Методика экспериментальных исследований

Эксперименты проводились на образце из трубы [6, 8]. Материал трубы – аустенитная сталь 12X18Н10Т. В трех локальных зонах образца создавался перепад температур на поверхности образца с температурой 300°С путем подачи дистиллированной воды температурой 20°С капельным способом с частотой 1 и 0,5 Гц. В качестве образца была выбрана труба

Ø 63×6 мм из стали марки 12X18H10T (ГОСТ 9941-81). На рис. 5 представлен образец. На рис. 6 представлена осциллограмма, полученная при сканировании трубчатого образца с помощью продольных волн. Как видим из рисунка, для данного случая испытаний возможно использование 3 импульса.



Рис. 5. Образец - труба Ø 63×6 мм из стали марки 12X18H10T

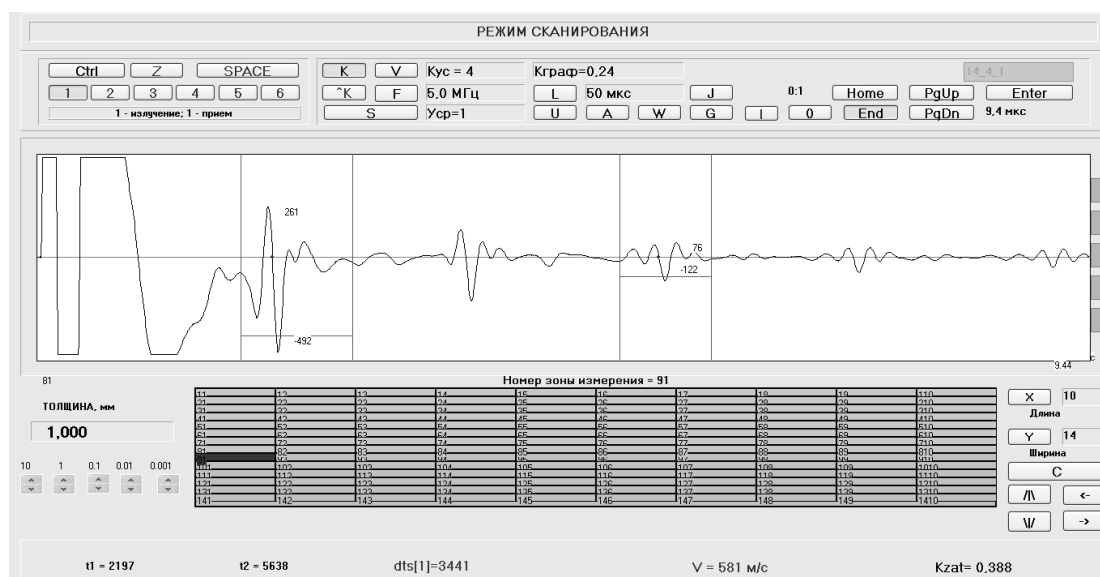


Рис. 6. Осциллограмма при сканировании продольными волнами трубчатого образца

Выводы

1. Полученные результаты свидетельствуют о чувствительности спектрально-акустических характеристик к накоплению повреждений в процессе термоциклирования.
2. Метрологические характеристики ИВК «АСТРОН» обеспечивают измерение безразмерного акустического параметра с точностью $6,5 \times 10^{-4}$.
3. Диапазон изменения безразмерного акустического параметра в процессе термоциклирования составляет порядка $3,5 \times 10^{-2}$. Чувствительность нормированного параметра d_n , приведенного к диапазону изменения поврежденности, составляет порядка 0,02.
4. Расчетная погрешность определения поврежденности порядка 0,04 – 0,06.
5. Таким образом измерение акустического параметра d позволяет решать задачи механики среды с повреждениями, причиной которых являются пульсации температуры.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках договора № 02.G25.31.0124 от «03» декабря 2014 г. года (в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218).

Библиографический список

1. **Судаков, А.В.** Пульсации температур и долговечность элементов энергооборудования / А.В. Судаков, А.С. Трофимов. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 176 с.
2. **Судаков, А.В.** Ресурс энергооборудования при пульсациях температур // Надежность и безопасность энергетики. – 2008. – № 9. – С. 10–18.
3. **Углов, А.Л.** Об одной модели накопления рассеянных повреждений // Прикладная механика. – 1991. – № 1. С. 77–84.
4. **Волков, И.А.** Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями / И.А. Волков, Ю.Г. Коротких. – М.: Физматлит, 2008. – 424 с.
5. **Углов, А.Л.** Акустический контроль оборудования при изготовлении и эксплуатации / А.Л. Углов, В.И. Ерофеев, А.Н. Смирнов; отв. редактор академик РАН Ф.М. Митенков. – М.: Наука, 2009. – 280 с.
6. Методы обоснования ресурса ядерных энергетических установок / Ф.М. Митенков [и др.]. – М.: Машиностроение, 2007. – 445 с.
7. **Хлыбов, А.А.** Оценка напряженного состояния гильотинных ножей, подвергаемых термической обработке // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2009. – Т. 75. – № 4. – С. 54–57.
8. **Хлыбов, А.А.** Исследование накопления рассеянных микроповреждений в образцах из стали 08X18H10T при малоцикловой усталости / А.А. Хлыбов, С.Н. Пичков, А.Л. Углов // Контроль. Диагностика. – 2011. – № 4. – С. 55– 61.

*Дата поступления
в редакцию 10.10.2015*

A. L. Uglov, A. A. Khlybov, A. D. Makarov, R. R. Ryazapov, A. E. Sobornov

**TECHNIQUE OF ASSESSING DAMAGE AUSTENITIC STEEL BECAUSE
OF THERMAL PULSATION BY ACOUSTIC METHOD**

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

Shown, that for control thermal fatigue damage can be used elastic wave. Proposed the technique of monitoring physico-mechanical characteristics and damage accumulation by acoustic method. Provided data on the evaluation of experimental error. Experimental verification of operability of the proposed monitoring algorithm implemented on the sample tube of austenitic steel by creating thermal pulsation. The proposed method of control allows the control of physical and mechanical characteristics of the material and thus improves the security of controlled structural elements, exposed by thermal pulsation.

Key words: thermal fatigue, elastic waves, austenitic steel, damage, physical and mechanical characteristics.

УДК 621.785:666.362

И.В. Гладких

ВЛИЯНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ОГНЕУПОРНОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ ИЗ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ НА СВОЙСТВА ЖАРСТОЙКОГО БЕТОНА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты исследования влияния гранулометрического состава огнеупорного заполнителя из техногенного сырья на свойства жаростойкого бетона. Установлено, что использование гранулометрического состава заполнителя, рассчитанного на основании обобщающего уравнения Фуллера, Андреасена и Боломэ с использованием эмпирических коэффициентов $\alpha=0,1$; $n=0,7$, обеспечивает получение бетона с высокими качественными характеристиками.

Ключевые слова: огнеупорный заполнитель, гранулометрический состав, техногенное сырье, жаростойкий бетон.

В современных условиях стремления к материало- и энергосбережению, экономии природных ресурсов, снижению антропогенной нагрузки на окружающую среду повышение уровня использования техногенного сырья особенно актуально. Применительно к огнеупорной промышленности важнейшим из техногенных сырьевых ресурсов является лом различных видов огнеупорных изделий (шамотных, диасовых, магнезитовых и др.), образующихся в процессе эксплуатации и ремонтов промышленных тепловых агрегатов.

Согласно экспертным оценкам [1-3], вторичное использование 1 т лома алюмосиликатных огнеупоров позволяет сэкономить до 1,5 т огнеупорной глины, 0,15 т условного топлива, $1,4 \cdot 10^5$ Дж электроэнергии; 1 т боя кремнеземистых изделий экономит 1,2 т кварцитов, 0,3 т условного топлива, $1,6 \cdot 10^5$ Дж электроэнергии; 1 т магнезиальных огнеупоров экономит до 2,3 т природного магнезита, 0,35 т хромитовой руды, 0,25 т условного топлива, $1,6 \cdot 10^5$ Дж электроэнергии. Кроме того, использование вторичных огнеупоров способствует исключению высокотемпературного обжига огнеупорного сырья из технологического процесса производства огнеупоров, что позволяет снизить удельный выход оксида углерода до 5 кг на тонну готовой продукции, оксидов азота до 6 кг/т, диоксида серы до 7,5 кг/т [4]. Следовательно, эффективное использование лома огнеупорных материалов обеспечивает в итоге значительное ресурсосбережение и сохранение окружающей среды.

Одним из перспективных направлений переработки огнеупорного лома, в частности боя шамотных изделий, является использование его в качестве вторичного огнеупорного сырья для производства жаростойких бетонов, получивших широкое распространение в черной и цветной металлургии. Применение их вместо штучных огнеупоров снижает трудозатраты, уменьшает сроки строительства, позволяет быстро изготавливать изделия любой формы, зачастую повышает долговечность футеровки.

Кроме того, в отличие от традиционных огнеупоров жаростойкие бетоны не требуют обжига – самого дорогого технологического процесса производства огнеупоров. Производство изделий из жаростойкого бетона проще и более гибкое, чем штучных огнеупоров. Соответственно, в общем объеме огнеупоров доля бетонов и «неформованных огнеупоров» неуклонно увеличивается с 1970-х гг., как в нашей стране, так и за рубежом [2, 3].

Ввиду многообразия промышленных отходов, пригодных для использования в технологии жаростойкого бетона в качестве техногенного огнеупорного сырья, следует отметить, что оно должно удовлетворять требованиям, предъявляемым к огнеупорным заполнителям, которые регламентируют химико-минералогический состав, огнеупорность и др. Кроме того, применение огнеупорного заполнителя из техногенного сырья должно обеспечивать необхо-

димый комплекс технологических и эксплуатационных характеристик жаростойкого бетона, который в значительной степени зависит от гранулометрического состава заполнителя. Проведенные исследования показали, что оптимальное соотношение зерен разных фракций обеспечивает виброреологические характеристики бетонных масс, способствующих созданию низкопористой и прочной структуры бетона как в процессе формования, так и под воздействием тепловой обработки [6].

Для достижения максимального уплотнения бетонной массы подбор гранулометрического состава рекомендуется осуществлять с использованием кривых распределения Фурнса, уравнений Фуллера (1), Андреасена (2) и Боломэ (3) [7, 8]:

$$X_i = \left(\frac{d_i}{D_{\max}}\right)^{0,5} \cdot 100; \quad (1)$$

$$X_i = \left(\frac{d_i}{D_{\max}}\right)^n \cdot 100; \quad (2)$$

$$X_i = \left[\alpha + (1-\alpha) \cdot \left(\frac{d_i}{D_{\max}}\right)^{0,5} \right] \cdot 100 \quad (3)$$

где X_i – содержание фракции с размером зерен меньше d_i , %;

D_{\max} – максимальный размер зерна, мм;

α – коэффициент, зависящий от типа бетона и характера зерен заполнителя;

n – показатель степени, зависящий от формы зерен, их взаимного сцепления, условий осуществления упаковки.

На основании анализа уравнений (1)–(3) авторами [7] предложено обобщающее уравнение (4), расширяющее интервал возможных значений показателя степени свободы в пределах $n = 0,5-0,9$ и $0 < \alpha < 0,4$:

$$X_i = \left[\alpha + (1-\alpha) \cdot \left(\frac{d_i}{D_{\max}}\right)^n \right] \cdot 100. \quad (4)$$

Эффективность использования уравнения (4) подтверждена при подборе гранулометрического состава огнеупорных периклазовых масс для изготовления безобжиговых изделий полусухого прессования.

В настоящей работе проведены исследования влияния гранулометрического состава огнеупорного заполнителя из техногенного сырья на свойства жаростойкого бетона. Для проведения исследований в качестве сырьевых материалов использовали: огнеупорный заполнитель на основе лома алюмосиликатных изделий, вяжущее – жидкое стекло натриевого по ГОСТ13078-81 «Стекло натриево жидкое» (силикатный модуль – 2,9; плотность – 1,41 г/см³), отвердитель – кремнефтористый натрий по ТУ 113-08-587-86 (массовая доля Na₂SiF₆ не менее 98 %).

Физико-химические характеристики огнеупорного заполнителя из техногенного сырья представлены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-химические показатели огнеупорного заполнителя из техногенного сырья

Наименование показателя						
Массовая доля, %				Огнеупорность, °С	Водопоглощение, %	Массовая доля влаги, %
Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂			
35,80	0,16	2,86	47,80	1690	12,0	3,0

Из представленных данных следует, что физико-химические характеристики заполнителя из техногенного сырья соответствуют требованиям, предъявляемым к заполнителям алюмосиликатным марки ЗША по ГОСТ 23037-99 «Заполнители огнеупорные» (массовая доля Al_2O_3 не менее 35,0 %, массовая доля Fe_2O_3 не более 6,5 %; огнеупорность не ниже 1690 °С). Значение водопоглощения находится в пределах, допустимых для заполнителей, изготовленных из брака и лома (не более 15 %).

Исследования проводились на образцах бетона (кубы с ребром 50 и 100 мм), изготовленных в разборных металлических формах из масс состава: заполнитель – 70 %, вяжущее – 25%, отвердитель – 5%. Формование образцов осуществлялось на лабораторном вибростоле, с параметрами вибрации – частота колебаний 40 кол/с, амплитуда колебаний 0,2 мм. Образцы бетона выдерживались на воздухе при температуре окружающей среды 20-25 °С в течение 3 суток, затем подвергались сушке при температуре 105 °С в течение 48 часов (температурно-влажностный режим твердения образцов огнеупорного бетона соответствовал условиям ГОСТ 20910-90 «Бетоны жаростойкие»).

В работе изучалось влияние 2-х видов гранулометрического состава заполнителя из техногенного сырья на свойства жаростойкого бетона:

1) гранулометрический состав заполнителя с непрерывной гранулометрией фракции 5-0 мм;

2) гранулометрический состав заполнителя, рассчитанный на основании уравнения (4) с использованием эмпирических коэффициентов $\alpha=0,1$; $n=0,7$, фракции 5-0 мм.

Таблица 2

Гранулометрический состав заполнителя из техногенного сырья

Фракция, мм	Содержание фракций заполнителя из техногенного сырья, % масс.			Полные остатки на контрольных ситах (требования ГОСТ 20910-90), % масс.
	Гранулометрический состав № 1	Гранулометрический состав № 2		
		Расчетный	Фактический	
Более 5,0	1,3	-	1,1	0-5
5-2,5	9,4	34,6	37,2	10-40
2,5-1,25	24,7	21,3	18,8	20-60
1,25-0,63	21,3	13,0	9,8	40-85
0,63-0,315	18,4	8,1	11,1	60-95
0,315-0,16	12,8	4,9	6,9	80-100
Менее 0,16	12,1	18,1	15,1	
Всего	100	100	100	

Поскольку существующие в огнеупорном производстве методы разделения порошков не позволяют осуществлять расфракционирование материалов на узкие фракции для последующей их дозировки, смешения и получения полидисперсной смеси с заданным соотношением фракций, расчет содержания фракций заполнителя гранулометрического состава №2 осуществляли по трем фракциям: 5 мм, 3 мм, 1 мм. С учетом расчета гранулометрический

состав №2 характеризовался следующим содержанием фракций %, масс: 5-3 мм – 27; 3-1 мм – 33; 1-0 мм – 40. Гранулометрический состав заполнителя из техногенного сырья представлен в табл. 2.

Анализ представленных данных показывает, что гранулометрический состав заполнителя обоих вариантов полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к заполнителям жаростойких бетонов по ГОСТ 20910-90 «Бетоны жаростойкие». При этом фактический гранулометрический состав №2 незначительно отличается от расчетного состава.

Образцы жаростойкого бетона исследовались на следующие физико-механические характеристики: кажущаяся плотность, открытая пористость и прочность на сжатие при температуре термообработки 20 °С, 105 °С, 1000 °С.

Определение физико-механических характеристик бетона проводили согласно ГОСТ 24468-80 «Изделия огнеупорные. Метод определения кажущейся плотности и общей пористости теплоизоляционных изделий», ГОСТ 2409-95 «Огнеупоры. Метод определения кажущейся плотности, открытой и общей пористости, водопоглощения», ГОСТ 4071.2-94 «Изделия огнеупорные теплоизоляционные. Метод определения предела прочности при сжатии при комнатной температуре».

Результаты исследования влияния гранулометрического состава заполнителя из техногенного сырья и температуры термообработки на физико-механические характеристики жаростойкого бетона представлены в табл. 3.

Из представленных данных следует, что кажущаяся плотность образцов бетона, полученных с использованием заполнителя гранулометрического состава №2, характеризуются более высокими значениями, практически не зависит от температуры термообработки и находится в диапазоне 1,84-1,86 г/см³, по сравнению с образцами бетона на основе заполнителя гранулометрического состава №1 (1,63-1,84 г/см³). Выявленное при этом незначительное увеличение кажущейся плотности с 1,63 г/см³ до 1,68 г/см³ у образцов бетона на основе заполнителя №1 после обжига при температуре 1000 °С обусловлено усадкой образцов.

Зависимость открытой пористости от температуры для разных видов гранулометрического состава заполнителя носит неоднозначный характер. С увеличением температуры термообработки у образцов бетона на основе заполнителя №2 наблюдается уменьшение пористости с 24,8 % до 18,6 %. Пористость образцов бетона на основе заполнителя гранулометрического состава №1 в интервале температур 105-1000 °С практически не изменяется и находится в пределах 31,5-30,2 %.

Наиболее значительное влияние вида гранулометрического состава заполнителя и температуры термообработки выявлено на механическую прочность образцов бетона.

Таблица 3

Физико-механические характеристики образцов огнеупорного бетона

Гранулометрический состав заполнителя из техногенного сырья	Наименование показателя качества							
	Кажущаяся плотность при температуре термообработки, г/см ³			Открытая пористость при температуре термообработки, %		Прочность на сжатие при температуре термообработки, МПа		
	20 °С	105 °С	1000 °С	105 °С	1000 °С	20 °С	105 °С	1000 °С
№ 1	1,84	1,63	1,68	31,50	30,20	5,97	14,84	26,50
№ 2	1,86	1,84	1,85	27,80	18,60	8,42	28,0	33,2

Установлено, что после сушки при температуре 105 °С прочность бетона на основе заполнителя гранулометрического состава №2 практически в два раза превышает прочность бетона на основе заполнителя состава №1, и составляет 28 МПа и 14,84 МПа, соответственно.

При температуре 1000 °С достигаются максимальные значения прочности (26,5 МПа и 33,2 МПа) образцов бетона для обоих видов заполнителя, при этом наибольшая прочность бетона достигается при использовании заполнителя гранулометрического состава №2. Существенные различия в значениях прочности на сжатие образцов бетона, по-видимому, обусловлены распределением зерен различных фракций в гранулометрическом составе заполнителя и некоторым оптимальным соотношением площадей поверхности зерен заполнителя и матричного компонента бетона.

Таким образом, в результате проведенных исследований влияния гранулометрического состава огнеупорного заполнителя из техногенного сырья на свойства жаростойкого бетона установлено, что использование заполнителя гранулометрического состава, рассчитанного на основании обобщающего уравнения (4) с эмпирическими коэффициентами $\alpha=0,1$; $n=0,7$, обеспечивает получение бетона с низкой пористостью (18,6 %) и высокой механической прочностью (33,2 МПа).

Библиографический список

1. **Хорошавин, Л.Б.** Значение вторичных огнеупоров недооценено / Л.Б. Хорошавин // Уральский рынок металлов. 2006. № 8. – С. 39–42.
2. **Хорошавин, Л.Б.** Современные тенденции развития производства и применения огнеупоров./ Технология композиционной керамики в материаловедении: материалы заочной Всероссийской конференции. – Уфа: Вагант, 2008. – С. 22–30.
3. **Хорошавин, Л.Б.** Диалектика огнеупоров / Л.Б. Хорошавин – Екатеринбург: Изд-во Екатеринбургская Ассоциация Малого Бизнеса, 1999. – 359 с.
4. **Старк, С.Б.** Газоочистные аппараты и установки в металлургическом производстве: учеб. для вузов / С.Б. Старк. – М.: Металлургия. – 2-е изд., перераб. и доп. – 1990. – 400 с.
5. **Кашеев, И.Д.** Неформованные огнеупоры: справоч. изд. в 2 т. Т. 2: свойства и применение неформованных огнеупоров / И.Д. Кашеев, М.Г. Ладыгичев, В.Л. Гусовский. – М.: Теплотехник, 2004. – 440 с.
6. **Пивинский, Ю.Е.** Неформованные огнеупоры: справоч. изд. в 2 т. Т. 1. Книга 1. Общие вопросы технологии / Ю.Е. Пивинский. – М.: Теплоэнергетик, 2004. – 448 с.
7. **Кашеев, И.Д.** Химическая технология огнеупоров: учеб. пособие / И.Д. Кашеев, К.К. Стрелов, П.С. Мамыкин. – М.: Интернет Инжиниринг, 2007. – 752 с.
8. **Стрелов, К.К.** Технология огнеупоров / К.К. Стрелов, И.Д. Кашеев, П.С. Мамыкин. – 4-е изд. – М.: Металлургия, 1988. – 528 с.

*Дата поступления
в редакцию 15.10.2015*

I.V. Gladkikh

INFLUENCE OF GRANULOMETRIC COMPOSITION OF HEAT-RESISTANT FILLER FROM TECHNOGENIC RAW MATERIALS ON PROPERTIES OF HEAT-RESISTANT CONCRETE

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

Results of research of influence of granulometric composition of heat-resistant filler from technogenic raw materials on properties of heat-resistant concrete are presented. It is established that use of of the filler calculated on the basis of the generalizing equation of Fuller, Andreasen and Bolome with use of empirical coefficients of $\alpha=0,1$; $n=0,7$, provides receiving concrete with high qualitative characteristics.

Key words: heat-resistant filler, granulometric composition, technogenic raw materials, heat-resistant concrete.

УДК.669.017:621.78

С. Н. Жеребцов¹, Е. В. Лобов², Е.А. Чернышов³**КОМПЛЕКСНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА КРИСТАЛЛИЗУЮЩИЙСЯ ЖАРОПРОЧНЫЙ
НИКЕЛЕВЫЙ СПЛАВ
ПРИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОМ КОКИЛЬНОМ ЛИТЬЕ**Омский государственный педагогический университет¹,
ОАО «Омский научно-исследовательский институт технологии машиностроения»²,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева³

Представлены многолетние результаты практических исследований, подтверждающие положительное влияние разрабатываемой технологии высокотемпературной обработки расплава (ВТОР) с совместным использованием процесса модифицирования никелевых сплавов при электрошлаковом кокильном литье. Впервые на практике показаны реальные параметры прямых замеров температуры жидкого металла и шлака при переплаве ряда жаропрочных никелевых сплавов типа ЖС6-У, ЖС3-ДК и т.д., в автогарнисажной плавильной ёмкости на протяжении всего технологического процесса электрошлакового литья изделий. Приведены сравнительные характеристики и результаты испытаний физико-механических свойств и служебных характеристик изделий, полученных вакуумно-индукционным переплавом и электрошлаковым переплавом с применением комбинированной технологии модифицирования и высокотемпературной обработки расплава.

Ключевые слова: электрошлаковое кокильное литьё, модифицирование, температура, жидкий металл, шлак, технологические параметры, физико-механические свойства, никелевый сплав.

Электрошлаковому переплаву (ЭШП) подвергали никелевые жаропрочные сплавы типа: ЖС6-У, ЖС6-К, ЖС3-ДК, во время переплава вводили модификаторы различного химического состава-(TiCN-Ti-Cr, TiCN-Ti-Ni, TiCN-Ti-Y, TiCN-Ti-Mo, TiCN-Ti-Va, а также РЗМ); в статье представлены результаты исследования с модификатором Ti(C_x N_y)-Ti. В процессе ЭШКЛ (электрошлаковое кокильное литьё) производили технологический перегрев расплавленного металла в плавильной емкости - для проверки нашего предположения о положительном влиянии технологии высокотемпературной обработки расплава (ВТОР), совмещённой с процессом модифицирования жидкого металла, на структуру и физико-механические свойства отливаемого изделия [1, 3, 4].

Металл плавил и разливали в установке электрошлакового литья А550-У, УШ-148, варьируя температуру введения добавки, состав модификатора, время выдержки, температуру жидкого металла и шлака, силу тока, напряжение в процессе переплава, температуру охлаждающей жидкости и т.д.

Контроль и запись токовых режимов электрошлакового переплава расходуемого электрода в плавильной ёмкости производились с помощью электронного потенциометра КСП-4, контроль скорости плавления электрода осуществлялся с помощью датчика веса в комплекте с самописцем ПСР-1. Температура охлаждающей жидкости (вода) на входе и выходе из поддона плавильной емкости контролировалась электронным автоматическим многоточечным потенциометром ЭПР-09РМЗ. Для прямого замера температуры жидкого металла и шлака в плавильной ёмкости на протяжении всего процесса переплава расходуемого электрода применялась вольфрам-рениевая термопара типа ВР5(20)5 в защитном корпусе из тугоплавкого металла.

Модифицирование после ВТОР с введением УДПК (ультрадисперсный порошок комплекс, разработанный на базе TiCN-Ti [1, 4]) в диапазоне температур при 1450-1470°С, 1580-1600°С, 1720-1740°С-потребовало применения технологии подстуживания жидкого металла для повышения эффекта модифицирования за счет снижения продолжительности вре-

мени выдержки от момента введения УДПК в жидкий металл, с последующей заливкой в кокиль и до начала процесса кристаллизации сплава в литейной форме [4].

На (рис. 1) приведена реальная схема процесса переплава расходоуемого электрода из сплава ЖС6-У под слоем защитного синтетического флюса марки $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ в охлаждаемой автогарнисажной плавильной ёмкости [1,4]. Температура нагрева жидкого металла достигала от 1900°C до 2040°C , а жидкого флюса соответственно от 2150°C до 2320°C .

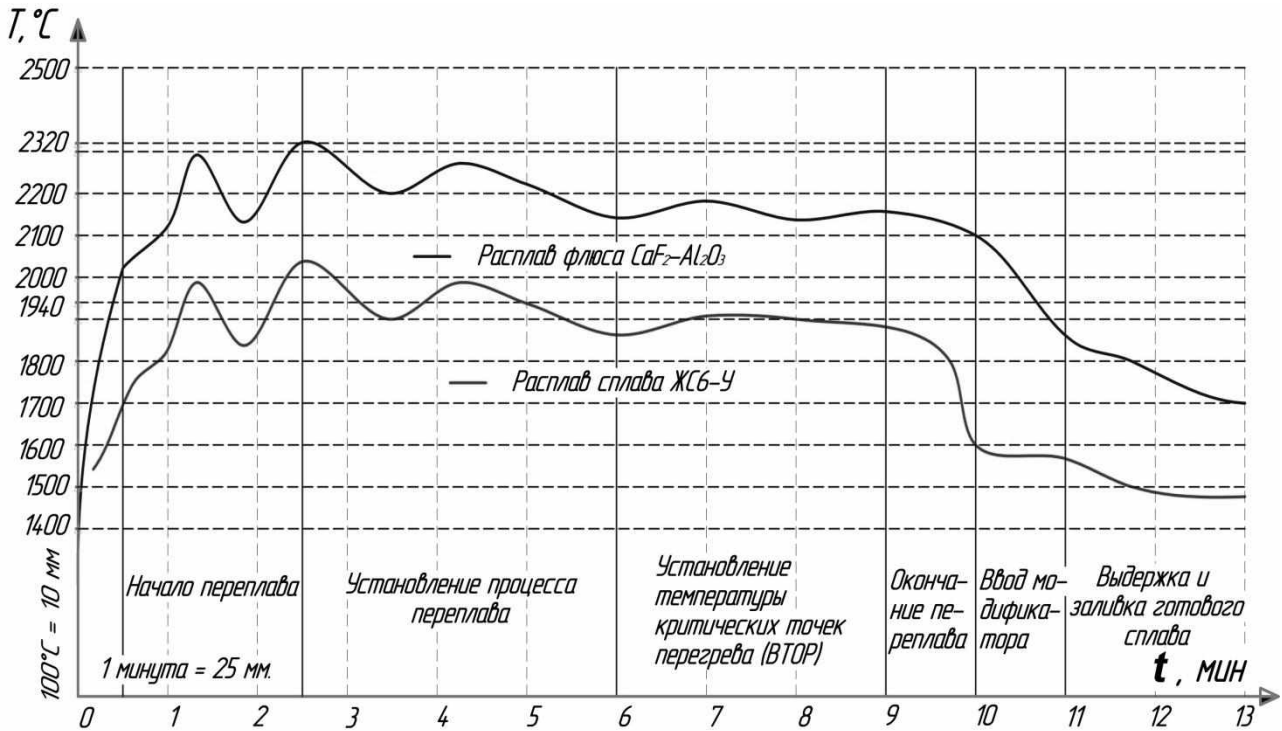


Рис. 1. Температурно-временная зависимость процесса ЭШКЛ+ВТОР расходоуемого электрода из сплава ЖС6-У в плавильной емкости

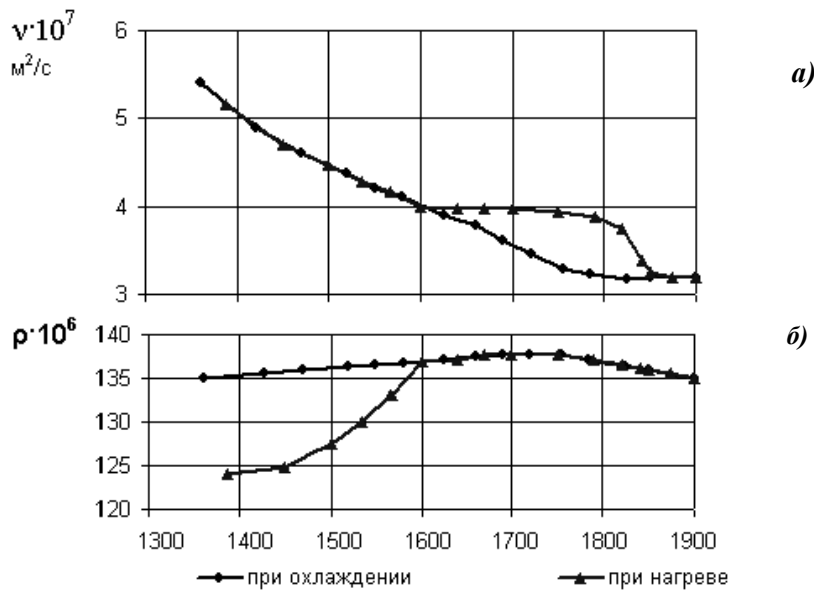


Рис. 2. Политермы:
 а – кинематической вязкости (ν) сплава ЖС3-ДК;
 б – удельного электросопротивления (ρ) сплава ЖС3-ДК

Перевод расплава никелевых сплавов в равновесное состояние при воздействии высокотемпературной обработки расплава осуществляют перегревом выше второй критической температуры $t_{кр2}$ 1830°C (для ЖС3-ДК и ЖС6-У), и 1800°C для ЖС6-К [1, 4]. Необходимую температуру перегрева расплава ЖС3-ДК, ЖС6-К, ЖС6-У для перевода его в равновесное состояние определили по изменению кинематической вязкости и удельного сопротивления в жидком состоянии (рис. 2, а, б), по методикам, рассмотренным в работах [7, 8].

На политемах структурно-чувствительных свойств никелевого сплава ЖС3-ДК можно выделить два температурных интервала, в которых происходят интенсивные изменения структуры расплава. В низкотемпературной области 1550-1650°C аномальный характер изменения свойств связан с разрушением неравновесных группировок атомов, соответствующих по составу и строению интерметаллидной γ' - фазе, а в интервале температур 1780-1830°C осуществляются полная диссоциация и растворение тугоплавких соединений, находящихся в расплаве.

С учетом результатов опытов был выбран следующий температурный режим плавки и модифицирования: перегрев до 1840–1850°C, выдержка 5–10 мин; температура введения УДПК не должна превышать 1700°C. Оптимальную температуру введения модификатора установили по изменению механических свойств образцов из сплава ЖС3-ДК, полученных с использованием технологии электрошлакового кокильного литья (табл. 1).

Таблица 1

**Влияние температуры введения модификатора после ВТОР при ЭШП (1830°C)
на механические свойства сплава ЖС3-ДК**

Температура введения, T_1 °C	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
1570	1086/1074/1071	793/820/791	18,9/14,0/18,8	21,2/20,0/22,4
Среднее	1077	801	17,2	21,2
1610	1056/1075/1036	802/804/794	18,8/18,0/14,8	20,8/20,1/20,5
Среднее	1055	800	17,2	20,4
1650	1162/1162/1152	843/843/839	16,0/16,8/16,0	19,7/20,4/18,1
Среднее	1158	841	16,3	19,4
Паспорт	900	760	14,0	16,0

В качестве оптимизируемых технологических параметров ЭШКЛ были взяты: температура перегрева расплава (ВТОР), температура ввода УДПК в расплав, температура заливки, время выдержки от момента ввода модификатора до заливки и количество вводимых УДПК. В качестве функций сравнения использовали относительное удлинение, предел прочности, ударную вязкость и длительную жаропрочность исследуемых сплавов ЖС6-У, ЖС3-ДК, ЖС6-К, согласно ОСТ1 90126-85.

Была отлита большая партия образцов с добавкой модификаторов, приготовленных при различных режимах ТФА (температурная фазовая активация) и вводимых в расплав при различных температурах жидкого металла, а также последующей временной выдержки и заданной температурой заливки жидкого металла, в литейную форму и последующим определением качества отливки (табл. 2). Для повышения эффективности модифицирования применяли принудительное охлаждение модифицированного расплава ЖС3-ДК, ЖС6-У, к двухкамерному поддону плавильной ёмкости под давлением подвели охладитель, с помощью которого задавали требуемые параметры температуры нагрева и охлаждения жидкого металла [2, 3].

Таблица 2

**Влияние режимов ТФА модификатора и температуры введения
и разливки сплава ЖС-6У на качество отливок**

№ плавки		Режимы ТФА, T, °С/мин	Температура введения T, °С	Температура за- ливки T, °С	Качество отливок
1	ЭШП	1000/60	1650	1570	Чистая
2	ЭШП	1000/60	1650	1575	Засоры
3	ВИП	1000/60	1670	1650	Чистая
4	ВИП	1000/60	1650	1620	Чистая
5	ВИП	1000/60	1570	1550	Засоры
6	ЭШП	1000/60	1670	1600	Чистая
7	ЭШП	950/30	1670	1570	Отливки каче- ственные
8	ВИП	950/30	1680	1550	

Необходимость этой операции возникла в результате продолжительного времени «выстаивания» и выдержки перегретого модифицированного расплава в литейной форме, до начала прохождения процесса кристаллизации отливки, из-за этого значительно снижается эффект модифицирования. Результаты испытания образцов, вырезанных из отливок «Сердечник рогообразный», показали, что предел прочности металла увеличился на 140-210 МПа при возрастании пластичности материала (табл. 3).

Таблица 3

**Механические свойства образцов из модифицированного сплава ЖС6-У,
с принудительным охлаждением затравочного узла**

Вид отливки	Наличие охлаждителя	σ_b , Мпа	δ , %	ψ , %
Сердечник ВИП	(+)	909	10,0	18,1
	(-)	885	16,4	16,8
	(+)	934	10,8	19,7
Сердечник ЭШП мод.	(+)	1186	16,0	15,7
	(+)	1240	16,8	18,7
	(+)	1190	16,0	17,0
Образцы ЭШП без мод.	(-)	1045	12,8	15,0
	(+)	1070	13,6	13,0
	(-)	1065	8,8	14,9
Образцы ЭШП мод.	(+)	1260	20,0	20,1
	(-)	1120	16,0	17,3
	(+)	1150	16,8	18,9
	(+)	1196	20,0	20,1

Механические свойства испытанных образцов, вырезанных из отливок, свидетельствуют о том, что совмещение ВТОР с модифицированием и принудительным охлаждением расплава позволяет увеличить прочность изделия на 220-250 МПа при росте пластичности примерно в два раза. Исследование длительной прочности на образцах, вырезанных из отливок не модифицированного и модифицированного сплава ЖС6-У, указывает, что показатель длительной прочности у модифицированного сплава выше на 80÷140 МПа.

Следует отметить, что при последовательном увеличении нагрузки на испытываемый образец сопротивление разрушению модифицированного сплава повышается. Это может быть связано с диссипацией энергии на блоках структуры, окружающей модифицированные карбиды, а также меньшим углом «разориентировки» самих зерен модифицированного сплава [4].

Образцы из модифицированного сплава ЖС3-ДК после ЭШКЛ по сравнению с ВИП выдерживают нагрузку 700-920 МПа при 700°С, при длительности испытания более 150-265 ч

(табл. 4). Выполненные исследования наглядно показывают, что ЭШП по сравнению с ВИП более прогрессивная технология переплава высоколегированных никелевых сплавов.

Таблица 4

Длительная прочность образцов модифицированного сплава ЖС-ЗДК, вырезанных отливок ($t_{исп}$ -700°C)

№	Нагрузка σ , МПа	Время до разрушения, ч	δ , %	ψ , %
ВИП	680/720/740	100/106/97	4,7	5,6
ВИП	688/720/740/760/780	100/100/100/100/168	3,1	3,7
ВИП	680/740	100/93	4,3	6,8
ЭШП	870/920	265/155	6,8	7,5
ЭШП	880/910	240/180	5,4	6,3
ЭШП	680/700	150/130	3,4	5,1
ВИП	820/800	130/145	5,2	4,0

Свойства модифицированного сплава ЖС6-У, подвергнутого ВТОР при ЭШП, верхняя критическая точка для сплава ЖС6-У составляет 1830°C, а нижняя 1650°C. Продолжительность выдержки расплава при 1830°C принимали равной 10 мин. Модификаторы вводили при 1650°C. Исследование механических свойств образцов показало (табл. 5), что свойства модифицированного сплава по сравнению со сплавом после ВТОР без модифицирования улучшились: σ_b увеличился на 10÷15%, δ -на 35- 47%, ψ на 45-58%.

Таблица 5

Механические свойства образцов из сплава ЖС6-У после ВТОР и модифицирования, испытанные при температуре 20°C

Вид обработки	Механические свойства			
	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
ВТОР (ЭШЛ)	1100/1045/1120	970/920/990	5,2/4,7/4,9	8,3/6,3/7,2
ВТОР+(TiCN-Ti)	1210/1160/1180	1060/980/1005	8,3/6,7/7,1	12,7/10,0/11,3

Размер макрозерна в отливках из модифицированного сплава при ЭШКЛ + ВТОР составил в среднем 0,7-1,2 мм, карбиды приобрели компактную форму, их средний размер составил 3-5 мкм. Наилучшие сочетания структуры и свойств сплавов ЖС6-К, ЖС6-У получены при введении УДП комплекса при 1580°C и выдержке 5 мин с последующей разливкой при 1490-1510°C.

Циклическая устойчивость образцов из модифицированного сплава ЖС6-У при 20°C увеличивается от 166 МПа до 200 МПа при испытании на резонансной частоте и базе $2 \cdot 10^7$ циклов, полученных различными способами производства ВИП и ЭШКЛ.

Исследование длительной прочности образцов модифицированного сплава ЖС6-У при различных температурах и нагрузках показало, что при 100-часовой нагрузке на образец она может быть увеличена до 30 МПа (табл. 6). По сертификату завода изготовителя $\sigma_b=1000-1050$ МПа; $\delta=3-5\%$; $\psi=4-8\%$; $\sigma_{100}^{1000}=170$ МПа. Это связано с тем, что детали машин (энергетические установки, лопатки, ротора газотурбинных двигателей, изделия «Сердечник рогообразный» и др.), работающих в условиях высоких температур и агрессивных газовых средах, воспринимают большие знакопеременные механические нагрузки.

Таким образом, применение ВТОР совместно с модифицированием позволяет получать стабильные служебные свойства отливок, превышающие верхний уровень механических свойств серийных сплавов, указанных в сертификатах на металл, поставляемых заводами-изготовителями.

Таблица 6

Длительная прочность образцов из сплава ЖС6-У, после ВТОР и модифицирования

Плавка	Режим испытаний	Физико-механические свойства		
		τ , ч	δ , %	ψ , %
ВИП	σ_{250}^{975}	12,0	4,2	5,3
ЭШП		25,0	3,9	4,6
ВИП	σ_{200}^{1000}	32,0	6,2	2,8
ЭШП		69,8	5,3	1,5
ВИП	σ_{160}^{1100}	21,6	4,3	1,9
ЭШП		37	5,0	1,6
ВИП	σ_{120}^{1150}	12,0	3,2	4,1
ЭШП		28	4,0	5,4

Необходимо отметить, что особенности структуры жаропрочных никелевых сплавов, отлитых с применением ВТОР, требуют изменения режимов термической обработки изделий для получения максимальной жаропрочности: нагрев до температуры растворения 10% γ' -фазы с охлаждением на воздухе и старения при температуре начала растворения γ' -фазы. Но значительного изменения строения карбидной фазы при этом может не происходить. Отмечено, что повышение скорости охлаждения металла отливки способствует измельчению карбидов MeC при кристаллизации и γ' -фазы при распаде γ -фазы в интервале температур 1400-1500°C, но четкой (прямой) функциональной зависимости между допустимым пределом повышения скорости охлаждения и наилучшими показателями по физико-механическим свойствам сплавов не установлено, в этом направлении ведутся дальнейшие исследования.

Для исследования возможности улучшения строения карбидной и γ' -фазы, за счёт повышения скорости процесса направленной кристаллизации, для увеличения физико-механических свойств металла отливок провели цикл опытных плавки сплавов ЖС6-У, ЖС6-К, ЖС3-ДК и т.д., с применением комбинированной технологии ВТОР и модифицирования на базе производственных мощностей ЗАО «Омский завод специальных изделий», ОАО «Омский научно-исследовательский институт технологии машиностроения», г. Омск.

Используя опыт НПО "Сатурн" и рекомендации ВИАМ, был принят следующий режим плавки и заливки сплава ЖС6-У в изделие «Сердечник рогообразный»: ВТОР - 1740°C, выдержка 10-20 мин, введение модификатора при 1670°C, температура заливки 1530°C. Для подбора составов модифицирующих комплексов проведен ряд экспериментальных плавки с заливкой образцов, испытания которых показали, что применение новых модификаторов оказало положительное влияние на физико-механические свойства изучаемых сплавов [3, 4].

Варьирование параметров процесса заливки позволило оценить влияние температуры введения модификатора и его состава на механические свойства сплава. Наиболее высокие и стабильные свойства получены при модифицировании 0,025% TiCN-Ti от массы заливаемого металла, при температуре введения добавки 1650- 1670°C.

Следует отметить, что общий уровень механических свойств всех образцов из сплавов ЖС6-У после ВТОР и модифицирования выше по сравнению с сертификатом ОСТ1 90126-85: σ_B -на 140-320 МПа, $\delta\%$ -в 2-4 раза, причем он достигнут без образования посторонних кристаллов, образующихся при охлаждении.

В процессе выполнения работы был широко опробован технологический процесс объемного модифицирования сплавов ЖС6-У, ВЖЛ12-У, ЖС3-ДК, позволивший увеличивать их пластичность в 1,5-2 раза и поднять предел циклической выносливости на 25-40 % [1, 4, 6].

Применение новой технологии модифицирования и совмещение с ВТОР при получении качественных заготовок, за счёт изменения микроструктуры и повышения химической

однородности отливки, позволило улучшить качество литья как ЭШКЛ, так и традиционными технологиями ВИП, ВДП, исключить сосредоточенную пористость, уменьшить размер зерна, значительно повысить прочностные показатели, пластичность, жаропрочность и служебные характеристики изделий.

Библиографический список

1. **Жеребцов, С.Н.** Применение метода высокотемпературной обработки жаропрочного сплава при литье изделия "Сердечник рогообразный" // Литейщик России. – 2005. – №7. – С. 37–39.
2. **Жеребцов, С.Н.** Применение технологии электрошлакового переплава для производства изделия из хромоникелевых сплавов // Технология машиностроения. – 2006. – №5. – С. 12–14.
3. **Жеребцов, С.Н.** Исследование зависимости физико-механических свойств сплава ЖС6-У от технологических параметров литья // Литейщик России. – 2005. – №11. – С. 35–36.
4. **Жеребцов, С.Н.** Применение наноматериалов и высокотемпературной обработки никельхромовых сплавов при электрошлаковом литье: дисс. ... на соискание уч. степ. канд. техн. наук. – Новокузнецк, 2006. – 213 с.
5. **Ларинов, В.Н.** Применение высокотемпературной обработки расплава при монокристалльном литье лопаток турбин на установке УВНК-8П // В.Н. Ларинов [и др.] // Авиационная промышленность. – 1989. – Прил. № 2. – С. 30–34.
6. **Еремин, Е.Н.** Повышение качества литого металла при электрошлаковом переплаве жаропрочных никелевых сплавов / Е.Н. Еремин, С.Н. Жеребцов, В.Г. Радченко // Известия Вузов. Черная металлургия. – 2003. – №8. – С. 15–18.
7. **Колотухин, Э.В.** Совершенствование технологии выплавки и повышение качества жаропрочных сплавов на основе исследования их удельного электросопротивления: дисс. ... на соискание уч. степ. канд. техн. наук. – Свердловск, 1990. – 150 с.
8. **Барышев, Е.Е.** Влияние структуры расплава на свойства жаропрочных никелевых сплавов в твердом состоянии / Е.Е. Барышев, А.Г. Тягунов, Н.Н. Степанова. – Екатеринбург: УрО РАН, 2010. – 198 с.

*Дата поступления
в редакцию 22.10.2015*

S.N. Zherebtsov, E. V. Lobov, E.A. Chernyshov

KOMPLESNY IMPACT ON THE CRYSTALLIZING HEAT RESISTING NICKEL ALLOY AT ELECTROSLAG KOKILNY MOLDING

Omsk State Pedagogical Institute,
Omsk Research Institute of Mechanical Engineering (ONIITM),
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Presented the results of many years of research supporting the positive impact of high-technology developed by melt processing (second) with the joint use of the process of modifying nickel alloys at electroslag diecasting. For the first time in practice shows the real parameters of direct measurements of the temperature of the molten metal and slag remelting of a number of heat-resistant nickel alloys such ZHS6-U, ZHS3-DC, etc., avtogarnisazhnoy smelting capacity, throughout the process of electroslag casting products. The comparative characteristics and test results of physical and mechanical properties and service characteristics of products obtained by vacuum induction remelting and electroslag remelting using a modification of the combined technology and high-melt processing.

Key words: electroslag chill casting, modification, temperature, liquid metal, slag, process parameters, physical and mechanical properties, nickel alloy.

УДК:669.621.74

Р.Н. Зенкин¹, Н.Н. Зенкин², А.И. Вальтер¹**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПЛАВЛЕНИЯ
МАГНИЙСОДЕРЖАЩЕГО МОДИФИКАТОРА ПРИ МОДИФИЦИРОВАНИИ
ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА С ШАРОВИДНОЙ ФОРМОЙ ГРАФИТА**Тульский государственный университет¹,
ОАО «КМЗ, Тула²

В текущей работе основным вопросом, решаемым при математическом моделировании процесса расплавления, было полное растворение магнийсодержащего модификатора. Разработка математической модели на базе метода конечных разностей позволяет получить зависимость высоты всплытия от времени и зависимость массы одного элемента от высоты всплытия.

Ключевые слова: магний, высокопрочный чугун, шлак магнитоактивный, лигатура.

Одна из причин неполного растворения Mg - возникновение пироэффекта и значительного дымовыделения в процессе модифицирования высокопрочного чугуна, быстрое всплывание компонентов в среде расплава, так как их плотность значительно меньше плотности чугуна. При этом Mg, содержащийся в модификаторе, не успевает прореагировать с исходным расплавом. Как показала практика, использование Mg в большинстве случаев это 25...60%, в зависимости от способа его ввода [1]. Остальной Mg сгорает на поверхности чугуна с ослепительным пироэффектом и большим количеством дыма, состоящего из мелкодисперсных оксидов магния. Соответственно, в этом случае решаются следующие задачи: 1) связывание модификатора шлакоактивными добавками; 2) замедление всплытия всех компонентов; 3) это человеческий фактор, который влияет на скорость наполнения ковша жидким расплавом.

Для полного усвоения Mg в чугуне при модифицировании необходимо, чтобы пузырьки парообразного Mg, образующиеся из его частиц при контакте с жидким чугуном, успевали полностью аннигилировать за время своего расхождения в чугуне. Размер же образующегося пузырька газообразного Mg зависит от размера частицы модификатора, и чем меньше частица, тем меньше пузырёк Mg, образующийся из него, тем больше вероятность, что за время своего образования и всплытия он полностью прореагирует с компонентами чугуна. При этом необходимо, чтобы модификатор до окончания процесса реагировал в исходном чугуне максимально столько, сколько требует технологический процесс для определенного рода продукции.

Разработка математической модели на базе метода конечных разностей

Для модифицирования используется цилиндрическая система координат ввиду осевой симметрии ковша: r - расстояние от точки до оси вращения, z - высота точки от дна ковша (рис. 1).

Для получения визуализации результатов расплавления модифицирующего комплекса моделирование производили с помощью императивного, структурированного, объектно-ориентированного языка программирования со строгой статистической типизацией переменных Delphi.

Основой модели является уравнение теплопроводности, которое в цилиндрической системе имеет вид:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (1)$$

где $\frac{\partial H}{\partial t}$ - скорость изменения энтальпии; r - расстояние от оси вращения; λ - теплопроводность; $\frac{\partial}{\partial r}$ - радиальный шаг; $\frac{\partial}{\partial z}$ - произв. по z ; $\frac{\partial T}{\partial z}$ - изменение температуры во времени; T - температура; $\frac{\partial T}{\partial r}$ - изменение температуры во времени.

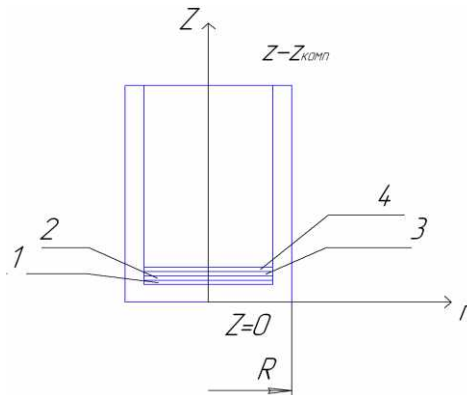


Рис. 1. Система координат и размеры:

1 – модификатор; 2 – шлак магнитоактивный; 3 – лигатура ФС30РЗМ30;
4 – чугун дробленый со шлакообразующими добавками

Начальным условием является распределения температуры в момент окончания заливки:

$$T(r, z) = \begin{cases} T_{\text{ч}} & \text{при } z > z_{\text{комп}} \text{ и } r < r_{\text{стенк}} \\ T_{\text{ост}} & \text{при } z < z_{\text{комп}} \text{ или } r > r_{\text{стенк}} \end{cases}, \text{ при } t = 0,$$

где z - координата высоты;

Граничными условиями являются условия теплообмена ковша с воздухом:

- на внешней поверхности ковша $\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\alpha}{\lambda}(T_R - T_0)$, при $r = R$,
где α - коэффициент теплоотдачи; T_0 - температура окружающей среды; T_R - температура стенки ковша; R - радиус ковша;
- снизу и сверху ковша $\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\alpha}{\lambda}(T_z - T_0)$, при $z = 0$ или $z = Z$
где Z - высота ковша;
- на оси вращения $\frac{\partial T}{\partial r} = 0$.

Уравнение теплопроводности решали методом конечных разностей. Пространство моделирования поделено на контрольные объемы имеющие размеры Δr , Δz . Объемы нумеруются: i - в направлении координаты r , j - в направлении координаты z . В цилиндрической системе координат контрольные объемы нумеруются по направлению координаты r :

$$V_i = r_i \Delta r \Delta z = (\Delta r)^2 \left(i - \frac{1}{2} \right) \Delta z, \quad (2)$$

где V - контрольный объем слоя;

Тепловые координаты между контрольными объемами зависят от площади их соприкосновения, которые зависят от радиуса и границ.

$$S_{i-\frac{1}{2}} = \Delta z r_{i-\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

где S - площадь соприкосновения контрольных объектов.

С учетом зависимости площадей соприкосновения и объемов уравнение теплопроводности имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta H_{i,j}}{\Delta t} = & \frac{i}{i - \frac{1}{2}} \frac{\lambda_{i-\frac{1}{2},j}}{(\Delta r)^2} (T_{i,j} - T_{i-1,j}) + \frac{i}{i + \frac{1}{2}} \frac{\lambda_{i+\frac{1}{2},j}}{(\Delta r)^2} (T_{i,j} - T_{i+1,j}) + \frac{\lambda_{i,j-\frac{1}{2}}}{(\Delta z)^2} (T_{i,j} - T_{i,j-1}) \\ & + \frac{\lambda_{i,j+\frac{1}{2}}}{(\Delta z)^2} (T_{i,j} - T_{i,j+1}). \end{aligned} \quad (4)$$

Для удобства численного счета использовались сеточные коэффициенты:

$$a_{i,j} = \frac{i\Delta t}{i - \frac{1}{2}} \frac{\lambda_{i-\frac{1}{2},j}}{(\Delta r)^2}, b_{i,j} = \frac{\lambda_{i,j-\frac{1}{2}}\Delta t}{(\Delta z)^2} \quad (5)$$

С введением этих обозначений уравнение будет иметь вид:

$$H_{i,j}^* = H_{i,j} + a_{i,j}(T_{i,j} - T_{i-1,j}) + a_{i+1,j}(T_{i,j} - T_{i+1,j}) + b_{i,j}(T_{i,j} - T_{i,j-1}) + b_{i,j+1}(T_{i,j} - T_{i,j+1}), \quad (6)$$

где H - энтальпия вещества.

Для гетерогенной среды теплопроводность между узлами рассчитывали:

$$\lambda_{i-\frac{1}{2},j} = \frac{2\lambda_{i-1,j}\lambda_{i,j}}{\lambda_{i-1,j} + \lambda_{i,j}}$$

$$a_{i,j} = \frac{S_{i-1/2}}{V_i} = \frac{\Delta z \Delta r i}{(\Delta r)^2 (i - \frac{1}{2}) \Delta z} = \frac{i}{\Delta r (i - \frac{1}{2})}. \quad (7)$$

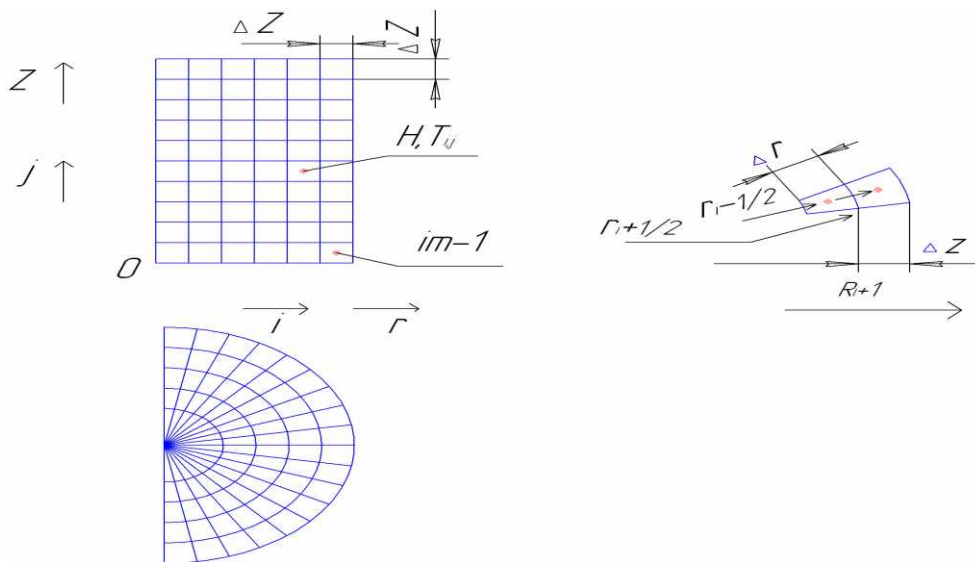


Рис. 2. Сетка численного решения

Модифицирующий комплекс состоит из разных компонентов, представляющих собой куски разного размера, масса которых распределена пропорционально их размеру. Допустим, что скорость всплытия определяется размером пропорционально размеру. Количество легирующих элементов описывается их концентрацией в расплаве. При всплытии концентрации уменьшаются. Процесс изменения концентрации при всплытии частиц можно описать:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = v \frac{\partial c}{\partial z}, \quad (8)$$

где v - скорость всплытия, зависящая от размера d и от плотности вещества; $\frac{\partial c}{\partial t}$ - скорость изменения концентрации; $\frac{\partial c}{\partial z}$ - градиент концентрации.

Всплытие протекает под действием гравитационной силы, которая пропорциональна, и тормозится лобовым сопротивлением чугуна. Когда эти силы уравновешивают друг друга, частицы всплывают с постоянной скоростью, которую можно определить из равновесия сил:

$$d^3(\rho_{Fe} - \rho_{комп}) = \rho_{Fe} * v^2 * d^2, \quad (9)$$

где ρ - плотность вещества.

$$v = \sqrt{d \left(1 - \frac{\rho_{\text{КОМП}}}{\rho_{\text{Fe}}} \right)}. \quad (10)$$

Изменение концентрации ∂c зависит от объема частиц, который пропорционален d^3 . Одновременно со всплытием размеры частиц уменьшаются вследствие их плавления. Скорость плавления частицы зависит: от площади ее поверхности, разности температур расплава, температуры плавления, от коэффициента теплопроводности, от теплоемкости.

Скорость плавления частицы определяется:

$$\frac{\partial d}{\partial t} = \frac{\lambda}{dc\rho}, \quad (11)$$

где λ – теплопроводность компонентов; c – теплоемкость; $\frac{\partial d}{\partial t}$ – скорость изменения диаметра;

Положим, что частица имеет сферическую форму радиусом R , плотность ρ , теплоемкость c , температуру t_0 . Эта частица находится в расплаве исходного чугуна. На эту частицу действует сила гравитационного давления (архимедова сила). Этой силе противодействует сила инерции и сила лобового сопротивления. Движение частицы в расплаве происходит под действием этих сил, которое описывается уравнением:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = -\rho \left(\frac{dy}{dt} \right) + \frac{m}{\rho} (\rho_0 - \rho), \quad (12)$$

где m – масса частицы; $\frac{dy}{dt}$ – скорость всплытия.

Начальные условия: $t=0, y=0, \frac{dy}{dt} = 0$.

Решение этого уравнения является y от t , которые определяется распределением частиц, находящихся в ковше, во времени. Масса частицы изменяется вследствие ее плавления. Тепловой процесс плавления описывается уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial x} \left(r^2 \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right). \quad (13)$$

Начальными условиями уравнения являются: $t=0, T=T_0, H=c\rho T_0$.

Граничными условиями являются: $r=0, \frac{\partial T}{\partial r} = 0$ – центр частицы, $r=R, T=T_{fe}$, на расстоянии первоначального радиуса частиц. Решением этого уравнения является функция распределения энтальпии во времени $H(t, r)$. По условию $H(t, r)=H_L$ определяется $r(t)$ – текущий радиус твердой частицы. По радиусу определяется масса частицы:

$$m = \rho \frac{4}{3} \pi r(t)^3 \quad (14)$$

Результат решения позволяет определить количество легирующего элемента на расстоянии y от первоначального положения слоя.

Количество легирующего элемента, перешедшего в жидкий чугун за время $d(t)$, определяется:

$$\frac{dm_L}{dt} = 4\pi r(t)^2 \rho \frac{dr}{dt}, \quad (15)$$

где $\frac{dm_L}{dt}$ – плавление частицы во времени.

Это количество легирующего элемента переходит в чугун на расстояние $y(t)$, от начального положения.

Легирующие элементы представим, как множество сфер разного радиуса закон распределения начальных радиусов которых зададим функцией распределения:

$$n = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{(R - R_0)^2}{2R_0^2} \right), \quad (16)$$

где R_0 – средний размер кусков легирующих компонентов.

Для практического использования разработанной математической модели на языке Delphi разработана программа по определению и получению численных результатов. При

использовании данной программы производится математический расчет процесса расплавления модификатора с учетом укладки его на дно ковша с последующим присыпанием: шлаком магнитоактивным; лигатурой ФС30РЗМ30; чугуном дробленным со шлакообразующими добавками. Данная модель позволяет получить зависимости: *высота всплытия* от времени; зависимость массы от высоты всплытия.

Согласно произведенному исследованию, перенесем все в Delphi и получим график зависимости: высота всплытия от времени (рис. 3); зависимость массы от высоты всплытия (рис. 4).

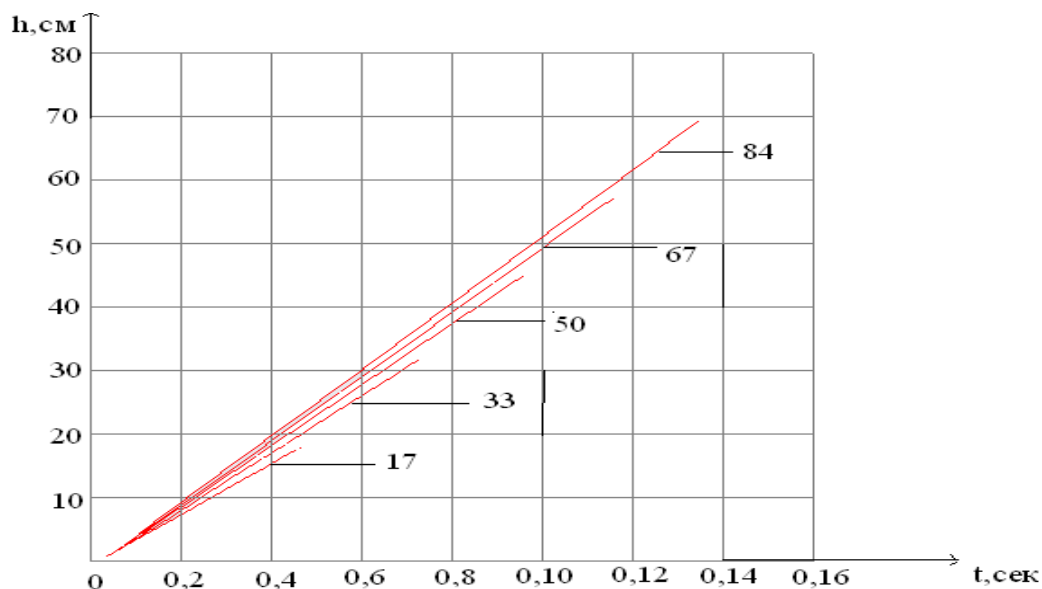


Рис. 3. График зависимости высота всплытия от времени для модификатора

Из графика (рис. 3) видно на какую высоту всплывет компонент и за какое количество времени в зависимости от массы частицы модификатора. Согласно проведенному исследованию видно, что чем больше размер и масса компонента, тем выше он всплывет.

Из графика (рис. 4) видно, что чем больше масса одного элемента модификатора, тем больше время его растворения в жидком чугуне.

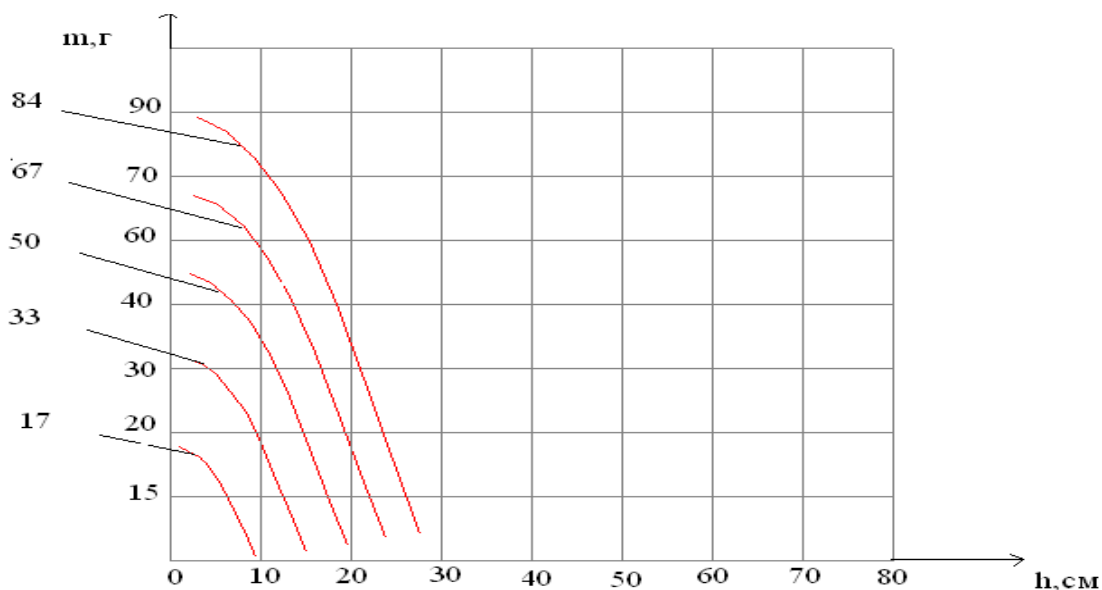


Рис. 4. Зависимость массы одного элемента модификатора от высоты всплытия

Из графика (рис. 4) видно, что чем больше масса одного элемента модификатора, тем выше высота всплытия до полного растворения.

Моделирование показало, что модификатор растворится, не успев подняться на поверхность ковша, а, следовательно, к этим условиям можно отнести тот момент, когда при сливе металла практически не будет перемешивания, получаемого в результате слива, процесс модифицирования осуществится. Теоретический расчет, на основании разработанной математической модели, позволил установить, что послойная укладка компонентов на дно ковша, наполненного расплавом исходного чугуна без последующего перемешивания всех компонентов, осуществляет растворение всех элементов, а средняя масса каждого должна находиться в пределах 10-40 г. Часть нерастворившихся компонентов в виде шлаковых композитов всплывет на поверхность зеркала металла и будет продолжать реагировать по мере того, как шлак перестает препятствовать растворению элементов.

Библиографический список

1. **Ковалевич, Е.В.** Эффективный модификатор для получения чугуна с шаровидным графитом // Литейное производство. – 2015. – №3. – С. 2–4.
2. **Волков, К.Н.** Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений / К.Н. Волков, В.Н. Емельянов. 2008. – 370 с.
3. **Гршилов, А.А.** Математические методы построения прогнозов / А.А. Гршилов, В.А. Стакун, А.А. Стакун. 1997. – 179 с.
4. **Джулиан Бакнелл.** Фундаментальные алгоритмы и структуры данных в Delphi / Д. Бакнелл. 2003. – 550 с.
5. **Бакженова, И.Ю.** Delphi 7. Самоучитель программиста / И.Ю. Бакженова. 2003. – 448 с.

*Дата поступления
в редакцию 26.10.2015*

R. N. Zenkin¹, N. N. Zenkin², A. I. Walter¹

MATHEMATICAL SIMULATION OF MELTING MAGNESIUM-BEARING MODIFIER DURING MODIFICATION OF DUCTILE CAST IRON WITH SPHERICAL GRAPHITE

Tula State University¹,
Tula, OAO "KMZ"².

In this paper major issue which was solved by mathematical simulation of melting process is complete dissolution of magnesium-bearing modifier. After reaction the the morphology of graphite was changed by modifier changed in that case if there will be no mixing of the metal stream during pouring it into the ladle. Development of the mathematical model based on the finite difference method which allows to define the dependence of the height of ascent of time dependence of mass, and ones element of the height of ascent.

Key words: magnesium, high-strength cast iron, magnetoactive slag, ligature.

УДК 620.1783:620.194.8

В.Г. Пачурин¹, В.В. Галкин², Г.В. Пачурин², А.А. Дербенев³**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ НА ЦИКЛИЧЕСКУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ДЕФОРМИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ**ООО «Нау стандарт»¹,Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²,ОАО «НАЗ» Сокол»³

В производственных условиях применение схемы технологического проектирования изготовления металлоизделий методами обработки давлением с обозначением связи между деформированным состоянием материала и формируемой им структурой с учетом циклической долговечности сдерживается недостаточностью средств информационной поддержки. Зависимости сопротивления усталости материала от условий технологического передела методами пластического деформирования весьма ограничены. В работе предложена схема оценки циклической долговечности пластически деформированного металла изделий, основанная на совершенствовании автоматизированного метода микроструктурного анализа размера зерна и совершенствования структуры технологического проектирования и информационного обеспечения для оценки усталостных характеристик материала. Результаты исследования могут быть использованы при расчетном сопровождении технологий проектирования, совершенствовании информационной базы в виде разработки инженерных приложений для конструкторско-технологического проектирования и производства листовых гофрированных обшивок, раскатанных заготовок с клиновидной поверхностью.

Ключевые слова: технологическое проектирование, листовая гофрированная панель, рессорный лист, микроструктура, деформация, циклическая долговечность.

Введение

Одной из основных задач структурной перестройки отечественной промышленности является ускоренное формирование национальной технологической базы по обеспечению конкурентоспособной продукции на внутреннем и внешнем рынках. Наиболее распространенным видом эксплуатационных разрушений инженерных конструкций является усталостное разрушение [1,2]. Поэтому вопросы работоспособности деталей, узлов, машин и технических устройств в целом являются приоритетными направлениями современной науки и важнейшей задачей промышленности.

В настоящее время в производстве используются металлические изделия, получаемые различными способами обработки. Практически все прочностные металлические детали машин изготавливаются из заготовок, полученных после обработки давлением. Условия эксплуатации изделий отличаются величиной, характером нагрузки, температурными условиями и средой, которые неоднозначно влияют на процессы упрочнения металла и его эксплуатационные свойства [3, 4, 5]. Вопросы усталостного разрушения металлов и сплавов подробно изложены в работах В.Ф. Терентьева, В.С. Ивановой.

Одним из основных факторов, влияющих на сопротивление усталости, является структурное состояние материала [6, 7, 8]. В число параметров структурного состояния входят размер зерна, тип структуры, состояние приповерхностного слоя, остаточные напряжения на уровнях суб-, микро-, макроструктуры и размеры изделия. На указанные параметры могут влиять технологические условия процесса изготовления изделия [9, 10]. Проблемы долговечности получаемых изделий и ее зависимость от предварительной деформации обозначены в работах Г.П. Гусяковой, Г.В. Пачурина, А.Б. Елькина, А.П. Гущина и других исследователей.

Следует указать на сложности, связанные с оценкой циклической долговечности металлоизделий, получаемых методами обработки давлением. Данная проблема является комплексной, затрагивающей кроме вопросов усталостной прочности проблемы теории пластично-

сти. Необходим анализ напряженно-деформированного состояния металла изготавливаемого изделия, которое изменяет его структурное состояние в результате технологического передела. Среди ученых, внесших значительный вклад в изучение данных явлений, необходимо назвать С.И. Губкина, М.В. Сторожева, А.А. Илюшина, В.П. Северденко, Г.А. Смирнова-Аляева и др.

В системе технологической подготовки производства изделий используются нормативные документы, в частности стандарт ГОСТ Р 50995.0.1-96, который определяет содержание и структуру технологического обеспечения (ТО). Она основана на целевом комплексном охвате технологических работ, в которые как подсистема входит технологическое обеспечение проектирования. В настоящее время отсутствует единая схема технологической подготовки проектирования изготовления металлоизделий методами обработки давлением с позиции прогнозирования циклической долговечности, в которой была бы обозначена связь между деформируемым состоянием материала и формируемой им структурой, от которой зависит сопротивление усталости. При этом можно отметить недостаточность эффективности средств информационной поддержки процесса конструкторско-технологического проектирования, которая касается с одной стороны процессов обработки давлением, с другой - циклической долговечности материала, обусловленной технологическим переделом. Одно и то же металлоизделие, как правило, можно изготовить различными технологическими процессами, которые отличаются температурно-скоростными условиями деформации и схемой деформирования. При этом в объеме получаемых поковок и листовых, заготовок формируется различная структура, отличающаяся величиной зерна, морфологией структуры, значением остаточных напряжений разных уровней. В работах В.Ф. Терентьева [11] прямо указывается, что главным при усталостном разрушении являются не осредненные характеристики сопротивления деформированию, а их величина в конкретных местах и элементах изделий, отвечающих за их эксплуатационную долговечность. Для взаимосвязи локальных деформированных объемов со структурным их изменением необходима количественная их оценка, автоматизация которой является одной из задач изложенной проблемы. В настоящее время основным направлением ее решения является компьютерное материаловедение.

Это подтверждает актуальность исследования по совершенствованию информационного; обеспечения технологического проектирования изготовления пластически деформированных металлических изделий с заданными усталостными характеристиками.

Методика

В качестве объектов исследований выбраны изделия, эксплуатируемые в условиях циклической долговечности: листовые гофрированные панели из сплава ЭИ 878 (12Х17Г9АН4) и рессорный лист с клиновидным профилем из стали 50ХГФА.

Материал панелей формовался по двум технологиям: на форм-блоке эластичной средой на гидропрессе в холодном состоянии и в жестких штампах на молоте с нагревом. Для определения напряженно-деформированного состояния был применен метод сеток. По местам замеров деформированной сетки рассчитаны характеристики деформированного состояния по конструктивным элементам - рифтам и построены графики изменения интенсивности итоговой деформации и толщины в зонах рифтов по поперечному и продольному сечениям [9, 12].

Структурно-механические и усталостные испытания проводились на образцах, которые вырезались из зоны рифтов по их гребням и впадинам. На основании обработки данных механических испытаний построены зависимости упрочнения сплава Ж 878 панелей, изготовленных на прессе и молоте.

Образцы из стали 50ХГФА вырезались методом проволочной электроэрозионной обработки из раскатанных на клин и термически обработанных листов [13]. Оценка деформированного состояния металла проводилось с помощью методов: определения изменения расстояний между вертикальными рисками (метод линий Холленберга), нанесенными на боковой поверхности прокатываемой полосы; замера деформации прокатанных винтов.

Экспериментальные исследования структуры включали: макро- и микроструктурный анализ с использованием оптической микроскопии на микроскопах МБС-10, МИМ-7; фрактографический анализ изломов на растровом электронном микроскопе типа SAMSUNG SEM 515 с применением цифрового фотографирования; рентгеноструктурный анализ на установке ДРОН-2; измерение релаксации напряжений на автоматизированной установке. Механические испытания включали стандартные испытания на растяжение согласно ГОСТ 1497 на испытательной машине УМЭ-10Г и измерение твердости по Роквеллу (ТК-2), Вickers (Zwick) и микротвердости. Испытания на усталость, проводились на образцах с использованием двухпозиционной установки [14] и на натуральных изделиях по стандартным и отраслевым методикам.

Результаты исследования

Листовая гофрированная панель из сплава ЭИ 878 (12Х17Г9АН4).

Структура стали сплава ЭИ 878 представлена на рис. 1.

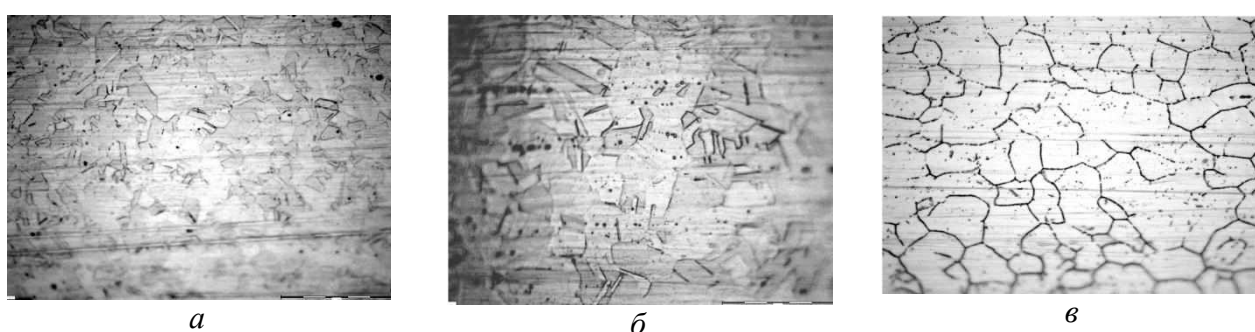


Рис. 1. Микроструктура сплава ЭИ 878:

а – состояние поставки, *б, в* – листовые гофрированные панели, изготовленные на прессе и на молоте (соответственно по фото) с утонением 15%

По результатам исследования деформированного состояния материала формованных листовых гофрированных панелей были получены следующие зависимости утонения в поперечном сечении синусоидального рифта в зависимости от схемы штамповки, определяемой конструкцией инструмента. При штамповке на прессе на форм-блоке эластичной средой степень деформации по толщине материала в поперечном сечении находится в интервале 10-15% с наибольшим утонением по впадине рифта, а при штамповке на молоте в жестком штампе, соответственно 10-30% с наибольшим утонением по гребню рифта. Причиной этого является принципиальное отличие схем штамповки. При штамповке на прессе по ходу процесса первоначально происходит защемление заготовки эластичной средой по гребням матрицы без ее защемления по периметру. Это обеспечивает возможность подтягивания в зону формовки фланца заготовки. При этом штамповка на прессе имеет техническую возможность постепенного увеличения давления эластичной среды в контейнере с большой равномерностью прикладываемых сил по поверхности заготовки.

При штамповке на молоте элементы жесткости получают постепенно за несколько переходов, при этом верхний инструмент своими гребнями концентрированно воздействует на заготовку, лежащую на нижнем инструменте. С целью предотвращения возникновения складок в формируемой заготовке на нижнем инструменте защемление заготовки по его периметру выполняются на первом переходе на технологических порогах. Многопереходность и постепенность процесса деформации обеспечиваются за счет стопки технологических прокладок, которые убираются на каждом последующем переходе. Полученные результаты объясняют необходимость штамповки гофрированных панелей из сплава ЭИ 878 на молотах с нагревом в действующем производстве (инструкция ВИАМ). Причиной является значительная неравномерность утонения и недостаточная пластичность материала при холодной обработке.

Рессорный лист с продольным клиновым профилем из стали 50ХГФА.

Микроструктура по всей длине рессорного листа состоит из сорбита и феррита (рис. 2). По длине прокатного листа определяется величина зерна.

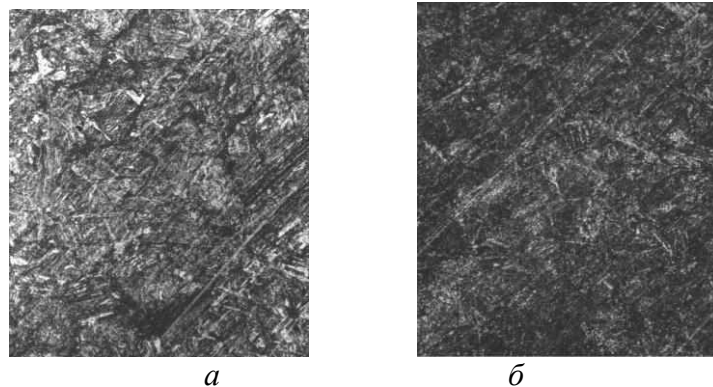


Рис. 2. Микроструктура исследуемых зон рессорного листа:
a – центральное отверстие;
б – сечение со степенью обжатия 40%

По результатам механических испытаний рассчитаны прочностные характеристики и показатели пластичности прокатанного и термически обработанного материала в зависимости от степени раскатки. Результаты испытаний на усталость представлены зависимостями циклической долговечности слоев раскатанной заготовки рессорного листа для двух степеней обжатия (рис. 3).

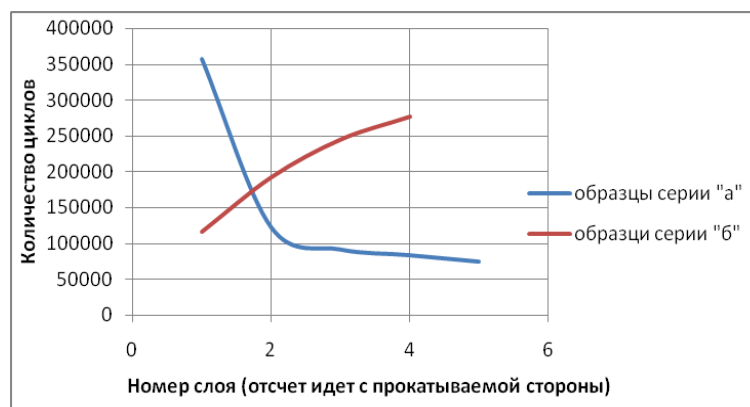


Рис. 3. Зависимость циклической долговечности слоев раскатанного листа из стали 50ХГФА со степенями обжатия:
a – 40%; *б* – 23 %

Анализ деформированного состояния металла в объеме раскатанной заготовки рессорного листа показал его неоднородность по слоям и по длине раскатки. Данный факт означает, что при разных степенях обжатия слои имеют различную степень деформации и определенную закономерность изменения: с начала прокатки и до степени обжатия $\approx 20\%$ наибольшую интенсивность деформации по удлинению имеют слои контактирующие с инструментом - валком, далее она смещается на слои, контактирующие с неподвижной плитой прокатного стана. При дальнейшем увеличении она вновь начинает смещаться к прокатываемой поверхности. Неоднородность деформированного состояния также подтверждается механическими характеристиками материала по поперечным сечениям прокатанной заготовки. Неравномерность деформации определяется особенностями строения очага, просматриваемого при математическом моделировании. При малых обжатиях до 4% зона локализации

представляет собой сомкнутый вершинами односторонний конус со стороны активного инструмента - валка. При степени обжатия 23% зона локализации также представляет односторонний конус, только его вершина соответствует поверхности заготовки, контактирующей с неподвижной плитой.

В дальнейшем геометрия зоны локализации в виде конуса начинает размываться и принимает сложную форму. Экспериментальное подтверждение данного факта было выполнено при анализе объема металла по месту контакта валка с заготовкой, зафиксированного в момент остановки процесса. Кроме того, неоднородное строение очага деформации подтверждается различной твердостью и структурой (рис. 4).

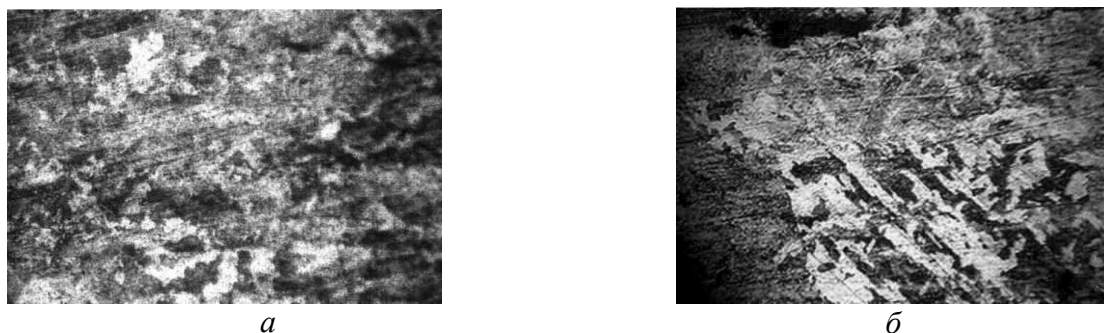


Рис. 4. Микроструктура прокатанной полосы стали 50ХГФА ($\times 270$):

a – зона с зёрнами феррита, имеющих равноосную форму; *б* – зона с вытянутыми зёрнами феррита.

Микроструктура прокатанной полосы стали 50ХГФА состоит из перлитных колоний и феррита и отличается неравномерностью, которая проявилась в размерах ферритной составляющей, имеющей практически по всему очагу деформации равноосную форму (рис. 4, *a*). Только для характерного участка с максимальной твердостью 34...36 *HRc* выявлены вытянутые зёрна феррита (рис. 4, *б*), что может свидетельствовать об отсутствии в данной области рекристаллизации.

В целом полученные результаты подтверждают модель построения очага деформации по С.И. Губкину, согласно которой максимальная деформация материала происходит по месту пересечения направлений максимальных тангенциальных напряжений, исходящих под углом 45 из точек границ периметра контакта валка с полосой.

Обсуждение результатов экспериментов

Из результатов усталостных испытаний сплава ЭИ 878 следует, что металл гофрированных панелей, изготовленных на прессе эластичной средой, имеет лучшие результаты по усталостной прочности (циклической долговечности) по сравнению с металлом панелей, штампованных на молоте в металлическом штампе. При этом в обеих технологиях сопротивление усталости материала повысилось по сравнению с его исходным состоянием. Объяснение полученных результатов проведено на основании комплексной методики исследований, включившей определение структурно-механических характеристик металла штампованных изделий. При холодной деформации повышение сопротивлению усталости вполне закономерно и соответствует положению теории усталости, согласно которому при уменьшении размера зёрен по их границам увеличивается сопротивление распространению трещин. Это подтверждается анализом микроструктур (рис. 1).

Штамповка на молоте с нагревом имеет более сложную картину. С одной стороны, металл нагревается до температур его рекристаллизации, что уменьшает сопротивление усталости. С другой, скорость деформации на молоте на два порядка выше скорости деформации на гидравлическом прессе. Поэтому процесс рекристаллизации металла гофрированных панелей происходит не в полной мере. Зависимости упрочнения металла, полученные

при механических испытаниях, согласуются с полученными результатами, подтверждающими вывод о том, что при горячей штамповке на молоте металл изделий имеет неполную рекристаллизацию.

Для случая холодного предварительного пластического деформирования полученные в работе результаты согласуются с ранее сформулированными положениями проф. Г.П. Гусяковой с сотрудниками, которые свидетельствуют о следующем. Во-первых, эффект влияния пластической деформации, в основном равномерной, на повышение ограниченного предела выносливости и циклической долговечности в диапазоне значений температур от 0,06 до 0,6 Тпл, К возрастает с увеличением способности материала к деформационному упрочнению при статическом растяжении [1]. Во-вторых, влияние предварительного деформирования на повышение ограниченного предела выносливости (на базе испытания 10^6 циклов) и долговечности (при $\sigma_a \approx 0,5 \sigma_b$) при разных температурах усиливается с улучшением способности материала в исходном состоянии к деформационному упрочнению, оцениваемой показателем A в уравнении кривой деформационного упрочнения при статическом нагружении [2].

Однако для условий горячей предварительного пластического деформирования в настоящее время основные характеристики, влияющие на сопротивление усталости материала, не выявлены. В условиях горячей раскатки полосовой заготовки на клин сопротивление усталости ее материала характеризуется сложной зависимостью. На рис. 5 приведены послойные зависимости циклической долговечности прокатанной заготовки из стали 50ХГФА со степенью обжатия 23% и 40%.

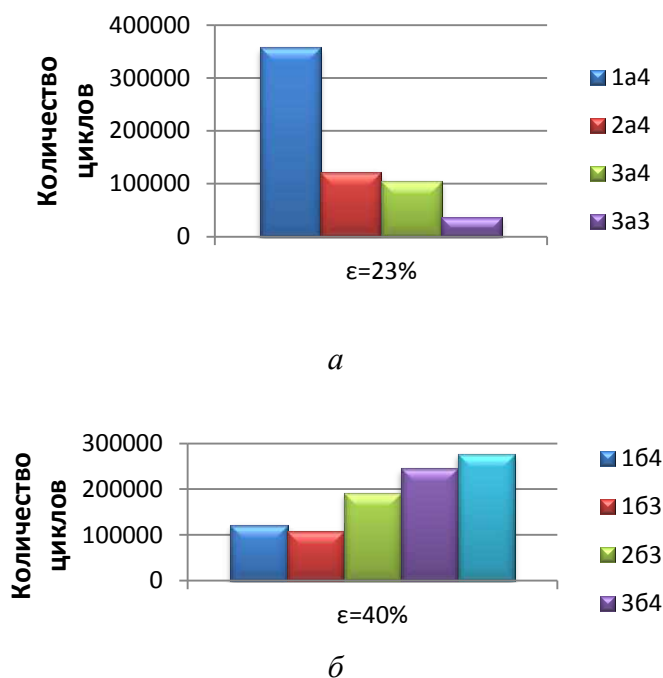


Рис. 5. Гистограммы зависимости циклической долговечности слоев (2 мм) прокатанной заготовки из стали 50ХГФА со степенью обжатия ϵ :
 $a - 23\%$; $b - 40\%$ (слои обозначены с поверхности прокатки)

Зависимости имеют сложную и неоднозначную форму. Данное обстоятельство свидетельствует о корреляции действительной степени деформации в слоях прокатываемой заготовки с величиной зерна, определяемой развитием процесса рекристаллизации в зависимости от степени деформации. Для процесса рекристаллизации при обработке давлением при высо-

ких температурах характерен значительный рост зерна при малых степенях деформации и последующее его уменьшение при дальнейшем увеличении ее степени. Как следствие, при раскатке призматической заготовки на клин при степени деформации $\varepsilon \approx 20\%$ размер зерна увеличивается с прокатываемой поверхности заготовки на поверхность, контактирующую с неподвижной опорой; при степени деформации $\varepsilon \approx 40\%$ тенденция изменяется. При этом уменьшается разность величины зерна по толщине заготовки, в силу уменьшения неравномерности деформации. Отсюда слои металла раскатанной заготовки, имеющие большую интенсивность рекристаллизационных процессов, и как следствие лучшую залечиваемость дефектов структуры, получаемых при деформации, имеют большее сопротивление усталости. Неравномерность рекристаллизации по объему рессорного листа также подтверждается неравномерностью прочностных характеристик материала. Полученные зависимости показателей механических свойств по длине горячекатаного листа сопоставимы со сформированной структурой. По всей длине листа она состоит из сорбита и феррита. По результатам металлографического анализа была обнаружена разнородность.

Таким образом, в качестве основного параметра, влияющего на сопротивление усталости пластически деформированных металлов и сплавов в условиях горячей обработки, можно рассматривать размер рекристаллизованного зерна. А именно, с увеличением степени рекристаллизации ухудшается циклическая долговечность материала.

Для определения размера зерна, отвечающего за сопротивление усталости материала, и построения диаграмм рекристаллизации 2-го рода в координатах «интенсивность деформации - средний размер (площадь) зерна - температура», на базе программного обеспечения NI Vision в среде разработки Lab VIEW фирмы National Instruments и программы Mathcad 14, разработан специализированный программный пакет [15], позволяющий выполнять автоматизированное построение трехмерной графической модели диаграммы и производить оценку неравномерности степени рекристаллизации.

В состав пакета входят две программы. Первая обеспечивает количественные измерения и обсчет микроструктуры металла. Для этого производится бинаризация цифровых фотографий микроструктуры, в результате которой элементы изображения разделяются на объекты - зерна и фон.

Фотографии микроструктур выполняются на продольных шлифах двух осаженных заготовок со степенью деформации по высоте 10% и 57%. Исследования производятся в местах, определяемых координатной сеткой. Для определения в местах исследования величины интенсивности деформации было выполнено математическое моделирование процессов осадки заготовок с применением программного комплекса «DEFORM-3D».

Результаты расчета программы, в виде подсчитанного числа зерен, их размеров (средней площади) и гистограммы распределения, сохраняются в пакете текстового редактора Microsoft excel, а также выводятся на интерфейс программы.

Программа выполняет построение графических моделей диаграмм рекристаллизации в виде трехмерного изображения взаимосвязи размера зерна, температуры и интенсивности деформации. При необходимости программное обеспечение обеспечивает выведение сечения трехмерного изображения при конкретной температуре или интенсивности деформации.

Таким образом, результаты комплексных исследований позволили уточнить информационное обеспечение, необходимое для прогнозирования усталости пластически деформированного материала изделий. Очевидна необходимость проведения деформационного анализа в силу того, что основной особенностью пластической деформации является неоднородность деформированного состояния формоизмененного изделия. При этом в качестве характеристики необходимо использование интенсивности деформации, которая позволяет определить значение конечной и итоговой деформации материальной точки, независимо от схемы формоизменения.

Выводы

1. Выполнено уточнение теории очага деформации, выразившееся в установлении основных закономерностей строения очага деформации и его изменений по ходу процесса в технологических процессах раскатки плоской заготовки на клин на плите и изготовление конструктивного элемента - рифта в листовых жесткостях.

2. Предложена схема оценки циклической долговечности пластически деформированного металла изделий, основанная на совершенствовании метода микроструктурного анализа для определения размера зерна и усовершенствования структуры технологического проектирования и информационного обеспечения для оценки деформированного состояния, структурно-механических и усталостных характеристик материала.

Библиографический список

1. **Пачурин, Г.В.** Коррозионная долговечность изделий из деформационно-упрочненных металлов и сплавов: учеб. пособие / Г.В. Пачурин. – 2-е изд., доп. – СПб.: Издательство «Лань», 2014. – 160 с.
2. Усталостное разрушение при разных температурах и долговечность штампованных металлоизделий: монография / Г.В. Пачурин [и др.]; под общей ред. Г.В. Пачурина; НГТУ. – Н. Новгород, 2010. – 169 с.
3. **Пачурин, Г.В.** Усталостное разрушение при нормальной температуре предварительно деформированных сплавов // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1990. – №10. – С. 35–38.
4. **Пачурин, Г.В.** Долговечность штампованных конструкционных материалов на воздухе и в коррозионной среде // *Заготовительные производства в машиностроении.* – 2003. – №10. – С. 21–27.
5. **Пачурин, Г.В.** Долговечность пластически деформированных коррозионно-стойких сталей // *Вестник машиностроения.* – 2012. – № 7. – С. 65–68.
6. **Пачурин, В.Г.** Формирование структуры хромистых сталей под высадку болтов / В.Г. Пачурин, А.А. Филиппов, Г.В. Пачурин // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований.* – 2011. – № 9. – С. 55–59.
7. **Pachurin, G.V.** Ruggedness of structural material and working life of metal components // *Steel in Translation.* – 2008. – №3. – Т. 38. – P. 217–220.
8. **Pachurin, V.G.** Fatigue resistance stamped on the grind and press shell plate alloy ЭИ 878 / V.G. Pachurin, V.V. Galkin, G. Pachurin // *Modern scientific research and their practical application*, edited by Alexandr G. Shibaev, Alexandra D. Markova. Vol.J 11410-020. – P. 110–114. (Kupriyenko SV, Odessa, 2014) - URL: http://www.sworld.com.ua/e-journal/jl_1410.pdf (date: 01.06.2014).
9. **Галкин, В.В.** Структурно-механические и усталостные свойства штампованных на молоте и прессе листовых гофрированных панелей из сплава ЭИ 878 / В.В. Галкин, В.Г. Пачурин, Г.В. Пачурин // *Фундаментальные исследования.* – 2013. – №10 (часть 15). – С. 3294–3298.
10. **Пачурин, В.Г.** Сопrotивление усталости штампованных на молоте и прессе листовых панелей из сплава ЭИ 878 / В.Г. Пачурин, В.В. Галкин, Г.В. Пачурин // *Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте, 2013: мат. междунар. научно-практич. конф.* – Одесса: КУПРИЕНКО СВ., 2013. – Вып. 4. – Т. 16. – С. 26–29.
11. **Терентьев, В.Ф.** Усталостная прочность металлов и сплавов / В.Ф. Терентьев. – М.: Интермет Инжиниринг, 2002. – 228 с.
12. **Пачурин, Г.В.** Эксплуатационная долговечность листовых гофрированных заготовок из некоторых титановых сплавов / Г.В. Пачурин, В.В. Галкин, В.Г. Пачурин // *Фундаментальные исследования.* – 2014. – № 11 (Ч. 4). – С. 765–773.
13. **Пачурин В.Г.** Оценка деформационной неоднородности в раскатанных изделиях с клиновым профилем / В.Г. Пачурин, В.В. Галкин, Г.В. Пачурин // *Фундаментальные исследования.* – 2014. – №11 (Ч. 4). – С. 765–773.
14. **Пачурин, Г.В.** Двухпозиционная установка для усталостных испытаний тонколистовых сварных образцов / Г.В. Пачурин, Г.П. Гуслякова // *Заводская лаборатория.* – 1980. – №10. – С. 969.

15. Манцеров С.А., Галкин В.В., Терещенко Е.Г., Дербенев А.А., Хадеев Р.Г., Пачурин В.Г. Определение величины зерна для оценки степени рекристаллизации горячедеформированных сталей и сплавов. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2105611190. Заявка № 2014662663 от 09.12.2014 г. Дата гос. регистр. В реестре программ для ЭВМ 26.01.2015 г.

*Дата поступления
в редакцию 09.12.2015*

V.G. Pachurin¹, V.V. Galkin, G.V. Pachurin¹, A.A. Derbenev²

**ASSESSMENT OF STRUCTURAL CONDITION FOR CYCLIC DURABILITY
DEFORMED MATERIAL**

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alexeev¹,
"NAZ" Sokol "²

In industrial environments the use of schemes for technological design methods of manufacturing metal forming labeled connection between the deformed state of the material and formed their structure with the cyclic life, is constrained by lack of IT support. Depending on the fatigue resistance of the material conditions of the technological conversion methods of plastic deformation is limited. The paper presents the evaluation scheme cyclic durability of plastically deformed metal products, based on the improvement of the automated method of microstructural analysis of the grain size and improving the structure of the design process and provide information to assess the fatigue characteristics of the material. The results can be used in the settlement, accompanied by design technologies, improving the knowledge base in the form of the development of engineering applications for structural and technological design and manufacture of corrugated sheet metal cladding, roll pieces with a wedge-shaped surface.

Key words: process design, sheet corrugated panel, spring leaves, microstructure, deformation, cyclic durability.

УДК 389.6+658.5

Е.В. Зимина, В.Н. Кайнова

РОЛЬ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ В ПОВЫШЕНИИ ПРОЕКТНОГО КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Указана значимость метрологической экспертизы (МЭ) технической документации в повышении проектного качества изделий. Выполнен анализ типовых ошибок КД, обнаруженных при МЭ машиностроительных чертежей. Отмечена необходимость решать вопросы МЭ в САД-системах.

Ключевые слова: проектное качество, техническая документация, единство измерений, контролепригодность, геометрические параметры, нормы точности, взаимоувязка назначаемых параметров, погрешности измерения, выбор средств измерения, затраты и потери на качество.

Метрологическая экспертиза (МЭ) – анализ и оценка правильности установления и соблюдения метрологических требований применительно к объекту, подвергаемому экспертизе [1].

Метрологическую экспертизу технической документации проводят путем анализа и оценивания технических решений в части метрологического обеспечения (технических решений, касающихся измеряемых параметров, установления требований к точности измерений, выбора методов и средств измерений, их метрологического обслуживания) [2].

Принято различать проектное качество, производственное и эксплуатационное. Потребитель оценивает эксплуатационное качество, которое закладывается на этапе проектирования, а создается на этапе производства. Очень важно на этапе проектирования устранить все недостатки и повысить проектное качество, обеспечив контролепригодность, безопасность и надежность эксплуатации изделия. В проектные документы включают практически все основные параметры функционального назначения изделия, а также требования к метрологическому обеспечению изделия как на этапах производства, так и на этапах сертификационных и инспекционных испытаниях [3].

Знаменитый авиаконструктор А.А. Туполев указывал на важность повышения проектного качества, отмечая: «Чем дальше от доски конструктора обнаруживается ненадежность, тем дороже она обходится» [4].

Изменения в техническую документацию необходимо вносить на первых этапах (при метрологической экспертизе, технологической проработке, нормоконтроле) жизненного цикла изделия, а не в условиях крупносерийного, массового производства. Установлено, что ухудшение качества в n раз приводит к увеличению затрат на исправление дефектов в $\langle 10^n \rangle$ раз, т.е. действует правило 10-кратного увеличения затрат на исправление несоответствий (ошибок, дефектов) от проекта к готовому изделию (рис. 1).

В отраслях машиностроения (приборостроения) большой объём составляют измерения геометрических параметров. Точность геометрических параметров деталей характеризуется точностью размеров, шероховатостью, формой и расположением поверхностей, обеспечение которых технологически взаимозависимо. Увеличение нагрузок, скоростей, рабочих температур, характерных для современных машин и приборов, усиливает воздействие этих параметров на работоспособность и долговечность машин.

Анализ опыта проведения МЭ машиностроительных чертежей показал наличие следующих типовых ошибок в КД:

1) допуски формы на ответственных поверхностях назначаются конструктором без увязки с допуском размера, без учета жесткости конструкции детали, определяемой соотношением $L/2d$, или часто отсутствуют совсем;

2) допуски расположения задаются необоснованно, без учета условий работы или они неконтролепригодны ввиду неправильного выбора базовой поверхности (грубо обработанной и малой длины по сравнению с контролируемой);

3) при нормировании шероховатости поверхности не обеспечиваются минимально необходимые требования по параметру R_a , что может привести к дополнительной погрешности измерения;

4) не соблюдаются соотношения между допуском размера и геометрическими допусками, (формы и расположения поверхностей), а также требованиями к шероховатости поверхности;

5) задается большая номенклатура контролируемых параметров (общие допуски мало применяются);

6) выбор средств измерений (СИ) производится необоснованно, применяются не соответствующие СИ, что может привести к недостоверным результатам измерений и значительным потерям.

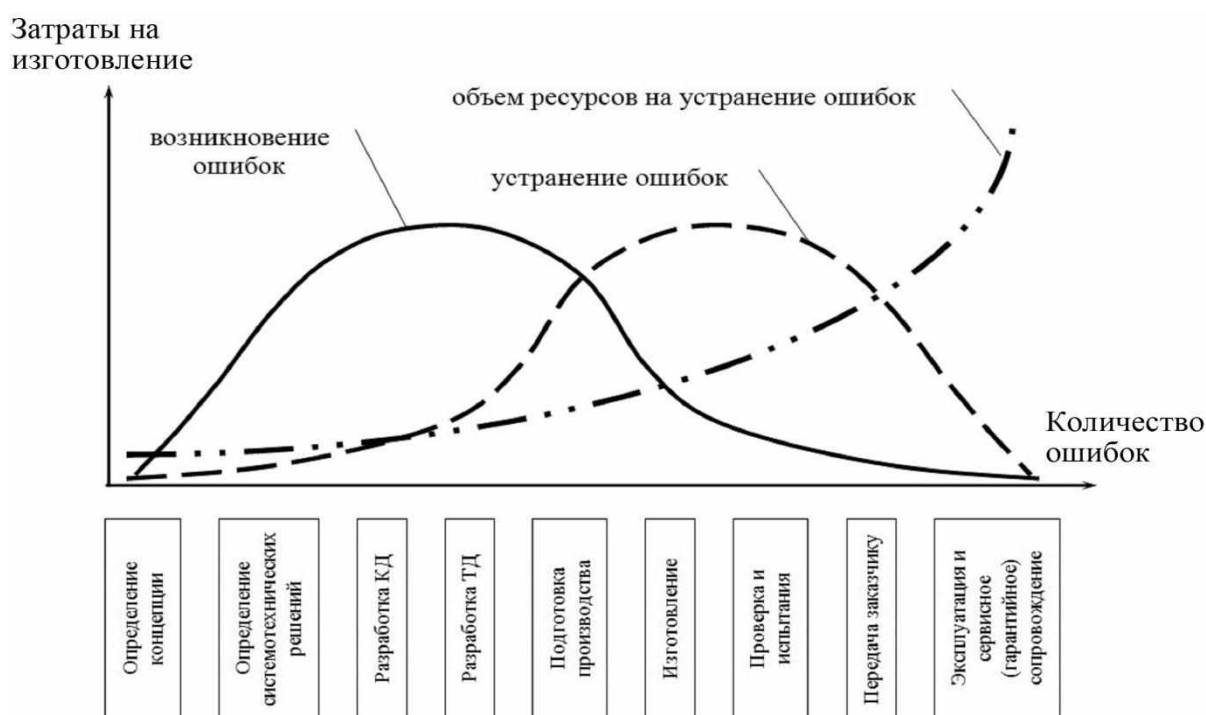


Рис. 1. Роль нормоконтроля и метрологической экспертизы в повышении качества изделия и сокращении затрат на устранение несоответствий

При выполнении МЭ важной задачей является контролепригодность конструкции детали (изделия), которая оценивается по исключению факторов, влияющих на увеличение погрешности измерения (погрешности базирования, погрешности метода и средства измерения, погрешности от шероховатости контролируемой поверхности и др.).

С целью уменьшения погрешности базирования должен соблюдаться принцип единства баз, т.е. измерительная база должна быть конструкторской, технологической и эксплуатационной. При нарушении принципа единства баз необходимо выполнять расчет размерной цепи, связывающей эти базы. У одной детали необходимо иметь минимальное количество баз, т.к. иначе сложнее и дороже контроль, а также больше погрешности измерения. Если на чертеже несколько баз, то они должны быть связаны допусками расположения [5].

Измерительная база должна быть материально оформлена, иметь достаточную протяженность, высокую точность обработки по размерам, форме и шероховатости поверхности. Погрешность базирования является одной из систематических составляющих суммарной по-

грешности измерения. Ее величина зависит от точности изготовления базовой поверхности, т.е. от допуска на размер, допуска формы поверхности при базировании вала на призмы, смещения центров при использовании в качестве базы оси центров, величины зазора при базировании на оправку.

Фактическая (реальная) погрешность базирования должна быть меньше или равна допускаемой погрешности базирования по условию (1), которая определяется расчетным методом по конкретным заданным параметрам по формуле (2) или по ГОСТ 28187-89 [6].

Фактическая погрешность базирования зависит от схемы базирования (в центрах, на призме, на оправке, по плоскости или др.), от точности выполнения базовой поверхности, от соблюдения принципа единства баз, жесткости конструкции детали и приспособления и от других факторов.

$$\delta_{\text{баз}} \leq [\delta_{\text{баз}}], \tag{1}$$

где $\delta_{\text{баз}}$ – погрешность базирования по реальной поверхности базы; $[\delta_{\text{баз}}]$ – допускаемая погрешность базирования.

$$[\delta_{\text{баз}}] = (0,2 \div 0,3) T_p L_{\text{баз}} / L_{\text{контр}}, \tag{2}$$

где $L_{\text{баз}}$ – длина базовой поверхности; T_p – контролируемый допуск расположения; $L_{\text{контр}}$ – длина контролируемой поверхности.

Если неравенство нарушено, то указанный допуск расположения T_p является неконтролепригодным. Необходимо повысить точность базы (уменьшить допуск размера базовой поверхности детали $T_{\text{баз}}$ и задать допуск формы поверхности) или увеличить допуск расположения T_p , заданный чертежом.

Рассмотрим на примере детали «Вал» (рис. 2).

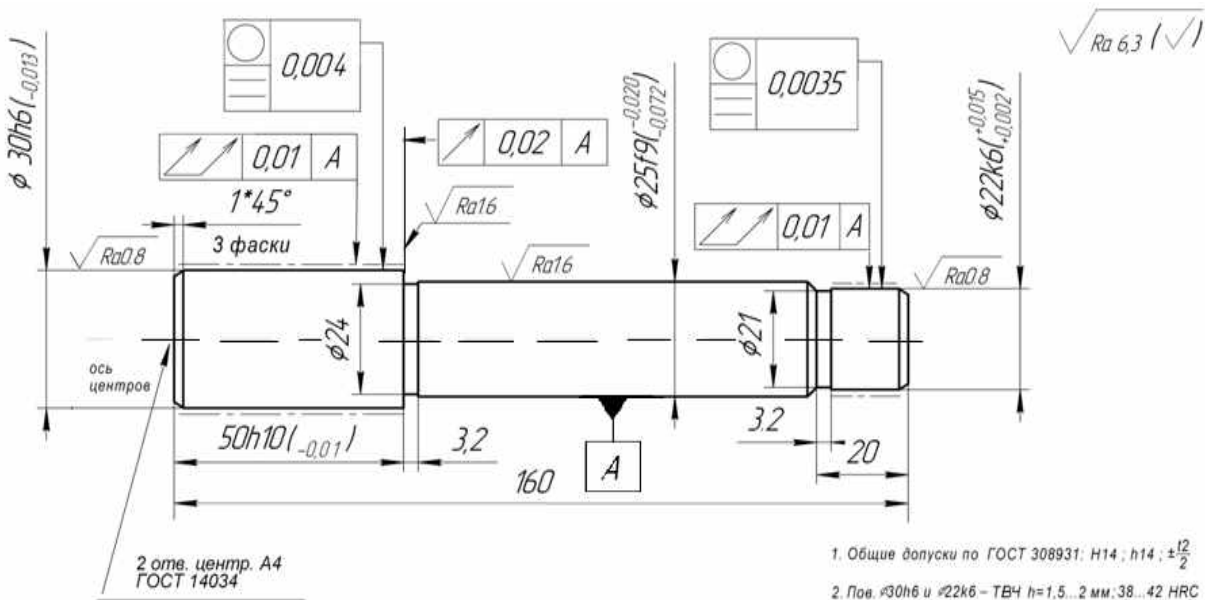


Рис. 2. Вал

Для допусков радиального и торцового биений вала на рис. 1 задана измерительная база А – $\phi 25f9 (-0.020, -0.072)$ с допуском $T_{\text{баз}} = 0,052$ мм. При измерении биения поверхностей вала с установкой на призмы (ножи) следует принять:

$$\delta_{\text{баз}} = T_{\text{ф}},$$

где $T_{\text{ф}}$ – допуск формы базовой поверхности не ограничен, его можно принять, как общий допуск, равный половине допуска на размер, т.е. $T_{\text{ф}} = 0,5T_{\text{баз}} = 0,026$ мм или 26 мкм.

При установке вала на призму принимают: $L_{\text{баз}}$ равна длине ступени вала, расположенной на призме; $L_{\text{кнтр}}$ равна длине контролируемой ступени вала для радиального биения, а для торцового биения - радиусу контролируемого торца $L_{\text{кнтр}} = d/2$.

Выполнен расчет допустимой погрешности базирования вала по формуле (2) при измерении заданного допуска радиального биения $T_p = 10$ мкм поверхности $\varnothing 30h6$ на длине $L_{\text{кнтр}} = 50$ мм, при длине $L_{\text{баз}} = 160 - 50 - 20 = 90$ мм.

$$[\delta_{\text{баз}}] = 0,2 \cdot 10 \cdot 90 / 50 = 3,6 \text{ мкм.}$$

Расчетная (требуемая) погрешность базовой поверхности 3,6 мкм в несколько раз меньше заданного допуска $T_{\text{баз}} = 52$ мкм и допуска формы базовой поверхности $T_{\text{ф}} = 26$ мкм. Условие (1) не выполняется, $26 > 3,6$. Поверхность, выполненная по 9 квалитету не может быть принята за базу при контроле поверхностей более точного 6 квалитета. Следовательно, необходимо ужесточить требования к базовой поверхности, либо выбрать другую базу. Если деталь имеет технологическую базу – ось центров, то рационально ее принять за измерительную базу, т.е. соблюдать принцип единства баз.

Если базой служит ось центров, то расчет по формуле (2) выполнять нельзя, так как ось не материальная база. В приспособлениях с центрами должны быть заданы и периодически контролироваться погрешности на взаимное расположение центровых бабок (параллельность направляющих, перекос осей). При базировании детали в центрах величина смещения линии измерения зависит от перекоса центров ($\Delta_{\text{ц}}$), диаметра детали (d) и расстояния между центрами (длиной детали – L):

$$\delta_{\text{баз}} = \Delta_{\text{ц}} d/L \quad (3)$$

Выполнен расчет при базировании вала в центрах. Допускаемая погрешность измерения по ГОСТ 28187-89 при измерении заданного радиального биения $T_p = 10$ мкм составляет $[\delta_{\text{баз}}] = 3,5$ мкм, перекос центров задан $\Delta_{\text{ц}} = 0,01$ мм.

Погрешность базирования вала в центрах по формуле (3):

$$\delta_{\text{баз}} = 0,01 \cdot 30 / 160 = 0,002 \text{ мм} = 2 \text{ мкм.}$$

Следовательно, заданный допуск по условию (1) контролепригоден ($2 < 3,5$). Для обеспечения соблюдения принципа единства баз на чертеже рекомендовано принять в качестве измерительной базы ось центров вала.

Основные задачи метрологического обеспечения любого объекта: **что измерять и чем измерять?**

Выбор средств измерений зависит от большого количества факторов, которые необходимо учитывать [5]. Условно их можно разделить на три группы.

1. Организационно-технические факторы зависят от специфики производства (типа производства, стабильности техпроцесса, обеспечения полной или групповой взаимозаменяемости и т.п.). Формы контроля могут быть в виде сплошного 100%-го контроля всех деталей (для единичного, мелкосерийного производства, нестабильного техпроцесса, групповой взаимозаменяемости) и в виде выборочного, статистического контроля (для крупносерийного, массового производства, полной взаимозаменяемости, стабильного техпроцесса). Универсальные средства измерений находят широкое применение во всех типах производства, так как имеют низкую себестоимость. Производительность операций контроля при этом также низкая. Применение специальных средств измерения должно быть экономически обосновано.

2. Конструктивные параметры изделия (габариты, масса, жесткость конструкции, конструктивные особенности, доступность к точкам контроля и контролируемый размер) также существенно влияют на выбор методов и средств измерения. Могут быть использованы контактные и бесконтактные, абсолютные и относительные, прямые и косвенные методы измерений, а также стационарные и переносные средства измерений (для крупногабаритных деталей).

Для деталей нежесткой конструкции необходимо применять бесконтактные методы

измерений. Косвенные методы используются в том случае, если непосредственное измерение размера невозможно. Применяются различные средства измерений для деталей типа вал, втулка (отверстие), зубчатое колесо, резьбовая деталь и так далее.

3. Метрологические характеристики средств измерений (цена деления, пределы или диапазон измерения, погрешность и класс точности), которые необходимо согласовывать с контролируемыми параметрами изделия. Для всех видов измерений установлено, что погрешность измерения не должна превышать 20 или 35 процентов от контролируемого допуска или цена деления шкалы СИ должна быть равна $(1/6 \dots 1/10)T$.

До начала процесса измерения должны быть приняты меры по исключению возможных систематических погрешностей (соблюдать температурный режим, проверить наличие свидетельства о поверки или калибровки СИ и другие меры). Если систематическая погрешность (инструментальная) является доминирующей, то измерение достаточно выполнить один раз. Однократные измерения наиболее часто встречаются при техническом контроле изделий машиностроения. При выполнении однократных измерений прямым методом погрешность результата определяется инструментальной погрешностью с вероятностью $P=0,95$, при которой выполняется поверка средств измерений.

Выбор средств измерений для однократных измерений заключается в сравнении инструментальной систематической погрешности – Δ (РД 50-98-86) [9] с допускаемой погрешностью измерения – $[\delta_{\text{баз}}]$ (ГОСТ8.051-81) [10], в установлении приемочных границ и приемочного процента риска.

Необходимо соблюдать условие $\Delta \leq [\delta_{\text{баз}}]$.

Если случайная погрешность больше (доминирует) систематической, то необходимо выполнять многократные измерения, а погрешность среднего арифметического должна быть меньше инструментальной погрешности СИ. Выбор необходимого числа измерений производится таким образом, чтобы инструментальная погрешность определяла точность результата. При выполнении многократных измерений прямым методом погрешность результата уменьшается в \sqrt{n} раз, где n – число выполненных измерений. После обработки результатов измерений ответ должен содержать среднее арифметическое значение, доверительный интервал и доверительную вероятность P .

Погрешности измерений являются источником неблагоприятных событий, таких как экономические потери из-за брака, возможность травматизма, загрязнение окружающей среды и т.д. Повышение точности измерений снижает размеры этих последствий, однако требует вложения дополнительных затрат. Применяемые средства измерения должны обеспечить оптимальное значение погрешности измерения, т.е. необходимо оценивать затраты на измерения и потери от ложного брака (рис. 3).

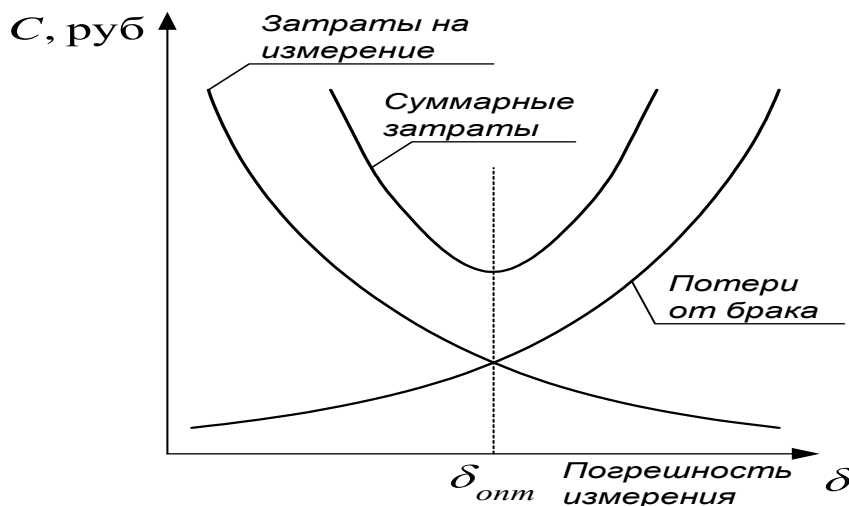


Рис. 3. Влияние погрешности измерения на стоимость изделий

Ориентировочный расчет потерь за счет погрешности измерения:

$$\Pi = \delta_{\text{изм}}^2.$$

Ориентировочный расчет затрат на измерения:

$$З = 1 / \delta_{\text{изм}}.$$

Потери производства пропорциональны квадрату погрешности измерения, а затраты обратно пропорциональны ей [2]. Увеличение погрешности в два раза приводит к увеличению потерь в 4 раза, а затраты на измерения уменьшаются лишь на 50%.

Метрологическая служба предприятия контролирует правильность выбора и эксплуатации средств измерений, осуществляет поверку (калибровку) и аттестацию средств измерений.

Метрологи-эксперты должны разбираться как в вопросах метрологии, так и в проектных и производственных требованиях и задачах. Рассмотрение вопросов и задач, решаемых при метрологической экспертизе технической документации, показывает, что метролог-эксперт должен ориентироваться в большом объеме разных критериев и методов оценки, нормативных документах по вопросам метрологии, ЕСКД и ЕСТД.

Анализ возможностей современных САД-систем показал, что существующие САД системы не обеспечивают конструкторскую, технологическую и метрологическую поддержку разработчика при проектировании деталей [7, 8]. В САД-системах есть встроенные библиотеки для выбора допусков размеров, формы, расположения, параметров шероховатости. Конструктор выбирает допуски из предлагаемого списка, отклонения при этом проставляются автоматически. Но в системах отсутствует проверка взаимосвязки назначаемых параметров системой, автоматический выбор или расчет поля допуска по виду поверхности и ее размеру, условиям работы для обеспечения зазора, натяга в соединении поверхностей и т.д.

Все это приводит к ошибкам в рабочих чертежах, неправильному составлению технологии изготовления, к доработкам документации, потере времени при подготовке производства и снижению качества выпускаемых изделий.

Автоматизация проработки чертежей значительно облегчит труд проектировщика, метролога-эксперта, сократит затраты времени и повысит качество конструкторской документации.

Выводы

1. Метрологическая экспертиза технической документации, так же, как и нормоконтроль, позволяет повысить проектное качество создаваемых изделий, что в свою очередь сокращает затраты на производство и в дальнейшем на эксплуатацию сложных технических систем.

2. Основные вопросы метрологического обеспечения любого объекта: **что измерять и чем измерять?**

3. При выполнении МЭ важной задачей является оценка контролепригодности конструкции детали (изделия).

4. Потери производства пропорциональны квадрату погрешности измерения, а затраты обратно пропорциональны ей.

5. Выполнение МЭ в системе САД является перспективным направлением развития работ по автоматизация интеллектуального труда.

Библиографический список

1. Российская Федерация. Законы. Об обеспечении единства измерений: федер. закон от 26.06.2008 № 102-ФЗ: принят ГД ФС РФ 11.06.2008: ред. от 27.07.2014 // Консультант – Плюс. – Электрон. дан.
2. РМГ 63-2003. ГСИ. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Метрологическая экспертиза технической документации.
3. Метрологическая экспертиза технической документации / Ю.Р. Яковлев [и др.]. – М.: Изд-во стандартов, 1992.

4. Сертификация сложных технических систем / Л.Н. Александровская [и др.]; под ред. В.И. Круглова: учеб. пособие.– М.: Логос, 2001. – 312 с.
5. **Кайнова, В.Н.** Метрологическое обеспечение машиностроительного производства: учеб. пособие / В.Н. Кайнова [и др.]; НГТУ. – Н. Новгород, 2003.
6. ГОСТ 28187-89 «Основные нормы взаимозаменяемости. Отклонения формы и расположения поверхностей. Общие требования к методам измерений».
7. **Андреев, В.В.** Автоматическое формирование массива конструктивно-технологических признаков деталей интеллектуальной информационной системой / В.В. Андреев, Е.В. Тесленко // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2010. – №3. – С. 170–174.
8. **Андреев, В.В.** Интеллектуальная информационная система технологического проектирования в САД-системах / В.В. Андреев, Е.В. Тесленко // Научно-технический вестник Поволжья. – 2011. – №6. – С. 90–92.
9. РД 50-98-86 Руководящий нормативный документ. Методические указания. Выбор универсальных средств измерений линейных размеров до 500 мм. (По применению ГОСТ 8.051-81).
10. ГОСТ 8.051-81 ГСИ. Погрешности, допускаемые при измерении линейных размеров до 500 мм.

*Дата поступления
в редакцию 25.10.2015*

E.V. Zimina, V.N. Kaynova

THE ROLE OF METROLOGICAL EXPERT EXAMINATION OF TECHNICAL DOCUMENTATION TO IMPROVE PROJECT QUALITY

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

Purpose analysis of the significance of metrological examination of design documentation in improving design quality engineering products. Consideration is metrological expertise of working drawings in which the designer performs the valuation accuracy of the parameters of the functional purpose of products. Metrologist-expert checks the validity of job parameters and ensure their testability.

Methodology/ approach the analysis of the typical errors of design documentation identified in metrological expert examination of engineering drawings.

Research limitations/implications identified in metrological expertise inconsistencies reduce the cost of their removal in subsequent stages of production.

Originality/value the machine-building enterprises are recommended to ensure the quality of products with the release of design documentation to enhance the role of Metrology expert and enter his signature in the sheet format. The implementation of metrological expertise in the CAD system is a promising direction of development of works on automation of intellectual labor.

Key words: project quality, design documentation, the unity of measurements, the testability, geometrical parameters, standards of accuracy, the integration of assignable parameters, measuring error, the choice of means of measurement, the costs and losses in quality.

УДК 378.147

Т.А. Неделева

ОСОБЕННОСТИ ПОДГОТОВКИ СТУДЕНТОВ ОЧНО-ЗАОЧНОЙ И ЗАОЧНОЙ ФОРМ ОБУЧЕНИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОФИЛЯ В ОБЛАСТИ ПРОФЕССИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматриваются вопросы эффективного изучения информационных технологий студентами очно-заочной и заочной форм обучения машиностроительного профиля.

Ключевые слова: форма обучения, информационные технологии, CAD, CAM, CAE, CAPP, PDM.

Стремительное развитие информационных технологий вместе с открывающимися перспективами поставило целый ряд проблем, связанных, в том числе, и с подготовкой кадров, способных работать в условиях информационного общества. Это предъявляет серьезные требования к высшим учебным заведениям, призванным обеспечивать общество высококвалифицированными специалистами, и заставляет их искать новые пути повышения эффективности учебного процесса.

Наряду с общими задачами, которые приходится решать вузам в рамках любого направления и любой формы обучения, можно выделить и частные проблемы, характерные для конкретного высшего учебного заведения, направления подготовки, формы обучения и даже дисциплины.

Возьмем, например, актуальные для педагогов вопросы «Чему учить?» и «Как учить?». Для дисциплин, связанных с подготовкой в области профессионально-ориентированных информационных технологий, зачастую к ним можно добавить еще один – «Кого учить?», или, точнее, «Кого учим?». Рассмотрим этот вопрос применительно к направлению подготовки 151900 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» очно-заочной и заочной форм обучения.

Разработка и техническая подготовка изделий машиностроения предполагает выполнение определенной стандартами последовательности действий [1]. К основным процессам принято относить конструкторское и технологическое проектирование (КТП), к вспомогательным – организацию информационной поддержки КТП и управление бизнес-процессами промышленного предприятия. Современные системы автоматизированного проектирования в области машиностроения (профессионально-ориентированные информационные технологии в контексте данного исследования) направлены на поддержку процессов конструкторско-технологической подготовки производства и включают в себя:

- САД-системы, предназначенные для решения конструкторских задач и автоматизации оформления проектно-конструкторской документации;
- САМ-системы, предназначенные для проектирования процессов обработки изделий на станках с числовым программным управлением;
- САЕ-системы, позволяющие решать задачи анализа, моделирования, оптимизации проектных решений;
- САРР-системы, осуществляющие компьютерную поддержку проектирования технологических процессов, трудового и материального нормирования и разработки технологической документации;
- РДМ-системы, решающие задачи интеграции и хранения информационной модели изделия [2, 3].

Комплексный характер систем автоматизации в машиностроении обеспечивается объектно-центричным подходом, основанным на использовании универсальной геометрической модели изделия, выполненной в САД-системе [4].

В число основных требований, предъявляемых к молодым специалистам на предприятиях, в конструкторских и технологических бюро, как можно заключить из предложений о наборе кадров, включается наличие знаний и практических навыков применения профессионально-ориентированных информационных технологий в инженерной деятельности и в первую очередь навыков работы в САД-системе.

Исходя из этого, для организации эффективного учебного процесса необходимо иметь современные программные и технические средства в области автоматизации машиностроения, методические материалы и применять соответствующие педагогические технологии. Однако, на степень восприятия изучаемого материала, отношение к дисциплинам, связанным с применением информационных технологий, например, у студентов очно-заочной и заочной форм обучения могут оказывать влияние и внешние факторы, связанные с возрастом, местом работы и т.д. Для определения таких факторов в течение нескольких лет в начале 2 курса мы проводим анонимный опрос студентов всех форм обучения относительно их предыдущего образования, возраста, текущего и предыдущего мест работы, субъективной оценки знаний в области общесистемных (Windows, MSOffice и др.) и профессионально-ориентированных информационных технологий.

Как показывают результаты опросов, у студентов очной формы обучения уровень владения общесистемными информационными технологиями приблизительно одинаков и предполагает навыки работы с операционной системой Windows, а также пакетами MSWord и MSExcel. Для профессионально-ориентированных информационных технологий также нет никаких неожиданностей:

- САД 2D (черчение) изучается в рамках дисциплин, связанных с начертательной геометрией и компьютерной графикой на 1 курсе, поэтому достаточно свободное владение;
- САД 3D (трехмерное моделирование) – навыки работы отсутствуют у большинства студентов. Исключение составляют, как правило, 1-2 человека из группы 17-23 человека, окончившие до поступления в вуз колледж, техникум, обучавшиеся в специализированной школе или у которых родители работают конструкторами или технологами. Обычно уровень владения в районе «хорошо», реже «отлично»;
- САМ-системы – знания и навыки работы отсутствуют, исключение составляют выпускники техникумов и колледжей машиностроительного профиля (как правило, 1-2 человека);
- САЕ, САРР, РДМ-системы – знания и навыки работы отсутствуют у 100% студентов.

Совершенно другая ситуация со студентами, обучающимися по очно-заочной и заочной формам обучения. В этом контингенте наблюдается значительный разброс практически по всем составляющим профессионально-ориентированных информационных технологий, а зачастую и по владению общесистемными информационными технологиями. Причем ситуация за последние несколько лет практически не изменилась.

Обратимся к обобщенным результатам опросов (количество студентов в группах – 18-25 человек):

- САД 2D – профессионально работают до 7 человек, в среднем оценивают свои знания на «хорошо» – 10-13 человек, «удовлетворительно» – 7-10 человек, не знают – 0-2 человека;
- САД 3D – профессионально работают до 2 человек, в среднем оценивают свои знания на «хорошо» – 4-6 человек, «удовлетворительно» – 7-8 человек, не знают – 7-9 человек;
- САМ – профессионально работают 2-3 человека, 4-6 человек знакомы с данным классом систем по предыдущему образованию, у остальных знания и навыки работы отсутствуют;
- САРР – профессионально работают до 3 человек, у остальных знания и навыки работы отсутствуют;

- PDM – имеют представление 2-3 человека, у остальных знания отсутствуют;
- CAE – знания и навыки работы отсутствуют у 100% студентов.

Если говорить о параметрическом геометрическом моделировании, под которым мы понимаем такое моделирование, когда при изменении одного элемента изменяются все взаимосвязанные с ним элементы, то навыки работы с такими моделями отсутствуют практически у 100% студентов. Вместе с тем именно такое моделирование позволяет получить экономический эффект от снижения трудоемкости при модификации изделия.

В качестве причин столь большого разрыва во «входном» уровне в области профессионально-ориентированных информационных технологий, и компьютерного геометрического моделирования, в частности, согласно результатам опросов, можно назвать следующие:

1. Разница в возрасте (варьируется от 20 до 54 лет). Этот факт достаточно сильно сказывается не только на уровне владения студентами информационными технологиями, но также и на отношении к ним.

2. Предыдущее образование:

- школа;
- профильный техникум или колледж (авиационный, автомеханический, механический, политехнический и др.);
- непрофильный техникум или колледж (педагогический, экономико-правовой и т.д.);
- получение второго высшего образования на базе непрофильного (юридическое, экономическое и др.).

3. Место работы:

- не связано с получаемым образованием (полиция, МЧС, менеджеры, домохозяйки, охранники, электрики, работники автосервиса и др.);
- отдаленно связано с получаемым образованием (мастера, цеховые рабочие, ОТК и др.);
- связано с получаемым образованием (технологи, конструкторы).

В результате комбинации вышеназванных пунктов на одном полюсе мы можем получить студента, профессионально работающего в одной или нескольких системах (CAD/CAM/CAE/CAPP/PDM), имеющего представление об уровне автоматизации современных машиностроительных предприятий, настроенного на получение новых знаний, а на другом – студента с отсутствием знаний и умений в области профессионально-ориентированных информационных технологий и полным их неприятием в связи с работой в другой сфере и нежеланием менять ее в будущем.

Таким образом, ответив на вопросы «Чему учить?» и «Кого учим?», достаточно остро встает вопрос «Как учить?» студентов с таким колоссальным разрывом в первоначальном уровне подготовки в области информационных технологий как общесистемных, так и профессионально-ориентированных, чтобы они освоили не просто отдельные системы, а их комплекс, смогли применить свои знания и умения и соответствовали требованиям работодателей, а также как сделать это всего за несколько занятий и заданий на самостоятельную работу, учитывая, что автоматизированные системы в области машиностроения считаются одними из наиболее сложных [5]. Очевидно, что необходимо введение дифференцированных заданий и использование элементов контекстного обучения с моделированием предметного и социального содержания профессиональной деятельности.

В рамках направления 151900 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» очно-заочной и заочной форм обучения для подготовки студентов в области профессионально-ориентированных информационных технологий в учебный план включены две дисциплины – «Автоматизированное решение инженерных задач» (АРИЗ) (2 курс) и «Основы автоматизированного проектирования» (4 курс).

В качестве основных задач дисциплины «Автоматизированное решение инженерных задач» выделены, в том числе, получение и совершенствование навыков в области создания компьютерных параметрических геометрических моделей деталей и сборочных конструкций

и формирование готовности применения полученных знаний, умений, навыков в будущей профессиональной деятельности.

Учитывая столь большую разницу в знаниях и умениях обучающихся в области компьютерного геометрического моделирования, для повышения эффективности процесса обучения в рамках дисциплины АРИЗ студентам предлагаются разноуровневые задания, различающиеся как по сложности, так и по количеству (1 уровень – три однотипных задания, направленных на получение и закрепление навыков работы по созданию компьютерных геометрических моделей, 2 уровень – два задания, предполагающих закрепление и совершенствование навыков работы путем освоения нескольких дополнительных функций САД-системы, 3 уровень – одно задание, предполагающее расширение знаний и умений в области создания компьютерных геометрических моделей за счет конструктивных особенностей предлагаемых деталей или сборок). Все задания подбираются из числа заводских чертежей и ГОСТов, поэтому даже навыков, полученных в результате выполнения заданий 1 уровня, достаточно для использования при изучении САМ-систем и САРР-систем в рамках дисциплины «Основы автоматизированного проектирования» и в профессиональной деятельности. Кроме того, задания 1 и 2 уровней подбираются таким образом, чтобы, используя полученные знания в области параметрического моделирования, можно было в качестве прототипов использовать уже созданные модели, что на конкретных примерах показывает студентам эффект, получаемый от применения автоматизированных систем.

После теоретической части и выполнения общего задания по методическим указаниям перед студентами ставится задача по созданию по предлагаемым заводским чертежами или ГОСТам деталей и сборок параметрических геометрических моделей стандартных изделий. Уровень получаемого задания студент выбирает самостоятельно в зависимости от собственной оценки своих знаний. Выбранный уровень не влияет на оценку результатов выполненной работы, поскольку ни одно из заданий нельзя назвать репродуктивным, все они имеют несколько способов решения и задача студента – применить творческий подход и, по возможности, построить качественно параметризованную модель (модель, которая имеет минимум параметров и изменяется в широком диапазоне их значений). Обязательным условием является объяснение последовательности своих действий при выполнении работы. Для моделей деталей, созданных по ГОСТам, используя таблицы типоразмеров, студенты самостоятельно могут оценить правильность выбранного подхода к созданию параметрической геометрической модели и исправить найденные ошибки до сдачи готовой работы преподавателю.

Как показывает практика, задания 3 уровня сложности выбирают 1-2 человека из группы 18-25 человек. Это те студенты, которые по роду своей деятельности связаны с работой в САД системах. Большая часть студентов (13-15 человек) первоначально выбирают 1 уровень сложности (студенты, оценившие свой уровень знаний в области профессионально-ориентированных информационных технологий на «удовлетворительно» и реже на «хорошо»). Оставшаяся часть выбирает второй уровень сложности (оценившие свой уровень знаний на «хорошо» и «отлично»). Бывают случаи «переоценивания» собственных знаний, когда студенты меняют уровень задания в сторону понижения. В процессе работы студенты, выбравшие один и тот же уровень, могут консультироваться друг с другом, развивая, таким образом, навыки коллективной работы и коллективного поиска решения.

По окончании каждой лабораторной работы проходит обсуждение возможных путей решения поставленных задач, их эффективность, рассматриваются найденные ошибки и предлагаются пути их устранения по уровням заданий. В обсуждении обычно принимает участие вся группа. Обсуждение заданий 3 уровня проходит в индивидуальном порядке.

К четвертой лабораторной работе распределение студентов по уровням заданий, в среднем, выглядит следующим образом: 1 уровень – 5-7 человек, 2 уровень – 14-16 человек, 3 уровень – 1-2 человека.

Для итоговой аттестации студентам, выбравшим 1 и 2 уровни заданий, предлагается работа по созданию библиотечных элементов по чертежам и таблицам типоразмеров из

ГОСТов. Выдаваемые задания соответствуют 2 уровню и позволяют оценить не только приобретенные навыки работы в области компьютерного геометрического моделирования, но и навыки создания параметрических моделей. В процессе выполнения аттестационного задания большая часть студентов проявляет самостоятельность в работе над заданием и успешно его выполняет. Из группы 18-25 человек за помощью к преподавателю обращаются не более 5-6 студентов, причем вопросы в основном связаны с особенностями конструкции детали или с интерфейсом САД-системы.

В виду повышенной сложности заданий студенты, выбравшие 3 уровень, аттестуются по результатам выполнения лабораторных работ.

Принимая во внимание большой разброс знаний и умений студентов в области обще-системных и профессионально-ориентированных информационных технологий перед началом изучения дисциплины «Автоматизированное решение инженерных задач», по результатам выполнения аттестационной работы можно сделать вывод об эффективности используемого подхода к изучению компьютерного геометрического моделирования студентами очно-заочной и заочной форм обучения.

Библиографический список

1. Информационная поддержка жизненного цикла изделий машиностроения, системы и технологии CALS/ИПИ / А.Н. Ковшов [и др.]. – М.: Академия, 2007.
2. **Черепашков, А.А.** Компьютерные технологии, моделирование и автоматизированные системы в машиностроении / А.А. Черепашков, Н.В. Носков. – Волгоград: Издательский дом «Ин-Фолио», 2009.
3. **Норенков, И.П.** Автоматизированные информационные системы / И.П. Норенков. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Е. Баумана, 2011.
4. **Ли, К.** Основы САПР (CAD/CAM/CAE) / К. Ли. – СПб.: Питер, 2004.
5. Информационные вычислительные системы в машиностроении: CALS-технологии / Ю.М. Соломенцев [и др.]. – М.: Наука, 2003.

*Дата поступления
в редакцию 22.10. 2015*

T.A. Nedelyaeva

FEATURES OF TRAINING OF STUDENTS OF PART-TIME AND CORRESPONDENCE FORMS OF EDUCATION OF MACHINE-BUILDING SPECIALITIES IN THE FIELD OF THE VOCATIONALLY-ORIENTATED INFORMATION TECHNOLOGIES

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

Purpose: To consider the ways of increasing efficiency in teaching students of part-time and correspondence forms of education in the field of automation of design and technological preparation of production.

Operating procedure: The article deals with automation means of design and technological preparation of production (CAD/CAM/CAE/CAPP/PDM). A comparative analysis of students preparedness of full-time, part-time and correspondence forms of education to study disciplines related to the use of automated systems is given. External factors that influence the quality of educational process of students of part-time and correspondence forms of education are identified. Based on the analysis the need to improve effectiveness of educational process in the field of computer geometry modeling and to take into account individual level of preparedness of students is stated. The use of context learning technology with modeling objective and social content of professional activity and the introduction of multi-level tasks are suggested.

Conclusion: The considered approach to studying computer geometric modeling can be used to train students of secondary and higher educational institutions of engineering profile.

Key words: form of education, information technologies, CAD, CAM, CAE, CAPP, PDM.

УДК 621.833

А.Н. Петровский¹, С.В. Воронков²

К ЗАДАЧЕ ОПТИМИЗАЦИИ ВНЕЦЕНТРОИДНОГО ЦИКЛОИДАЛЬНОГО ЗАЦЕПЛЕНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексева¹
АО «Федеральный научно-производственный центр
«Нижегородский научно-исследовательский институт радиотехники»²

Задача оптимизации поставлена как система условий существования и качества зацепления. Решение содержит формулы расчета независимых геометрических параметров, удовлетворяющих максимальному значению нагрузочной способности. Создана аналитическая система автоматического проектирования зацепления по передаточному числу и нагрузке. Решение задачи рассматривается как методика проектного расчета, параметризации и стандартизации внецентроидного циклоидального зацепления.

Ключевые слова: циклоидальное зацепление, удельная нагрузочная способность, параметрический анализ.

Внецентроидное циклоидальное зацепление широко применяется в зарубежной приводной технике. Зацепление отличается большими передаточными числами, высокой точностью, низкими уровнями шума и вибраций. Производители рекламируют относительно высокий КПД – до 0.95 и хорошую перегрузочную способность, которая по их данным до пяти раз превосходит передачи с эвольвентным зацеплением.

В отечественном машиностроении циклоидальное зацепление используется редко и ограничено мелкосерийным и единичным производством. Множество исследований не нашли воплощения в нормативном документе на расчет циклоидального зацепления, что является решающим фактором, ограничивающим его применяемость. Подробное описание зацепления и проектные рекомендации даны в монографиях [1–4].

Внедрение нового зацепления в серийные изделия связано с необходимостью убедительного обоснования замены. При этом важно установить не только превосходство нового технического решения, но и дать его количественную оценку. В работе [5] представлена универсальная методика анализа и обобщенной оценки совершенства механических передач, которая применяется для анализа и оптимизации зацеплений, передач и структуры механического привода. В качестве главного критерия качества используется показатель *удельной нагрузочной способности* зацепления в виде отношения допускаемого вращающего момента к характерному объему зацепления.

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

где t – удельная нагрузочная способность зацепления, МПа; T_1 – вращающий момент на шестерне, Нм; V – характерный объем зацепления, м³.

Для внешнего зацепления пары зубчатых колес характерный объем определен суммой начальных цилиндров сопряженных колес, для внутреннего – начальным цилиндром внешнего колеса.

Критерий удельной нагрузочной способности численно равен средней энергии упругой деформации, условно воспринимаемой единицей характерного объема на единичном угловом смещении шестерни. Критерий имеет универсальный характер и применяется для разнотипных зацеплений. Он определяется в виде (1) по техническим характеристикам изделия и в виде главной целевой функции от показателей прочности материалов зубчатой пары и безразмерных геометрических параметров:

$$t = q \frac{\gamma}{v} = q\tau, \quad (2)$$

где q , γ , ν – автономные целевые функции соответственно допускаемых напряжений (МПа), зацепления и структуры; τ – целевая функция формы.

Сравнением расчетных значений по (1) и (2) выявляют резервы нагрузочной способности или необходимость снижения нагрузки.

Автономные целевые функции определены на непересекающихся множествах параметров и анализируются отдельно.

Функция q допускаемых напряжений содержит параметры механических свойств материалов зубчатых колес и ограничивающие их эмпирические коэффициенты.

Функция зацепления γ содержит безразмерные геометрические параметры, а функция структуры ν – безразмерные параметры конструктивного исполнения передачи: передаточные числа, числа ступеней, числа потоков мощности, числа паразитных колес [5]. Отношение функций зацепления и структуры есть функция формы τ , которая отражает влияние геометрических параметров на нагрузочную способность.

Анализ целевых функций и оптимизация параметров позволяют повысить нагрузочную способность зацеплений, сформировать их параметрические ряды и создать аналитические системы автоматического проектирования. В работах [5–7] методика анализа и обобщенной оценки совершенства механических передач применена к эвольвентному зацеплению и зацеплению М.Л. Новикова. Далее задача оптимизации геометрических параметров поставлена для внецентроидного циклоидального зацепления.

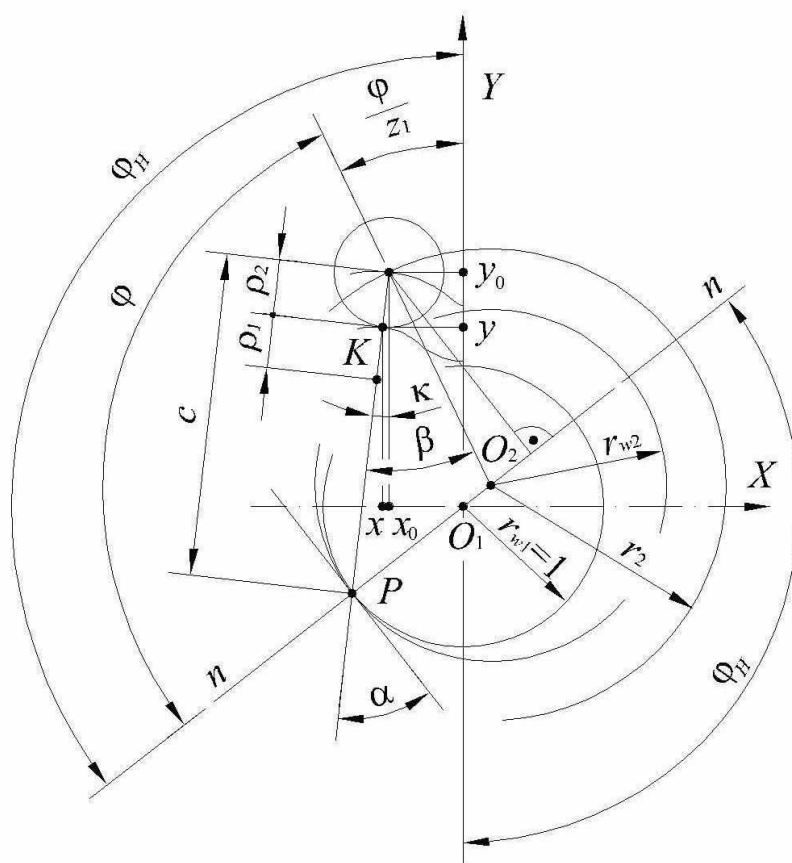


Рис. 1. Схема внецентроидного циклоидального зацепления

Схема внецентроидного циклоидального зацепления представлена в декартовых координатах XY на рис. 1, где 1 – индекс циклоидальной шестерни; 2 – индекс цевочного колеса; $O_{1,2}$ – оси шестерни и колеса; O_1O_2 – водило; $r_{w1,2}$ – радиусы центров водила, м; r_2 – радиус окружности центров цевки, м; ρ_1 – радиус кривизны профиля циклоидальной шестерни, ρ_2 –

радиус цевки; c – отрезок, соединяющий центр цевки и полюс P зацепления, м; $z_{1,2}$ – соответственно числа выступов шестерни и цевок колеса; α – угол зацепления; β – центральный угол цевки между полюсом и центром цевочного колеса; κ – угол между отрезком c и осью Y ; x_0, y_0 – координаты центра цевки; x, y – координаты точки контакта K ; φ – полюсный угол, определенный как центральный угол колеса между центром цевки и полюсом зацепления; Φ_H – угол поворота водила.

Передаточное число внецентроидного циклоидального зацепления при неподвижном водило определяется выражением:

$$u_H = \frac{r_{w2}}{r_{w1}} = \frac{z_2}{z_1}. \quad (3)$$

Для выявления параметров зацепления в обобщающем безразмерном виде, радиус центроиды циклоидальной шестерни будем рассматривать как масштабный фактор: $r_{w1}^* = 1$ [5–7], тогда радиус центроиды колеса: $r_{w2}^* = u_H$, а радиус окружности центров цевок: $r_2^* = u_H l$, где l – коэффициент внецентроидности [3]. Здесь и далее "*" – индекс линейных величин в новом масштабе.

Профиль шестерни образуется качением центроиды колеса по центроиде шестерни. В движении обката центр цевки описывает удлиненную эпициклоиду, а окружность с радиусом цевки формирует ее эквидистанту. Колесо совершает сложное вращение вокруг осей O_1 и O_2 , которое сводится к вращению вокруг полюса P . Из равенства линейных скоростей точки O_2 относительно оси O_1 и полюса P , следует известное выражение для передаточного числа между водило и колесом при неподвижной шестерне:

$$u_{H2} = \frac{u_H}{u_H - 1} = z_2. \quad (4)$$

Из схемы зацепления, рис. 1, установим связь полюсного угла и угла поворота водила:

$$\varphi = \frac{\Phi_H}{u_H}. \quad (5)$$

При повороте водила на угол Φ_H , центр цевки повернется на угол Φ / z_1 .

Цикл формирования одного выступа шестерни соответствует периоду изменения угла φ от 0 до 2π , а цикл передачи выступом нагрузки соответствует периоду изменения φ от 0 до π . Кроме того, полюсный угол φ есть угловая координата центра цевки относительно полюса P и необходим для анализа распределения нагрузки в многопарном зацеплении. С учетом этих особенностей зацепления полюсный угол φ выбран главной независимой переменной в уравнениях профиля и целевых функциях.

Используя обозначения рис. 1, и учитывая масштабный фактор, получим соотношения, необходимые для вывода уравнения профиля циклоидальной шестерни:

$$c^* = u_H \sqrt{1 + l^2 - 2l \cos \varphi}, \quad (6)$$

$$\sin \alpha = \frac{l \cos \varphi - 1}{\sqrt{1 + l^2 - 2l \cos \varphi}}, \quad (7)$$

$$\cos \alpha = \frac{l \sin \varphi}{\sqrt{1 + l^2 - 2l \cos \varphi}}, \quad (8)$$

$$\beta = \arcsin \frac{\cos \alpha}{l}, \quad (9)$$

$$\kappa = \arcsin \frac{\cos \alpha}{l} - \frac{\varphi}{z_1} \quad (10)$$

и само уравнение в безразмерном параметрическом виде:

$$x^* = \frac{1}{z_1} \left(\sin \frac{z_2}{z_1} \varphi - z_2 l \sin \frac{\varphi}{z_1} \right) - \rho_2^* \sin \kappa, \quad (11)$$

$$y^* = -\frac{1}{z_1} \left(\cos \frac{z_2}{z_1} \varphi - z_2 l \cos \frac{\varphi}{z_1} \right) - \rho_2^* \cos \kappa. \quad (12)$$

Уравнение удлиненной эпициклоиды получим из уравнений (11), (12) исключением слагаемых, содержащих радиус цевки ρ_2^* :

$$x_0^* = \frac{1}{z_1} \left(\sin \frac{z_2}{z_1} \varphi - z_2 l \sin \frac{\varphi}{z_1} \right), \quad (13)$$

$$y_0^* = -\frac{1}{z_1} \left(\cos \frac{z_2}{z_1} \varphi - z_2 l \cos \frac{\varphi}{z_1} \right). \quad (14)$$

Удлиненная эпициклоида и ее эквидистанта для шестерни с тремя выступами показаны на рис. 2. Кривые построены посредством электронных таблиц как графики параметрических уравнений (11), (12) и (13), (14).

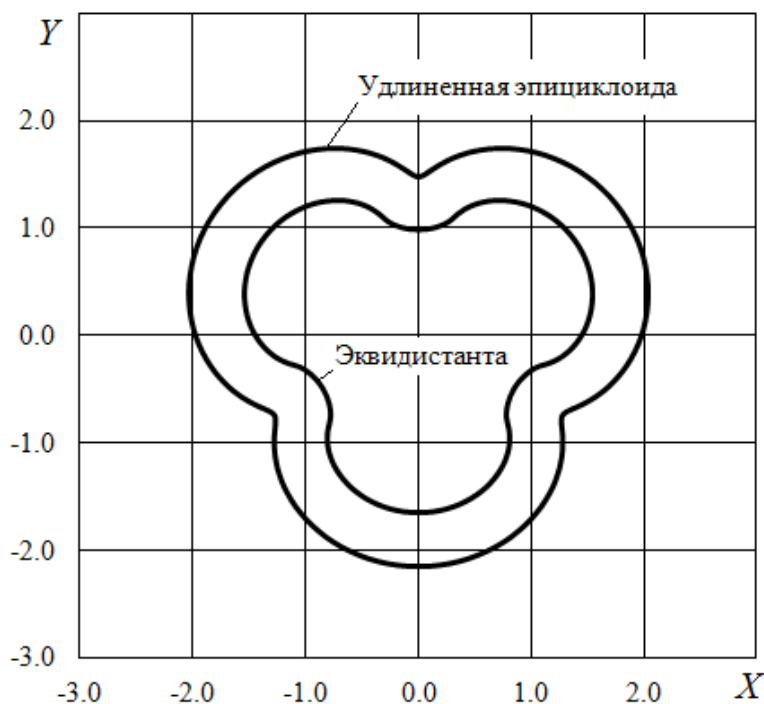


Рис. 2. Графики параметрических уравнений удлиненной эпициклоиды и ее эквидистанты для $z_1 = 3$

Параметрическое уравнение профиля шестерни содержит пять независимых безразмерных параметров: z_1 , z_2 , φ , l , ρ_2^* . Независимые параметры связаны условиями существования и качества зацепления. Если условия сформулировать в виде системы совместных уравнений и ограничений, которых достаточно для определения всех параметров, то задача оптимизации будет иметь единственное решение.

В качестве главного критерия качества зацепления будем рассматривать удельную нагрузочную способность по контактным напряжениям. Воспользуемся решением Г. Герца для контакта двух упругих цилиндров с параллельными осями [9]:

$$\sigma_H = Z_E \sqrt{\frac{f}{\rho}}, \quad (15)$$

$$Z_E = \pi^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)^{-\frac{1}{2}}, \quad (16)$$

$$\rho = \frac{\rho_1 \rho_2}{\rho_1 + \rho_2}, \quad (17)$$

где σ_H – контактное напряжение, МПа, Z_E – коэффициент, учитывающий механические свойства материалов колес, МПа^{0,5}; $E_{1,2}$ – модули упругости материалов цевки и шестерни, МПа; ν – коэффициент Пуассона; f – составляющая нагрузки, распределенная по начальной линии контакта, Н/м; ρ – приведенный радиус кривизны сопрягаемых профилей, м.

При известных радиусах центров и цевки радиус кривизны профиля циклоидальной шестерни удобно определить геометрически построением Бобилье, рис.3, или аналитически из уравнения Эйлера и Савари [1]:

$$\frac{1}{r_{w1}} - \frac{1}{r_{w2}} = \left(\frac{1}{\rho_2 + x} + \frac{1}{\rho_1 - x} \right) \sin \alpha, \quad (18)$$

где x – расстояние от полюса до точки контакта, м.

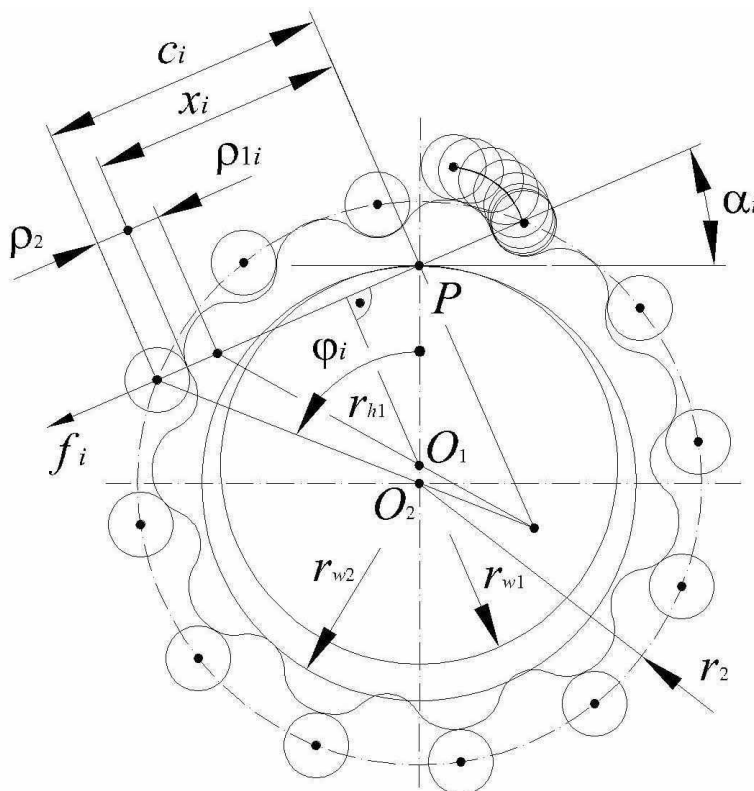


Рис. 3. Схема внецентроидного циклоидального зацепления к выводу и анализу целевых функций

Из схемы зацепления на рис. 3, и соотношений (3), (6), (18) получим:

$$\rho_1 = \rho_0 - \rho_2, \quad (19)$$

$$\rho_0 = \frac{r_{w1} c^{*2}}{c^* - z_2 \sin \alpha}, \quad (20)$$

где ρ_0 – радиус кривизны удлиненной эпициклоиды, м.

Приводной момент на шестерне определим как сумму моментов от составляющих нагрузок в каждом из n мест контакта:

$$T_1 = \sum_{i=1}^n f_i r_{1w} b_w \cos \alpha_i, \quad (21)$$

где i – порядковый номер места контакта в отсчете от полюса зацепления, b_w – ширина циклоидальной шестерни, м.

Выражая составляющую распределенной нагрузки из (15), получим:

$$f_i = \frac{\sigma_{Hi}^2}{Z_E^2} \rho_i, \quad (22)$$

$$T_1 = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{Hi}^2}{Z_E^2} \rho_i r_{1w} b_w \cos \alpha_i. \quad (23)$$

В месте с максимальным контактным напряжением назначим его допустимое значение:

$$[\sigma_H]^2 = \frac{\sigma_{H \lim}^2}{K_H S_H^2}, \quad (24)$$

где: $\sigma_{H \lim}$ – предел контактной выносливости материала, K_H и S_H – сводные коэффициенты нагрузки и безопасности, см. ГОСТ 21354-87.

Момент от составляющей нагрузки в месте с максимальным контактным напряжением определим выражением:

$$T_{1\sigma} = \frac{\sigma_{H \lim}^2}{K_H S_H^2 Z_E^{*2}} r_{w1} b_w \rho_\sigma \cos \alpha_\sigma, \quad (25)$$

где "σ" – индекс параметров в месте с максимальным контактным напряжением.

Если известна часть приводного момента, которая приходится на место с максимальным контактным напряжением, выражение (23) упрощается:

$$T_1 = \frac{\sigma_{H \lim}^2 r_{w1} b_w \rho_\sigma \cos \alpha_\sigma}{K_H S_H^2 Z_E^{*2} \chi_\sigma}. \quad (26)$$

где χ_σ – часть приводного момента, воспринимаемая в месте с максимальным контактным напряжением.

Характерный объем циклоидального зацепления будем представлять объемом цилиндра, радиус которого равен радиусу lr_{w2} окружности центров цевок, а высота равна ширине b_w циклоидальной шестерни:

$$V = \pi l_H^2 l^2 r_{w1}^2 b_w. \quad (27)$$

Из (1), (26) и (27) с учетом введенного масштаба, $r_{w1} = 1$, следует *главная целевая функция*:

$$t = \frac{\sigma_{H \lim}^2}{Z_E^2 K_H S_H^2} \left(\frac{\rho_\sigma^* \cos \alpha_\sigma}{\pi l_H^2 l^2 \chi_\sigma} \right), \quad (28)$$

в которой выделим *функцию допустимых напряжений*:

$$q = \frac{\sigma_{H \lim}^2}{Z_E^2 K_H S_H^2}, \quad (29)$$

и функцию формы:

$$\tau = \frac{\rho_{\sigma}^* \cos \alpha_{\sigma}}{\pi u_H^2 l^2 \chi_{\sigma}}. \quad (30)$$

Для достижения максимальной нагрузочной способности зацепления необходимо установить значения независимых параметров, удовлетворяющие максимальному значению главной целевой функции (28). Ее максимум определяется как произведение максимумов автономных целевых функций (29) и (30), заданных на непересекающихся множествах.

Во внецентроидном циклоидальном зацеплении передаточное число совпадает с числом цевков колеса или выступов шестерни, что исключает представление функции формы в виде отношения функций зацепления и структуры, как это было сделано в анализе эвольвентного зацепления [6].

Анализ функции допускаемых напряжений (29) связан с экспертным выбором коэффициентов безопасности и нагрузки, что требует достоверных данных об условиях производства и эксплуатации. В этом случае можно воспользоваться рекомендациями и стандартами расчета на контактную прочность эвольвентного зацепления, например ГОСТ 21354-87. Однако анализ функции (29) целесообразно формализовать посредством вычисления ее значения для надежных серийных изделий и действующих образцов по формуле обратного расчета:

$$q = \frac{T_1 \chi_{\sigma}}{r_{w1}^2 b_w \rho_{\sigma}^* \cos \alpha_{\sigma}}, \quad (31)$$

полученной из (1), (26) и (27). В этом случае функция допускаемых напряжений рассчитывается по параметрам действующего зацепления и объективно отражает отраслевые требования к его надежности, а также технологические возможности производителя. Накопление значений функции q по серийным изделиям и опытным образцам позволяет наращивать ее значение за счет рационального снижения коэффициентов нагрузки и безопасности.

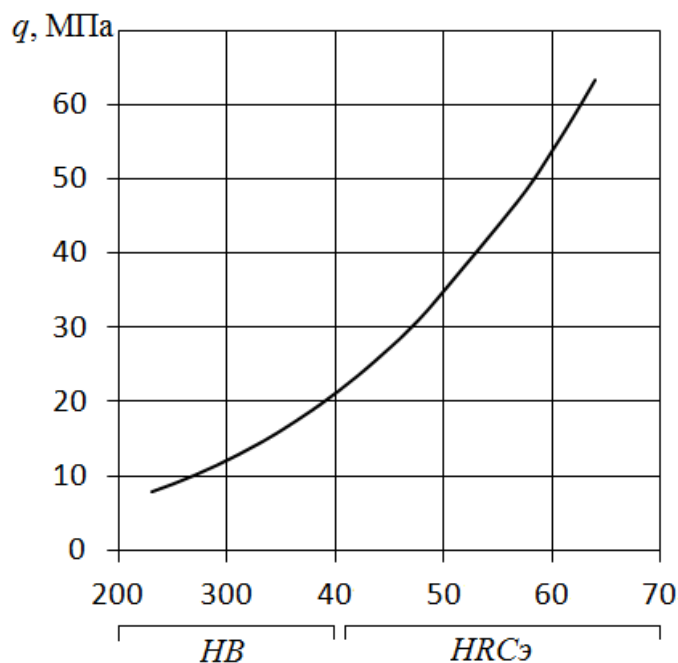


Рис. 4. Зависимость функции допускаемых напряжений от твердости сопрягаемых поверхностей при $S_{H1,2}=K_{H1,2}=1$

Функции допускаемых напряжений для циклоидального и эвольвентного зацеплений совпадают [5, 6]. На диаграмме рис. 4 представлена зависимость функции допускаемых кон-

тактных напряжений стальных колес от твердости сопрягаемых поверхностей при $S_{H1,2}=K_{H1,2}=1$.

Функция формы (30) не содержит в явном виде независимых параметров: $z_1, z_2, \varphi, l, \rho_2^*$. Чтобы найти их значения, удовлетворяющие максимальному значению целевой функции, сформулируем условия существования и качества зацепления.

1. *Условие максимального передаточного числа.*

Большие передаточные числа – главное потребительское свойство циклоидального зацепления, которое определяет заказчик. Максимальное передаточное число получают при условии:

$$z_2 - z_1 = 1. \tag{32}$$

В этом случае число выступов шестерни и число цевок определены, а зацепление реализует следующие варианты передаточных чисел: от водила к цевочному колесу при неподвижной шестерне: $u_{H1} = z_2$; от водила к циклоидальной шестерне при неподвижном колесе $u_{H2} = -z_1$; и от циклоидальной шестерни к цевочному колесу при неподвижном водило: $u_{H2} = z_2 / z_1$. Таким образом, независимые параметры $z_{1,2}$ в задаче оптимизации следует рассматривать как исходные ограничения заказчика.

2. *Условие существования сопрягаемого профиля циклоидальной шестерни.*

Сопрягаемый профиль циклоидальной шестерни формируется как эквидистанта удлиненной эпициклоиды на ее внутренней стороне посредством семейства окружностей с радиусом цевки ρ_2 , рис. 1–3. Следовательно, радиус цевки не может превышать радиус кривизны эпициклоиды, а сопрягаемый профиль существует при условии:

$$\rho_2^* \leq k\rho_0^* = k \frac{c^{*2}}{c^* - z_2 \sin \alpha_\sigma}, \tag{33}$$

где k – независимый безразмерный параметр из интервала (0; 1), который определяет радиус цевки как часть радиуса кривизны удлиненной эпициклоиды.

3. *Условие максимума приведенного радиуса кривизны.*

С учетом (33) радиус кривизны профиля шестерни составит $(1 - k)$ часть радиуса кривизны удлиненной эпициклоиды, а формула (17) для приведенного радиуса кривизны в месте с максимальным контактным напряжением примет вид:

$$\rho_\sigma^* = (k - k^2)\rho_{0\sigma}^*. \tag{34}$$

Выражение (34) содержит элементарную квадратичную функцию независимого параметра k , которая имеет максимум при $k = 0.5$. Последнее значение есть решение задачи оптимального деления радиуса кривизны удлиненной эпициклоиды между цевкой и сопрягаемым профилем:

$$\rho_{2\sigma}^* = \rho_{1\sigma}^* = 0.5\rho_{0\sigma}^*. \tag{35}$$

При таком выборе радиусов кривизны сопрягаемых профилей, приведенный радиус кривизны будет иметь максимальное значение:

$$\rho_\sigma^* = 0.25\rho_{0\sigma}^* \tag{36}$$

и обеспечит максимальное значение функции формы (30).

4. *Условие определения места с максимальным контактным напряжением.*

Максимальное контактное напряжение возникает на образующей рабочей поверхности циклоидальной шестерни с минимальным радиусом кривизны, где согласно (35), (36) радиус кривизны удлиненной эпициклоиды также должен иметь минимальное значение. Условие минимума радиуса кривизны эпициклоиды следует из равенства нулю первой производной функции (20):

$$\frac{d\rho_0^*}{d\varphi} = \frac{d}{d\varphi} \left(\frac{c^{*2}}{c^* - z_2 \sin \alpha} \right) = 0. \quad (37)$$

После дифференцирования получим полюсный угол для минимального радиуса кривизны профиля циклоидальной шестерни:

$$\varphi_\sigma = \arccos \frac{1 + 2z_1 - (z_1 - 1)l^2}{(z_1 + 2)l}. \quad (38)$$

Из (6) – (8), (38) и (20) получаем минимальный радиус кривизны эпициклоиды:

$$\rho_{0\sigma}^* = c_\sigma \frac{3}{z_1 + 2} = \frac{3(z_1 + 1)\sqrt{3z_1(l^2 - 1)}}{z_1(z_1 + 2)^{3/2}}, \quad (39)$$

и с учетом (35), (36) радиус цевки и минимальный радиус кривизны профиля шестерни:

$$\rho_{2\sigma}^* = \rho_{1\sigma}^* = \frac{3(z_1 + 1)\sqrt{3z_1(l^2 - 1)}}{2z_1(z_1 + 2)^{3/2}}, \quad (40)$$

минимальный приведенный радиус кривизны:

$$\rho_\sigma^* = \frac{3(z_1 + 1)\sqrt{3z_1(l^2 - 1)}}{4z_1(z_1 + 2)^{3/2}}. \quad (41)$$

5. Условие максимума целевой функции зацепления по параметру l .

Применив соотношения (8), (36) и (39), представим целевую функцию формы (30) в независимых параметрах:

$$\tau = \frac{3 \sin \varphi_\sigma}{4\pi u_H l \chi(z_1 + 2)}. \quad (42)$$

В месте с максимальным контактным напряжением функция зацепления теперь определена одним независимым переменным – коэффициентом внецентроидности l . Условие максимума функции (42) следует из равенства нулю ее первой производной:

$$\frac{d\tau}{dl} = \frac{d}{dl} \left(\frac{\sin \varphi_\sigma}{(z_1 + 2)l \chi_\sigma} \right) = 0. \quad (43)$$

После дифференцирования получим формулу для коэффициента внецентроидности, который удовлетворяет максимальному значению функции (42):

$$l_\sigma = \frac{(2z_1 + 1)\sqrt{2}}{\sqrt{(2z_1 + 1)^2 + (z_1 - 1)^2}}. \quad (44)$$

6. Условие распределения нагрузки.

В определении части приводного момента χ_σ , воспринимаемой в месте контакта с максимальным напряжением, необходимо учитывать статически-неопределимый характер распределения нагрузки между множеством пар цевок и выступов шестерни. Монография [2] содержит методику расчета составляющих нагрузки в зацеплении с цевками, установленными на осях с двумя опорами. Методика исходит из условия, что распределение нагрузки зависит от деформаций изгиба осей, а нелинейные контактные деформации исключает как малозначительные. Однако в современных конструкциях циклоидального зацепления часто используют цевки-ролики, установленные в пазах корпуса. В такой более жесткой конструкции составляющие нагрузки определяются контактными деформациями, что требует уточнения методики.

Воспользуемся формулами теории контактных деформаций [10] для двух упругих цилиндров с параллельными осями:

$$\delta_i = \frac{2f_i}{\pi} \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) \ln \left(\frac{9\rho_{1i}\rho_{2i}}{b_{\delta i}^2} \right), \quad (45)$$

$$b_{\delta i} = 2 \sqrt{\left(\frac{1 - v_1^2}{E_1} + \frac{1 - v_2^2}{E_2} \right) f_i \frac{\rho_{1i} \rho_2}{\pi(\rho_{1i} + \rho_2)}}, \quad (46)$$

где δ_i – деформация сближения тел в контакте; $b_{\delta i}$ – полуширина полоски контакта.

Если при неподвижном цевочном колесе к циклоидальной шестерне приложить вращающий момент, то за счет деформаций она повернется на некоторый угол, а сближение в местах контакта можно выразить формулой:

$$\delta_i = r_{1hi} \Delta, \quad (47)$$

где Δ – угол поворота шестерни одинаковый для всех мест контакта, рад.

Из соотношений (15) – (17), (22), (45) – (47) с учетом $r_{w1}=1$ получим систему n уравнений вида:

$$\Delta = \frac{4\sigma_i^2 \rho_i^*}{\pi^2 Z_E^4 \cos \alpha_i} \ln \left(\frac{3\pi Z_E^2 \left(\frac{\rho_{0i}^*}{\rho_i^*} \right)^{\frac{1}{2}}}{2\sigma_i} \right). \quad (48)$$

Угол Δ определим по параметрам места с максимальным напряжением контакта:

$$\Delta = \frac{\sigma_\sigma^2 \rho_{0\sigma}^*}{\pi^2 Z_E^4 \cos \alpha_\sigma} \ln \left(\frac{3\pi Z_E^2}{\sigma_\sigma} \right), \quad (49)$$

что позволит решить все уравнения системы относительно σ_i и получить из (23), (26) формулу и гистограмму, рис. 5, для части приводного момента, воспринимаемого в месте с максимальным контактным напряжением:

$$\chi_\sigma = \frac{\sigma_\sigma^2 \rho_\sigma^* \cos \alpha_\sigma}{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2 \rho_i^* \cos \alpha_i}. \quad (50)$$

Чтобы решать систему уравнений (48), надо установить число n мест контакта и полюсные углы φ_i . Последние отличаются от полюсного угла φ_σ , см. (38), на величины кратные угловому шагу цевок:

$$\theta = \frac{2\pi}{z_1 + 1} = \frac{2\pi}{z_2}. \quad (51)$$

Сам угол φ_σ содержит следующее число угловых шагов:

$$s_\sigma = \frac{(z_1 + 1)\varphi_\sigma}{2\pi} = [s_\sigma] + \{s_\sigma\}, \quad (52)$$

где $[s_\sigma]$ и $\{s_\sigma\}$ – соответственно целая и дробная части числа.

Место с максимальным напряжением контакта в отсчете от полюса будет иметь номер:

$$i_\sigma = [s_\sigma] + 1. \quad (53)$$

Полюсные углы цевок в момент максимального напряжения на i_σ -ой цевке будут определяться формулой:

$$\varphi_i = i\theta + \{s_\sigma\}\theta, \quad (54)$$

а число мест контакта – целой частью числа:

$$n = \left[\frac{z_1 + 1}{2} - \{s_\sigma\} + 1 \right], \quad (55)$$

которое для четного числа z_2 цевок равно $0.5 z_2$, а для нечетного числа – $0.5 (z_2 \pm 1)$, причем "+" имеет место при $\{s_\sigma\} < 0.5$, а "-" при $\{s_\sigma\} > 0.5$.

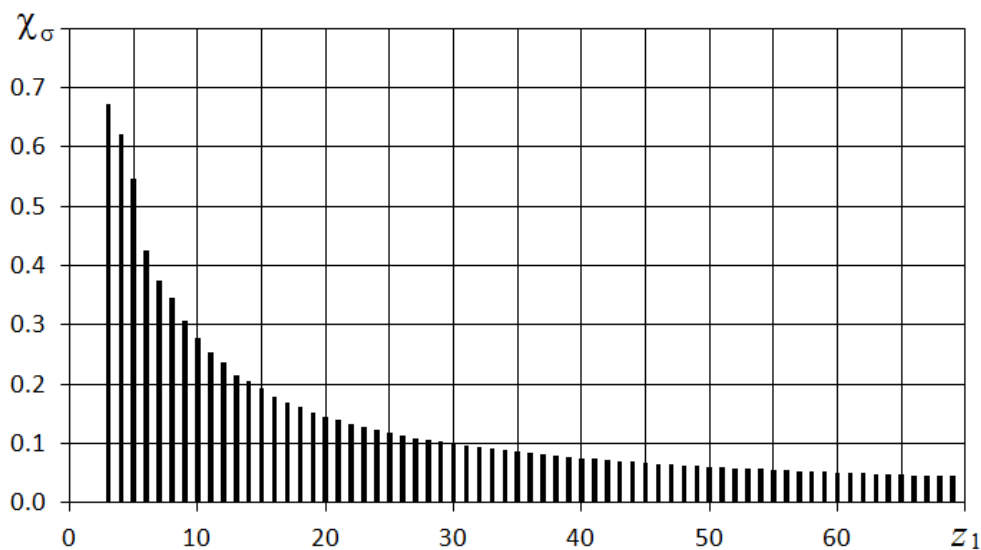


Рис. 5. Часть приводного момента, воспринимаемая в месте с максимальным напряжением контакта

По формулам (35), (38), (44) и (50) установлены независимые безразмерные параметры: φ_σ , ρ_2^* , l_σ и χ_σ , удовлетворяющие максимальному значению целевой функции формы. Все параметры являются функциями одного аргумента – числа выступов циклоидальной шестерни z_1 , и имеют асимптотический характер, рис. 6.

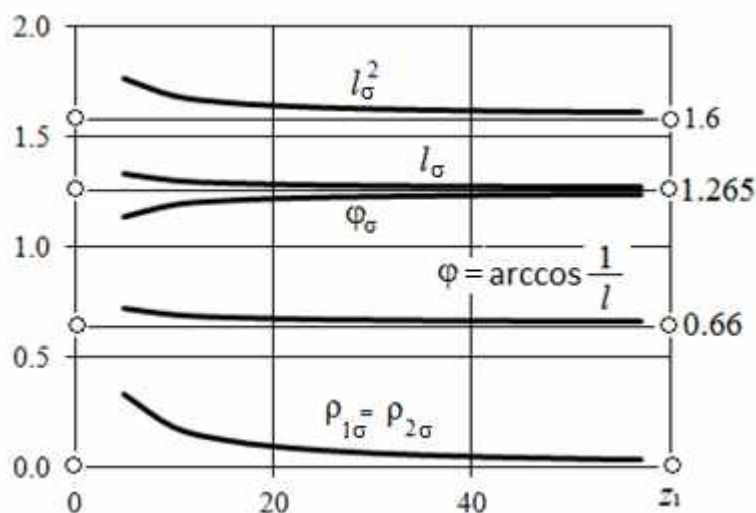


Рис. 6. Графики оптимизированных параметров

С ростом числа зубьев z_1 квадрат коэффициента нецентроидности асимптотически приближается к 1.6, совпадая до второго знака с отношением "золотого сечения". Сам коэффициент l и полюсный угол φ_σ изменяются в узком интервале соответственно над и под общей асимптотой $2\sqrt{2}/5 \approx 1.265$. График радиусов кривизны асимптотически приближается к оси абсцисс. На диаграмме рис. 6 показан график полюсного угла $\varphi = \arccos(1/l)$, при котором угол зацепления $\alpha = 0$, а плечо составляющей нагрузки имеет максимальное значение.

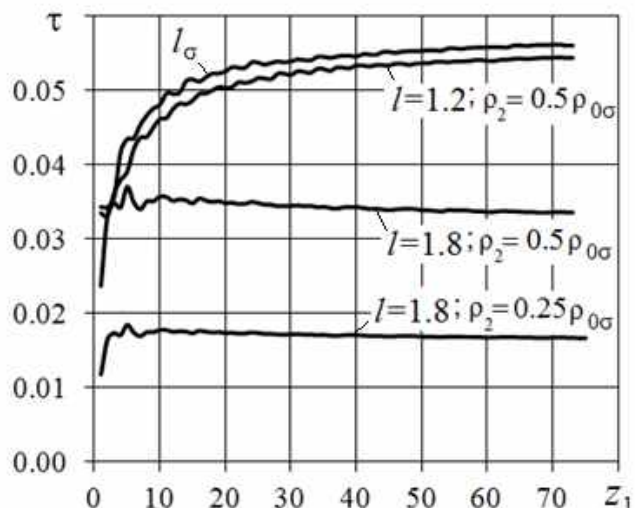


Рис. 7. Функции формы для различных значений параметров l и ρ

Эффективность решения задачи оптимизации демонстрируется диаграммой на рис. 7. Негладкий вид графиков функции формы τ отражает влияние нечетных чисел цевок на число мест контакта и распределение нагрузки. Графики показывают область возможного снижения нагрузочной способности зацепления при выборе коэффициента внецентричности l из интервала (1.2; 1.8). Последний соответствует интервалу (0.15; 0.5) коэффициента коррекции x , рекомендуемого известными методиками. Графики функций формы для $l \neq l_\sigma$ располагаются ниже графика для оптимизированного параметра l_σ . Если же радиусы цевок отклоняются от $0.5\rho_{0\sigma}^*$ значение целевой функции падает до значений меньших 0.02, а возможная нагрузочная способность снижается вдвое.

Решением задачи оптимизации внецентроидного циклоидального зацепления установлены формулы для расчета геометрических параметров, удовлетворяющих максимальному значению удельной нагрузочной способности. Решение обеспечивает разработку зацепления по двум исходным ограничениям: передаточному числу: u_{H2} или u_{H1} , и приводному моменту T_1 , что исключает неопределенность известных конструктивных рекомендаций и реализует идею аналитического проектирования [5].

Проектный расчет зацепления удобно выполнять в следующей последовательности:

1. Вычислить функцию q допускаемых напряжений по формулам (29) и/или (31).
2. Вычислить параметры: $\varphi_\sigma, \rho_{2\sigma}^*, \rho_{0\sigma}^*, l_\sigma$ по формулам (38), (39), (40), (44).
3. Определить часть приводного момента χ_σ по формулам (45) - (50) или рис.5.
4. Вычислить функцию формы τ по формуле (42).
5. Вычислить показатель удельной нагрузочной способности t по формуле (2).
6. Вычислить характерный объем V зацепления, используя формулу (1).
7. Вычислить произведение $r_{wl}^2 b_w$, используя формулу (27).
8. Для ряда стандартных роликов сформировать параметрический массив: $[\rho_j \times b_j; r_{wlj}]$,

где

$$r_{wlj} = \frac{1}{\rho_{2\sigma}^*} \sqrt{\frac{r_{wl}^2 b_w}{b_j}},$$

где j – номер варианта и номер параметров стандартного ролика.

9. Из массива $[\rho_j \times b_j; r_{wlj}]$ выбрать вариант в наибольшей степени удовлетворяющий условиям компоновки.

Выводы

1. Решением задачи оптимизации внецентроидного циклоидального зацепления получены формулы для расчета независимых параметров, удовлетворяющих максимальному значению удельной нагрузочной способности.

2. Расчетные зависимости исключили неопределенность выбора независимых параметров и позволили создать аналитическую систему автоматического проектирования зацепления по двум исходным ограничениям: передаточному числу и нагрузке.

3. Решение задачи создает предпосылки параметризации и стандартизации внецентроидного циклоидального зацепления.

Библиографический список

1. Литвин, Ф.Л. Теория зубчатых зацеплений / Ф.Л. Литвин. – М.: Наука, 1968. – 584 с.
2. Кудрявцев, В.Н. Планетарные передачи / В.Н. Кудрявцев. – 2-е изд., перераб. – М., 1986. – 308 с.
3. Алипиев, О.Л. Геометрия и формообразование на эпи- и гипоциклоидных колесах от коригирующей циклопредавки: дисс. ... док. техн. наук. – Рязань, 1990. 208 с.
4. Киреев, С. О. Теоретические основы методов анализа и синтеза планетарных механизмов с внецентроидным внутренним цевочным зацеплением: дисс. ... доктора техн. наук. – Новочеркасск: Южно-рус. гос. техн. универ. 2002. – 441 с.
5. Попов, П.К. Обобщенная оценка совершенства механических передач / П.К. Попов, Л.А. Андриенко, А.Н. Петровский // Справочник. Инженерный журнал. – 2009. – № 7. – С 20–31; – №8. – С 6–12.
6. Петровский, А.Н. Конструктивно-технологическая оптимизация геометрических параметров эвольвентного зацепления. Вестник машиностроения. 2012. № 3. С 41 – 49.
7. Петровский, А.Н. Конструктивно-технологическая оптимизация зацепления Новикова. Критерий, целевые функции, параметры // Вестник машиностроения. – 2014. – № 5. – С 3–9.
8. Петровский, А.Н. Конструктивно-технологическая оптимизация зацепления Новикова. Условия существования и качества зацепления. Численное решение // Вестник машиностроения. – 2014. – № 7. – С 3–11.
9. Тимошенко, С.П. Теория упругости: [пер. с англ.] / С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер; под ред. Г.С. Шапиро. – 2-е изд. – М.: Наука, 1979. – 560 с.
10. Прочность, устойчивость, колебания: справочник в трех томах. Т. 2 / под ред. И.А. Биргера и Я.Г. Пановко. – М.: Машиностроение, 1968. – 463 с.

Дата поступления
в редакцию 22.10.2015

A.N. Petrovskiy¹, S.V. Voronkov²

TO THE PROBLEM OF THE CYCLOID GEARING OPTIMIZATION

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alexeev¹,
Federal Research and Production Centre

“Nizhniy Novgorod Institute of Radio Engineering”, Joint-Stock Company²

Purpose: The load capacity improvement and parameterization of the cycloid gearing.

Methods: The parameters analysis and optimization by virtue specific load capacity criterion

Results: The equations for calculating the geometric parameters, satisfying to the maximum load capacity.

Key words: cycloid gearing, parameters analysis and optimization, specific load capacity.

УДК 656.132:656.072

М.Е. Елисеев, А.В. Липенков, В.В. Ясенов, Е.Д. Галкина

ПОДБОР АППРОКСИМИРУЮЩЕЙ ФУНКЦИИ ВРЕМЕНИ ДВИЖЕНИЯ ПРИ СОСТАВЛЕНИИ " ГИБКОГО " РАСПИСАНИЯ ДВИЖЕНИЯ МАРШРУТНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

Цель работы: Рассматривается методика составления расписания движения городских автобусов с учетом неравномерности времени рейса в течение дня. Подробно разбирается подбор специальной функции, наилучшим образом аппроксимирующей данные выполненных рейсов.

Метод: Задача разбивается на три этапа. На первом, с помощью компьютерной программы, обрабатываются данные отметок навигационных устройств. На втором определяется класс подходящих функций. На третьем подбираются коэффициенты с использованием программной реализации метода наименьших квадратов.

Результаты: Методика подбора функции $T(t)$ аппроксимирующей замеры времени движения маршрутных транспортных средств между двумя конечными остановками.

Область применения: Реализация разработанной методики способна повысить регулярность движения городского общественного транспорта.

Ключевые слова: городской пассажирский транспорт, пассажирские перевозки, регулярность движения, неравномерность движения.

Городской пассажирский транспорт (ГПТ) является основным способом передвижения пассажиров в большинстве российских городов, доля поездок на общественном транспорте составляет 60-70%. Одним из основных показателей качества обслуживания населения общественным транспортом является регулярность движения. Она прямо зависит от четкого соблюдения расписания движения маршрутных транспортных средств (МТС). По факту во многих городах по расписанию выполняется лишь малая часть рейсов, обычно в самом начале и конце рабочего дня [1]. Одной из причин этого являются устаревшие методы составления расписания движения автобусов, считающие время рейса постоянной величиной, хотя в современных условиях оно подвержено серьезным колебаниям в течение дня. В результате применения таких расписаний регулярность движения нарушается, особенно в «часы пик», снижается количество рейсов и качество обслуживания. Коммерческие операторы перевозочного процесса во многих случаях вообще не используют расписания, а осуществляют выпуск подвижного состава по так называемой «интервальной» стратегии.

Вопросами повышения регулярности движения автобусов на городских маршрутах занимались многие специалисты. Ими были предложены различные подходы: выделенные полосы для общественного транспорта, грамотное диспетчерское управление, нормирование скоростей движения автобусов и др. [2-4].

В данной работе приводится авторский алгоритм составления расписания движения городских автобусов, основанный на анализе кривых времени рейса. Назовем такое расписание «гибким». Для его составления необходима исходная информация о времени рейсов автобуса за большой период времени (желательно за год) и данные о пассажиропотоках.

Преимущества метода:

- а) выдерживается интервал выходов автобусов с одной из конечных;
- б) уменьшается число рейсов без ухудшения качества обслуживания;
- в) увеличивается коэффициент использования рабочего времени водителя.

Алгоритм составления расписания разбивается на несколько этапов:

1. Получение данных о времени рейса в прямом и обратном направлениях в виде

набора значений: $T_{01}(t_1), T_{01}(t_2), \dots, T_{01}(t_k), T_{02}(t_{k+1}), T_{02}(t_{k+2}), \dots, T_{02}(t_{2k})$, где через T_{01} обозначено время рейса в прямом направлении, T_{02} – в обратном.

2. Подбор функции, наилучшим образом аппроксимирующей полученные значения. Результат этапа – функции $T_1(t)$ и $T_2(t)$.

3. Определение по информации о пассажиропотоках потребного числа рейсов, числа смен водителей, интервалов движения автобусов.

4. Распределение водителей по рейсам.

В настоящей работе будет подробно разобран подбор аппроксимирующей функции. Реализация остальных этапов алгоритма будет детально рассматриваться в последующих публикациях авторов.

Информацию о движении автобусов, как правило, легко получить в виде треков бортового навигатора в формате *.csv. Далее из известных источников, например, OpenStreetMap, берутся геокоординаты конечных остановок. Каждая конечная представляется точкой в центре круга радиусом 50 м. Из потока координат в исходном файле выбираем такие пары соседних строк, чтобы первой отвечала точка внутри круга, второй – вне круга. Соответственно получаем время отправления от каждой из конечных или время прибытия на конечную. Данный этап реализовывался с помощью программы, работа которой показана на рис. 1.

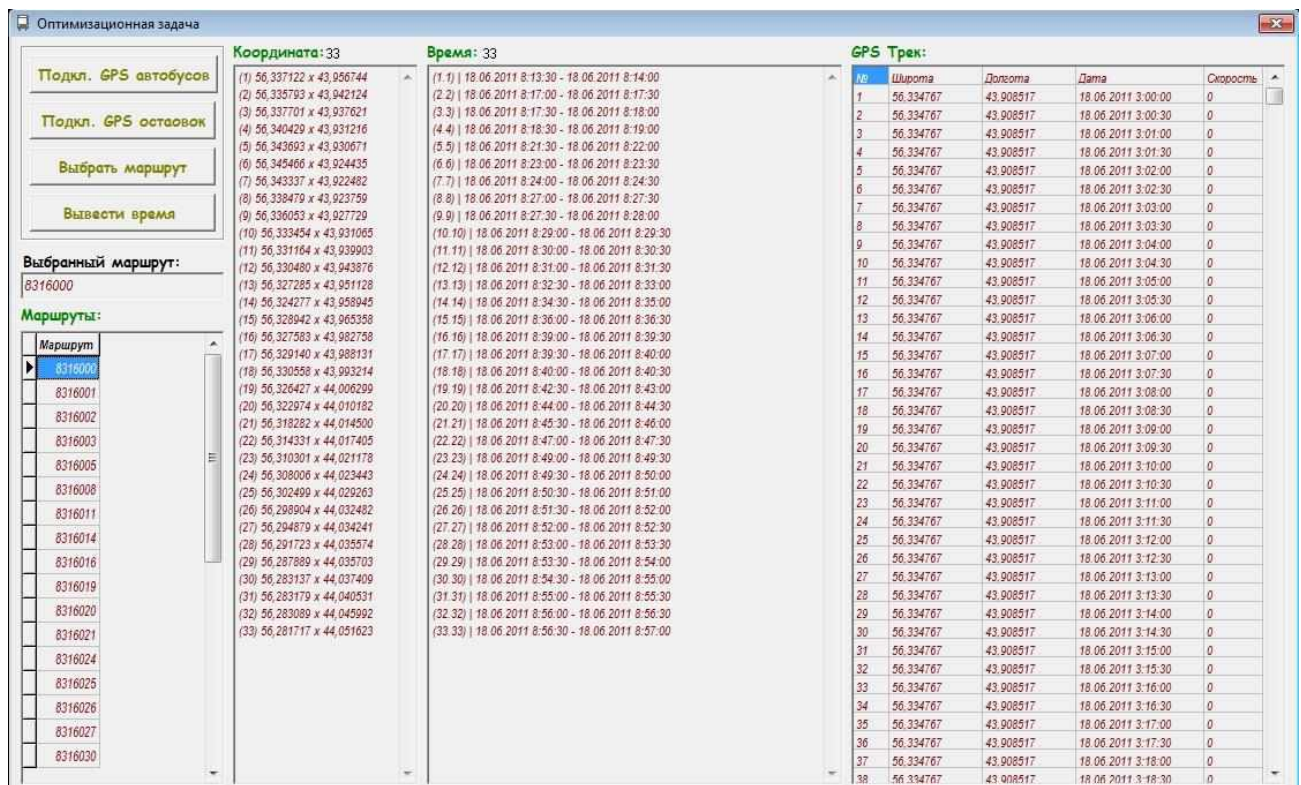


Рис. 1. Программа анализа GPS-треков автобусов

Результат этого этапа – данные о времени рейса в прямом и обратном направлениях.

Таким образом на входе имеем набор точек $T_{01}(t_1), T_{01}(t_2), \dots, T_{01}(t_k), T_{02}(t_{k+1}), T_{02}(t_{k+2}), \dots, T_{02}(t_{2k})$ (через T_{01} обозначено время рейса в прямом направлении, T_{02} – в обратном). Необходимо подобрать пару функций $T_1(t)$ и $T_2(t)$ наилучшим образом описывающих изменение времени пути от первой конечной до второй и обратно в зависимости от времени суток.

Аппроксимация данных точек представляет собой нетривиальную задачу. Заметим, что искомые функции должны иметь по три экстремума: два максимума, соответствующих утреннему и вечернему часу пик и один минимум - соответствующий обеду. Стандартная аппроксимация в виде полинома, логарифмической или показательной функции не подходит

– логарифмическая и показательная функции имеют мало экстремумов, многочлены четвертого порядка слишком резко убывают на краях интервала, больших порядков – имеют много «лишних» экстремумов. Рассматривался класс функций зависящих от 9 параметров, представляющих собой алгебраическую сумму многочлена 4-й степени и двух экспонент общего вида $exp(-x^2)$. Их графики показаны на рис. 2, а, б.

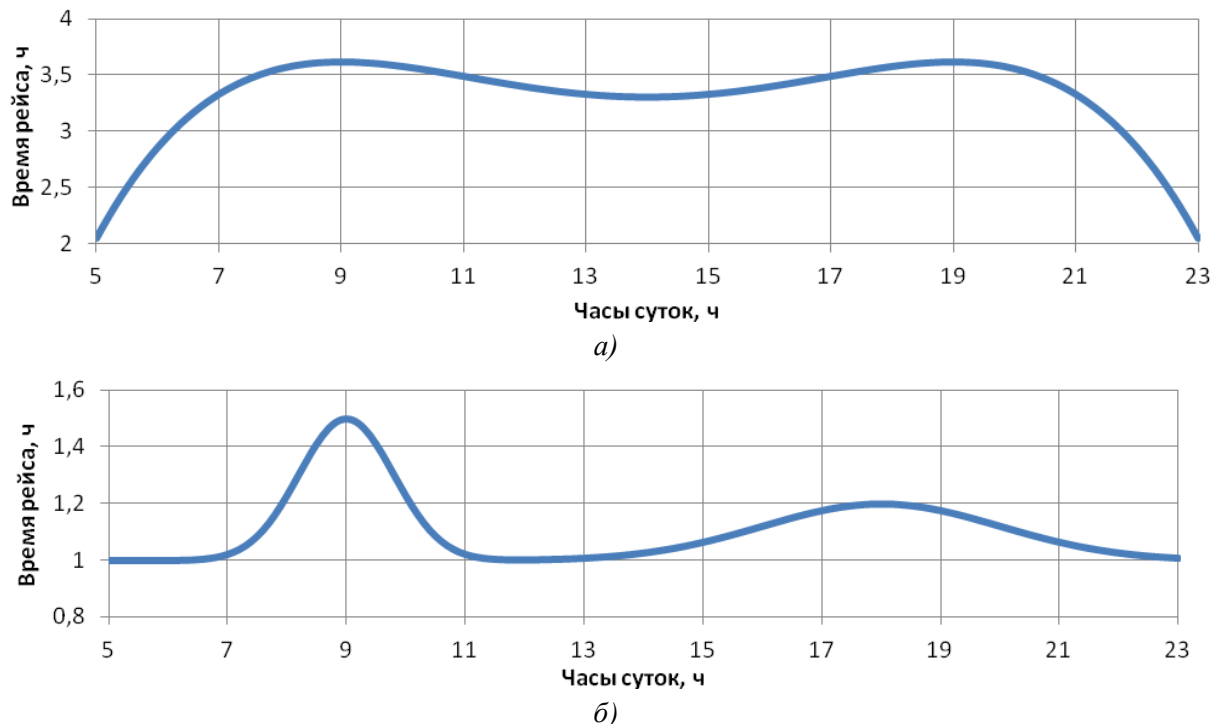


Рис. 2. Вид аппроксимирующей функции:
 а – вариант 1; б – вариант 2

Общий вид функций следующий:

$$f(x) = k_1 f_1(x) + k_2 f_2(x),$$

где $f_1(x) = ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + g$, $f_2(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_1}} e^{-\frac{(x-a_1)^2}{2\sigma_1^2}} + \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_2}} e^{-\frac{(x-a_2)^2}{2\sigma_2^2}} + m$.

Причины такого выделения - каждая из функций $f_1(x)$, $f_2(x)$ имеет нужное число экстремумов, которые легко установить. Поведение этих функций хорошо изучено - несложно указать как повлияет изменение коэффициентов на изменение вида графиков.

Для подбора функции из данного класса используется метод наименьших квадратов, т.е. ищется функция, обеспечивающая условие:

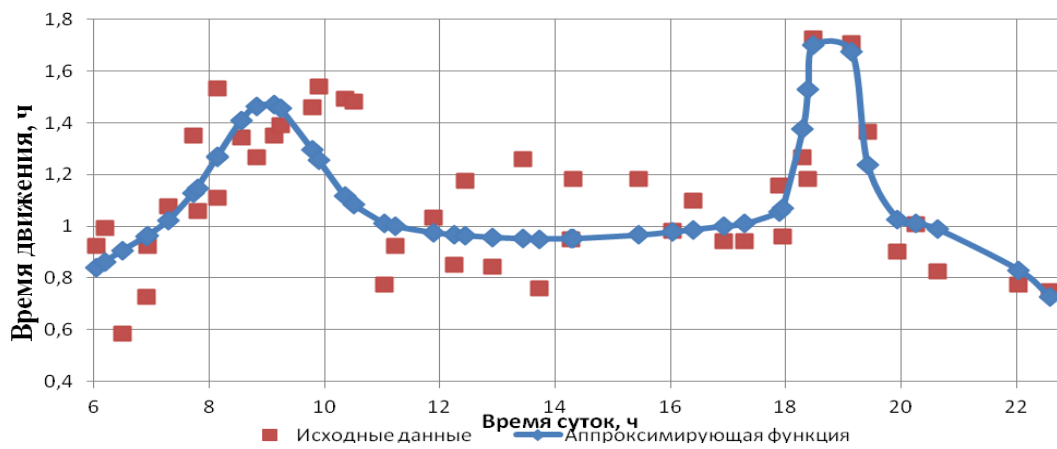
$$f(x) = \min \sum_i (T_{01}(t_i) - T_1(t_i))^2. \tag{1}$$

Подбор коэффициентов велся по следующей схеме:

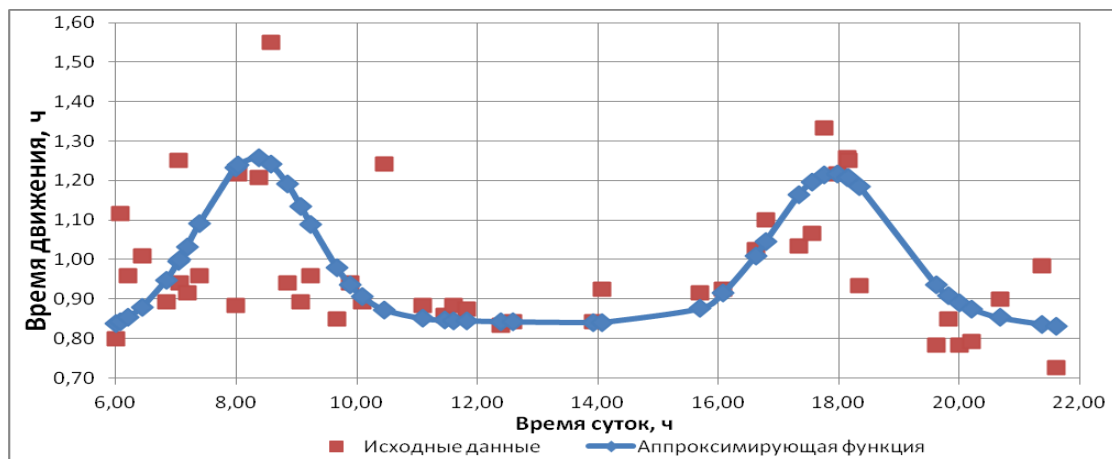
- 1) исходя из данных определялись максимумы функций и высота "пиков" и выбирались начальные значения внутренних коэффициентов $a, \dots, g, a_1, \sigma_1, a_2, \sigma_2$;
- 2) за счет подбора коэффициентов k_1 и k_2 регулируется поведение на краях интервала, соответствующих утру и вечеру;
- 3) выбирается диапазон изменения коэффициентов и шаг изменения и прямым перебором (с использованием компьютерной программы) вычисляются коэффициенты функции, удовлетворяющей условию (1). Время работы программы при задании не слишком широких диапазонов переменных - несколько секунд.

Заметим, что подбор коэффициентов в явном виде из решения соответствующих уравнений практически невозможен.

На рис. 3 представлены примеры такого подбора.



а)



б)

Рис. 3. Аппроксимация исходных данных:

а – для прямого направления; б – для обратного направления

Реализация остальных шагов алгоритма позволяет получить "гибкое" расписание движения МТС. Далее приводится пример такого расписания.

Таблица 1

Пример "гибкого" расписания движения маршрутных транспортных средств

Время выхода	Прибытие на конечную	Время оборота	Водитель	Раб. время	Обед
1	2	3	4	5	6
05:00	06:26	01:26	1		
05:12	06:42	01:30	2		
05:24	06:58	01:34	3		
05:36	07:13	01:37	4		
05:48	07:30	01:42	5		
06:00	07:46	01:46	6		
06:12	08:03	01:51	7		

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6
06:24	08:21	01:57	8		
06:36	08:38	02:02	1		
06:48	08:55	02:07	2		
07:00	09:12	02:12	3		
07:12	09:27	02:15	9		
07:24	09:41	02:17	4		
07:36	09:54	02:18	5		
07:48	10:07	02:19	6		
08:00	10:18	02:18	10		
08:06	10:24	02:18	7		
08:12	10:30	02:18	14		
08:18	10:36	02:18	11		
08:24	10:43	02:19	8		
08:30	10:49	02:19	15		
08:36	10:56	02:20	16		
08:42	11:02	02:20	17		
08:48	11:09	02:21	18		
08:54	11:15	02:21	19		
09:00	11:20	02:20	12		
09:12	11:31	02:19	13		
09:24	11:40	02:16	1		00:45
09:36	11:48	02:12	9		
09:48	11:56	02:08	2		00:52
10:00	12:04	02:04	20		
10:12	12:12	02:00	3		00:59
10:24	12:21	01:57	10		
10:36	12:30	01:54	4		00:54
10:48	12:40	01:52	11		
11:00	12:51	01:51	5		01:05
11:12	13:02	01:50	6		01:04
11:24	13:14	01:50	12		
11:36	13:25	01:49	13		
11:48	13:37	01:49	1	07:51	
12:00	13:48	01:48	2	07:44	
12:12	14:00	01:48	21		
12:24	14:12	01:48	3	07:48	
12:36	14:24	01:48	4	07:54	
12:48	14:35	01:47	22		
13:00	14:47	01:47	5	07:54	
13:12	14:59	01:47	6	07:54	
13:24	15:11	01:47	23		
13:36	15:23	01:47	24		
13:48	15:35	01:47	25		
14:00	15:47	01:47	21		

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6
14:12	16:00	01:48	26		
14:24	16:12	01:48	14		03:53
14:36	16:25	01:49	22		
14:48	16:38	01:50	15		03:58
15:00	16:51	01:51	16		04:03
15:12	17:05	01:53	23		
15:24	17:19	01:55	24		
15:36	17:33	01:57	25		
15:48	17:48	02:00	17		04:45
16:00	18:03	02:03	26		
16:12	18:18	02:06	18		05:02
16:24	18:33	02:09	14	06:28	
16:36	18:47	02:11	19		05:20
16:48	19:00	02:12	15	06:32	
17:00	19:13	02:13	16	06:33	
17:12	19:24	02:12	20		05:07
17:24	19:35	02:11	7	06:23	06:59
17:36	19:45	02:09	21		01:48
17:48	19:55	02:07	22		01:22
18:00	20:07	02:07	17	06:40	
18:06	20:15	02:09	8	06:28	07:22
18:12	20:24	02:12	23		01:06
18:18	20:36	02:18	9	06:55	06:29
18:24	20:51	02:27	24		01:04
18:30	21:07	02:37	18	07:16	
18:36	21:22	02:46	10	07:08	06:14
18:42	21:35	02:53	11	07:16	06:01
18:48	21:44	02:56	19	07:29	
18:54	21:47	02:53	12	07:07	05:40
19:00	21:46	02:46	13	06:59	05:34
19:12	21:36	02:24	25		01:38
19:24	21:30	02:06	20	06:22	
19:36	21:32	01:56	26		01:32
19:48	21:41	01:53	21	07:41	
20:00	21:51	01:51	22	07:41	
20:30	22:19	01:49	23	07:49	
21:00	22:47	01:47	24	08:06	
21:30	23:13	01:43	25	07:47	
22:00	23:37	01:37	26	07:53	

Полученное в ходе реализации описанной методики расписание было проверено на имитационной модели пассажирского маршрута [5, 6]. Следующим этапом работы авторов является апробация методики на реальных маршрутах Нижнего Новгорода и разработка программного комплекса для составления «гибких» расписаний.

Библиографический список

1. **Ясенов, В.В.** Анализ проблем в работе городского пассажирского транспорта г. Нижнего Новгорода / В.В. Ясенов, М.Е. Елисеев, А.В. Липенков // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексева. – 2014. – №4 (106). – С. 249–254.
2. **Власов, В.М.** Централизованная система управления движением наземного городского пассажирского транспорта по выделенным полосам / В.М. Власов, Л.А. Баранов, С.А. Ульянов // Автотранспортное предприятие. – 2012. – №4. – С. 48–52.
3. **Гуревич, Г.А.** Автоматический расчет расписаний движения наземного маршрутизированного транспорта Г.А. Гуревич, С.Б. Перцович // Автотранспортное предприятие. – 2006. – №5. – С. 38–41.
4. **Богумил, В.Н.** Обеспечение автоматического контроля регулярности движения пассажирских транспортных средств в диспетчерской системе / В.Н. Богумил, Д.Б. Ефименко // Автотранспортное предприятие. – 2012. – №6. – С. 19–22.
5. **Елисеев, М.Е.** О проведении обследований городских автобусных маршрутов с целью их последующего моделирования / М.Е. Елисеев, А.В. Липенков, О.А. Маслова // Автотранспортное предприятие. – 2012. – №1. – С. 42–44.
6. **Елисеев, М.Е.** О модели городского пассажирского транспорта: моделирование логики пассажира / М.Е. Елисеев, А.В. Липенков, Е. М. Елисеев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексева. – 2011. – №3. – С. 347–352.

*Дата поступления
в редакцию 15.10.2015*

M. E. Eliseev, A. V. Lipenkov, V.V. Yasenov, E.D. Galkina

**CALCULATION OF APPROXIMATING FUNCTIONS TIME TRAFFIC
IN COMPILING "FLEXIBLE" TIMETABLES ROUTE VEHICLES**

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

Purpose: The article presents the description of methodology of making up of a schedule of city buses movement taking into account the irregular time of rides during the day. The calculation of the irregularity is made by specially selected mathematical function that approximates the data of rides in a best way.

Method: The task is divided into three stages. On the first, the data of points from navigation devices is processed with using a computer program. The second, the class is determined by the appropriate functions. The third, function coefficients are selected using a software implementation of the method of least squares.

Results: The method of selection of function $T(t)$ approximating the measurement time traffic route vehicles between two end stops.

Application domain: Implementation of developed methodology could increase the regularity of city transport rides.

Key words: city passenger transport, passenger traffic, regularity of movement, rides irregularity.

УДК 629.5.01

Дун Синьшо

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОЩАДИ И ПЛЕЧА ПАРУСНОСТИ СУДНА-ГАЗОВОЗА LNG

Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова
(г. Николаев, Украина)

На основе обработки современных статистических данных получены регрессионные зависимости для определения продольной и поперечной площади парусности судна-газовоза LNG двух типов емкостей и плеча парусности.

Ключевые слова: статистические данные, судно-газовоз LNG, площадь парусности, плечо парусности.

Площадь парусности – это площадь проекции надводной части судна на диаметральную плоскость (или плоскость мидель-шпангоута). Величины площадей парусности значительно влияют на мореходные качества судна, например, при расчете кренящего момента от давления ветра обязательно знать продольную площадь парусности и плечо парусности, а величина поперечной площади парусности необходима для определения сопротивления воздуха движению судна. По сравнению с другими типами транспортных судов, судно-газовоз LNG, особенно типа Moss, имеет больше площадь парусности. При проектировании такого типа судна на это следует обращать особое внимание.

Полный расчет площади парусности судна выполняется по подробной проектной документации на стадии технического проекта, а на начальных стадиях проектирования площадь парусности может определяться путем обработки статистических данных. В относительно небольшом количестве работ [1–3] даны площади парусности нескольких судов-газовозов LNG различного водоизмещения, однако зависимости для вычисления этих величин не составлены. В этой работе на основе обработки материалов [4, 5] приведены формулы для расчета продольной и поперечной площади парусности судна-газовоза LNG и соответствующего плеча парусности.

Простейшие формулы устанавливают зависимость продольной и поперечной площади парусности судна от его грузоподъемности:

- для судна-газовоза LNG типа Moss (рис. 1):

$$A_L = 5,38; A_T = 10,04W^{0,432};$$

- для судна-газовоза LNG мембранного типа (рис. 2):

$$A_L = 9,366W^{0,55}; A_T = 5,234W^{0,471};$$

где A_L – продольная площадь парусности судна, м²; A_T – поперечная площадь парусности судна; W – грузоподъемность судна, м³.

С целью уточнения расчета вводится другой подход к определению площади парусности, когда за основу вычисления берутся главные размерения судна и добавочные коэффициенты. В этом случае:

$$A_L = k_1(H - T)L;$$

$$A_T = k_2(H - T)B,$$

где H , T , L , B – высота борта, осадка, расчетная длина и ширина судна, м; k_1 , k_2 – безразмерные добавочные коэффициенты, являющиеся средним значением соотношения площади парусности к площади прямоугольника со сторонами $H - T$ и L (или B).

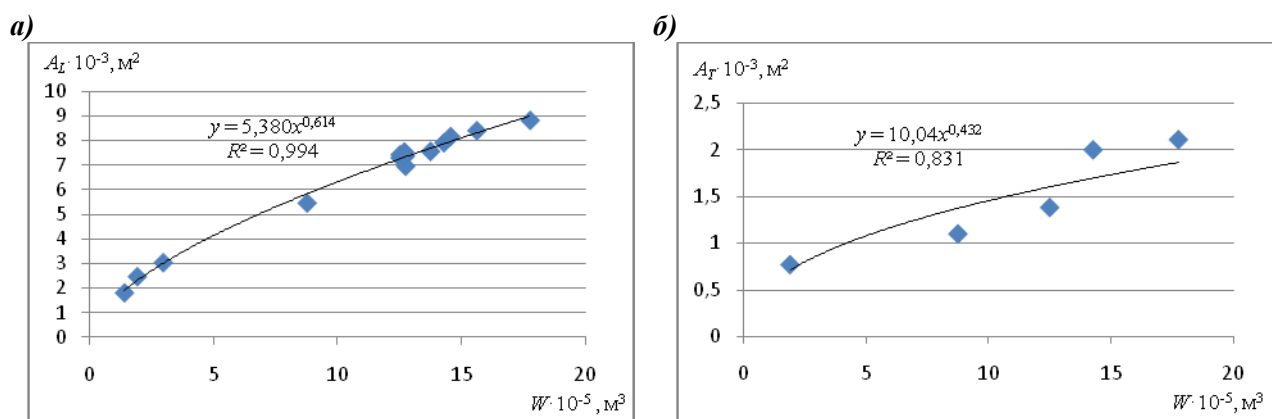


Рис. 1. Зависимость продольной (а) и поперечной (б) площадей парусности судна от его грузовместимости (тип Moss)

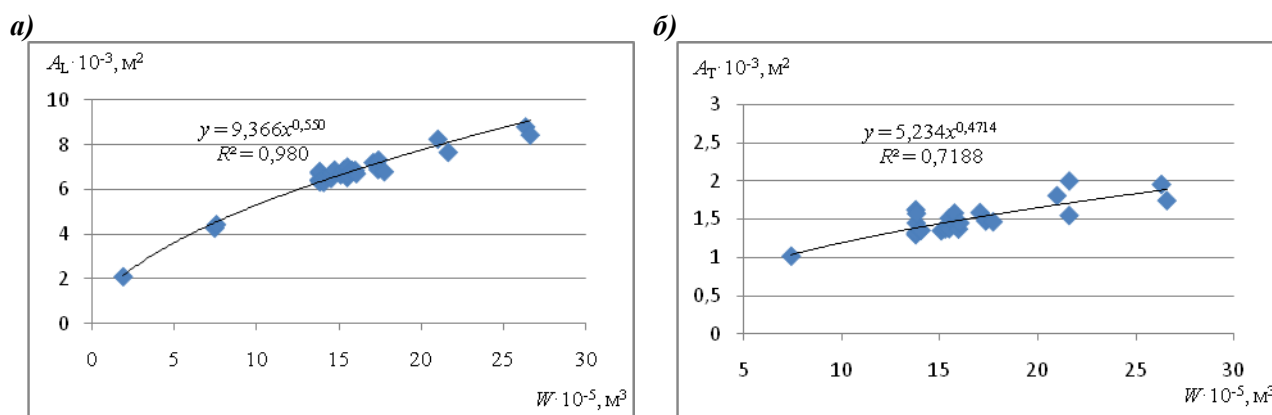


Рис. 2. Зависимость продольной (а) и поперечной (б) площадей парусности судна от его грузовместимости (мембранный тип)

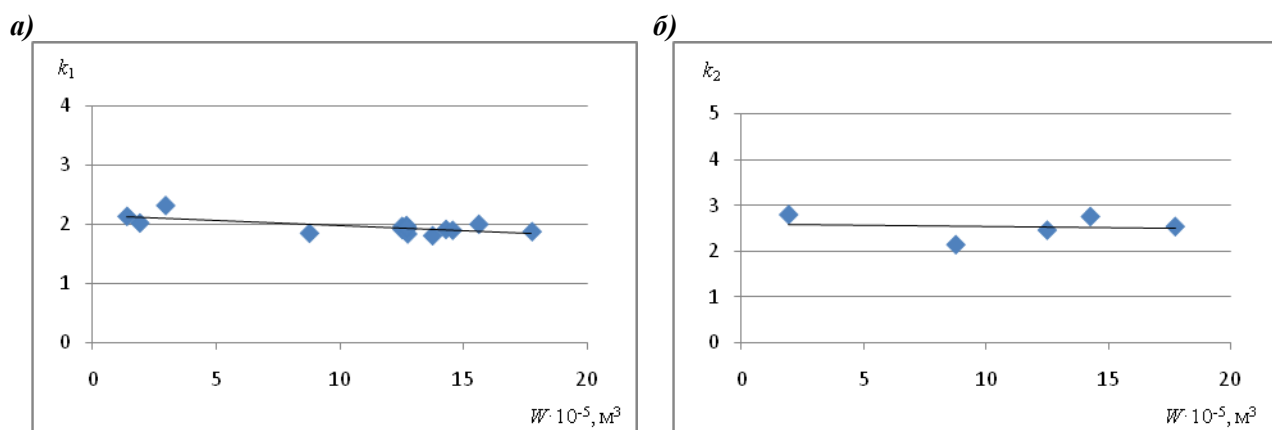


Рис. 3. Зависимость дополнительных коэффициентов k_1 (а) и k_2 (б) от грузовместимости судна (тип Moss)

Для судна-газовоза LNG типа Moss (рис. 3):

$$A_L = 1,952 \cdot (H - T)L; A_T = 2,542 \cdot (H - T)V.$$

Для судна-газовоза LNG мембранного типа (рис. 4):

$$A_L = 1,689 \cdot (H - T)L; A_T = 2,273 \cdot (H - T)V.$$

Плечо парусности z_L измеряется по вертикали от центра площади парусности A_L до середины осадки судна [6], то есть z_L равно разности между расстоянием от центра площади парусности до основной плоскости и половиной осадки, в этом случае:

$$z_L = k_3 H - 0,5T,$$

где k_3 – безразмерный коэффициент, являющийся средним значением соотношения расстояния от центра площади парусности до основной плоскости к высоте борта судна.

Для судна-газовоза LNG типа Moss (рис. 5, а):

$$z_L = 1,018H - 0,5T.$$

Для судна-газовоза LNG мембранного типа (рис. 5, б):

$$z_L = 0,948H - 0,5T.$$

Если приблизительно считать, плечо парусности z_L также может быть определено как $z_L = f(H)$ или $z_L = f(T)$.

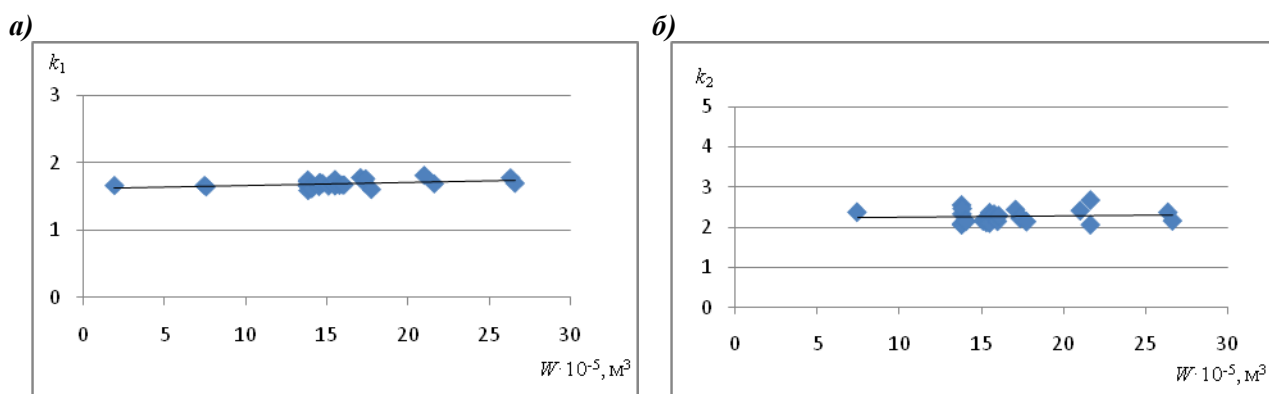


Рис. 4. Зависимость добавочных коэффициентов k_1 (а) и k_2 (б) от грузоподъемности судна (мембранный тип)

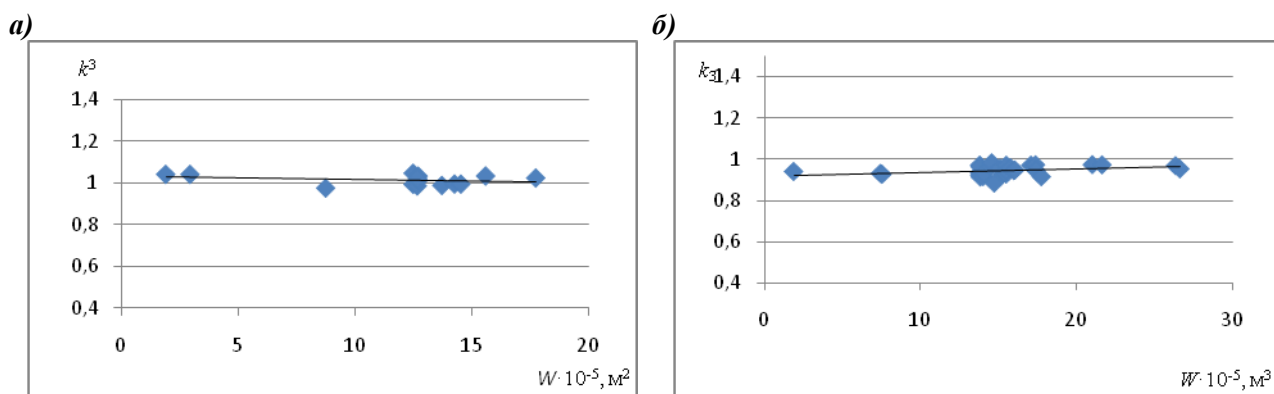


Рис. 5. Зависимость коэффициента k_3 от грузоподъемности судна: тип Moss (а); мембранный тип (б)

Судно-газовоз LNG имеет высокое расположение центра тяжести и большую площадь парусности, эти характерные качества оказывают плохое влияние на остойчивость судна. На начальных стадиях проектирования следует разрешить этот вопрос. С помощью приведенных формул можно вычислять плечо кренящего момента судна при проверке остойчивости судна. Полученные формулы для определения поперечной площади парусности могут применяться в задаче расчета сопротивления воздуха движению судна.

Библиографический список

1. Prediction of wind loads on large liquefied gas carriers // Society of international Gas Tanker & Terminal Operators Ltd. 2007
2. **Carl A. Thoresen.** Port designer's handbook: Recommendations and guidelines, 2003. 549с.
3. **Akakura, Takahashi.** Ship Demensions of Design Ship under Given Confidence Limits // Technical Note of the Ports and Harbour Research Institute, 1998. – № 911
4. Significant ships of 1997, 1999, 2002, 2004-2011, 2013 // The Royal Institution of Naval Architects.
5. **惠美洋彦.** 液化气运输船实用手册 / 惠美洋彦(编著),黄胜,马鉴恩,刘英贵,周凤智,雷电,刘国英(编译) // – 中国哈尔滨.: 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1992. – 830 页.
6. Правила классификации и постройки морских судов // Российский морской регистр судоходства, 2015

*Дата поступления
в редакцию 26.10.2015*

Dong Xinshuo

**DETERMINATION OF THE WIND AREA
AND LEVER ARM OF LNG CARRIERS**

Admiral Makarov National University of Shipbuilding

Purpose: Derivation of formulas for calculating the wind area and lever arm of LNG carriers.

Method: In this paper, the regression formulas were derived by using the statistical method.

Results: By processing the statistical data, the formulas for calculating the longitudinal and transverse wind area of LNG carriers with two types of containment systems and the lever arm were determined.

Conclusion: Obtained formulas can be used to calculate ship air resistance and the heeling moment when checking the stability of LNG carriers.

Key words: statistics, the ship is a liquefied gas carrier LNG, sail area, sail the shoulder.

УДК.621.43

Л.А. Захаров¹, А.Н. Тарасов^{1,2}, И.Л. Захаров¹, А.В. Дегтярев^{1,3}**МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЫБОРА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ
ДЛЯ СРЕДСТВ КОЛЛЕКТИВНОГО СПАСЕНИЯ**

– Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева¹,
– ООО «Объединенный инженерный центр» ОАО ГАЗ²,
– ОАО «ЦКБ по СПК им. Р. Е. Алексева»³

С развитием водного транспорта, добычи полезных ископаемых на буровых платформах на морских и арктических шельфах ставится серьезная задача о создании коллективных средств спасения при возникновении аварийной ситуации. Поэтому выбор оптимальной энергетической установки, обеспечивающей его работоспособность для всех режимов работы транспортного средства, является сложной задачей. В статье рассматриваются теоретические и экспериментальные исследования перспективных инженерных решений органов впуска и выпуска подсистемы газообмена, органов подсистемы охлаждения и др., обеспечивающих рациональные энергетические, экономические и эксплуатационные показатели КП ДВС с воспламенением от сжатия в составе транспортного средства и методы их обеспечения. Предложены специализированные эксплуатационные характеристики КП ДВС в составе транспортного средства, обеспечивающие современные перспективные стандарты при сохранении энергетических и экономических показателей.

Ключевые слова: комбинированный поршневой ДВС, универсальное средство спасения (УСС), судовая энергетическая установка (СЭУ), инженерное решение, СОЛАС (SOLAS).

В 2012 г. исполнилось 100 лет со дня гибели пассажирского лайнера «Титаник». Это был первый случай крупной катастрофы, повлекший за собой массовую гибель людей из-за отсутствия достаточного количества средств коллективного спасения экипажа и пассажиров. И этот случай положил начало созданию международной системы спасения человеческой жизни на море, которая под названием Safety of Life at Sea (Безопасность жизни на море – СОЛАС) была принята Международной Морской Организацией (ИМО) в 1960 г. в качестве Международной конвенции. На базе СОЛАС Комитетом по безопасности на море ИМО принят Международный кодекс по спасательным средствам (Кодекс КСС – LSA CODE), который с 01.06.1998 является обязательным приложением СОЛАС. Наиболее эффективными средствами коллективного спасения (СКС), способными в короткое время обеспечить проведение спасательной операции и отход экипажа и пассажиров на безопасное расстояние от терпящего бедствие судна, полностью отвечающими конвенционным требованиям СОЛАС, являются моторные спасательные шлюпки, оснащенные надежными судовыми энергетическими установками (СЭУ). При аварийных ситуациях условием успешного проведения спасательной операции является, в первую очередь, безотказная и эффективная работа энергетической установки универсального средства спасения (УСС) [1].

Статистика показывает, что аварийные ситуации нередко случаются на морском и речном транспорте при различных климатических условиях, при сильном штормовом ветре и больших волнах, в холод и жару. Поэтому инженерное решение УСС и ее КП ДВС должны обеспечивать немедленный ввод в действие, хорошие судходные качества, непотопляемость, возможность использования в качестве активного средства для сбора и буксировки плотов, передачи и приема экстренной информации, борьбы с дрейфом, спасения лиц, оказавшихся за бортом и безопасное укрытие людей до подхода помощи.

Основой энергетических установок спасательных шлюпок является двигатель внутреннего сгорания. В соответствии с Международной конвенцией по охране человеческой жизни на море (СОЛАС), Правилами Российского Морского Регистра Судходства (РМРС) и Международному кодексу по спасательным средствам моторные спасательные шлюпки мор-

ских судов должны быть оборудованы двигателями с воспламенением рабочей смеси от сжатия.

Стоит отметить, что выбор КП ДВС в составе рациональной энергетической установки для конкретного транспортного средства является сложной задачей.

Причины этого - разнообразие транспортных средств, широкий диапазон условий эксплуатации и специфических требований к конкретному транспортному средству.

Подбирая двигатель, необходимо решить следующие вопросы:

- тип двигателя,
- максимальная мощность,
- крутящий момент,
- частота вращения коленчатого вала,
- тип системы охлаждения,
- эксплуатационно-технические показатели: экономичность, токсичность, виброакустические характеристики, пусковые качества, обеспечение условий зимней эксплуатации и надежность и др. [6].

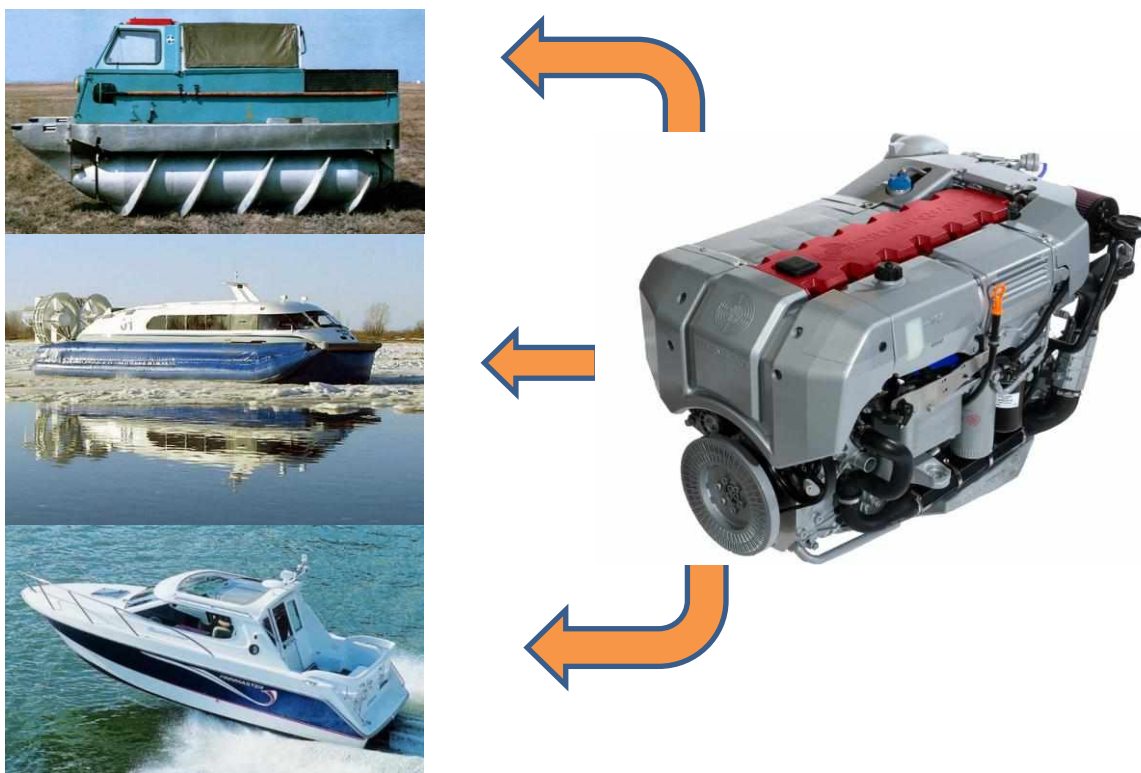


Рис. 1. КП ДВС с воспламенением от сжатия для водного транспорта

Требования, предъявляемые к двигателям

Требования к ДВС наземного транспорта.

Основными показателями, характеризующими качество ДВС, являются [4]:

- надежность всех элементов конструкции;
- степень совершенства преобразования тепловой энергии в механическую (оценивается КПД и удельным расходом топлива);
- удельная мощность;
- масса, удельная масса и его габаритные размеры;
- экологические показатели;
- простота конструкции, удобство обслуживания и стоимость ДВС, его эксплуатации и ремонта;

- надежность пуска;
- перспективность конструкции.

Требования к двигателям речного и морского транспорта.

Энергетическая установка судна должна удовлетворять следующим основным требованиям [3, 5]:

- иметь мощность главных двигателей, обеспечивающую движение судна с заданной скоростью;
- обеспечивать потребности в электрической и тепловой энергии всех потребителей, установленных на борту судна;
- обладать высокой теплоэнергетической эффективностью;
- быть надежной и сохранять работоспособность при аварийной ситуации;
- обеспечивать маневровые качества, определяемые назначением судна и условиями его эксплуатации;
- иметь минимальную массу и габариты;
- обеспечивать максимальную дальность хода;
- не оказывать вредных воздействий на экипаж и пассажиров судна;
- удовлетворять Правилам Регистра, действующим ГОСТам и нормам, правилам по охране труда и санитарии.

Кроме перечисленных требований общего характера, судовой энергетической установке (СЭУ) могут быть предъявлены отдельные специальные требования, определяемые назначением судна (устойчивость работы на малых ходах, экономичность на частичных нагрузках, марка топлива, стоимость и др.).

Требования к двигателям спасательных средств [7].

Спасательные средства – это устройства, способные обеспечить сохранение жизни людей, терпящих бедствие, с момента оставления ими судна. Все спасательные средства делятся на два основных вида: коллективного использования и индивидуальные. Помимо этого, существует еще один вид спасательных средств, не относящийся к указанной классификации: линеметательные установки. Требования, предъявляемые к спасательным средствам, и нормативы снабжения ими судов регламентируются Конвенцией СОЛАС-74 и Правилами Регистра. Эти требования в общем случае сводятся к следующему:

- не должны приходить в негодность при хранении их при температуре воздуха от -30 до $+65^{\circ}\text{C}$;
- работать при температуре морской воды от -1 до $+30^{\circ}\text{C}$;
- быть стойкими к гниению, коррозии, морской воде, нефти и грибкам;
- быть хорошо видимого цвета для лучшего их обнаружения (обычно оранжевого);
- быть снабжены светоотражающим материалом;
- работать на волнении.

Коллективные спасательные средства. К ним относятся специализированные спасательные коллективные средства и дежурные шлюпки, спасательные плоты, спасательные приборы, плот-каюты (спасательный отсек).

Спасательные шлюпки. Изготавливаются из металла (сталь или алюминиевые сплавы) или стеклопластика. Дерево для изготовления спасательных шлюпок не применяется. Спасательная шлюпка непотопляема за счет наличия воздушных ящиков под сиденьями вдоль бортов, поэтому в перевернутом, затопленном состоянии она остается на плаву. Конвенция СОЛАС-74 определяет общие требования к шлюпкам и дополнительные к частично закрытым и закрытым шлюпкам.

Требования к энергетической установке и ее системам:

Особые требования, предъявляемые к органам подсистем КП ДВС в составе спасательного коллективного средства (СКС):

- **Требования** к органам впуска и выпуска КП ДВС подсистемы газообмена в составе транспортного СКС.

Анализ результатов исследований, проведенных при доводке вновь создаваемых инженерных решений КП ДВС, и совершенствование существующих рабочих процессов позволяют отметить взаимосвязь между процессами наполнения, топливоподачи, смесеобразования и тепловыделения в рабочей камере цилиндра, при вращении окислителя вокруг и вдоль продольной оси цилиндра. Кинетическая энергия воздуха, вращающегося в рабочей камере цилиндра, необходимая для эффективного смесеобразования, зависит от аэродинамических качеств впускного трубопровода в целом и отдельных органов впуска. Размеры, формы, расположения и инженерные решения их оказывают решающее влияние на следующие факторы:

1) на величину аэродинамического сопротивления, возникающего от воздушного фильтра до впускного отверстия, при истечении через проходную площадь во впускном отверстии (образованного фасками седла и клапана) и организации упорядоченных вращательных движений воздуха вокруг и вдоль продольной оси цилиндра в рабочей камере цилиндра;

2) на колебательный процесс столба воздуха, заключенного между воздушным фильтром и рабочей камерой цилиндра, используемой для повышения наполнения цилиндра за счет динамического наддува и формирования кривой крутящего момента в рабочем диапазоне частот вращения;

3) равномерность распределения воздуха по отдельным цилиндрам.

• **Требования** к органам подсистемы охлаждения КП ДВС в составе транспортного СКС позволяют отметить взаимосвязь теплового баланса КП ДВС, обеспечивающего рациональное распределение части внутренней энергии рабочего тела по остову КП ДВС, деталям, узлам и подсистемам КП ДВС и поддержания ее постоянной для получения наиболее выгодных энергетических экономических и эксплуатационных показателей.

Аналогичные требования предъявляются и другим подсистемам.

Все выхлопные трубы двигателя, воздухопроводы и другие отверстия должны быть устроены так, чтобы при опрокидывании спасательной шлюпки и возвращении ее в прямое положение исключалась возможность попадания воды в двигатель.

Управление двигателем и его передачей должно производиться с поста управления рулем.

Двигатель и относящиеся к нему устройства должны быть способны работать в любом положении во время опрокидывания спасательной шлюпки и продолжать работать после возвращения ее в прямое положение или автоматически останавливаться при опрокидывании, а затем вновь легко запускаться после возвращения спасательной шлюпки в прямое положение. Конструкция топливной системы и системы смазки должна предотвращать возможность утечки из двигателя топлива и утечки не более 250 мл смазочного масла во время опрокидывания спасательной шлюпки.

Двигатели с воздушным охлаждением должны иметь систему воздухопроводов для забора и выброса за пределы спасательной шлюпки охлаждающего воздуха. Должны быть предусмотрены заслонки с ручным управлением, позволяющие забирать охлаждающий воздух изнутри спасательной шлюпки и выбрасывать его также внутрь спасательной шлюпки.

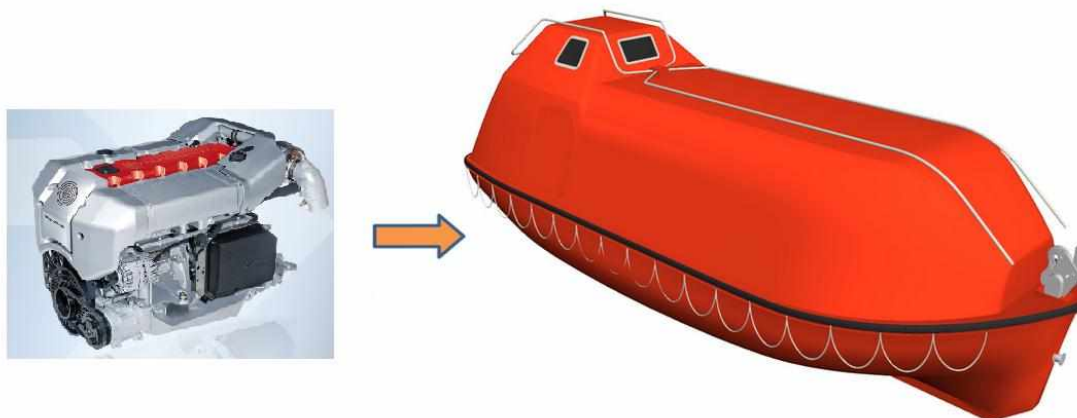


Рис. 2. Поршневой ДВС для УСС

Перечислим специальные характеристики дизельных двигателей, поставляемые с сертификатом SOLAS:

- простота ввода в действие и управления, удовлетворяющие условию, чтобы лица, не имеющие специальной подготовки, могли их эксплуатировать;
- компактность и простота конструкции;
- пожаро- и взрывобезопасность;
- коррозионная стойкость деталей и узлов при работе в условиях высокой влажности, насыщенного солями морского воздуха;
- малая масса и габариты, обеспечивающие минимальные потери полезной площади и грузоподъемности судна;
- наличие валоповоротного приспособления для проворачивания коленчатого вала двигателя;
- постоянная готовность к вводу в действие, надежный и немедленный пуск как вручную, так и с помощью электростартера или другого пускового устройства при температуре окружающего воздуха до 258 К;
- безотказное функционирование в любых условиях эксплуатации;
- возможность запуска и прогрева на палубе до спуска СКС на воду и функционирования на полной мощности сразу после спуска на воду;
- быстрый отход СКС от терпящего бедствие судна со скоростью не менее 3,1 м/с на безопасное расстояние;
- возможность функционирования в полузатопленном состоянии по ось коленчатого вала, при перевороте на 360° , с задержкой в перевернутом на 180° положении до 10 с и прохождении в течение 8...10 минут зоны огня;
- автоматическая остановка при перевороте, при этом течь масла и топлива минимальна;
- двигатель может быть моментально запущен вновь после выравнивания;
- двигатель может работать при погружении по уровень коленчатого вала;
- продолжает работать при максимальном наклоне в 30° ;
- выдерживает удар спасательной шлюпки о воду;
- имеется возможность привода противопожарной помпы от шкива коленчатого вала.

Выполнение всех перечисленных требований позволяет обеспечить сохранность человеческих жизней на море при любых возможных условиях эксплуатации морских объектов и судов. Эти требования должны учитываться как в процессе разработки и производства энергетических установок УСС, так и в процессе их эксплуатации за счет поддержания эксплуатационных качеств двигателя на должном уровне.

Данная работа проводилась в Нижегородском государственном техническом университете им. Р. Е. Алексеева при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта: RFMEFI57714X0105).

Библиографический список

1. **Алексеев, В.В.** Повышение надёжности и функциональных характеристик двигателей средств коллективного спасения экипажей морских судов: дисс. ... канд. техн. наук. – Н.Новгород, 2015. – 162 с.
2. **Захаров, И.Л.** Методы повышения энергии рабочего тела в современных ДВС, работающих на топливе разного химического состава, до уровня перспективных энергетических, экономических и экологических стандартов / И.Л. Захаров [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н.Новгород. – 2013. – №1. – С. 172–183.
3. **Троицкий, С.А.** Метод выбора критериев оценки поршневых ДВС для эффективной эксплуатации в составе водного транспорта / С.А. Троицкий [и др.]// Будущее технической науки: тезисы докладов 12 Междунар. молодежной научно-техн. конференции; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2013.
4. Автомобильные двигатели / под ред. М.С. Ховаха. – М.: Машиностроение, 1977.
5. **Ручкин, Ю.Н.** Судовые энергетические установки и их элементы: учеб. пособие / Ю.Н. Ручкин; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н.Новгород, 2008. – 158 с.
6. <http://azbukadvs.ru/dinamika-i-konstruirovaniye/2056-podbor-dvigatelja-dlja-transportnogo-sredstva-chast-1.html>.
7. <http://gigabaza.ru/doc/72042.html>.

*Дата поступления
в редакцию 26.10.2015*

L.A. Zakharov¹, A.N. Tarasov^{1,2}, I.L. Zakharov¹, A.V. Degtyarev^{1,3}

**METHODOLOGICAL BASIS FOR THE SELECTION OF THE POWER
PLANT MEANS OF COLLECTIVE RESCUE**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev¹,
– LLC "Joint Engineering Centre" JSC GAZ²,
ALEXEEV'S CENTRAL HYDROFOIL DESIGN BUREAU³

With the development of waterway transport, mining, drilling rigs offshore and the Arctic shelf is placed a major challenge to establish a collective means of escape in case of emergency. Therefore, selection of the optimal power plant, ensuring its efficiency for all modes of operation of the vehicle, is a challenge. The article deals with theoretical and experimental studies of engineering solutions most favorable intake and exhaust gas exchange subsystem, subsystems of cooling, etc., Providing sustainable energy, economic and operational indicators KP internal combustion engines with compression ignition into a vehicle and methods for their support. We offer specialized performance gearbox the engine as part of the vehicle to ensure modern standards while maintaining the long-term energy and economic indicators.

Key words: combined piston internal combustion engine, a universal means of salvation (UMS), the ship's power plant (SPP), an engineering solutions, SOLAS.

УДК 629.124

Ю.А. Москвичева

ВЛИЯНИЕ СПЛОЧЕННОСТИ МЕЛКОБИТОГО ЛЬДА И ШИРИНЫ ЛЕДОВОГО КАНАЛА НА ЛЕДОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ СУДОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приводятся результаты модельных исследований арктического судна-снабженца в мелкобитых льдах различной сплоченности. Приводится приближенная зависимость для учета сплоченности в ледовом сопротивлении. Описывается влияние ширины ледового канала на сопротивление модели в битых льдах.

Ключевые слова: модель судна, модель битого льда, ледовый канал, сопротивление, влияние сплоченности.

Развитие судоходства в условиях продления навигации на морских и внутренних водных путях, необходимое для развития экономики России, ставит задачи прогнозирования ледового сопротивления для различных условий плавания. Одним из таких условий является движение судов в поле мелкобитого льда или в ледовом канале, проложенном ледоколом.

В статье приводятся результаты модельных испытаний в модели битого льда, в ледяном поле и в ледовом канале. Испытания проводились в ледовом бассейне Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. Размеры бассейна 16,5 x 1,65 x 0,9 м. Испытания проводились в июле 2014 г. Битый лед имитировался треугольными плитками полиэтилена высокого давления. Как показали исследования [1], в настоящее время этот материал наиболее полно удовлетворяет условиям подобия, которые для битого льда можно записать в виде:

$$\text{Fr} = \frac{v}{\sqrt{gL}} = \text{idem}; \quad \rho_{\text{л}}/\rho_{\text{в}} = \text{idem}; \quad f = \text{idem};$$

$$\bar{S} = \text{idem}; \quad h_{\text{м}} = \frac{h_{\text{н}}}{\lambda}; \quad S_{\text{н}}/S_{\text{м}} = \lambda^2,$$

где индекс «м» относится к модели, индекс «н» относится к натуре;

Fr – число Фруда;

$\rho_{\text{л}}, \rho_{\text{в}}$ – плотность льда и воды;

f – коэффициент трения льда или его модели о корпус;

$h_{\text{м}}, h_{\text{н}}$ – толщины модели льда и натуре;

λ – геометрический масштаб модели;

$S_{\text{н}}, S_{\text{м}}$ – площадь обломков льда натуре и модели.

При выполнении приведенных условий чисто ледовое сопротивление $R^{\text{чл}}$ можно переписать по кубу линейного масштаба

$$R^{\text{чл}} = R_{\text{обл}}^{\text{л}} - R_{\text{в}},$$

где $R_{\text{обл}}^{\text{л}}$ – сопротивление обломков льда; $R_{\text{в}}$ – сопротивление воды.

Большое разнообразие ледовых условий, нестабильность свойств и характеристик битых льдов, делают достаточно сложным точно и определенно зафиксировать многочисленные параметры, характеризующие натуральную ледовую обстановку (формы и размеры льдин, их сплоченность), поэтому в эксперименте приближенно моделируется движение

судна в некоторой условной среде с осредненными характеристиками. Условия подобия соблюдаются лишь в наиболее важных характеристиках битого льда (толщины, сплоченности, ширины канала и коэффициента трения льда о корпус). При этом можно выполнить повторяемость проводимых опытов. Отношение размеров льдин в плане к толщине принимались равными 6, что соответствует средним размерам обломков при разрушении льда изгибом ($5 \div 7$).

Плотность льда полиэтилена высокого давления $\rho_{\text{л}} \approx 0,92 \text{ т/м}^3$, коэффициент трения $f \approx 0,15$, что соответствует реальным ледовым условиям.

В поле и в канале битого льда испытывалась модель судна-снабженца ледового класса, выполненная из дерева и покрытая специальной эмалью, обеспечивающей близкий коэффициент трения полиэтилена о корпус. Модель выполнена в масштабе 1:100 с характеристиками: $L = 1450 \text{ мм}$, $B = 270 \text{ мм}$, $T = 77 \text{ мм}$, $H = 155 \text{ мм}$, масса модели 26,4 кг.

Бассейн оборудован гравитационной буксировочной системой – сопротивление измерялось весом падающего буксировочного груза, скорость – частотомером, работающем от фоторезистора, сигналы от которого через АЦП передавались на компьютер. Сплоченность битого льда определялась суммарной площадью обломков (плиток полиэтилена), заполнявших водную поверхность бассейна.

Испытания проводились при разной сплоченности льда от 0 до 10 баллов через один балл, что соответствовало функции сплоченности $\bar{S} = 0; 0,1; 0,2 \dots 1,0$.

Результаты испытаний приведены на рис. 1. Каждое испытание повторялось 3–4 раза, из которых выбиралось среднее арифметическое значение.

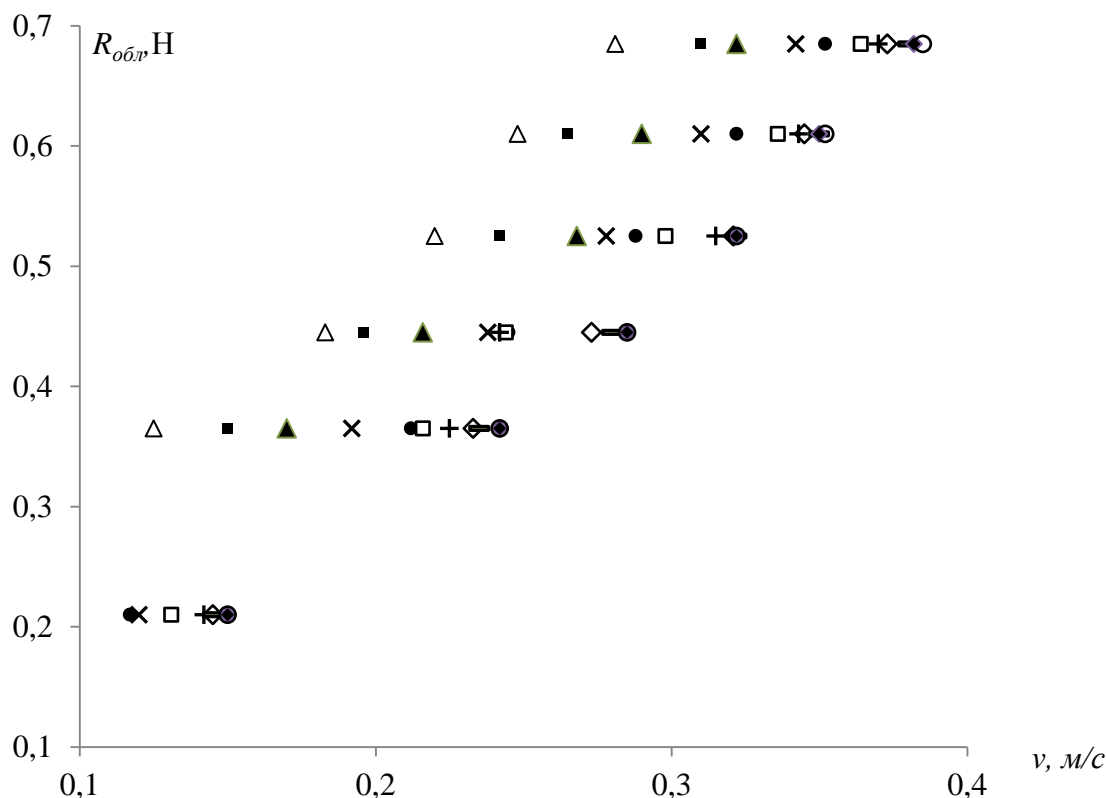


Рис. 1. Зависимость сопротивления модели от скорости при движении в битых льдах разной сплоченности:
 ○ - 0; ◆ - 1; ▢ - 2; ◇ - 3; + - 4; □ - 5; ● - 6; X - 7; ▲ - 8; ■ - 9; △ - 10

Экспериментальные данные для построения графика приведены в табл. 1

Таблица 1

Сопротивление модели в битом льду заданной сплоченности

Сплоченность льда, баллы	Наименование	Величины					
		v , м/с	$R_{обл}$, кН	v , м/с	$R_{обл}$, кН	v , м/с	$R_{обл}$, кН
10	v , м/с	0,125	0,183	0,220	0,248	0,281	
	$R_{обл}$, кН	0,365	0,445	0,525	0,610	0,685	
9	v , м/с	0,150	0,196	0,242	0,265	0,310	
	$R_{обл}$, кН	0,365	0,445	0,525	0,610	0,685	
8	v , м/с	0,170	0,216	0,268	0,290	0,322	
	$R_{обл}$, кН	0,365	0,45	0,525	0,610	0,685	
7	v , м/с	0,120	0,192	0,238	0,278	0,310	0,342
	$R_{обл}$, кН	0,210	0,365	0,445	0,525	0,610	0,685
6	v , м/с	0,117	0,212	0,245	0,288	0,322	0,352
	$R_{обл}$, кН	0,210	0,365	0,445	0,525	0,610	0,685
5	v , м/с	0,131	0,216	0,244	0,298	0,336	0,364
	$R_{обл}$, кН	0,210	0,365	0,445	0,525	0,610	0,685
4	v , м/с	0,142	0,225	0,242	0,315	0,343	0,370
	$R_{обл}$, кН	0,210	0,365	0,445	0,525	0,610	0,685
3	v , м/с	0,145	0,233	0,273	0,321	0,345	0,373
	$R_{обл}$, кН	0,210	0,365	0,445	0,525	0,610	0,685
2	v , м/с	0,145	0,235	0,280	0,322	0,350	0,380
	$R_{обл}$, кН	0,210	0,365	0,445	0,525	0,610	0,685
1	v , м/с	0,150	0,242	0,285	0,322	0,350	0,382
	$R_{обл}$, кН	0,210	0,365	0,445	0,525	0,610	0,685
0	v , м/с	0,150	0,242	0,285	0,322	0,353	0,385
	$R_{обл}$, кН	0,210	0,365	0,445	0,525	0,610	0,685

На рис. 2 и рис. 3 приведены фрагменты испытаний.

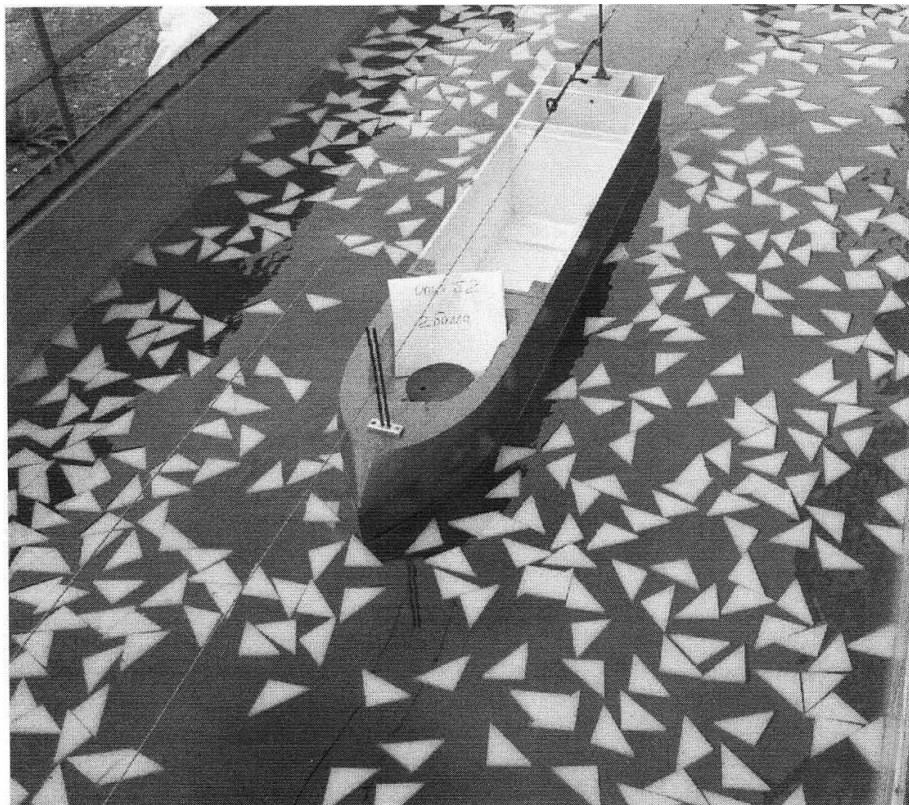


Рис. 2. Фрагмент испытаний во льду сплоченностью 2 балла

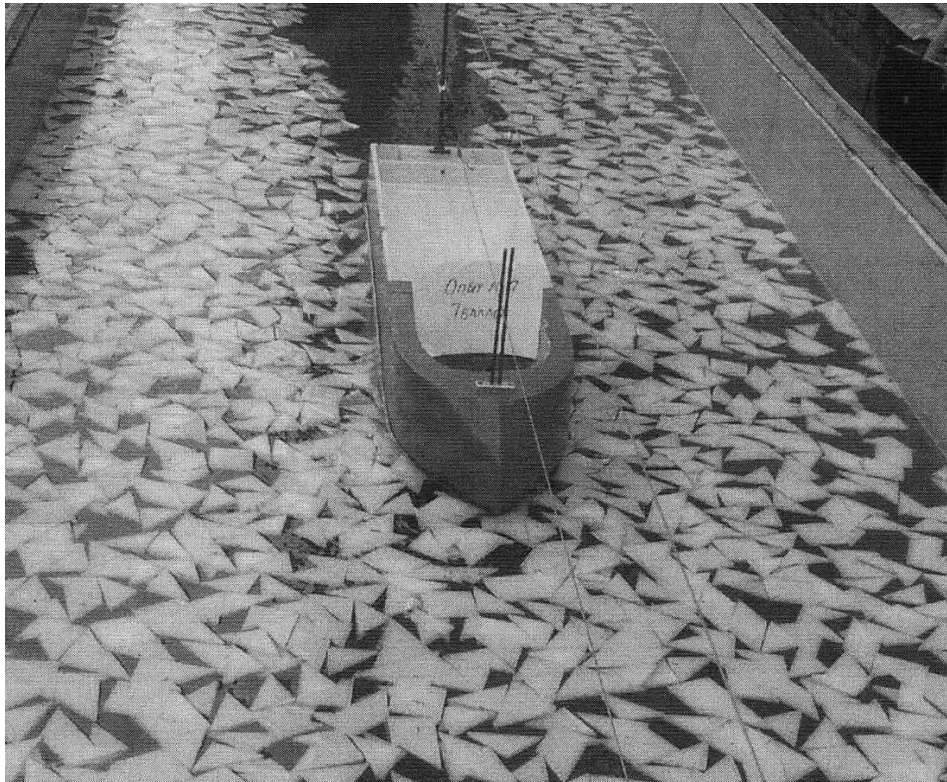


Рис. 3. Фрагмент испытаний во льду сплоченностью 8 баллов

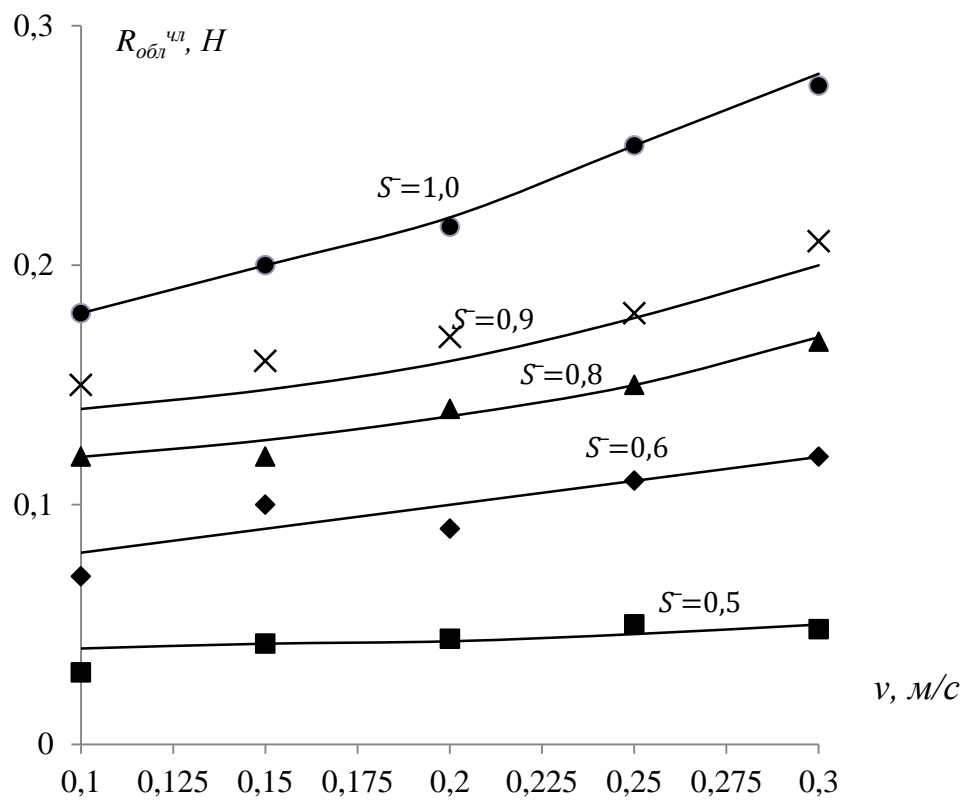


Рис. 4. Чисто ледовое сопротивление в поле битого льда различной сплоченности — по формуле *):

●, X, ▲, ◆, ■ — эксперименты

Сопротивление модели при движении в битом льду сплоченностью до 3 баллов практически не отличается от сопротивления в чистой воде, а затем начинает интенсивно возрастать с увеличением сплоченности.

На рис. 4 приведены кривые чисто ледового сопротивления модели в обломках льда. Если сопротивление в сплоченном 10-ти бальном льду принять за единицу, или за какую-то величину, полученную при расчетах или испытаниях, то сопротивление в битом льду другой сплоченности можно получить следующим образом:

$$R_{обл}^{чл} = R_{\bar{S}=1,0}^{чл} \cdot \bar{S}^3 (2 - \bar{S}).$$

Этой же зависимостью можно пользоваться для приближенной оценки сопротивления во льду любой сплоченности, если известно сопротивление в какой-то сплоченности.

Следующим этапом модельных испытаний была оценка влияния ширины ледового канала на сопротивление при движении модели в обломках.

Для этого вдоль длины бассейна выкладывались пластины из полиэтилена толщиной 20 мм. Ширина пластины варьировалась. Испытания проводились в битом льду толщиной 10 мм, сплоченностью 9 баллов.

Результаты испытаний приведены на рис. 5. Замечено, что при отношении ширины канала к ширине судна $B_k/B \geq 2$, движение в канале не отличается от движения в поле битого льда. При некоторой «критической» ширине канала, меньшей, чем $B_k \leq B + 2h$, часто возникало сжатие модели от повернутых льдин, а иногда и заклинивание модели.

С увеличением скорости влияние ширины канала на сопротивление падает, что видимо связано с повышением инерционных характеристик льдин и уменьшением заклинивания.

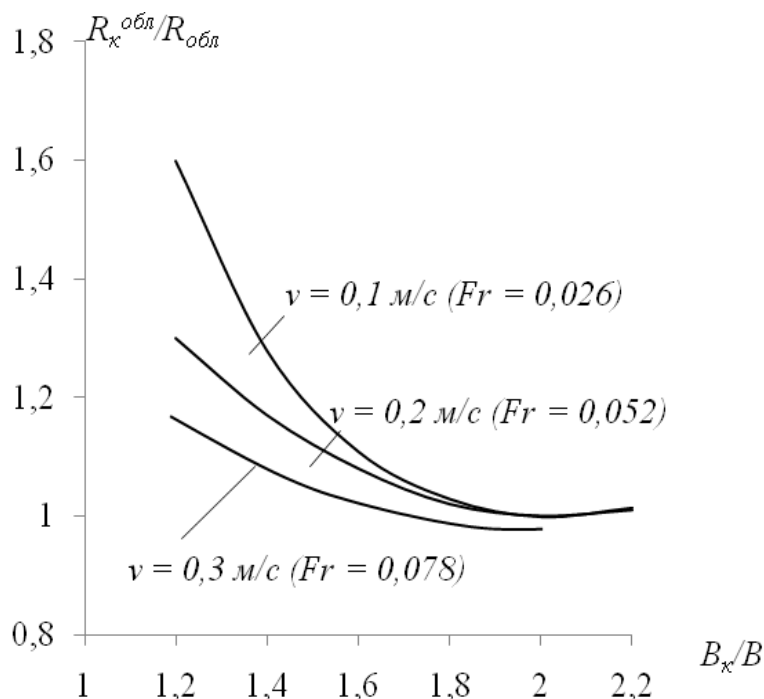


Рис. 5. Зависимость сопротивления в канале от отношения B_k/B ($Fr = v/\sqrt{gL}$)

На рис. 6 показан ледовый канал переменной ширины, заполненный битым льдом, в котором проходили испытания модели.



Рис. 6. Общий вид ледового бассейна. Ледовый канал переменной ширины

Библиографический список

1. **Зуев, В.А.** Средства продления навигации на внутренних водных путях / В.А. Зуев. – Л.: Судостроение, 1986. – 208 с.
2. **Сазонов, К.Е.** Метод расчета ледового сопротивления судна при его движении в крупнобитых льдах и обломках ледяных полей / К.Е. Сазонов, А.А. Добродеев // Сб. трудов ЦНИИ им. акад. Е.Н. Крылова. – Вып. 63 (347). – С. 73–79.
3. **Сазонов, К.Е.** Расчет ледового сопротивления судна по проложенному ледоколом каналу // Сб. трудов ЦНИИ им. акад. Е.Н. Крылова. – Вып. 51 (335). – С. 101–112.
4. **Сазонов, К.Е.** Теоретические основы плавания судов во льдах / К.Е. Сазонов. – СПб.: ЦНИИ им. Акад. Е.Н. Крылова, 2010. – 274 с.

*Дата поступления
в редакцию 26.10.2015*

Ju. Moskviceva

INFLUENCE OF UNITY OF SMALL BROKEN ICE AND WIDTH OF THE ICE CHANNEL ON THE ICE RESISTANCE OF SHIPS

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

Development of navigation in the conditions of extension of navigation on maritime and internal waterways, necessary for development of economy of Russia, sets tasks of forecasting of ice resistance for various conditions of swimming. One of such conditions is the movement of courts in the field of melkobyty ice or in the ice channel laid by the ice breaker.

The article presents the results of modeling studies of the Arctic supply vessel in different ice cohesion. An approximate relationship for the account of cohesion in the ice resistance. It describes the effect of the width of the ice channel resistance patterns in broken ice.

In a field and in the channel of beaten ice the model of the supplying vessel of an ice class executed from a tree and covered with the special enamel providing close coefficient of friction of polyethylene about the case was tested.

Key words: ship model, model broken ice, ice channel, resistance, the influence of cohesion.

УДК 629.12

А. Б. Ваганов¹, Нгуен Нгок Тан²

ДИНАМИКА ВОДОИЗМЕЩАЮЩЕГО АМФИБИЙНОГО СУДНА ПРИ ВХОДЕ В ВОДУ И ПРИ ВЫХОДЕ ИЗ ВОДЫ НА БЕРЕГ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Социалистическая Республика Вьетнам²

Цель: Исследование движения водоизмещающего амфибийного судна при входе в воду и при выходе из воды на берег.

Метод: При входе в воду и при выходе из воды на берег на водоизмещающее амфибийное судно действуют разные силы по разным категориям. Чтобы описывать его движение, была использована система уравнений по методу «ДИНАМИКА». При входе в воду движение судна разделяется на три режима: режим движения на колесах по твердой поверхности, режим частичного плавания с касанием колесами и режим свободного плавания. Расчет выполнен по численному методу Рунг-Кутта 4 порядка с помощью ПЭВМ.

Результаты: По результатам расчета можно определить изменения реакции подвески колеса, угла дифферента и водоизмещения. Во время спуска в воду реакции подвески у каждой пары колеса разные и быстро изменяются. При заданном условии начального движения судна угол дифферента появляется во время спуска и равен нулю при режиме свободного плавания.

Выводы: При входе в воду и выходе из воды на берег, движение водоизмещающего судна является сложным, в зависимости от условия эксплуатации можно определить нагрузки на колеса для оценки прочности подвески, а также оценить опасность движения судна с точки зрения остойчивости и незаливаемости.

Ключевые слова: амфибийное судно, остойчивость, незаливаемость, дифферент, динамическая нагрузка.

Амфибийные суда должны выполнять достаточно трудные движения: спуск в воду с берега и выход из воды на берег. Такие суда в данных режимах движения частично поддерживаются гидростатическими силами в погруженной в воду части корпуса, и частично реакциями колес при касании о дно водоема или опорную поверхность. Соотношения между данными категориями сил непрерывно меняются в процессе движения и остойчивость данных судов не должна оказаться опасно малой. Поэтому научный анализ некоторых положений плавучести и остойчивости амфибийных водоизмещающих судов в переходных режимах движения представляется актуальным.

Можно отметить особенности динамики таких судов:

1. Сложный характер и высокий уровень внешних воздействий на судно.
2. Сложная динамика поведения судна как реакции на внешнее воздействие.

Отсюда следует необходимость проведения исследования движения и посадки корабля при сложном и внезапном воздействии внешними силами, базирующемся на подходах и математических моделях динамики судна. Методически решение задач динамики корабля основывается на составлении системы дифференциальных уравнений движения, определении сил, действующих на корпус, интегрировании уравнений движения и анализе полученных результатов.

Из-за сложности и громоздкости получающихся уравнений приходится часто рассматривать отдельные частные виды движений корпуса и применять частные или комбинированные виды расчетных уравнений движения. Для определения параметров посадки корабля и движения корабля применим системы координат, охарактеризованные в работах [1]; [2]; [3]. Принятые системы координат показаны на рис. 1.

Положение корпуса судна в неподвижной системе координат может быть определено тремя линейными координатами ξ_0, η_0, ζ_0 , центра G связанной системы координат и тремя угловыми координатами Θ, Ψ, χ , которые характеризуют взаимное расположение осей полу- связанной и связанной систем координат. Переход от связанной системы координат к неподвижной системе осуществляется по известным в аналитической геометрии формулам.

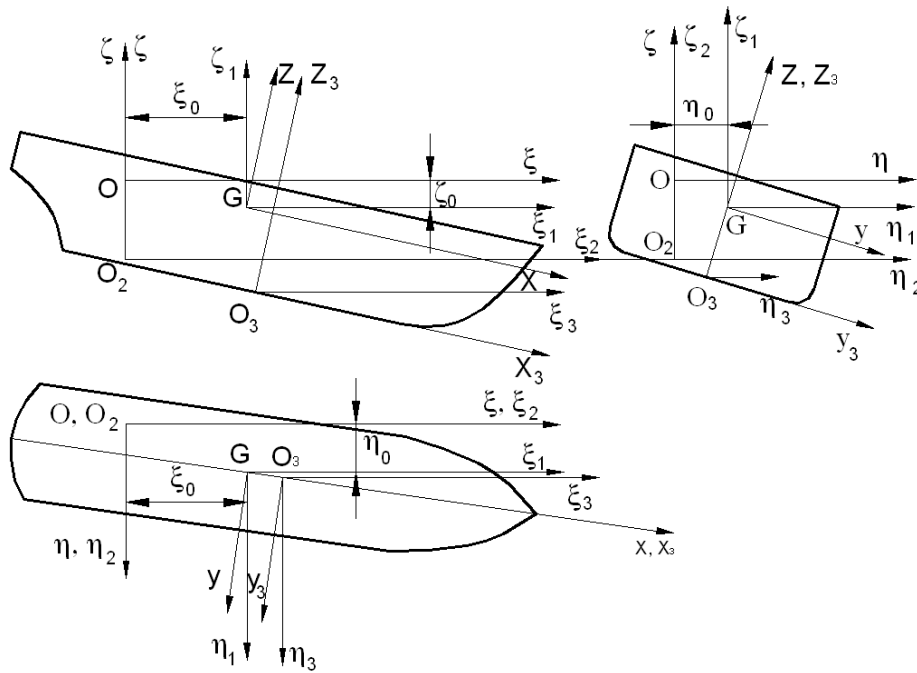


Рис. 1. Системы координат

Особенностью рассматриваемых движений корпуса судна является то, что силы тяжести корпуса и грузов вертикальны и при изменении нагрузки движение корпуса будет иметь место в вертикальном направлении, по крену и по дифференту. Кроме того движение корпуса в горизонтальной плоскости не приведет к изменению величины и формулы погруженного объёма и, следовательно, к изменениям гидростатических сил поддержания. Поэтому эти движения корпуса в дальнейшем не будем учитывать. Также положим $\xi_0 = \eta_0 = 0$.

Определим расчетные уравнения движения корпуса при изменении нагрузки. Схема внешних сил, действующих на корпус, покажем на рис. 2.

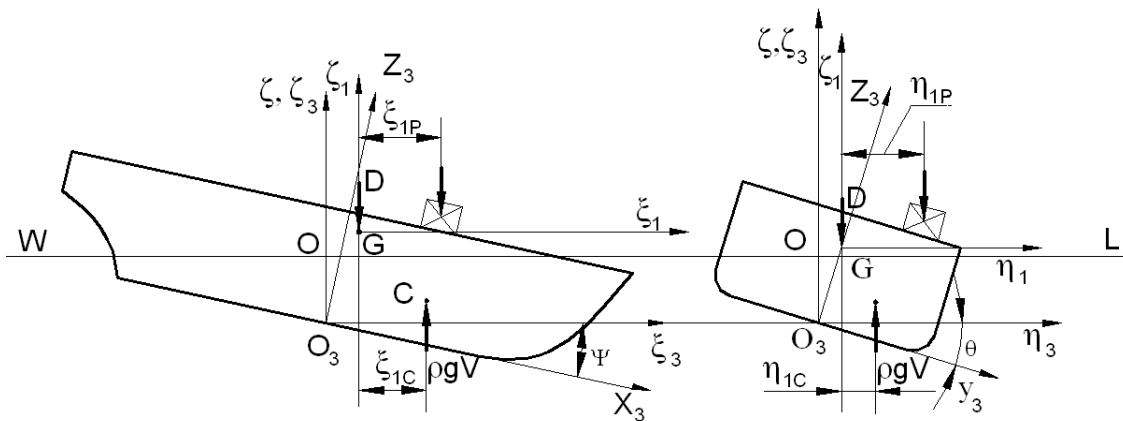


Рис. 2. Схема внешних сил

Уравнения движения корпуса при указанных ранее ограничениях примут такой вид:

$$\begin{aligned}
 (m + \lambda_{33}) \frac{dv_\zeta}{dt} &= \rho g V - D - \sum_{i=1}^{N_p} P_i - b_{\zeta\zeta} v_\zeta; \\
 (I_{yy} + \lambda_{55}) \frac{d\omega_\eta}{dt} &= M_{диф} - \rho g V \xi_{1c} + \sum_{i=1}^{N_p} P_i \xi_{1p_i} - b_{55} \omega_\eta; \\
 (I_{xx} + \lambda_{44}) \frac{d\omega_\xi}{dt} &= M_{кр} - \rho g V \eta_{1c} + \sum_{i=1}^{N_p} P_i \eta_{1p_i} - b_{44} \omega_\xi;
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

$$\xi_{1c} = \xi_{3c} - \xi_{3g}; \quad \eta_{1c} = \eta_{3c} - \eta_{3g};$$

$$\frac{d\zeta}{dt} = v_\zeta; \quad \frac{d\psi}{dt} = \omega_\eta; \quad \frac{d\theta}{dt} = \omega_\xi.$$

В уравнениях движения (1) обозначено: D - сила тяжести корпуса; ξ_g, η_g - абсцисса и ордината центра тяжести судна; ρgV - сила плавучести, вычисляемая при данной мгновенной посадке; ξ_{1c}, η_{1c} - абсцисса и ордината центра величины; $\sum P_i$ - суммарный вес принятых на судно грузов в данный момент времени; ξ_{1P_i}, η_{1P_i} - абсцисса и ордината центра тяжести принятого груза; M_{KP} - кренящий момент внешних сил, действующих в данный момент времени; $M_{Диф}$ - дифферентующий момент внешних сил, действующих в данный момент времени; $b_{\zeta\zeta}, b_{44}, b_{55}$ - коэффициенты сопротивления воды перемещениям корпуса.

Принимаемые грузы классифицированы так:

- 1 – твердые закрепленные грузы;
- 2 – жидкие грузы в отсеках, заданных размеров;
- 3 – подвешенные, смещающиеся при наклонении корпуса грузы;
- 4 – опора на дне (колесные движители, касание корпусом дна при посадке на мель).

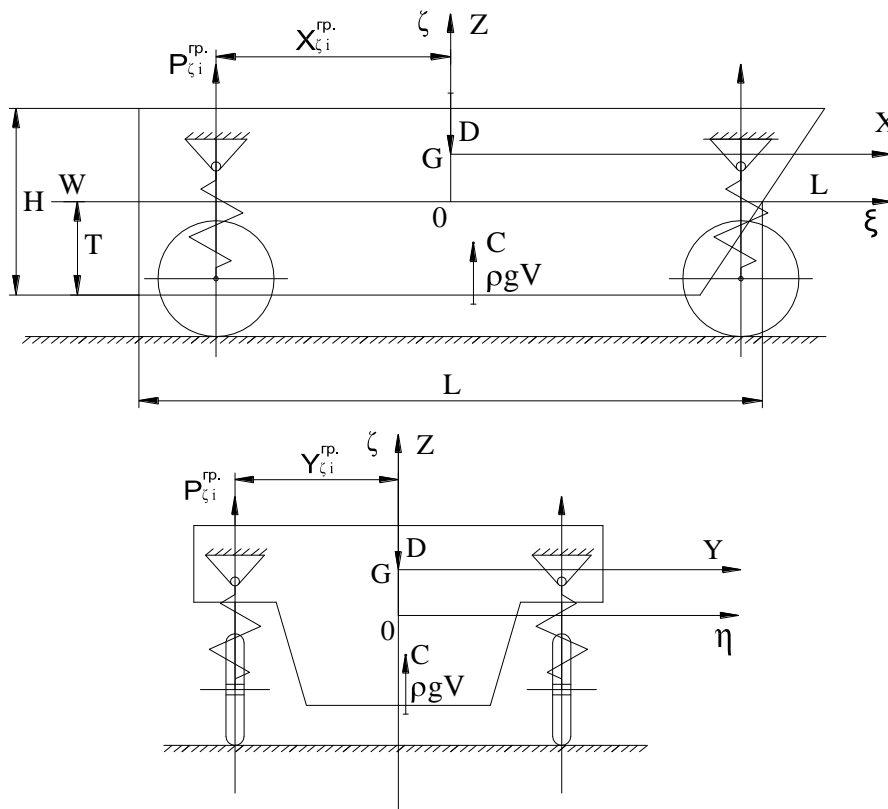


Рис. 3. Схема сил, действующих на корпус судна с колесными движителями на упругой подвеске.

Первые три категории грузов и их действие подробно освещены в литературе по плавучести и остойчивости судов [5]. Четвертая категория грузов нуждается в рассмотрении.

На рис. 3 приведена схема сил, действующих на корпус судна, имеющего колесные движители на упругой подвеске. Поддержание корпуса при погружении в воду частично осуществляется силой плавучести и частично реакциями подвески колес $\sum P_i^{gp}$.

Выделим и покажем три возможных расчетных ситуации движения амфибийного судна (рис. 4).

1. Режим движения на колесах по твердой опорной поверхности при полном выходе судна из воды (рис. 4, а). Сила тяжести корпуса полностью компенсируется реакциями подвески:

$$D = \sum P_i^{cp} . \quad (2)$$

2. Режим частичного плавания с касанием колесами опорной поверхности (рис. 4, б). Сила тяжести частично уравновешивается силой плавучести и частично вертикальными реакциями подвески колес:

$$D = \rho g V + \sum P_i^{cp} . \quad (3)$$

3. Режим свободного плавания судна на корпусе (рис. 4, в). Сила тяжести полностью уравновешивается силой плавучести. Колеса свободно висят и не касаются опорной поверхности:

$$D = \rho g V . \quad (4)$$

Обозначения на рис. 4: α – угол наклона опорной поверхности по направлению движения колеса; v – скорость продольного движения корпуса, которую будем полагать заданной и постоянной; H_{M0} – заглубление опорной поверхности под колесом на начальном этапе движения на горизонтальном участке; H_{M1} – заглубление, при котором колесо отрывается от опорной поверхности и реакция колеса будет равна нулю; k_v – коэффициент пропорциональности, определенный по такой формуле $k_v = v \cdot \text{tg} \alpha$; А – точка порога опорной поверхности; t_{0i} – время прохождения i -м колесом точки А.

В каждом режиме движения определим такие параметры:

H_M – заглубление опорной поверхности (дна) относительно плоскости ватерлинии WL;

X_{0i}^{cp} – горизонтальные координаты опор подвески, определяемые в связанной с корпусом системе координат ($i=1, \dots, n^{cp}$);

Z_{0i}^{cp} – аппликаты точки касания колесами опорной поверхности в свободном провисании при свободном плавании в воде, определяемые в связанной геометрической системе координат ($i=1, \dots, n^{cp}$);

В алгоритме решения системы уравнений (1) в каждый момент времени должны определяться:

ζ_i^{OP} – аппликата относительно плоскости WL (в неподвижной системе координат) опорной точки колеса в свободном провисании подвески

$$\zeta_i^{OP} = Z_{0i}^{cp} - T \quad (5)$$

T – заглубление начала связанной геометрической системы координат O_3 относительно плоскости WL (осадка корпуса);

ζ_{Mi}^{cp} – глубина воды под колесом;

$\Delta \zeta_i^{OP}$ – ход амортизатора подвески колеса

$$\Delta \zeta_i^{OP} = \zeta_i^{cp} + \zeta_i^{OP}; \quad (6)$$

P_i^{cp} – реакция подвески колеса

$$P_i^{cp} = k^{cp} \zeta_i^{OP}; \quad (7)$$

k^{cp} – Коэффициент жесткости амортизатора подвески полагается известным.

Процесс движения судна в продольном направлении заменим изменением глубины воды под колесом (рис. 5):

$$\zeta_{Mi}^{cp} = H_{M0} + k_v (t - t_{0i}). \quad (8)$$

Поскольку горизонтальные перемещения корпуса не оказывают влияние на величину гидростатических сил, такая замена будет правомочна. Вертикальные движения корпуса, крен и дифферент будут происходить правильно.

Осуществим интегрирование численным методом. Блок-схема алгоритма решения системы дифференциальных уравнений (1) приведена в работе [1]. Для вычисления характеристик погруженного объема корпуса и гидростатических сил поддержания применена программа [4], использующая метод поперечных сечений корпуса и правило трапеций с неравноотстоящими ординатами при вычислении определенных интегралов. Исходной информацией являются массивы координат поперечно-вертикальных сечений (шпангоутов) теоретического корпуса.

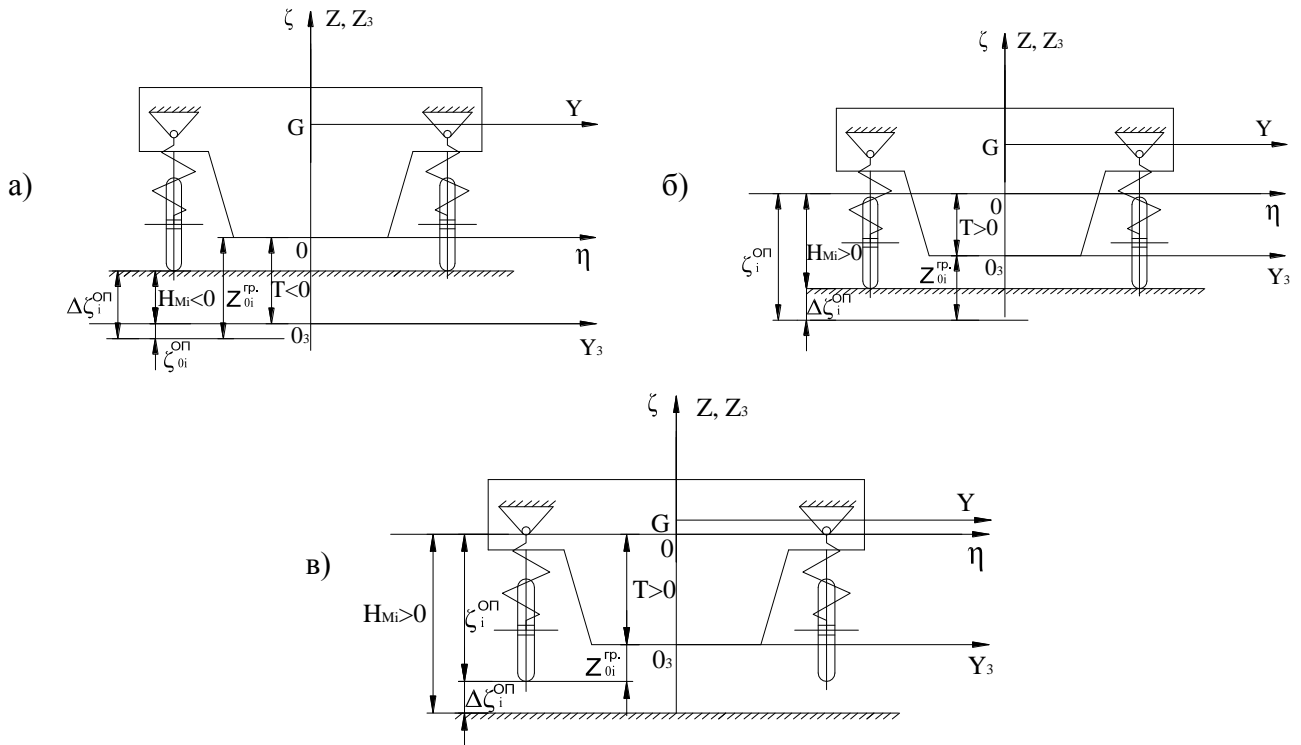


Рис. 4. Расчетные случаи

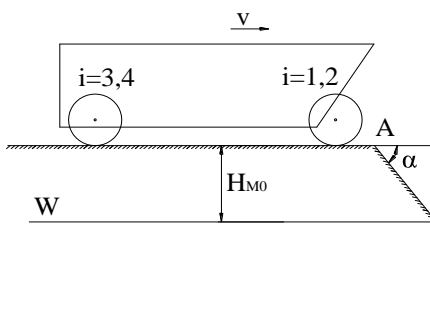


Рис. 5. Расчетная схема глубин при отпуске

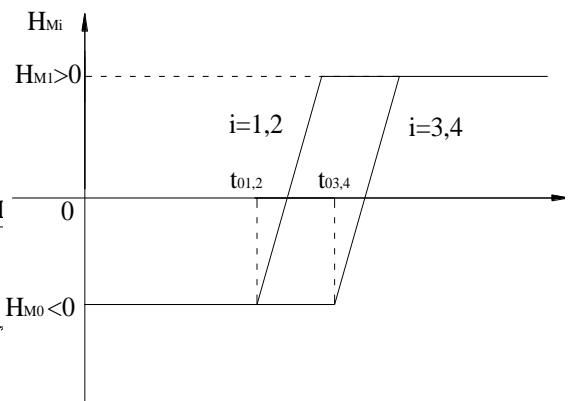


Рис. 6. Аналитическое представление глубин

В качестве примера для иллюстрации расчетов принят корпус небольшого амфибийного судна, главные размеры и характеристики которого:

$$L = 14,0 \text{ м}; B = 2,4 \text{ м}; T = 1,3 \text{ м}; H = 2,0 \text{ м}; D = 43 \text{ т}; Z_g = 0,8 \text{ м}.$$

Таблица 1
Координаты центров осей колес по времени

$X_{01} = 6,0$	$Y_{01} = 1,1$	$Z_{01} = 1,0$	$t_{01} = 8,0$
$X_{02} = 6,0$	$Y_{02} = -1,1$	$Z_{02} = 1,0$	$t_{02} = 8,0$
$X_{03} = 0$	$Y_{03} = 1,1$	$Z_{03} = 1,0$	$t_{03} = 11,0$
$X_{04} = 0$	$Y_{04} = -1,1$	$Z_{04} = 41,0$	$t_{04} = 11,0$
$X_{05} = -6,0$	$Y_{05} = 1,1$	$Z_{05} = 1,0$	$t_{05} = 14,0$
$X_{06} = -6,0$	$Y_{06} = -1,1$	$Z_{06} = 1,0$	$t_{06} = 14,0$

$k^{ep} = 180 \text{ кН/м}$; $\alpha = 14 \text{ град.}$; $v = 2 \text{ м/с}$.

$H_{M0} = -0,6 \text{ м}$; $H_{M1} = 4,0 \text{ м}$ – при спуске;

$H_{M0} = 4,0 \text{ м}$; $H_{M1} = -0,6 \text{ м}$ – при выходе.

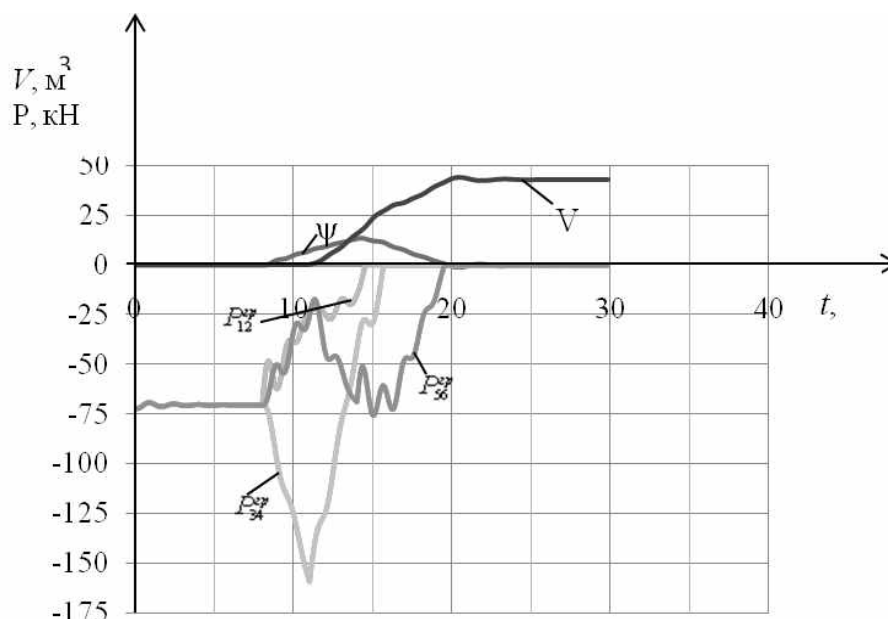


Рис. 7. Зависимости водоизмещения, реакции подвески колес и угла дифферента от времени

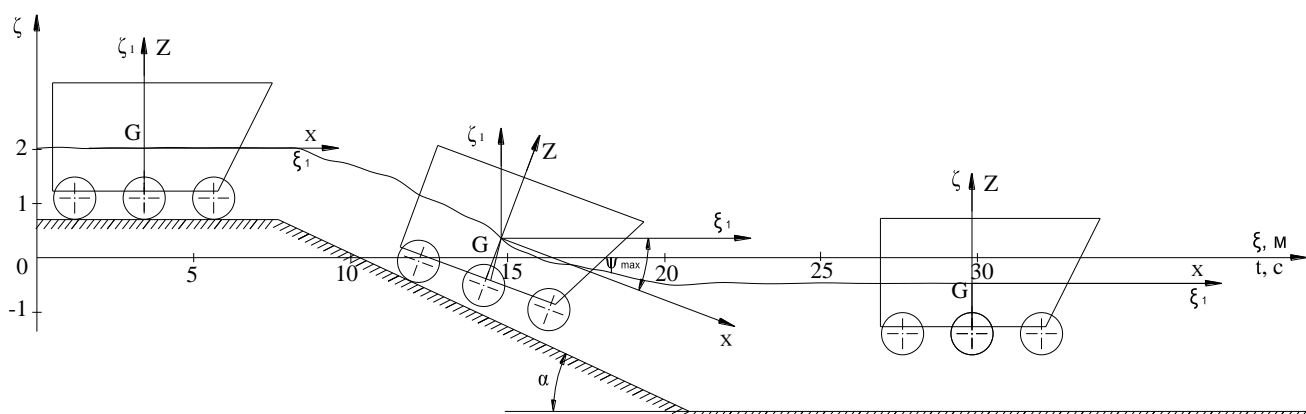


Рис. 8. Траектория движения центра тяжести G по времени

По разработанному алгоритму и программе выполнены расчет динамики судна при спуске в воду.

В начальном состоянии судно двигалось поступательно по горизонтальному участку

твердой поверхности, возвышающейся над плоскостью воды 0.60 метра, с постоянной скоростью 2 м/с. За порогом уклон дна составлял 14 градусов. Глубина водоема составляла 4.0 метра. Результаты расчета представлены на рис. 6, 7 и 8.

Выводы

1. Анализ результатов позволяет определить динамику корпуса при спуске на воду и действии изменяющихся во времени внешних сил, а также оценить опасные движения корпуса с точки зрения остойчивости и незаливаемости.

2. Определяются нагрузки на колеса, знание которых необходимо для оценки прочности подвески и возможности обеспечения колесами движущей силы.

3. Определяется положение мгновенной ватерлинии на корпусе, которое необходимо для анализа остойчивости. Определяется заглубление судового движителя (гребного винта) в воду, которое также необходимо знать для его включения с целью продолжения движения судна в воде после всплытия.

Библиографический список

1. Ваганов, А.Б. Динамика неравнообъемных наклонений судна при внезапном изменении нагрузки / А.Б. Ваганов, Н.Т. Нгуен // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – № 3.
2. Ваганов, А.Б. Динамика судна при сложном внезапном воздействии внешних сил нагрузки / А.Б. Ваганов, Н.Т. Нгуен // Вестник АГТУ. – 2014. – № 36.
3. Ваганов, А.Б. Конструирование теоретического корпуса судна аналитическим методом и расчет мореходных качеств на ЭВМ: учеб. пособие / А.Б. Ваганов, А.В. Васильев, В.А. Ковалев. – Горький, 1989.
4. Свидетельство о государственной Регистрации программы для ЭВМ. №2014612390. Расчет гидростатических характеристик и диаграмм остойчивости судовых корпусов сложной геометрической формы при произвольной посадке / А.Б. Ваганов, И.Д. Краснокутский.
5. Справочник по статике и динамике корабля: в 2 т. Т. 1. – 2-е изд., перераб. и доп. Статика корабля. – Л.: Судостроение, 1976.

Дата поступления
в печать 26.10.2015

A. B. Vaganov¹, Nguyen Ngoc Than²

THE DYNAMICS OF MOVEMENT OF AMPHIBIOUS VESSEL DURING ENTERING AND EXITING THE WATER

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alexeev¹,
Socialist Republic of Vietnam²

The purpose: A study of movement of a displacement amphibious vessel when entering the water and exiting the water.

Method: When entering the water and exiting the water on displacement amphibious vessel there are different forces of different categories. The system of equations by the method of "dynamics" was used to describe the movement. When entering the water the vessel is divided into three modes: the mode of movement on wheels on a hard surface, the partial mode of navigation with touch wheels and a free-floating mode. The calculation is made with the numerical method Runge-Kutta 4 using PEVM.

Results: According to the results of the calculation, it is possible to determine changes of the reaction of wheel suspension, of trim angle and of displacement. During the descent into the water the reaction of suspension from each pair of wheels are different and change rapidly. For a given initial condition of the vessel, the trim angle appears during descent and vanishes under the regime of free navigation.

Conclusions: When entering the water and exiting the water, the movement of a displacement vessel is complex, depending on the conditions, it is possible to determine the load on the wheels to assess the strength of the suspension, as well as to assess the risk of the vessel movement from the point of view of stability and deck-dryness.

Key words: amphibious vessel, stability, deck-dryness, trim, dynamic load.

НАШИ АВТОРЫ

ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Бирюков Владимир Валерьевич – канд. техн. наук, доцент НГТУ;
physics@nntu/nnov.ru.

Дузьякряченко Светлана Александровна – студент ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»;
olimp_porov@mail.ru

Душкина Эльвира Олеговна – Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского;
Elvira.dushkina@gmail.com

Игнатов Станислав Константинович - Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского;
skignatov@gmail.com

Кашеев Николай Иванович – канд. техн. наук, доцент Национального Исследовательского Университета «Высшая Школа Экономики»; nikolay.kascheev@gmail.com

Котельникова Олеся Александровна – магистр НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
sidorova-elena@yandex.ru

Курзенков Михаил Игоревич – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
physics@nntu/nnov.ru.

Мауль Роман Вячеславович - магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
physics@nntu/nnov.ru.

Миндров Александр Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
alex.mindrov@gmail.com

Матысик Олег Викторович – канд. физ.-мат. наук, доцент, зав. кафедрой Брестского государственного университета им. А.С. Пушкина;
matysikoleg@mail.ru

Мякинников Александр Валерьевич – д-р техн. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
redvillage@mail.ru

Поляков Дмитрий Вадимович – канд. техн. наук, ст. преподаватель ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»;
dimadress@yandex.ru

Попов Андрей Иванович – канд. педагог. наук, доцент, начальник отдела электронного обучения ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет» ;
olimp_porov@mail.ru

Путихин Никита Сергеевич – студент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
nikita.putikhin@gmail.com

Разуваев Алексей Григорьевич – Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского;
Elvira.dushkina@gmail.com

Сидорова Елена Владимировна – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
sidorova-elena@yandex.ru

Смирнова Дарья Михайловна – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
smirnovadarya@gmail.com

Тимофеева Ольга Павловна – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
cscs@nntu.nnov.ru

Шишанов Сергей Валерьевич – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; tribott@mail.ru

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

Мамедов Фирудин Ибрагим оглы – Сумгаитский государственный университет (Азербайджанская Республика);
Ekber.Abbasov.@hotmail.com

Арсенов Павел Владимирович – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
pavlycii@gmail.ru

Аббасов Акбер Казанфар оглы – Сумгаитский Государственный Университет (Азербайджанская Республика);
Ekber.Abbasov.@hotmail.com

Вихорев Николай Николаевич – инженер, аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
nvvikhorev@gmail.com.

Варенцов Андрей Владиславович – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; vav88@mail.ru

Доронков Денис Владимирович – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;
nevid000@mail.ru

Шахбазов Парвин Назим оглы – Сумгаитский государственный университет (Азербайджанская Республика);
Ekber.Abbasov.@hotmail.com

Гордеев Борис Александрович – д-р техн. наук, профессор, гл. научн. сотр. ИПМ РАН;
gord349@mail.ru

Охулков Сергей Николаевич – канд. физ.-мат. наук, старш. научн. сотрудник лаборатории виброзащиты машин ИПМ РАН;
oxulkovs@mail.ru

Плехов Александр Сергеевич – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; arlehov@mail.ru.

Дарьенков Андрей Борисович – канд. техн. наук, зав. кафедрой, доцент, директор института НГТУ им. Р.Е. Алексеева; fae@nntu.nnov.ru

Панфилов Иван Сергеевич – аспирант НГТУ им. Р.Е.Алексеева, инженер ОАО «НПП «По-лет»; mfnn@mail.ru.

Чивенков Александр Иванович – канд. техн. наук, доцент, профессор НГТУ им. Р.Е.Алексеева. chyvenkov@mail.ru.

Панфилов Сергей Юрьевич – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е.Алексеева; yurevich.sergej@mail.ru.

Полозкова Екатерина Николаевна – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; polozkova-ekaterina@yandex.ru

Пронин Алексей Николаевич – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; proninaleksei@mail.ru

Хробостов Александр Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент, директор ИЯЭ и ТФ НГТУ им. Р.Е. Алексеева; khrobostov@nntu.nnov.ru

Добров Александр Алексеевич – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; a.a.dobrov@yandex.ru

Сорокин Владислав Дмитриевич – ассистент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; vlad.sorokin1987@mail.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

Береснев Павел Олегович – лаборант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; Nord13@mail.ru

Беляев Александр Михайлович – ст. преподаватель НГТУ им. Р.Е.Алексеева; инженер ООО «Автол», (г. Нижний Новгород); myhome2010@mail.ru

Беляков Владимир Викторович – д-р техн. наук, профессор, начальник УНИИИР НГТУ им. Р.Е. Алексеева; nauka@nntu.nnov.ru

Ваганов Александр Борисович – д-р техн. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева; terkor_secr@nntu.nnov.ru

Вальтер Александр Игоревич – д-р техн. наук, профессор Тульского государственного университета; mto@nntu.nnov.ru

Воронков Сергей Викторович – конструктор АО «Федеральный научно-производственный центр «Нижегородский научно-исследовательский институт радиотехники»; eneso@aport.ru

Галкин Владимир Викторович – канд. техн. наук, доцент, каф. «МТК», НГТУ им. Р.Е. Алексеева; lumi1950@mail.ru

Галкина Екатерина Дмитриевна – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева, ekaterinagalka@gmail.com

Гладких Инна Васильевна – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; mto@nntu.nnov.ru

Дегтярев Александр Владимирович – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева, зам. начальника отдела энергетических установок ОАО «ЦКБ по СПК им. Р. Е. Алексеева»; alexandr_dvs@mail.ru

Дербенев Андрей Анатольевич – инженер, ПАО «Нижегородский авиастроительный завод «Сокол»; derbenev2004@mail.ru

Дун Синьшо – аспирант Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова (г. Николаев, Украина); michael3123@yandex.ru.

Еремин Алексей Александрович – инженер НГТУ им. Р.Е.Алексеева; alexejswt@gmail.com

Елисеев Михаил Евгеньевич – канд. физ.-мат. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; eliseevmic@mail.ru

Жеребцов Сергей Николаевич – канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВПО «Омский государственный педагогический университет»; (3812) 76-07-42

Захаров Лев Анатольевич – д-р техн. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева; tseu@nntu.nnov.ru

Захаров Илья Львович – канд. техн. наук, докторант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; zakharov_oi@mail.ru

Зимина Елена Витальевна – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; scheinrich@mail.ru

Зезюлин Денис Владимирович – канд. техн. наук, старший преподаватель НГТУ им. Р.Е.Алексеева; balakhnaman@gmail.com

Зенкин Руслан Николаевич – аспирант Тульского государственного университета; mto@nntu.nnov.ru

Зенкин Николай Николаевич – начальник литейного цеха ОАО «КМЗ» (Тула); mto@nntu.nnov.ru

Кайнова Валентина Николаевна – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; kainovavn@yandex.ru

Колотилин Владимир Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; transfer@nntu.nnov.ru

Кострова Зоя Александровна – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; zzz2015@ya.ru

Куркин Андрей Александрович – д-р физ. мат. наук, профессор, глав. науч. сотрудник управления научных исследований и инновационных разработок, зав. кафедрой, науч. руководитель лаборатории «Моделирования природных и техногенных катастроф» НГТУ им. Р.Е. Алексеева; aakurkin@gmail.com

Липенков Александр Владимирович – ст. преподаватель НГТУ им. Р.Е. Алексеева; _alex1_@mail.ru

Лобов Евгений Васильевич – зам. ген. директора ОАО «Омский научно-исследовательский институт технологии машиностроения» (ОНИИТМ); 8-962-052-87-83

Макаров Владимир Сергеевич – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; makvl2010@gmail.com

Макаров Андрей Дмитриевич – инженер НГТУ им. Р.Е. Алексеева; +79601683219

Михеев Артур Владимирович – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; micheev-av@mail.ru

Москвичёва Юлия Анатольевна – аспирант, ассистент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; ship@nntu.nnov.ru

Нгуен Нгок Тан – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева, Социалистическая Республика Вьетнам; namtananh@gmail.com

Неделяева Татьяна Анатольевна – ст. преподаватель НГТУ им. Р.Е. Алексеева; nedelyaevata@gmail.com

Пачурин Виктор Германович – инженер, ООО «Нау стандарт», г. Н. Новгород, pvg101@yandex.ru

Пачурин Герман Васильевич – д-р техн. наук, профессор, зав. каф. «ПБЭиХ», НГТУ им. Р.Е. Алексеева; (831) 217-66-98 PachurinGV@mail.ru

Петровский Александр Николаевич – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; eneco@aport.ru

Рязанов Ренат Рамильевич – ассистент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; ryazanov.renat@gmail.com

Соборнов Алексей Евгеньевич – инженер НГТУ им. Р.Е. Алексеева; wisestjedi@mail.ru

Тарасов Алексей Николаевич – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева, ведущий инженер-конструктор ООО ОИЦ; tarasov_alexey@list.ru.

Чернышов Евгений Александрович – д-р техн. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева; mto@nntu.nnov.ru

Хлыбов Александр Анатольевич – зав. кафедрой НГТУ имени Р.Е. Алексеева, hlybov_52@mail.ru

Углов Александр Леонидович – д-р техн. наук, зав. сектором, ст. научн. сотрудник Научно-исследовательского центра контроля и диагностики; auglov@list.ru

Ясенов Владимир Васильевич – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; yasenov-tu@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 НИЖЕГОРОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»**

Адрес редакции: 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24
Телефон: 8(920)00-37-877
E-mail: rsl@nntu.nnov.ru

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ, НАПРАВЛЯЕМЫХ В РЕДАКЦИЮ

- В редакцию направляют **два экземпляра** статьи, отпечатанных на лазерном принтере на белой бумаге формата А4, с одной стороны листа, через один интервал 12 кеглем. Сноски и примечания 10 кеглем. Поля: левое, правое и нижнее – 20 мм, верхнее – 25 мм.
- 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 экспертизы, выпиской из заседания кафедры, рекомендующей статью к опубликованию, сведениями об авторах и рецензией.
- Статья должна быть подписана **всеми авторами**.
- Текст набирают без переносов, используя 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.
- 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.
- 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 **jpf** или **tif** с разрешением 300 **dpi**. Рисунки выполняются по ГОСТ, подрисуночная подпись 11 жирный кегль.
- К статье следует приложить CD с файлами: текста статьи с библиографией на русском языке; **фамилиями авторов, названием статьи, информацией о месте работы всех авторов, аннотацией и ключевыми словами на английском языке**.
- В сведениях об авторах следует сообщить: ФИО (полностью), место работы, должность, ученую степень и звание, телефон и адрес электронной почты.

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

№ 4 (111)

Редакторы: **Н.Н. Максимова, О.В. Пугина**
Технический редактор **Т.П. Новикова**

Редакция:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.
rsl@ntu.nnov.ru

Подписано в печать 17.12.2015. Формат 60x84 ¹/₈. Бумага офсетная.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 30,75. 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 10312
Объединенный каталог «Пресса России»

Свидетельство о регистрации
периодического печатного издания
ПИ № ФС 77-56417 от 11 декабря 2013