

ISSN 1816-210X

# ТРУДЫ НГТУ

им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА

Нижний Новгород

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

**ТРУДЫ НГТУ  
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА**

*Журнал издается с 2010 года*

**№ 1 (112)**

**Нижний Новгород 2016**

УДК 050(06)  
ББК 9я54  
Т 78

Т 78 Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2016. №1(112).  
– 241 с.

*Выходит 4 раза в год*

**Главный редактор С.М. Дмитриев**

### **РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

Н.Ю. Бабанов (зам. гл. редактора), В.В. Беляков (ответственный секретарь),  
О.В. Пугина (отв. редактор), А.В. Крылова (гл. редактор выпуска)

**Члены редколлегии:** В.Г. Баранов, Г.Я. Вагин, В.Д. Вавилов, В.М. Галкин,  
А.М. Грошев, А.А. Куркин, А.Б. Лоскутов, А.Ю. Панов, А.Е. Хробостов

### **РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ**

**Председатель**

***Федор Михайлович Митенков***

(академик РАН, д. физ.-мат. н., проф.,  
советник директора «ОКБМ Африкантов» по научным вопросам)

**Заместитель председателя**

***Сергей Михайлович Дмитриев***

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

**Ответственный секретарь**

***Владимир Викторович Беляков***

(д. т. н., проф., начальник УНИИИР)

### **ЗАРУБЕЖНЫЕ ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА**

***Пелиновский Дмитрий Ефимович***

PhD, проф. математики, Университет Мак Мастер,  
Гамильтон, Онтарио, Канада

***Палкович Ласло***

Проф. Сечени Иштван Университет, Дьёр, Венгрия

***Варлаки Петер***

Проф. Сечени Иштван Университет, Дьёр, Венгрия

***Виджай Кумар Чакка***

PhD, проф., Университет Шив Надар, Индия

***Ялцинер Ахмет Джевдет***

д., проф., METU, директор OERC, Турция

### **ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА**

***Гуляев Юрий Васильевич***

член Президиума РАН, академик, д. физ.-мат. н., проф.,  
научный руководитель ИРЭ РАН им. В.А. Котельникова

***Гринберг Руслан Семенович***

член-корр. РАН, д. эк. н., проф.,

***Митяков Сергей Николаевич***

научный руководитель Института экономики РАН

Академик РАЕН, член президиума РАЕН,

действительный член АИН им. А.М. Прохорова,

д. физ.-мат. н., проф., директор ИНЭУ НГТУ

***Куркин Андрей Александрович***

д. физ.-мат. н., проф., зав. кафедрой ПМ

***Кондратьев Вячеслав Васильевич***

член-корр. РАН, д. т. н., проф.,

зав. кафедрой ВСТ НГТУ

***Рындык Александр Георгиевич***

д. т. н., проф., зав. кафедрой ИР НГТУ

***Раевский Сергей Борисович***

д. т. н., проф.

***Кошелев Олег Сергеевич***

д. т. н., проф., зав. кафедрой МТКОДСП НГТУ

***Кулепов Виктор Федорович***

д. т. н., проф., директор ДПИ (филиал НГТУ)

УДК 050(06)  
ББК 9я54

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

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

© Нижегородский государственный технический  
университет им. Р.Е. Алексеева, 2016

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

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

*Published since 2010*

**№ 1 (112)**

**Nizhny Novgorod 2016**



*The journal is issued 4 times a year*

**Editor-in-Chief S.M. Dmitriev**

**EDITORIAL BOARD**

N.Y. Babanov (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, G.Y. Vagin, V.D. Vavilov, V.M. Galkin,  
A.M. Groshev, A.A. Kurkin, A.B. Loskutov, A.Y. Panov, A.E. Khrobostov

**EDITORIAL COUNCIL**

**Chairman**

**Fedor Mikhailovich Mitenkov**

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

**Vice-chairman**

**Sergei Mikhailovich Dmitriev**

Doctor of technical sciences, professor  
Rector of NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)

**Executive Secretary**

**Vladimir Viktorovich Belyakov**

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

**Foreign members of Editorial council**

*Dmitri Efimovich*

*Pelenovski*

*László Palkovics*

*Péter Várlaki*

*Vijay Kumar Chakka*

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)

*Yalciner Akhmet Cevdet.*

professor, head of Ocean Engineering Research Center  
Middle East Technical University (Turkey)

**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)

*Mitiakov Sergei Nikolaevich*

Doctor of physical and mathematical sciences, professor  
NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)

*Kurkin Andrey Aleksandrovich*

Doctor of physical and mathematical sciences, professor  
NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)

*Kondratev*

*Viacheslav Vasilevich*

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

*Ryndyk Alexander Georgievich*

Doctor of technical sciences, professor  
NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)

*Raevski Sergei Borisovich*

Doctor of technical sciences, professor  
NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)

*Koshelev Oleg Sergeevich*

Doctor of technical sciences, professor  
NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)

*Kulepov Viktor Fedorovich*

Doctor of technical sciences, professor  
NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)

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

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ.....</b>	<b>9</b>
<b>Корелин О.Н., Леонова Е.Ю., Танонов П.П.</b> Применение вейвлет-преобразования и скрытых марковских моделей в распознавании речи.....	9
<b>Никулин Е.А.</b> Процедурный шум и мультивариантный тайлинг.....	17
<b>Тимофеева О.П., Палицына С.С.</b> Обучение нейронной сети интеллектуальной системы управления городскими светофорами.....	25
<b>Басова Л.Н., Миронов А.В.</b> Система качественной работы детских дополнительных образовательных учреждений в развитии человеческого капитала.....	32
<b>Терентьева И.Н.</b> Коммуникативное прочтение организационно-управленческой концепции Г.П. Щедровицкого (конструктивистская составляющая методологии)....	37
<b>Галкин В.М., Китаева Е.К., Ерофеева Л.Н., Лещева С.В.</b> Замечание об $L$ – функциях и ортогональных многочленах.....	44
<b>Степанов И.А.</b> Метод выигрывания в английскую лотерею Daily Play 7 из 27.....	49
<b>ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ.....</b>	<b>53</b>
<b>Кудряшов Д.А., Роцин Е.В.</b> Проблемы электромагнитной совместимости мощных регулируемых электроприводов с сетью собственных нужд АЭС.....	53
<b>Стеклов А.С., Серебряков А.В., Титов В.Г.</b> Система диагностики технического состояния судового синхронного генератора.....	60
<b>Соснина Е.Н., Шалухо А.В., Липужин И.А., Александрова Т.А.</b> Технико-экономический анализ применения ветро-дизельных электростанций для электрообеспечения энергоудаленных поселений.....	65
<b>Арсенов П.В., Варенцов А.В., Доронков Д.В., Коновалов К.С., Полозкова Е.Н., Хробостов А.Е.</b> Экспериментальные исследования локальной гидродинамики теплоносителя ТВС-квадрат реактора PWR при постановке перемешивающей дистанционирующей решетки с «дефлекторами увеличенной площади».....	73
<b>Аношкин Ю.И., Варенцов А.В., Куревин А.О., Легчанов М.А.</b> Расчетный анализ режимов естественной циркуляции теплоносителей в контурах системы охлаждения исследовательского стенда процессов смешения .....	82
<b>Комаров А.В., Фарафонов В.А.</b> Выбор оптимального размера внутреннего диаметра кольцевого тепловыделяющего элемента для реакторов с натриевым теплоносителем.....	89
<b>Бирюков В.В., Грачев В.А., Кожевникова Т.В.</b> Релятивистский метод расчета характеристик круглого и прямоугольного волноводов.....	98
<b>МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО .....</b>	<b>109</b>
<b>Береснев П.О., Филатов В.И., Еремин А.А., Беляев А.М., Папунин А.В., Макаров В.С., Зезюлин Д.В., Колотилин В.Е., Беляков В.В., Куркин А.А.</b> Статистическая модель выбора геометрических параметров, массоинерционных, мощностных и скоростных характеристик гусеничных транспортно-технологических машин.....	109
<b>Воронков О.В., Песков В.И.</b> Схематизация нагруженного состояния трехслойной панели основания несущего кузова автобуса.....	165

<b>Клубничкин В.Е., Клубничкин Е.Е., Макаров В.С., Зезюлин Д.В., Редкозубов А.В., Беляков В.В.</b> Моделирование движения гусеничных машин по лесным дорогам.....	171
<b>Балеев Б.Ф.</b> Исследования каландровых батарей .....	177
<b>Фролова И.Н., Сулин В.А.</b> Оценка полноты использования технологических возможностей инструмента и станка на основе сопоставления их формообразующих движений.....	183
<b>Шнейберг А.М., Малов А.Е.</b> Прессование стружки с использованием комбинированного нагружения: сжатия со сдвигом.....	189
<b>Сеземин А.В., Захаров Л.А., Дегтярев А.В., Захаров И.Л., Тарасов А.Н.</b> Исследование влияния момента впрыска топлива и наклона топливных струй на экономические и экологические показатели серийного судового дизельного двигателя.....	199
<b>Локтев А.В., Малахов А.В., Мишин И.С.</b> Повышение эффективности охлаждения газа на компрессорных станциях магистральных газопроводов.....	207
<b>Францев М.Э.</b> Проектные обоснования создания надстройки из композитов для пассажирского судна на подводных крыльях с использованием способа параметрического проектирования.....	211
<b>Гильманшина Т.Р., Баранов В.Н., Лыткина С.И., Худоногов С.А.</b> Разработка составов противопригарных покрытий на основе графитов, активированных с поверхностно-активными веществами.....	222
<b>Жеребцов С.Н., Чернышов Е. А.</b> Особенности физико-химических свойств флюсов, используемых в технологиях электрошлакового переплава.....	228

## CONTENTS

<b>INFORMATICS AND MANAGEMENT IN TECHNICAL AND SOCIAL SYSTEMS....</b>	<b>9</b>
<b>Korelin O., Leonova E., Tanonov P.</b> Wavelet transform and hidden markov models in speech recognition.....	9
<b>Nikulin E.A.</b> Procedural noise and multivariate tiling.....	17
<b>Timofeeva O.P., Palitsyna S.S.</b> Training of the neural network of the intellectual system aimed to control urban traffic lights.....	25
<b>Basova L.N., Mironov A.V.</b> Quality work system of additional educational institutions for children in the development of human capital.....	32
<b>Terentyeva I.N.</b> Communicative reading of organizational management the concept of G. P. Shchedrovitsky (constructivist component in the methodology).....	37
<b>Galkin V.M., Kitaeva E.K., Lescheva S.V., Erofeeva L.N.</b> A note on $L$ -functions and the orthogonal polynomials.....	44
<b>Stepanov I.A.</b> Method of winning in the english lottery daily play.....	49
<b>ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES.....</b>	<b>53</b>
<b>Kudriashov D.A., Roschin E.V.</b> Problems of electromagnetic compatibility of variable electric drives with in-house power supply system of NPP.....	53
<b>Steklov A.S., Serebryakov A.V., Titov V.G.</b> System of diagnostics of technical state marine synchronous generator.....	60
<b>Sosnyna E.N., Shalukho A.V., Lipuzhin I.A., Alexandrova T.A.</b> Feasibility study of wind-diesel power stations for electric power supply of energy remote settlements.....	65
<b>Arsenov P.V., Varentsov A.V., Doronkov D.V., Konovalov K.S., Polozkova E.N., Khrobostov A.E.</b> Investigation of local hydrodynamics of the coolant flow behind the mixing grid having «large scale» type of vanes in tvs-kvadrat fuel assembly.....	73
<b>Anoshkin Y.I., Kurevin A.O., Legchanov M.A.</b> Computational analysis of gravity coolant circulation modes in the cooling circuits of the flow processes research stand.....	82
<b>Komarov A.V., Farafonov V.A.</b> The choice of the optimal size of the inner diameter of the annular fuel element for reactors with sodium coolant a relativistic method of calculation characteristics of circular and rectangular waveguides.....	89
<b>Biryukov V.V., Grachev V.A., Kozhevnikova T.V.</b> A relativistic method of calculation characteristics of circular and rectangular waveguides.....	98
<b>MECHANICAL AND TRANSPORT: THEORY, TECHNOLOGY, PRODUCTION.....</b>	<b>109</b>
<b>Beresnev P.O., Filatov V.I., Eremin A.A., Belyaev A.M., Papunin A.V., Makarov V.S., Zeziulin D.V., Kolotilin V.E., Belyakov V.V., Kurkin A.A.</b> Statistical model of choice the geometrical parameters, mass of inertia, capacity and velocity characteristics of track transport technological machines.....	109
<b>Voronkov O.V., Peskov V.I.</b> Schematization of bus floor sandwich-panel loaded condition	165
<b>Klubnichkin V.E., Klubnichkin E.E., Makarov V.S., Zeziulin D.V., Redkozubov A.V., Belyakov V.V.</b> Modeling movement of tracked vehicles on forest roads.....	171
<b>Baleyev B.F.</b> Research of calender roll sets.....	177

<b>Frolova I.N., Sulin V.A.</b> Evaluation of completeness of use of technological possibilities of machine tool and by comparing their movements.....	183
<b>Schneiberg A.M., Malov A.E.</b> Pressing of the chips with using combined loading: compression with torsion.....	189
<b>Sezemin A.V., Zakharov L.A., Degtyarev A.V., Zakharov I.L., Tarasov A.N.</b> The research of fuel injection timing and angle of fuel spray impacting to economic and environmental parameters of the produced marine diesel engines.....	199
<b>Loktev A.V., Malahov A.V., Mishin I.S.</b> Improving the efficiency of gas cooling at compressor stations of main gas pipelines.....	207
<b>Frantsev M.E.</b> Project justification to increase the useful load of amphibious hovercraft using composite materials in its design.....	211
<b>Gilmanshina T.R., Baranov V.N. , Lytkina S.I., Khudonogov S.A.</b> Development of composition nonstick coatings based on graphite, activated with surfactants.....	222
<b>Zherebtsov S.N, Chernishov E.A.</b> Features physical and chemical properties flux used in the technology of electroslag remelting.....	228

# ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

УДК 004.932

О. Н. Корелин, Е. Ю. Леонова, П. П. Танонов

## ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И СКРЫТЫХ МАРКОВСКИХ МОДЕЛЕЙ В РАСПОЗНАВАНИИ РЕЧИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлен анализ применения вейвлет-преобразования и скрытых марковских моделей в задаче распознавания речи. Рассмотрены разные варианты конфигурации системы с использованием определённых результатов вейвлет-преобразования и различных объёмов словаря. Для сравнения сигналов использован алгоритм динамической трансформации временной шкалы.

*Ключевые слова:* распознавание речи, вейвлет-преобразование, dynamic time warping, скрытые марковские модели.

В данной работе опробован алгоритм распознавания изолированных слов, использующий вейвлет-преобразование для цифровой обработки сигнала, а также скрытые марковские модели для оценки результатов распознавания. Данный алгоритм настроен на распознавание изолированных слов, произносимых одним диктором.

Вейвлеты - это функции в виде коротких волн (всплесков) с нулевым интегральным значением и с локализацией по оси независимой переменной ( $t$  или  $x$ ), способных к сдвигу по этой оси и масштабированию (растяжению/сжатию).

При вейвлет-анализе в связи с масштабированием вейвлеты способны выявить различие в характеристиках процесса на различных шкалах, а посредством сдвига можно проанализировать свойства процесса в различных точках на всем исследуемом интервале:

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad (1)$$

где  $a$  – масштаб, малый масштаб соответствует высоким частотам, и наоборот;  $b$  – сдвиг, он задаёт положение вейвлета на временной оси.

Для определённых вейвлетов может быть построена масштабирующая функция. Сигнал может быть представлен в виде суперпозиции масштабирующихся функций с различными значениями сдвига и масштаба. Получившиеся для различных масштабов сигналы называют *аппроксимирующими*.

Также сигнал представляют в виде суперпозиции вейвлетов с различными значениями сдвига и масштаба. Получившиеся сигналы называют *детализирующими*, а образуемую ими трёхмерную плоскость – вейвлет – спектром сигнала. Детализирующие сигналы также могут быть получены как разность аппроксимаций соседних уровней масштаба.

Подобный анализ сигнала называют непрерывным вейвлет-преобразованием (НВП). НВП является избыточным, поэтому на практике применяют дискретное вейвлет-преобразование (ДВП).

В ДВП при анализе сигналов значения масштаба  $a$  и сдвига  $b$  дискретизируют.

$$a=2^m, b=k \cdot 2^m. \quad (2)$$

Сигнал также дискретизируется по времени.

При подобной дискретизации исключается перекрытие носителей вейвлетов, таким образом устраняется избыточность НВП.

Определённые вейвлеты (например, Добеши) и их масштабирующие функции могут быть представлены в виде набора коэффициентов цифровых фильтров.

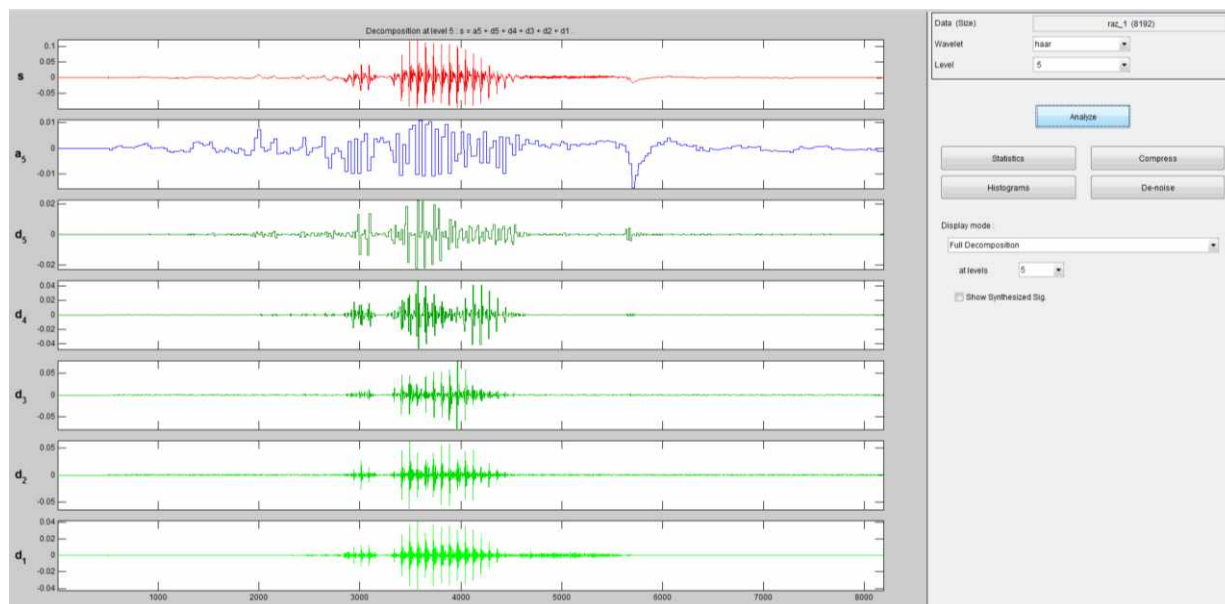


Рис. 1. Вейвлет-преобразование, Хаар, 5-й уровень

На рис. 1 показано вейвлет-преобразование сигнала, представляющего собой слово "Раз", с использованием вейвлета Хаара, или 1-го Добеши. Здесь:

$s$  - исходный сигнал;

$a_5$  - аппроксимирующий сигнал для 5-го уровня декомпозиции;

$d_1-d_5$  - детализирующие сигналы с 1-го по 5-й уровень декомпозиции.

Последующие уровни декомпозиции получаются путём применения вейвлет-преобразования к аппроксимирующему сигналу предыдущего уровня. Длина получившихся сигналов (аппроксимирующего и детализирующего) равна половине длины исходного сигнала.

Подобный подход называется кратномасштабным анализом (КМА).

На определённом уровне разложения сигнал представлен суммой аппроксимирующей составляющей и полученных на всех этапах, включая данный, детализирующих составляющих. Таким образом, на картинке  $s=a_5+d_5+d_4+d_3+d_2+d_1$ .

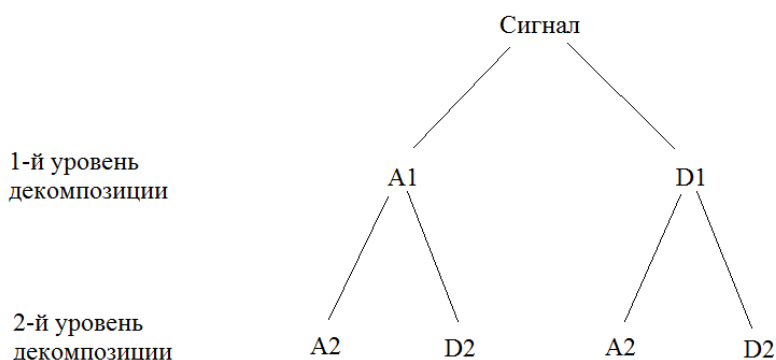
**Нулевые моменты.** Изменения сигнала хорошо локализуются НВП, где используются вейвлеты, в которых достаточно нулевых моментов. При значениях времени, соответствующих гладким частям сигнала, значения НВП малы, а при изменениях сигнала относительно велики.

Например, при анализе сигнала, состоящего из двух прямых, значения НВП с использованием вейвлета «Мексиканская шляпа» (два нулевых момента) лучше локализованы вокруг точки пересечения этих двух прямых, чем при использовании вейвлета Хаара (один нулевой момент).

Поскольку звуковой сигнал обладает сложной структурой, выбор вейвлета для анализа не имеет однозначных критериев. В данной работе использован вейвлет Хаара (или 1-й Добеши).

При КМА сигнал последовательно раскладывается на аппроксимирующую и детализи-

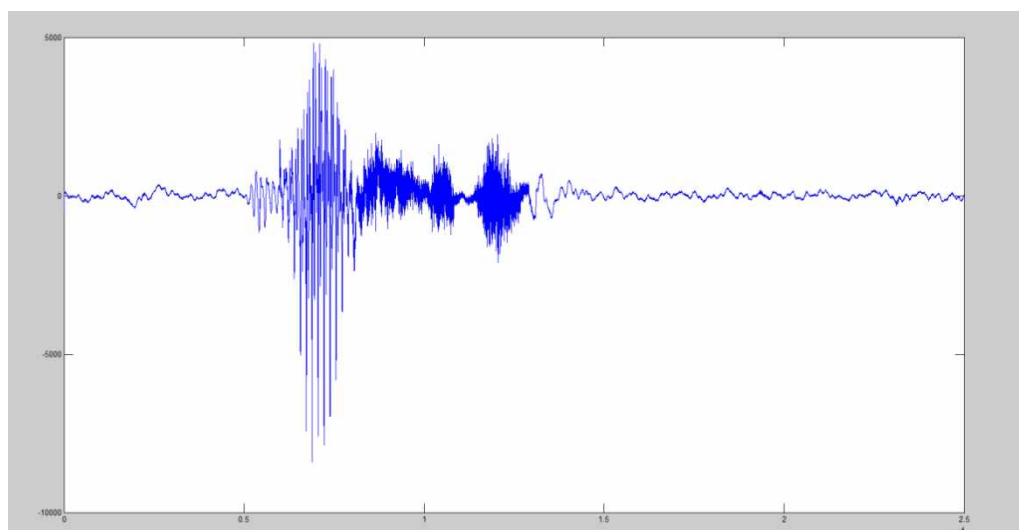
рующую составляющие, длина которых равна половине длины исходного сигнала. На первом шаге операция производится с самим сигналом, на последующих – с его аппроксимацией. При использовании пакетных вейвлетов детализирующий сигнал также подвергается декомпозиции. Результат преобразования представляет собой все аппроксимирующие и детализирующие сигналы, полученные на определённом уровне декомпозиции. Длина такой последовательности равна длине исходного сигнала.



**Рис. 2. Дерево декомпозиции:**

A1 - аппроксимирующий сигнал, полученный на первом уровне декомпозиции;  
 D1 - детализирующий сигнал, полученный на первом уровне декомпозиции;  
 A2 - аппроксимирующий сигнал, полученный на втором уровне декомпозиции;  
 D2 - детализирующий сигнал, полученный на втором уровне декомпозиции

Далее приведён результат пакетного вейвлет-преобразования слова «Раз» (рис. 3) с использованием пакетного вейвлета Хаара для 2-го уровня декомпозиции.



**Рис. 3. Исходный сигнал "Раз"**

Результатирующий сигнал, таким образом, состоит из четырёх частей – аппроксимации A2 и детализации D2, полученных из аппроксимации 1-го уровня декомпозиции A1, и того же для детализирующего сигнала 1-го уровня D1. Эти части записаны одна за другой в одну последовательность, занимая каждая одну четверть сигнала, и при необходимости могут анализироваться как совместно, так и отдельно.

Распознавание речи требует сравнения сигналов между собой. В связи с тем, что даже одинаковые слова у разных людей могут различаться по времени произношения, находят применение различные алгоритмы сравнения временных последовательностей. В данной ра-



боте используется алгоритм динамической трансформации временной шкалы, или Dynamic Time Warping (DTW). Данный алгоритм позволяет находить степень похожести различных по времени и смещённых один по отношению к другому сигналов.

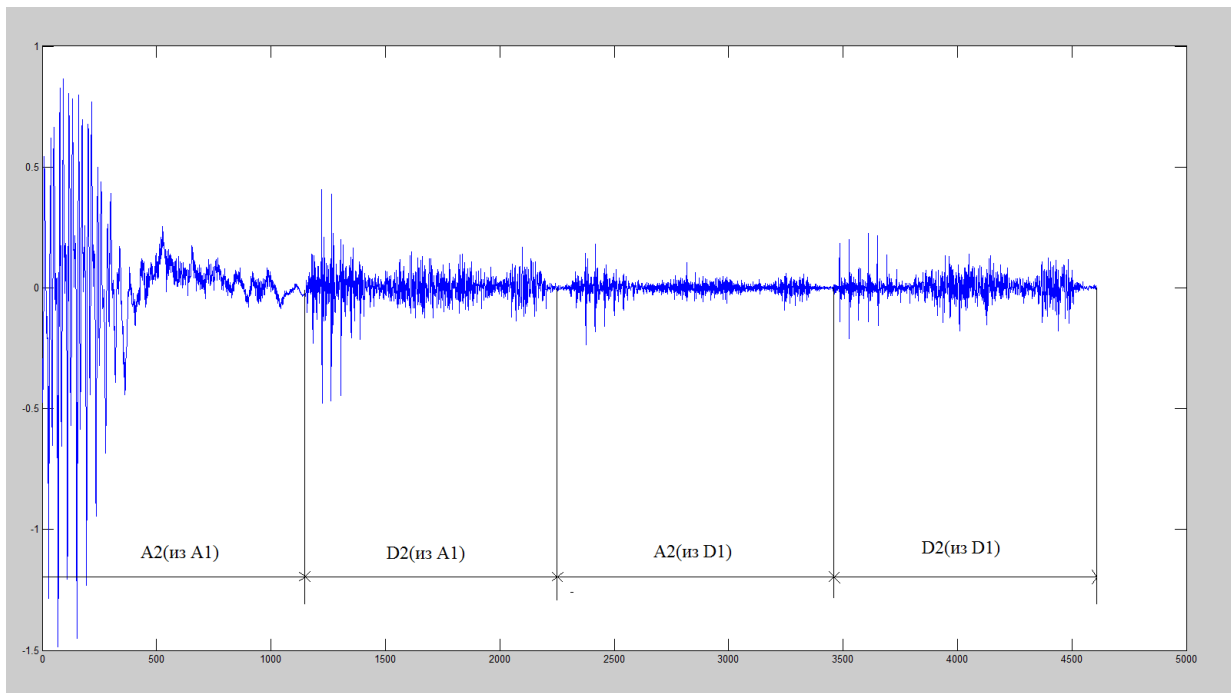


Рис. 4. Пакетное ДВП

Классический алгоритм DTW заключается в следующем:

Пусть даны две последовательности  $Q$  и  $C$  (временных ряда) длиной  $n$  и  $m$  соответственно:

$$Q = q_1, q_2, \dots, q_n, C = c_1, c_2, \dots, c_m.$$

Классический DTW алгоритм по этим последовательностям строит путь наименьшей стоимости. Поясним, что это значит.

Определим матрицу  $\Omega^{n \times m}$  так, чтобы её элемент  $(i, j)$  соответствовал расстоянию между  $i$ -м и  $j$ -м элементами последовательностей  $Q$  и  $C$ , т.е. соответствовал выравниванию между  $q_i$  и  $c_j$ . Мы будем брать евклидово расстояние:

$$d(q_i, c_j) = (q_i - c_j)^2.$$

По матрице построим некоторый путь  $W$ . Этот путь выражает соответствие между  $Q$  и  $C$ ,  $k$ -й элемент  $W$  определяется как  $w_k = (i, j)$ . Далее под  $d(w_k)$ , где  $w_k = (i, j)_k$ , будем понимать  $d(q_i, c_j)$ , т.е.

$$d(w_k) = d(q_i, c_j) = (q_i - c_j)^2.$$

Итак, мы имеем  $W = w_1, w_2, \dots, w_k, \dots, w_K$ , где  $K$  - длина пути,  $K$  удовлетворяет следующему условию:

$$\min(m, n) \leq K < m + n - 1.$$

Пусть путь  $W$  удовлетворяет следующим условиям:

– Граничные условия

Обычно предполагают, что  $w_1 = (1, 1)$  и  $w_K = (n, m)$ , т.е. начало и конец  $W$  находятся на диагонали в противоположных углах  $\Omega$ ;

– Непрерывность

Пусть  $w_k = (a, b)$  и  $w_{k-1} = (p, q)$ . Тогда

$$a - p \leq 1, b - q \leq 1.$$

Это ограничение нужно, чтобы в шаге пути  $W$  участвовали только соседние элементы матрицы (включая соседние по диагонали);

– Монотонность

Пусть  $w_k = (a, b)$  и  $w_{k-1} = (p, q)$ . Тогда

$$a - p \geq 1, b - q \geq 1.$$

Это ограничение нужно, чтобы точки  $W$  монотонно перемещались во времени. Путей, удовлетворяющих этим трем условиям, может быть очень много. Однако нам нужен путь, на котором достигается минимум стоимости пути:

$$DTW(Q, C) = \min \left\{ \frac{1}{K} \sqrt{\sum_{k=1}^K d(w_k)} \right\}.$$

Знаменатель  $K$  нужен для того, чтобы учесть различную длину  $W$ .

Таким образом, путь наименьшей стоимости (выравнивающий путь) для последовательностей  $Q$  и  $C$  это путь  $W$ , на котором достигается минимум стоимости пути  $DTW(Q, C)$ .

Классический DTW алгоритм поиска пути минимальной стоимости рекурсивно находит длину пути наименьшей стоимости  $i, j$  до каждого элемента матрицы:

$$\gamma_{i,j} = d(w_{i,j}) + \min(\gamma_{i,j-1}, \gamma_{i-1,j}, \gamma_{i-1,j-1}).$$

Таким образом, DTW позволяет оценить степень похожести сигналов.

По теореме Котельникова, аналоговый сигнал может быть восстановлен однозначно и без потерь по своим дискретным отсчетам, взятым с частотой строго большей удвоенной верхней частоты. Человеческому голосу соответствует диапазон частот 300–4000 Гц, следовательно, для того чтобы восстановить голосовой сигнал без потерь, необходимо использовать частоту дискретизации, большую 8 кГц. Для проведения экспериментов использовалась частота 11025 Гц.

Скрытой марковской моделью (СММ) называется модель, обладающая следующими характеристиками: модель имеет  $N$  состояний, в каждом из которых она принимает одно из  $M$  значений. Вероятности переходов между состояниями определяются матрицей  $A = \{a_{ij}\}$ , где  $a_{ij}$  - вероятность перехода из  $i$  в  $j$  состояние. Вероятности выпадения определённых значений в каждом состоянии определяются матрицей  $B = \{b_j(k)\}$ , где  $b_j(k)$  - вероятность выпадения  $k$ -го значения в  $j$ -м состоянии. Также модель содержит матрицу вероятностей  $\pi = \{\pi_i\}$ , где  $\pi_i$  - вероятность, что в начальный момент система в  $i$ -м состоянии.

Таким образом, скрытая марковская модель может быть описана как  $\lambda = \{A, B, \pi\}$ .

Для СММ решаются 3 задачи.

Первая задача – вычисление вероятности появления наблюдаемой последовательности для определённой СММ. Для решения первой задачи применяют алгоритм прямого хода и алгоритм обратного хода.

Вторая задача - выбор последовательности состояний определённой СММ, с наибольшей вероятностью порождающей указанную последовательность наблюдений. Для решения второй задачи применяют алгоритм Витерби.

Третья задача – подбор параметров СММ так, чтобы максимизировать вероятность появления определённой последовательности наблюдений. Для решения третьей задачи применяют алгоритм Баума-Уэлча.

При распознавании изолированных слов скрытые марковские модели могут соответствовать распознаваемым словам, при этом состояния модели соответствуют участкам сигнала. Значения, которые СММ принимает в этих состояниях, могут соответствовать определённым параметрам сигнала на заданном участке.

В целях оценки эффективности работы системы распознавания изолированных слов, использующей пакетные вейвлеты и скрытые марковские модели, был разработан следующий алгоритм:

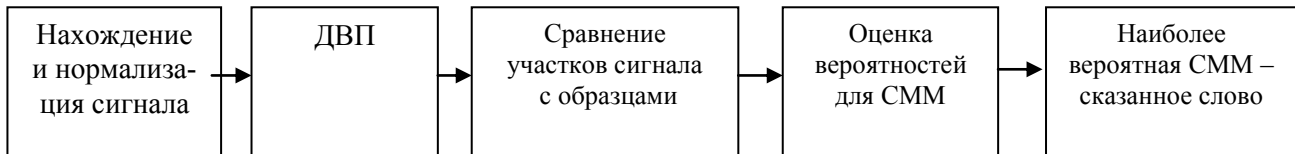


Рис. 5. Схема работы системы

Реализован алгоритм поиска начала сигнала по определённому уровню. Началом считается точка, отстоящая на некоторой дистанции от того момента, когда сигнал достигает заданного уровня. Уровень и отступ определены экспериментально.

Нормализация сигнала заключается в делении сигнала на максимальное его значение. Это позволяет работать с сигналами различной громкости, поскольку полученные значения будут между -1 и 1.

Для сравнения сигналов использован алгоритм Dynamic time warping, который сравнивает две числовые последовательности и в качестве результата выдаёт число, характеризующее их похожесть. Число тем меньше, чем более похожи последовательности.

Таким образом, значение сказанного слова определяется, исходя из того, какой из ранее записанных образцов наиболее похож на него.

Система настроена для распознавания слов «Раз», «Два», «Три», с использованием 9 образцов (по 3 для каждого слова). Также был опробован вариант с распознаванием десяти цифр.

Для распознаваемых слов построены СММ со следующими параметрами:

4 состояния, в каждом по 9 значений.

Состояния – 4 участка сигнала, соответствующие аппроксимирующим и детализирующим последовательностям.

Вероятности переходов выставлены таким образом, что происходит последовательный переход между состояниями.

На каждом из участков определяется похожесть на один из образцов с помощью алгоритма Dynamic Time Warping. Образцы – соответствующие отрезки сигналов – образцов. Таким образом, наблюдаемые последовательности, с которыми работают СММ, представляют собой четыре значения, соответствующие сигналам-образцам, на которые соответствующие участки наиболее похожи.

После получения такой последовательности решается первая задача СММ, т.е. определяется, какая из СММ с наибольшей вероятностью её генерирует. Слово, которое соответствует данной СММ, и является результатом распознавания.

Данный алгоритм реализован на языке Java, для СММ использована библиотека с открытым исходным кодом Jahmm v0.6.1.

Применение СММ обеспечило следующие преимущества:

- возможность использования нескольких образцов одного и того же слова. СММ возможно настроить таким образом, что вероятности появления сигналов, соответствующих одному слову, равны, и при этом больше, чем вероятности для других слов.
- распознаваемый сигнал может быть похож на различные образцы на разных участках, СММ позволяет учитывать только то, к какому слову относятся образцы. Это влияет на результат в случае, когда наблюдаются совпадения с различными образцами, и важно то, к какому слову каждый образец относится.

С целью оценки эффективности распознавания для различных конфигураций системы создана база образцов, состоящая из десяти записей для трёх слов "Раз", "Два", "Три".

Первая строка таблицы показывает количество и процент корректно распознанных слов

при использовании пакетного вейвлет-преобразования второго уровня декомпозиции, т.е. сравниваются последовательности, содержащие и аппроксимирующие, и детализирующие сигналы. Кроме того, деление сигнала на четыре участка позволяет независимо сравнивать эти компоненты. Данный подход показал наилучшие результаты.

Таблица 1

Вейвлет-преобразование	Процент распознавания	Количество распознанных слов
Пакетный Хаар, 2 уровень	86%	(26/30)
A2+D2+D1	70%	(21/30)
A4+D4	56%	(17/30)
A2+D2	60%	(18/30)
A4	66%	(20/30)
D4	33%	(10/30)
A3	46%	(14/30)
D3	43%	(13/30)
A2	50%	(15/30)
D2	53%	(16/30)
A1	46%	(14/30)
D1	56%	(17/30)
Исходный сигнал	40%	(12/30)

Далее показаны результаты распознавания для аппроксимирующих ( $A_i$ ) и детализирующих ( $D_i$ ) сигналов различных уровней декомпозиции, а также их сочетаний. Наиболее близкий к пакетному вейвлету результат получен для сочетания аппроксимирующих и детализирующих компонент вейвлет-преобразования, также на втором уровне декомпозиции.

### Выводы

С целью оценки эффективности распознавания при большем количестве распознаваемых слов записана база из 100 записей (слова от "Раз" до "Десять"), по 10 записей для каждого слова. Количество образцов в системе для распознавания каждого слова по-прежнему три (всего тридцать образцов). Каждому слову соответствует своя скрытая марковская модель, таким образом, всего десять моделей. Используется пакетный вейвлет Хаара, второй уровень декомпозиции.

Таблица 2

Распознавание	Процент распознавания	Количество распознанных слов
10 слов	65%	(65/100)
Раз, два, три	83%	(25/30)
Трёхбуквенные слова	84%	(42/50)

Результирующая таблица показывает, что процент распознанных слов существенно ниже. Тем не менее, для слов "Раз", "Два", "Три" процент уменьшился незначительно. Кроме того, тот же результат наблюдается для прочих коротких слов, что позволяет предположить, что характеристики полученной системы распознавания оптимальны для работы с подобными сигналами.

В данной работе, посвящённой распознаванию речи, мы опробовали алгоритм, сочетающий вейвлет-преобразование в различных конфигурациях, алгоритм динамической трансформации временной шкалы и скрытые марковские модели. Алгоритм применён для распознавания изолированных слов, произносимых одним диктором, при различных объёмах словаря системы и с использованием разных результатов вейвлет-преобразования.

### Библиографический список

1. **Яковлев, А.Н.** Я 474 Введение в вейвлет-преобразования: учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 104 с.
2. **Сергиенко, А. Б.** Цифровая обработка сигналов / А. Б. Сергиенко. – СПб.: Питер, 2002. – 602 с.
3. **Штарк, Г.Г.** Применение вейвлетов для ЦОС / Г.Г. Штарк. – М.: Техносфера, 2007. – 192 с.
4. **Смоленцев, Н. К.** Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в Matlab / Н. К. Смоленцев. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 304 с.
5. Texas Instruments C5505 Teaching Materials.
6. Непрерывное wavelet преобразование [Электронный ресурс] // Habrahabr. URL: <http://habrahabr.ru/post/103899/>
7. Динамическое программирование в алгоритмах распознавания речи [Электронный ресурс]// Habrahabr. URL: <https://habrahabr.ru/post/135087/>
8. Применение скрытых марковских моделей для распознавания речи [Электронный ресурс]// Компьютерное распознавание и порождение речи. URL: <http://speech-text.narod.ru/chap4.html>

*Дата поступления  
в редакцию 08.02.2016*

**O. Korelin, E. Leonova, P. Tanonov**

### **WAVELET TRANSFORM AND HIDDEN MARKOV MODELS IN SPEECH RECOGNITION**

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

**Purpose:** Create a speech recognition algorithm using a combination of methods.

**Design/methodology/approach:** The article deals with wavelet transform and hidden Markov models in speech recognition. Considered various options for system configuration using specific results of the wavelet transform and different volume of the dictionary. Dynamic time warping algorithm is used for signal comparison.

*Key words:* speech recognition, wavelet transform, dynamic time warping, hidden Markov models.

УДК 681.3.513

Е. А. Никулин

## ПРОЦЕДУРНЫЙ ШУМ И МУЛЬТИВАРИАНТНЫЙ ТАЙЛИНГ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

**Тема работы:** Создание процедурных бесшовных текстур с неповторяющимися плитками.**Цель работы:** Развитие методов процедурного бесшовного текстурирования.**Метод решения:** Особый выбор узловых элементов текстурной решетки.**Оригинальность:** Обеспечен неперриодичный тайлинг больших мультитекстур.**Выводы:** Метод предназначен для бесшовного покрытия больших площадей с малыми затратами ресурсов.*Ключевые слова:* текстура, клеточный шум, тайлинг.

Статья посвящена совершенствованию *тайлинга* – создания процедурных текстур-тайлов (от *tile* – плитка), способных бесшовно соединяться друг с другом в желаемых направлениях. После краткого изложения и иллюстрации алгоритма синтеза так называемого *клеточного шума* (ограничимся его 2D-вариантом) будет предложен способ вариации его исходных данных, обеспечивающий гладкость сшивки текстур по границам и неповторяемость их внутреннего рисунка.

Работа генератора клеточного шума происходит на решетке, разбивающей текстурную карту с габаритами  $\{N, M\}$  на клетки, уложенные в  $n$  рядов и  $m$  колонок длиной и высотой

$$d=M/m, \quad h=N/n \quad (1)$$

текселов (рис. 1, а). В узлах решетки задаются / вычисляются узловые элементы  $e_{00} \div e_{nm}$  – числа или векторы, используемые для расчета значений шумовой функции во всех текселах. В простейшем *численном шуме* они генерируются как случайные числа  $e_{ij} = rnd(1) \in [0, 1]$ . В самом распространенном виде клеточного шума – *градиентном шуме Перлина* [1] – в узлах решетки генерируются нормированные векторы градиентов  $\mathbf{G}_{ij} = [\sin(\varphi_{ij}) \cos(\varphi_{ij})]$  со случайными углами  $\varphi_{ij} = rnd(2\pi) \in [0, 2\pi]$ , после чего вычисление значения шумовой функции в каждом  $(v, u)$ -м текселе карты производится в следующем порядке:

- определяются целочисленные координаты клетки, содержащей тексел:

$$i = \lfloor v/h \rfloor - \{v=N\}, \quad j = \lfloor u/d \rfloor - \{u=M\}; \quad (2)$$

- находятся нормализованные клеточные параметры тексела (рис. 1, б):

$$t = v/h - i \in [0, 1], \quad \tau = u/d - j \in [0, 1]; \quad (3)$$

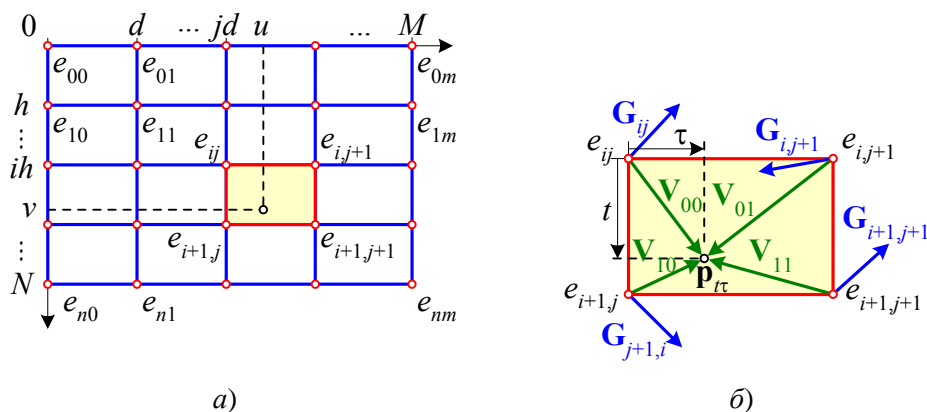


Рис. 1. Решетка и клетка для шума Перлина

- из углов клетки в точку  $\mathbf{p}_{t\tau} = [\tau \ t]$  проводятся векторы

$$\mathbf{V}_{00} = [\tau \ t], \quad \mathbf{V}_{01} = [\tau - 1 \ t], \quad \mathbf{V}_{10} = [\tau \ t - 1], \quad \mathbf{V}_{11} = [\tau - 1 \ t - 1]; \quad (4)$$

- скалярные произведения градиентных и угловых векторов

$$e_{ij} = \mathbf{G}_{ij} \cdot \mathbf{V}_{00}, \quad e_{i,j+1} = \mathbf{G}_{i,j+1} \cdot \mathbf{V}_{01}, \quad e_{i+1,j} = \mathbf{G}_{i+1,j} \cdot \mathbf{V}_{10}, \quad e_{i+1,j+1} = \mathbf{G}_{i+1,j+1} \cdot \mathbf{V}_{11}; \quad (5)$$

- эти числа используются для вычисления значения шума методом бипараметрической интерполяции:

$$F_{vu} = \text{lin}(\text{lin}(e_{ij}, e_{i+1,j}, L(t)), \text{lin}(e_{i,j+1}, e_{i+1,j+1}, L(t)), L(\tau)) \quad \forall v = \overline{0, N}, \quad u = \overline{0, M}. \quad (6)$$

В (6) использована функция  $\text{lin}(A, B, t) = A \cdot (1 - t) + B \cdot t$  линейной интерполяции от объекта  $A$  до объекта  $B$  по нормализованному параметру  $t \in [0, 1]$ . Таким параметром могут быть значения функции  $L(t) \in [0, 1]$ , которая должна обладать обязательными свойствами  $L(0) = 0$  и  $L(1) = 1$ , обеспечивающими непрерывность соединения смежных клеток шумовой функции, и желательными свойствами  $L'(1) = L'(0) = 0$  и  $L''(1) = -L''(0)$  первого и второго порядков гладкости шивки. На рис. 2 построены графики и приведены примеры цветовой интерполяции для трех полиномиальных функций интерполяции:

- простейшей линейной функции  $L_1(t) = t$ , при которой и при  $L_1(\tau) = \tau$  (6) превращается в билинейную интерполяцию;
- нелинейных функций  $L_3(t) = 3t^2 - 2t^3$  и  $L_5(t) = 10t^3 - 15t^4 + 6t^5$ , создающих двойную гладкость стыковки и большой контраст изображения;
- возможно использование косинусной (не полиномиальной) функции интерполяции  $L_{co}(t) = 0.5(1 - \cos(\pi t))$ , отличающейся от  $L_3(t)$  максимум на 0.01, но вычислительно более трудоемкой. Поэтому эту функцию следует признать *неэффективной*.

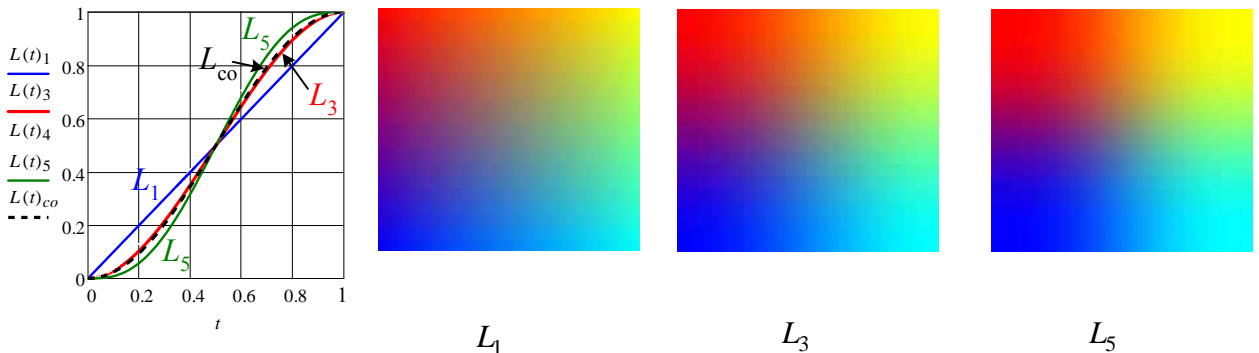


Рис. 2. Функции интерполяции

Благодаря интерполяции создается коррелированность клеточного шума, приводящая к образованию на текстуре причудливых фигур. Важно, что благодаря перебору в (6) текселов всей карты, а не в отдельных клетках по номерам (2), текстура будет закрашена без наложений и пропусков, а длина и высота клетки в (1) не обязаны быть степенями двойки и даже целочисленными! Это особенно ценно при выборе размеров решетки, которые могут быть произвольными целыми числами  $n \leq N$  и  $m \leq M$ .

Перед выводом на экран карты, заполненной значениями шумовой функции  $F_{vu}$   $\forall v = \overline{0, N}, \quad u = \overline{0, M}$ , она подвергается преобразованиям, имеющим следующие цели:

- приведение карты к виду, удобному для её дальнейших преобразований;
- преднамеренное искажение карты для достижения желаемых визуальных эффектов;
- конвертация значений карты в используемую цветовую палитру дисплея.

Хорошо, когда экстремальные значения карты равны 0 и 1 (такие *нормализованные* карты будем обозначать как  $H$ ). Это желание реализуется потексельной операцией *нормали-*

защиты  $H = \text{norm}(F)$  произвольной карты  $F$  со значениями матричной функции

$$\text{norm}(F)_{vu} = \frac{F_{vu} - \min(F)}{\max(F) - \min(F)} \in [0, 1] \quad \forall v = \overline{0, N}, u = \overline{0, M}. \quad (7)$$

При этом обеспечивается максимальное растяжение значений карты в единичном интервале  $[0, 1]$  с  $\min(H) = 0$  и  $\max(H) = 1$ .

Нормализация минимизирует вычислительные затраты, а то и обеспечивает саму возможность выполнения других операций с картами:

- $k_m H$  — масштабирование карты  $H$ , позволяющее при  $k_m < 1$  уменьшить яркость её изображения, а также преобразовать все её значения в оттенки серого цвета с цветовыми матрицами  $R = G = B = 255H$  палитры «True Color». Для получения разноцветной текстуры нужно сгенерировать три карты  $H_r, H_g, H_b$  и выводить на экран смесь цветных матриц  $R = 255H_r, G = 255H_g$  и  $B = 255H_b$ ;
- $F + k_c$  — смещение карты  $F$ , позволяющее совместно с масштабированием повысить яркость изображения нормализованной карты в  $k_y$  раз:

$$\text{bright}(H, k_y)_{vu} = \frac{H_{vu} + k_y - 1}{k_y} \quad \forall v = \overline{0, N}, u = \overline{0, M}; \quad (8)$$

- в различных графических программах имеется великое множество *нелинейных фильтров*, потексельно, аналогично фильтрам (7), (8), обрабатывающих изображения по определенным алгоритмам. Из-за очевидного факта, что «нельзя объять необъятное», ограничимся лишь несколькими фильтрами:

◇ *гамма-коррекция*

$$\text{gamma}(H, p)_{vu} = H_{vu}^p \quad \forall v = \overline{0, N}, u = \overline{0, M}; \quad (9)$$

изменяет в нормализованной карте соотношение между темными и светлыми участками согласно графику степенной функции на интервале  $[0, 1]$ . При степени  $p < 1$  яркость темных участков растет сильнее, чем светлых, а при  $p > 1$  яркость светлых участков снижается больше, чем темных;

- ◇ фильтр «Штамп» с уровнем  $f_1$  заменяет в карте  $F$  все значения  $F_{vu} \geq f_1$  на 1, а все остальные — на 0, делая карту нормализованной:

$$\text{stamp}(F, f_1)_{vu} = \{F_{vu} \geq f_1\} \quad \forall v = \overline{0, N}, u = \overline{0, M}; \quad (10)$$

- ◇ *абсолютный* фильтр заменяет в карте  $F$  все имеющиеся отрицательные значения на положительные:

$$\text{abs}(F)_{vu} = |F_{vu}| \quad \forall v = \overline{0, N}, u = \overline{0, M}; \quad (11)$$

- ◇ периодический *модульный* фильтр заменяет все значения карты, лежащие вне диапазона  $[0, 1]$ , на значения

$$\text{modul}(F)_{vu} = \text{mod}(\text{mod}(F_{vu}, 1) + 1, 1) \in [0, 1] \quad \forall v = \overline{0, N}, u = \overline{0, M}; \quad (12)$$

- *цветовое смешивание* нормализованной карты  $H$ , создающее RGB-вектор цвета  $(v, u)$ -го тексела как линейную интерполяцию от цвета  $c_0$  до цвета  $c_1$  по нормализованному параметру  $H_{vu} \in [0, 1]$ :

$$\text{mix}2(c_0, c_1, H)_{vu} = \text{lin}(c_0, c_1, H_{vu}) \quad \forall v = \overline{0, N}, u = \overline{0, M}. \quad (13)$$

Применение в (13) нелинейных функций интерполяции  $L_3(H_{vu})$  и  $L_5(H_{vu})$  приве-



дет к обострению контраста цветового перехода (см. рис. 2). Более красочные эффекты дает трехцветное смешивание

$$\text{mix}3(c_0, c_1, c_2, H)_{vu} = (1-t)c_0 + 2t(1-t)c_1 + t^2c_2 \quad \forall v=\overline{0, N}, u=\overline{0, M}, t=H_{vu}, \quad (14)$$

устроенное аналогично квадратичной линии Безье. Благодаря свойству любой линии Безье лежать в выпуклой оболочке ее узловых точек, трехцветная смесь всегда будет находиться в цветовом RGB-пространстве между точками  $c_0$ ,  $c_1$  и  $c_2$ . Отметим, что квадратичная интерполяция таким свойством не обладает. На основе полиномиальной модели Безье можно смешивать любое количество цветов;

- *фрактализация* (от *fraction* — дробить) — создание карты  $F^{<vn \times \mu m>}$  с теми же размерами  $\{N, M\}$ , но на более частой решетке с кратным числом рядов  $vn$  и/или колонок  $\mu m$  (вот здесь-то и возможны решетки с нецелочисленными длиной и высотой клетки!). Подражая музыкальной октаве, в которой отношение частот верхнего и нижнего звуков равно двум, процедурную карту с частотами  $v=\mu=2^k$  также называют  $k$ -й *октавой*. Ничто не мешает использовать гармоники с разными и не равными степеням 2 частотами  $v$  и  $\mu$ , что позволяет создать анизотропные текстуры с разными свойствами по горизонтали и вертикали;
- *смешивание текстур* с разными частотами позволяет добавить к пространственно протяженным деталям изображения текстуры  $H^{<n, m>}$  более мелкие детали гармоник  $H^{<vn \times \mu m>}$ . В формуле фрактального смешивания

$$C = k_0 H^{<n \times m>} + k_1 H^{<v_1 n \times \mu_1 m>} + k_2 H^{<v_2 n \times \mu_2 m>} + \dots \quad (15)$$

сумма коэффициентов  $k_0, k_1, k_2 \dots$  должна быть равна 1 с целью удержания значений карты  $C$  в диапазоне  $[0, 1]$ . Если задавать веса в порядке убывания  $k_0 \geq k_1 \geq k_2 \geq \dots$ , то низкочастотные гармоники (крупные детали текстуры) будут иметь относительно большую яркость, чем высокочастотные (мелкие детали).

Очень простой способ сделать генерируемую текстуру тайловой — это уравнивать граничные узловые элементы:

- верхнего ряда решетки с нижним для тайлинга плиток по вертикали:

$$e_{n0} = e_{00}, e_{n1} = e_{01}, \dots, e_{nm} = e_{0m}; \quad (16)$$

- левой колонки с правой для бесшовного соединения по горизонтали:

$$e_{0m} = e_{00}, e_{1m} = e_{10}, \dots, e_{nm} = e_{n0}; \quad (17)$$

- для бесшовного размножения во все стороны актуальны оба условия (16), (17).

На рис. 3 показана работа генератора численного шума и результаты операций (7)–(12) и (13)–(15) при исходных данных  $N=120, M=150, n=4, m=5$  и размерах клеток  $d=h=30$  текселов:

- а) на случайных узловых элементах тайловой решетки

$$E = \begin{bmatrix} 0.737 & 0.797 & 0.148 & 0.318 & 0.01 & 0.737 \\ 0.259 & 0.647 & 0.366 & 0.696 & 0.184 & 0.259 \\ 0.562 & 0.695 & 0.595 & 0.096 & 0.044 & 0.562 \\ 0.736 & 0.793 & 0.627 & 0.525 & 0.103 & 0.736 \\ 0.737 & 0.797 & 0.148 & 0.318 & 0.01 & 0.737 \end{bmatrix}$$

сгенерирована карта  $F^{<n \times m>}$  с экстремальными значениями  $\min(F) \approx 0.01$  и  $\max(F) \approx 0.797$ . Изображение получено по (13) цветовым смешиванием  $\text{mix}2(c_{\text{TK}}, c_{\text{CF}}, F)$  от темно-красного цвета  $c_{\text{TK}} = [128 \ 0 \ 0]$  до светло-голубого  $c_{\text{CF}} = [128 \ 255 \ 255]$ ;

- б) на той же решетке по (7) создана нормализованная карта  $H=norm(F)$  с  $\min(H)=0$ ,  $\max(H)=1$  и хорошо заметным повышением контраста;
- в) на той же решетке по (8) сгенерирована карта  $B=bright(F,2)$  с  $\min(B)=0.505$ ,  $\max(B)=0.899$  и вдвое большей яркостью, чем у карты  $F$ ;
- г) на той же решетке по (9) выполнена гамма-коррекция  $G=gamma(F,0.5)$  с  $\min(G)=0.1$ ,  $\max(G)=0.893$  и бóльшим контрастом, чем у карты  $B$ ;
- д) на той же решетке по (10) построен штамп  $S^{<n,m>}=stamp(F^{<n,m>},0.5)$  с пороговым уровнем  $f_1=0.5$ ;

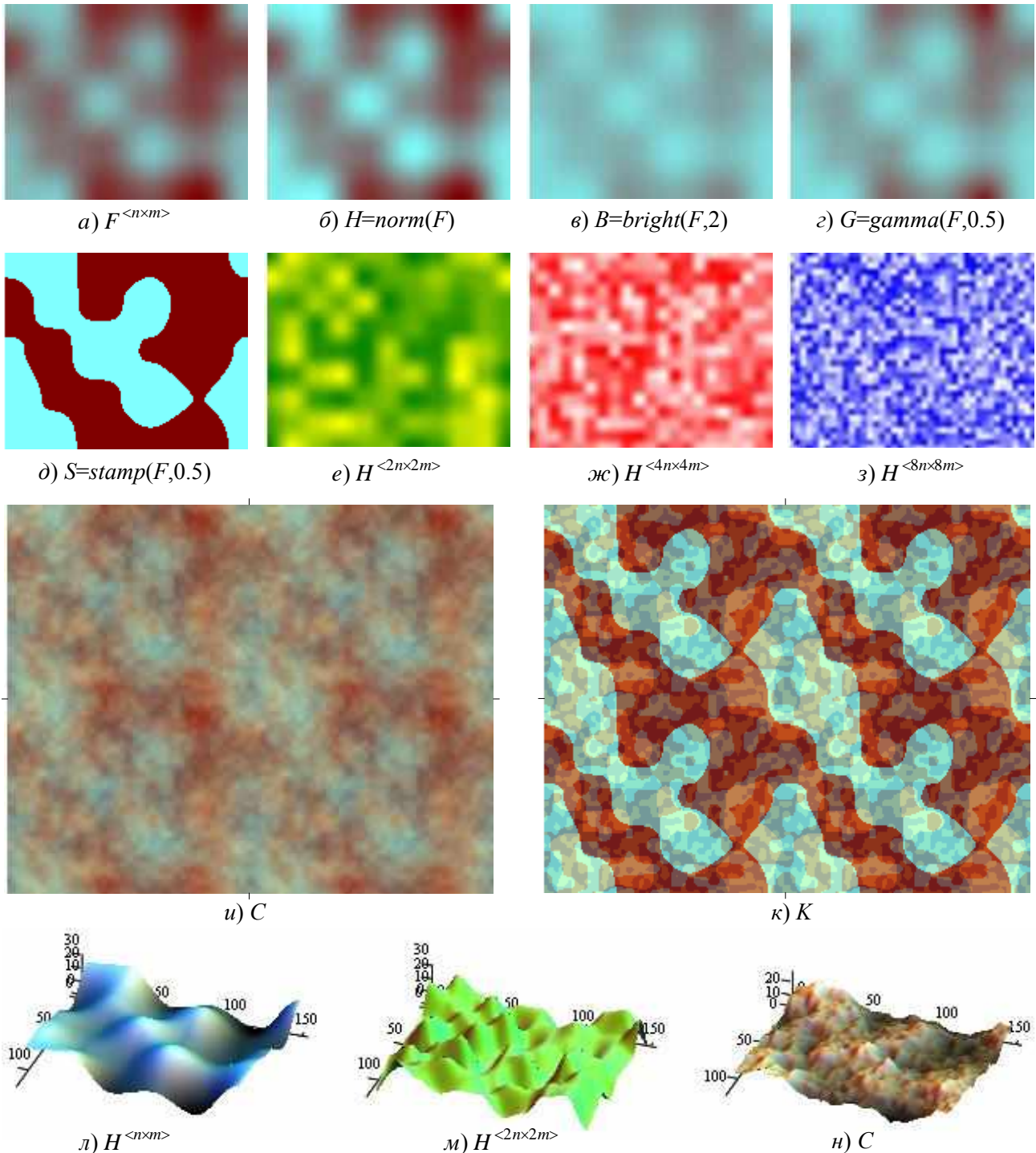


Рис. 3. Численный шум

- е) изображение карты первой октавы  $H^{<2n \times 2m>}$  получено по (13) линейным смешиванием  $\text{mix}2(c_{\text{тз}}, c_{\text{ж}}, H^{<8 \times 10>})$  от темно-зеленого цвета  $c_{\text{тз}} = [0 \ 128 \ 0]$  до желтого  $c_{\text{ж}} = [255 \ 255 \ 0]$ ;
- ж) карта второй октавы  $H^{<4n \times 4m>}$  получена линейным смешиванием  $\text{mix}2(c_{\text{б}}, c_{\text{к}}, H^{<16 \times 20>})$  от белого цвета  $c_{\text{б}} = [255 \ 255 \ 255]$  до красного  $c_{\text{к}} = [255 \ 0 \ 0]$ ;
- з) карта третьей октавы  $H^{<8n \times 8m>}$  получена линейным смешиванием  $\text{mix}2(c_{\text{с}}, c_{\text{б}}, H^{<32 \times 40>})$  от синего цвета  $c_{\text{с}} = [0 \ 0 \ 255]$  до белого  $c_{\text{б}}$ ;
- и) разноцветный шум  $C = 0.5H^{<n, m>} + 0.2H^{<2n, 2m>} + 0.2H^{<4n, 4m>} + 0.1H^{<8n, 8m>}$  получен по (15) покомпонентным смешиванием четырех октавных карт и бесшовно размножен в два ряда и две колонки;
- к) разноцветный камуфляж  $K = 0.5S^{<n, m>} + 0.2S^{<2n, 2m>} + 0.2S^{<4n, 4m>} + 0.1S^{<8n, 8m>}$  получен покомпонентным смешиванием четырех октавных штампов и бесшовно размножен в два ряда и две колонки.

Процедурный шум, и не только численный, имеет полезное применение как *генератор 3D-ландшафта* [2], в котором значения шумовой функции рассматриваются не как цвета текселей плоского изображения, а как *карта высот* рельефа на плане  $v \times u$ , по которой строится полигональная сеть. На рис. 3, л – н показаны поверхности карт  $H^{<n \times m>}$  (см. рис. 3, б),  $H^{<2n \times 2m>}$  (см. рис. 3, е) и одной секции тайловой текстуры на рис. 3, и. Для получения хорошей выпуклости рельефа значения карт увеличены в 30 раз.

При создании тайлового шума Перлина уравниваются граничные векторы

$$\mathbf{G}_{n0} = \mathbf{G}_{00}, \mathbf{G}_{n1} = \mathbf{G}_{01}, \dots, \mathbf{G}_{nm} = \mathbf{G}_{0m};$$

$$\mathbf{G}_{0m} = \mathbf{G}_{00}, \mathbf{G}_{1m} = \mathbf{G}_{10}, \dots, \mathbf{G}_{nm} = \mathbf{G}_{n0},$$

тогда в (5) автоматически получатся требуемые граничные элементы (16), (17).

Шум Перлина обладает следующими свойствами:

- благодаря нормализованной параметризации (3), все клетки решетки параметрически квадратны при любых геометрических размерах (1);
- во всех узлах решетки значения карты  $F_{ih, jd}$  равны нулю ввиду обнуления соответствующих векторов в (4). Это объясняет появление в Перлин-текстурах горизонтально и вертикально ориентированных прямоугольных деталей;
- на одноклеточной тайловой решетке с  $n=m=1$  и равными узловыми векторами  $\mathbf{G}_{00} = \mathbf{G}_{01} = \mathbf{G}_{10} = \mathbf{G}_{11}$  значения карты кососимметричны:  $F_{\tau\tau} = -F_{1-t, 1-\tau}$ ;
- все значения карты гарантированно лежат в интервале  $[-\sqrt{0.5}, \sqrt{0.5}]$  (реально в гораздо более узком), поэтому она нуждается в нормализации.

Возможности шума Перлина проиллюстрированы на рис. 4, где показано несколько его тайловых реализаций с размерами карты  $N=120$  и  $M=150$ , с разными размерами решетки  $n \times m$ , фильтрами (7)–(12) и цветовыми / фрактальными смесями (13)–(15):

- а) карта  $F \in [-0.197, 0.197]$  создана на одноклеточной решетке и автоматически промодулирована видеоадаптером так, что отрицательные значения  $F_{vu} < 0$  заменились на положительные  $F_{vu} + 1$ ;
- б) та же карта  $F$  нормализована по (7);
- в) та же карта преобразована абсолютным фильтром (11) и нормализована;
- г) типичный нормализованный Перлин-шум на решетке из  $12 \times 15$  квадратных клеток;
- д) волноподобный шум построен на решетке из  $10 \times 3$  горизонтально вытянутых клеток;
- е) шум построен на решетке  $3 \times 3$ , усилен в 10 раз и модулирован по (12);
- ж) шум, построенный на решетке  $3 \times 10$ , абсолютизирован по (11) и отштампован по (10) с порогом  $f_1 = 0.1$ , влияющим на толщину светлых линий;

- з) на решетке из  $6 \times 5$  клеток созданы и соединены в конечное изображение независимые цветовые Перлин-карты  $stamp(R,0)$ ,  $stamp(G,0)$  и  $stamp(B,0)$ ;
- и) – м) карта  $H^{<4 \times 2>}$  и три октавные карты  $H^{<8 \times 4>}$ ,  $H^{<16 \times 8>}$  и  $H^{<32 \times 16>}$ ;
- н) фрактальная смесь  $C = 0.5H^{<4 \times 2>} + 0.2H^{<8 \times 4>} + 0.2H^{<16 \times 8>} + 0.1H^{<32 \times 16>}$ , размноженная в два ряда и две колонки.

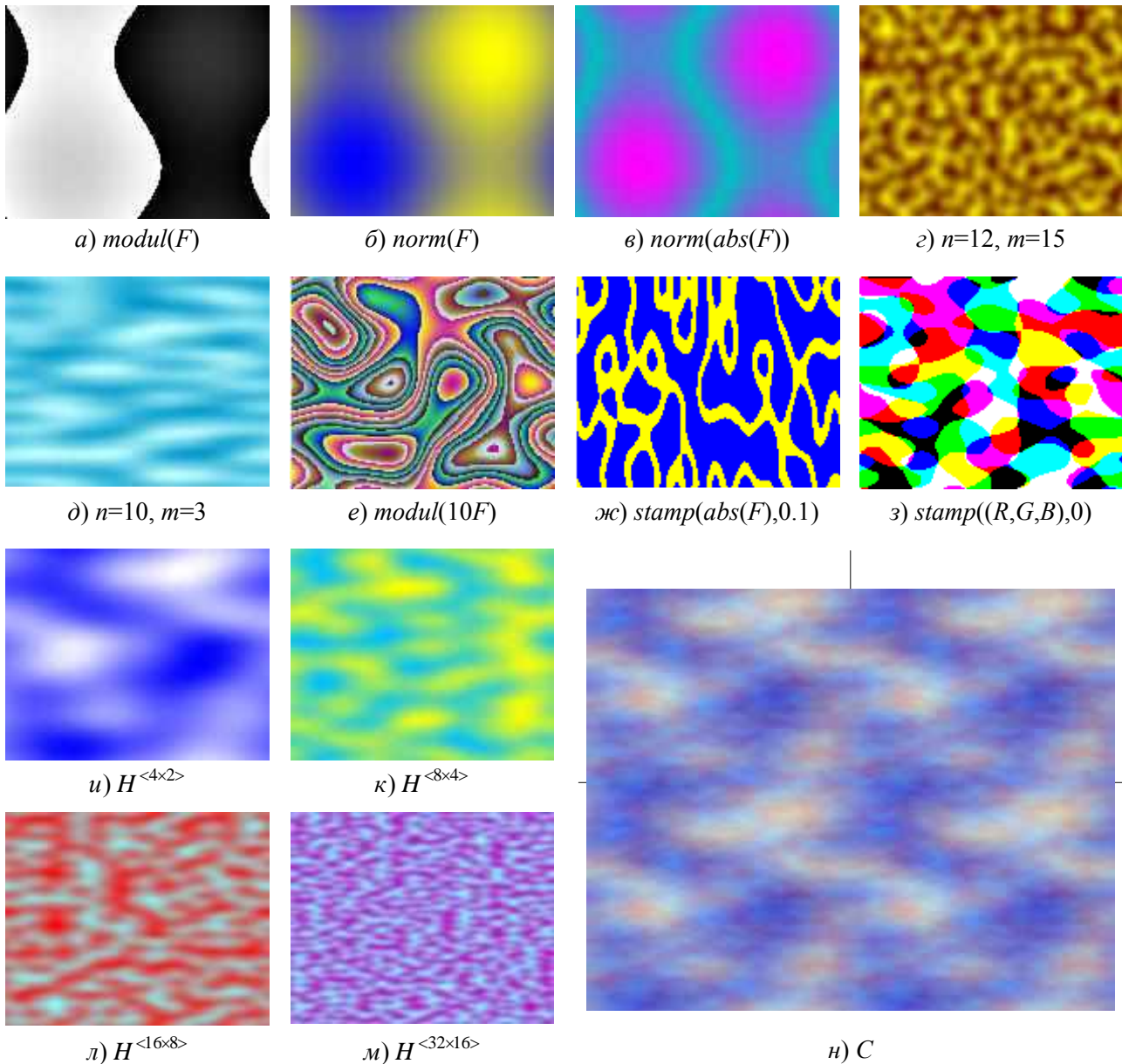
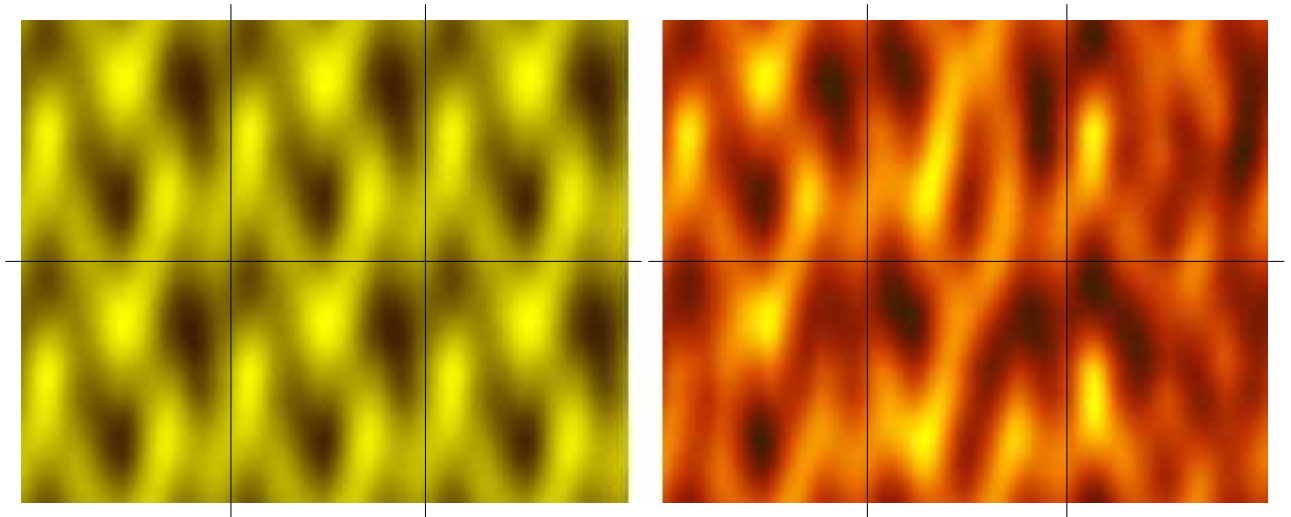


Рис. 4. Шум Перлина

Для того чтобы тайловая мультитекстура, собранная из одинаковых плиток, не утомляла назойливой периодичностью, нужно генерировать все «плитки» с одинаковыми граничными элементами (16), (17), но с *разными* внутренними элементами  $e_{11} \div e_{n-1,m-1}$ . На рис. 5 показаны слева периодическая  $2 \times 3$ -укладка из шести одинаковых плиток, а справа – мультивариантная тайловая текстура, в которой все плитки отличаются друг от друга внутри, но совпадают по обозначенным границам сшивки. Заметим, что только левые верхние плитки в обеих текстурах одинаковые. Цветовые переходы изображений получены с помощью сплайнов Безье: левого – линейным смешиванием (13) от темно-коричневого цвета до желтого, а правого – квадратичным смешиванием (14) от коричневого цвета через красный до желтого.



**Рис. 5. Периодический и мультивариантный тайлинг**

Метод мультивариантного тайлинга предназначен для бесшовного *последовательного* покрытия больших объемов пространства с малыми затратами памяти по сравнению с ресурсоемким одноразовым генерированием огромной текстуры.

#### **Библиографический список**

1. **Ebert, D.S.** Texturing and modeling. A procedural approach. Third edition / D.S. Ebert [et al.]. – San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2002. – 600 p.
2. **Снук, Г.** Создание 3D-ландшафтов в реальном времени с использованием C++ и DirectX 9: [пер. с англ.] / Г. Снук. – М.: КУДИЦ – ОБРАЗ, 2007. – 368 с.

*Дата поступления  
в редакцию 25.01.16*

**Е.А. Nikulin**

#### **PROCEDURAL NOISE AND MULTIVARIATE TILING**

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

**Subject:** Creation of procedural seamless textures with non-repeating tiles.

**Purpose:** Evolution of methods of procedural seamless texturing.

**Methodology:** A special choice of node elements of the texture lattice.

**Originality:** Is provided non-periodical tiling of the large multitextures.

**Findings:** The method is designed for seamless coverage of large areas at low cost resources.

*Key words:* texture, cellular noise, tiling.



УДК 004.89

О.П. Тимофеева, С.С. Палицына

## ОБУЧЕНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГОРОДСКИМИ СВЕТОФОРАМИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

**Цель работы:** Рассматривается проблема обучения нейронной сети, лежащей в основе интеллектуальной системы управления светофорами, регулирующей движение в соответствии с текущей дорожной ситуацией.

**Методология:** Система использует нейросетевой подход, что обеспечивает гибкость в выборе оптимального состояния перекрестка. Для проверки результатов обучения нейронной сети используется метод имитационного моделирования.

**Результаты:** Рассматриваемая система основана на двухслойной нейронной сети. Первый слой был обучен с помощью алгоритмов Хебба, алгоритма Кохонена и алгоритма с подкреплением. Второй слой был обучен по алгоритму обучения без учителя.

**Выводы:** Сеть реагирует на загруженность дорог и выбирает оптимальное для текущей ситуации состояние. Для первого слоя сети наилучшие результаты показало обучение по алгоритму Кохонена.

*Ключевые слова:* нейронная сеть, алгоритмы обучения нейронной сети

### Введение

Одной из наиболее актуальных проблем крупных городов является проблема организации дорожного движения транспортных средств. Причина возникновения данной проблемы - несовершенный способ управления транспортными потоками. В управлении транспортными потоками особое значение имеет светофорное регулирование. Большинство современных систем управления светофорами работает по заданным интервалам времени и не способно справиться с непрерывно меняющейся ситуацией на дороге.

Для решения этой проблемы была поставлена задача разработки интеллектуальной системы управления светофорами, которая позволит управлять транспортными потоками, основываясь на данных, отражающих загруженность направлений перекрестка и дорог, идущих от соседних с ним перекрестков.

Перспективным направлением для решения этой задачи является моделирование системы с помощью искусственных нейронных сетей. Преимущество нейронных сетей заключается в возможности самообучения, что позволяет системе подстраиваться под изменяющуюся ситуацию на дороге.

### Объект исследования

Ранее была спроектирована нейронная сеть, предназначенная для решения задачи светофорного регулирования на перекрестке, представляющая собой множество нейронов, связанных между собой. Создание архитектуры нейронной сети предполагало выбор типов используемых нейронов, определение количества слоев сети, описание входных и выходных параметров сети [1].

Крестообразный перекресток в [1] представляет собой совокупность светофоров, регулирующих каждую полосу движения в каждом направлении движения. Под «состоянием перекрестка» в данный момент времени подразумевается, что каждый светофор перекрестка включен в определенный режим (зеленый или красный), т.е. совокупность представляет собой вектор, длина которого соответствует количеству светофоров на перекрестке, и каждая компонента которого равна 1 (если соответствующий светофор горит зеленым) или 0 (если светофор горит красным). Множество возможных состояний, в которых может находиться перекресток для обеспечения безаварийного проезда по нему, определено заранее.

Каждый нейрон в нейронной сети перекрестка может иметь несколько входов, имеющих свой весовой коэффициент, определяющий важность поступающей по нему информации [1]. Правильность решения поставленной задачи преимущественно определяется оптимальными для конкретной ситуации значениями весовых коэффициентов. Процесс подбора этих параметров называется обучением нейронной сети. Примечательна способность нейронных сетей к обобщению, т.е. правильно обученная сеть выдает адекватные ответы не только для примеров, на которых была обучена, но и для любых входных значений. Схема обучения сети отражена на рис. 1.



Рис. 1. Схема обучения нейронной сети

### Методы обучения нейронной сети

Существует множество методов обучения, каждый из которых можно отнести к одной из двух групп: обучение с учителем и обучение без учителя. Отличительной чертой алгоритма “с учителем” является наличие во время обучения правильного ответа для каждого входного вектора. Алгоритм обучения без учителя предполагает наличие только значений, которые будут поданы на вход сети [2]. Кроме того, среди множества методов машинного обучения существует такой, который можно отнести и к обучению с учителем и к обучению без учителя – обучение с подкреплением. Суть этого метода заключается во взаимодействии обучаемой сети со средой, которая влияет на подстройку весов. Результатом обучения является набор весовых коэффициентов, оптимальных для данной задачи, что позволяет сети давать наиболее подходящие значения выходов.

Нейронная сеть перекрестка состоит из трех слоев (сенсорный, скрытый и выходной), каждый из которых решает свою задачу. При решении задачи оптимального светового регулирования невозможно получить верный результат заранее, поэтому предлагается использовать смешанный алгоритм обучения. Это означает, что матрицу весовых коэффициентов между первым и вторым слоем (первая часть нейронной сети) будем обучать “без учителя”, так как решается задача оптимизации и неизвестно верное решение, а между вторым и выходным слоем (вторая часть нейронной сети) – “с учителем”, так как решается задача классификации для определения конкретного состояния перекрестка из множества возможных.

Рассмотрим несколько алгоритмов обучения первой части нейронной сети, отвечающей за поиск оптимального решения, с целью выбора алгоритма, дающего наилучший результат регулирования дорожной ситуации перекрестка. Эту часть сети можно обучить по схеме “без учителя” или по методу “с подкреплением”. Рассмотрим оба варианта.

**Обучение по схеме “без учителя”.** Введем обозначения:  $t = 1, 2, \dots$ , момент времени (дискретная величина);  $w_{ij}(t)$  – весовой коэффициент синапса, расположенного между  $i$ -м нейроном сенсорного слоя и  $j$ -м нейроном скрытого слоя, в момент времени  $t$ ;  $y_i^{(n-1)}$  – результирующее значение  $i$ -го нейрона сенсорного слоя;  $y_j^{(n)}$  – результирующее значение  $j$ -го нейрона скрытого слоя ( $n$  – номер слоя сети);  $\alpha$  – коэффициент скорости обучения, управляет величиной изменения весов (в нашей задаче – небольшое константное значение).

Алгоритм обучения нейронной сети “без учителя”:

*Шаг 1.*  $t=0$ . Весовые коэффициенты сети  $w_{ij}(0)$  инициализируются случайными числами.

*Шаг 2.* Очередной входной вектор подается на вход первого слоя и рассчитывается выходной результирующий вектор сети  $y_j^{(n)}(t)$ .

*Шаг 3.* Модификация весов в соответствии с формулой выбранного алгоритма.

*Шаг 4.* Если требуемая точность обучения не достигнута (используется косвенная оценка точности),  $t=t+1$ , возвращаемся на шаг 2; иначе - выход из алгоритма.

В работе предлагается использовать несколько алгоритмов обучения без учителя: сигнальный алгоритм Хебба, дифференциальный алгоритм Хебба и алгоритм Кохонена. Разница в реализации будет проявляться только на *шаге 3*, где расчет будет производиться в соответствии с выбранным алгоритмом (формулы алгоритмов приведены далее).

Формула обучения для сигнального алгоритма Хебба:

$$w_{ij}(t) = w_{ij}(t-1) + \alpha \cdot y_i^{(n-1)} \cdot y_j^{(n)}. \quad (1)$$

Формула обучения для дифференциального алгоритма Хебба:

$$w_{ij}(t) = w_{ij}(t-1) + \alpha \cdot [y_i^{(n-1)}(t) - y_i^{(n-1)}(t-1)] \cdot [y_j^{(n)}(t) - y_j^{(n)}(t-1)]. \quad (2)$$

Формула обучения алгоритма Кохонена:

$$w_{ij}(t) = w_{ij}(t-1) + \alpha \cdot [y_i^{(n-1)} - w_{ij}(t-1)]. \quad (3)$$

**Обучение с подкреплением.** Общая схема алгоритма обучения с подкреплением показана на рис. 2. Идея состоит в том, что нейронная сеть рассматривается во взаимодействии с внешней средой - текущей дорожной ситуацией. Находясь в текущий момент времени  $t$  в одном из возможных состояний, нейронная сеть вычисляет следующее оптимальное для текущей дорожной ситуации состояние и переходит в него, за что получает подкрепление -  $r_t$ . Подкрепление может быть положительным (награда) или отрицательным (наказание).

Нейронная сеть стремится к достижению максимума суммарной награды, которую можно получить в будущем -  $R_t$ . Прогнозирование будущей награды ведется с помощью коэффициента забывания -  $\gamma$  ( $0 < \gamma < 1$ ), который отражает степень уверенности в предполагаемой оценке. Расчет суммарной награды ведется по формуле:

$$R_t = \sum_{k=0}^{\infty} (\gamma^k * r_{t+k}), \quad (4)$$

где  $r_{t+k}$  - прогнозируемое подкрепление в момент времени  $(t+k)$ .

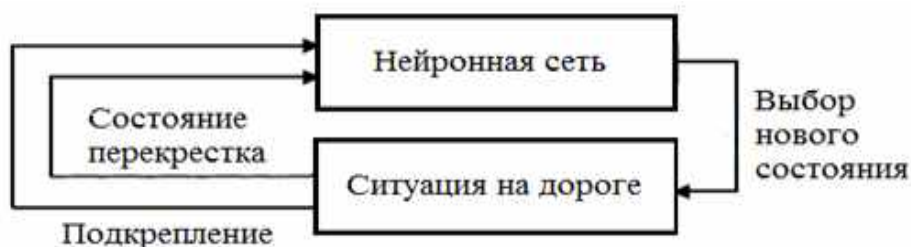


Рис. 2. Схема обучения с подкреплением

Опишем потребность и мотивации «умного светофора»: потребность – оптимизация дорожного движения, мотивация этой потребности - входные данные светофора. То есть чем меньше скорость, с которой машины проезжают под светофором и чем больше плотность потока, тем больше потребность в оптимизации. Количественно на данную мотивацию влия-



ет оценка -  $M$ , сообщающая, улучшилась или ухудшилась дорожная ситуация при смене состояния перекрестка. Оценку состояния каждого светофора рассматриваемого перекрестка будем вычислять по формуле:

$$M_i = \rho_i + \frac{1}{V_i}, \quad (5)$$

где  $M_i$  – оценка состояния  $i$ -го светофора перекрестка;  $\rho_i$  – средняя плотность транспортного потока, проходящего через  $i$ -й светофор;  $V_i$  – средняя скорость потока, проходящего через  $i$ -й светофор.

Количество очков для награждения высчитывается по формуле:

$$R_i^k = M_i^t - M_i^{t-1}, \quad (6)$$

где  $R_i^t$  – награда, передаваемая  $i$ -му светофору в момент времени  $t$ ;  $M_i^t$  – оценка состояния  $i$ -го светофора в момент времени  $t$ .

С помощью полученных очков происходит укрепление или ослабление нейронных связей, поэтому решения, приводящие к положительной награде, будут усиливать связь и, оказываясь в похожих состояниях, сеть будет выбирать то решение, которое уже приносило ей положительную награду.

Алгоритм обучения нейронной сети с подкреплением:

*Шаг 1.* Выбрано одно из состояний перекрестка, поступают данные о плотности  $\rho_i$  и скорости потока  $V_i$ .

*Шаг 2.* Нейронная сеть выбирает следующее состояние.

*Шаг 3.* Нейронная сеть переходит в новое состояние, получает награду  $R_i^t$ , на основе чего происходит коррекция весовых коэффициентов.

Сложность использования этого метода заключается в том, что нужно получать обратную связь - ответ от среды, т.е. полностью моделировать поведение транспортных потоков.

**Обучение по схеме "с учителем".** Рассмотрим механизм обучения второй части нейронной сети. Обучение проводилось на этапе проектирования, так как решается задача классификации – по набору входных данных, поступивших с выходов первой части сети, требуется определить состояние перекрестка (из множества возможных). Для обучения использовался итерационный алгоритм "с учителем", который предполагает наличие входных данных и эталонных результатов - константных значений, которые представляют собой правильный выход сети при заданных входных значениях. Эталонный вектор нужен для проверки качества обучения. На каждой итерации вычислялось отклонение полученного результата от эталонного по формуле среднеквадратичной ошибки:

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^p (d_i - y_i)^2, \quad (7)$$

здесь  $N$  - количество примеров;  $y_i$  - выходное значение  $i$ -го нейрона;  $d_i$  - эталонный результат  $i$ -го нейрона;  $p$  - размерность выходного вектора.

Цель «настройки» весовых коэффициентов заключается в минимизации функции ошибки  $E$ . Формула алгоритма обучения с подкреплением:

$$w_i(k+1) = w_i(k) + a[x_i - w_i(k)], \quad (8)$$

где  $w_i$  - весовой коэффициент входа  $x_i$  на итерации  $k$ ;  $a$  - коэффициент скорости обучения (перед началом обучения он имеет значение, равное 0.1, которое затем постепенно уменьшается);  $x_i$  - значение  $i$ -го входного параметра.

Алгоритм обучения с учителем:

*Шаг 1.* Веса сети  $w_i(k)$  инициализируются случайными числами.

*Шаг 2.* Очередной входной пример  $x_i$  поступает на вход сети.

*Шаг 3.* Для каждого нейрона вычисляется выходное значение  $y_i$ .

*Шаг 4.* Если результат не совпадает с эталонным - модифицировать веса  $w_i$  в соответ-

ствии с формулой (8) и снова подать рассматриваемый входной вектор  $x_i$  на вход сети. Перейти на шаг 3. Если приемлемая точность не достигнута, вернуться на шаг 2.

Постепенное регулирование весовых коэффициентов позволяет нейрону выдавать правильный ответ на произвольный входной вектор.

Следует отметить, что все знания о задаче, которыми обладает сеть, заключены в обучающей выборке, поэтому от размера и достоверности обучающих примеров зависит качество обучения. Главный вопрос, решаемый при составлении обучающей выборки, заключается в определении количества наблюдений, которые потребуются для обучения сети. При этом необходимо учитывать различные факторы, такие как число нейронов сети, количество связей и другие. Наиболее распространенное правило для приблизительной оценки количества обучающих примеров выражается формулой:

$$Q \approx \sqrt{p * d}, \quad (9)$$

где  $Q$  – число регулируемых весов;  $d$  – размерность входного обучающего вектора;  $p$  – количество обучающих примеров. Следует помнить, что полученное по этой формуле значение является приблизительным, более точный размер обучающей выборки может быть установлен в ходе обучения.

### Анализ результатов обучения нейронной сети

Первая часть нейронной сети перекрестка обучалась на 2000 примерах по четырем алгоритмам: сигнальному алгоритму Хебба, дифференциальному алгоритму Хебба, алгоритму Кохонена и алгоритму обучения с подкреплением.

При обучении сети с использованием первых двух алгоритмов наблюдалось неограниченное увеличение весовых коэффициентов. Это приводило к тому, что значения аксонов всех нейронов скрытого слоя принимали свое максимальное значение, равное единице. Применительно к предметной области это означает, что требуется включить все светофоры одновременно (соответствует аварийной ситуации на перекрестке). Вторая часть сети, исходя из этих данных, не может принять решение в пользу того или иного состояния, поэтому на выходе результирующего слоя нейронной сети появляется вектор значений, не соответствующий ни одному из возможных состояний. Таким образом, становится понятным, что обучение данной сети по алгоритмам Хебба не дало приемлемых результатов; значит эти алгоритмы неприменимы для рассматриваемой сети.

При обучении сети по алгоритму Кохонена сеть реагирует на изменение плотности потока и переходит в наиболее загруженное на момент работы сети состояние. Проанализируем результаты обучения сети по этому алгоритму для одного из возможных состояний перекрестка, полученные на примере тестовой конфигурации.

На рис. 3 представлена зависимость плотности потока на подконтрольных рассматриваемому состоянию светофорах от номера шага (шаг обучения принят равным 10 с).

В результате обучения по алгоритму Кохонена система чаще всего выбирает состояние, имеющее максимальную плотность потока на подконтрольных полосах. В некоторых случаях, система выбирает не самое загруженное состояние, что связано со скоростью изменения весовых коэффициентов, которая задается в алгоритме коэффициентом скорости обучения. Такое поведение является следствием резкого увеличения плотности входного потока - сети нужно время, чтобы приспособиться к резкой смене ситуации. Скорость изменения весовых коэффициентов является особенностью нейронных сетей, обеспечивающей определенную гибкость в работе системы.

При стандартном подходе, когда светофоры на перекрестке переключаются через равные промежутки времени (возьмем интервал переключения равным 10 с), плотности потока будут расти в течение 30 с и убывать только 10 с. По графику видно, что такой подход справляется с загруженностью при небольших плотностях потока, но с течением времени и ростом нагрузки, очереди на светофорах существенно больше, чем при аналогичной ситуа-

ции для системы "умных светофоров". Очереди будут постепенно убывать в том случае, когда исходная плотность потока начнет убывать.

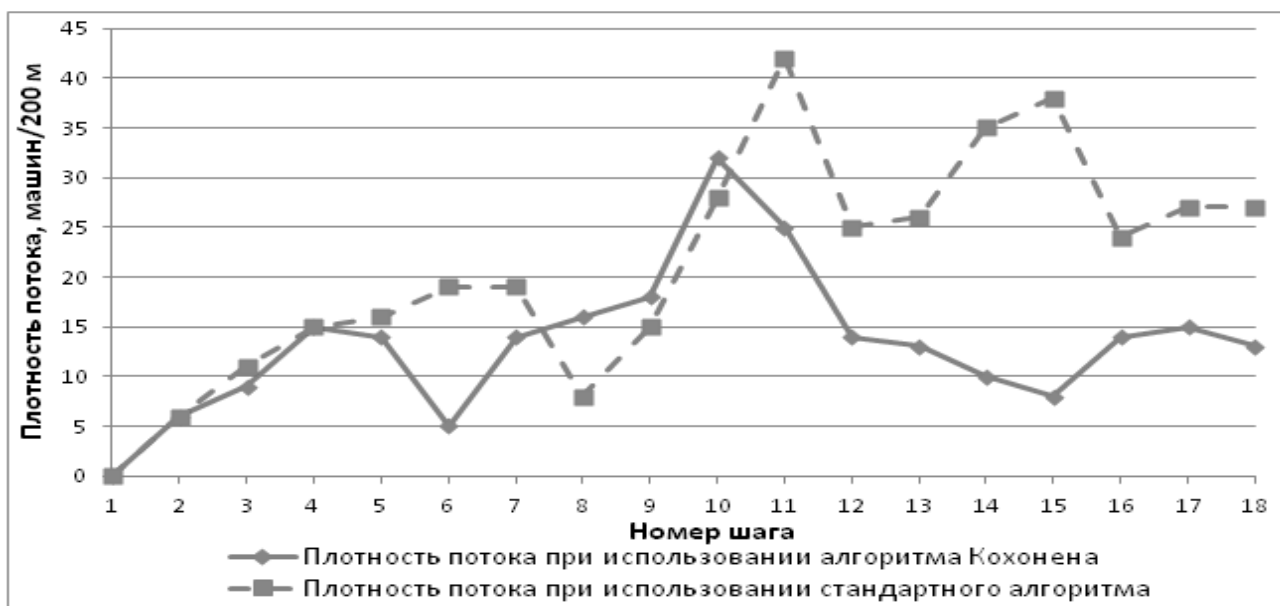


Рис. 3. Диаграмма зависимости плотности потока от времени для конфигурации с использованием алгоритма Кохонена и стандартного алгоритма

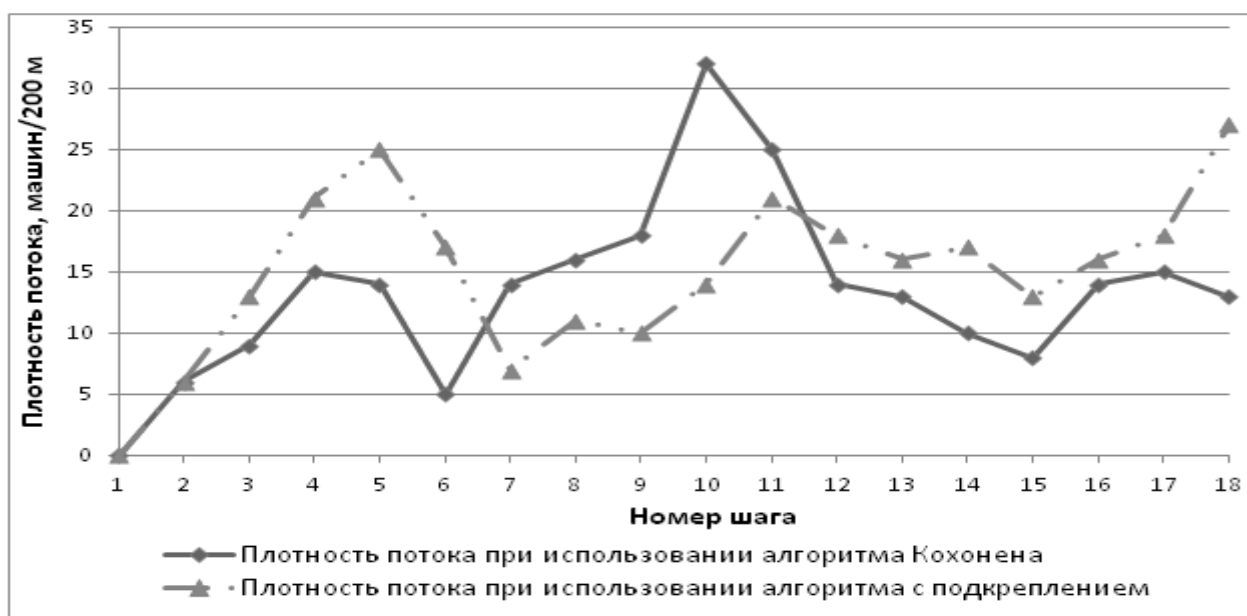


Рис. 4. Диаграмма зависимости плотности потока от времени для конфигурации с использованием алгоритма обучения с подкреплением и алгоритма Кохонена

Из рисунка видно, при использовании системы "умных светофоров" значения плотности потока в большинстве случаев меньше аналогичных значений для стандартной системы светофорного регулирования.

Проанализируем результаты работы алгоритма обучения с подкреплением в аналогичной ситуации, шаг обучения так же принят равным 10 с. Из графика (рис. 4) видно, что в целом алгоритм обучения с подкреплением справляется хуже алгоритма Кохонена, особенно при малой загруженности дорог (шаги 1-6). С другой стороны, этот алгоритм работает лучше при больших плотностях потока, не позволяя очереди долго расти, в отличие от алгоритма

Кохонена (шаги 10-14). Это может быть исправлено путем добавления к входным параметрам сети времени простоя машин на светофорах. Добавление этого значения позволит сети не допускать блокировки каких-либо направлений на долгий период, что поможет избежать больших очередей на подконтрольных светофору участках.

### Выводы

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что при обучении первой части сети по алгоритму Кохонена и алгоритму "с подкреплением" были получены хорошие результаты. Тем не менее, алгоритм Кохонена хорошо справляется при любых значениях плотности потока, в то время как алгоритм "с подкреплением" показывает худшие результаты при малой загруженности потока.

Вторая часть сети была обучена на выборке, состоящей из 650 примеров, с помощью алгоритма обучения с учителем. Следует отметить, что при обучении второй части сети потребовалось введение дополнительных обучающих примеров, так как ошибка вычислений, имевшая место при меньшем количестве примеров, была слишком велика.

Следующим этапом разработки системы "умных светофоров" является увеличение количества входных данных, подаваемых на вход нейронной сети, а именно параметра, отвечающего за время простоя машин на каждом из направлений движения. Так же планируется построить модель, состоящую из 5 перекрестков, что позволит передавать перекрестку данные с соседних дорог.

### Библиографический список

1. **Тимофеева, О.П.** Проектирование интеллектуальной системы управления светофорами на основе нейронной сети / О.П.Тимофеева, Е.М. Малышева, Ю.В. Соколова // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. URL: [www.science-education.ru/120-16496](http://www.science-education.ru/120-16496).
2. **Васенков, Д.В.** Методы обучения искусственных нейронных сетей // Компьютерные инструменты в образовании. – СПб.: Изд-во ЦПО "Информатизация образования", 2007. № 1. С. 20–29.

*Дата поступления  
в редакцию 08.02.2016*

**O.P. Timofeeva, S.S. Palitsyna**

### TRAINING OF THE NEURAL NETWORK OF THE INTELLECTUAL SYSTEM AIMED TO CONTROL URBAN TRAFFIC LIGHTS

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

**Purpose:** This article deals with the problem of the neural network training. The network underlies the intelligent system that controls traffic lights according to current traffic situation.

**Approach:** This system includes the neural network approach that provides flexibility in choosing an optimal crossroad state. Also, the considered system uses simulation modeling approach to test the training results.

**Findings:** The neural network consists of three layers. First part of the neural network was trained by Hebbian algorithms, Kohonen and reinforcement training methods. The other part uses supervised learning method.

**Value:** After training neural network chooses the most optimal state according to the current traffic flow density. The most suitable training algorithm for the first part of the neural network is Kohonen algorithm.

*Key words:* neural networks, learning algorithms of neural network.

УДК 330.332

Л.Н. Басова<sup>1</sup>, А.В. Миронов<sup>2</sup>

## СИСТЕМА КАЧЕСТВЕННОЙ РАБОТЫ ДЕТСКИХ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УЧРЕЖДЕНИЙ В РАЗВИТИИ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО КАПИТАЛА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
Муниципальное бюджетное образовательное учреждение дополнительного образования  
детей Детский юношеский центр «Ровесник»<sup>2</sup>

Рассмотрена система мониторинга для качественного образовательного процесса в образовательном учреждении дополнительного образования детей по нескольким направлениям: оценке общих количественных характеристик деятельности учреждения, оценке качества осуществления образовательного процесса педагога, оценке методической работы педагога и оценке результативности деятельности обучающихся.

*Ключевые слова:* человеческий капитал, мониторинг, дополнительное образование детей, физическая культура, спорт.

### Введение

В инновационной экономике России, основанной на развитии человеческого капитала, значительная роль отводится образованию [1, 2]. Государственная политика в сфере образования направлена на развитие дополнительного образования детей (ДОД) [3], где ценностным ориентиром является физическая культура и спорт [4]. Примером этого служит реализуемая в России федеральная целевая программа развития физической культуры и спорта на 2006–2015 гг., в которую вложено более 11800 млн руб. бюджетных инвестиций [5].

В Нижегородской области в рамках реализации федеральных и областных целевых программ осуществляется строительство социально-значимых объектов – многофункциональных физкультурно-оздоровительных комплексов (ФОК). На территории области построено 26 ФОК из них: 5 в Нижнем Новгороде и 21 в области. [6]

Современная деятельность по ДОД в сфере физической культуры и спорта определяется:

- Федеральным законом РФ от 23.12.2012 №273-ФЗ «Об образовании РФ»;
- Концепцией развития дополнительного образования детей, утвержденная Приказом Министерства образования и науки РФ от 29.08.2013 г. №1008;
- Федеральной целевой программой «Развитие физической культуры и спорта в Российской Федерации на 2016–2020 гг., утвержденная Постановлением Правительства РФ от 21.02.2015 г. № 30 и другими нормативно-правовыми документами.

Содержание дополнительных общеобразовательных программ в учреждениях по ДОД должно ориентироваться:

- на формирование и развитие творческих способностей учащихся;
- удовлетворение индивидуальных потребностей учащихся в интеллектуальном, художественно-эстетическом, нравственном развитии, а также в занятиях физической культурой и спортом;
- формирование культуры здорового и безопасного образа жизни, укрепление здоровья учащихся;
- обеспечение духовно-нравственного, гражданско-патриотического, трудового воспитания учащихся;
- выявление, развитие и поддержку талантливых учащихся;

- создание и обеспечение необходимых условий для личностного развития, укрепления здоровья;
- социализацию и адаптацию учащихся к жизни в обществе;
- формирование общей культуры учащихся. [7]

В концепции модернизации российского образования на период до 2020 г. и 2030 г. отмечено, что для реализации качественных образовательных программ должна быть сформированная и реализуемая общенациональная система оценки их качества.

Однако единая система оценки качества дополнительного образования в России еще не сформирована. Достаточно часто используется не апробированный и не стандартизированный инструментарий. Отсутствует необходимое научно-методическое обеспечение для объективного и надежного сбора информации. Слабо проработана нормативно-правовая база системы оценки качества образования. В научной базе авторов, работающих над исследованием данной проблемы (В. А. Болотов, Л. Б. Железнова, Б. К. Коломиец, А. И. Суббота, Г. И. Щукина и др.), также отсутствует единая точка зрения по вопросам определения количества «критериев качества» и их качественных показателей.

### **Направления мониторинга деятельности учреждения по ДОД**

Сегодня в данных условия каждый педагогический коллектив дополнительного образовательного учреждения самостоятельно разрабатывает способы отслеживания всех аспектов деятельности учреждения. Например, мониторинг образовательного процесса в Муниципальном бюджетном образовательном учреждении дополнительного образования детей Детском юношеском центре «Ровесник» (МБОУ ДОД ДЮЦ «Ровесник») охватывает несколько направлений работы:

- 1) оценка общих количественных характеристик деятельности учреждения по ДОД;
- 2) оценка качества осуществления образовательного процесса педагога ДОД;
- 3) оценка методической работы педагога ДОД;
- 4) оценка результативности деятельности обучающихся.

### **Оценка общих количественных характеристик деятельности учреждения по ДОД**

Оценка общих количественных характеристик деятельности дополнительного образовательного учреждения осуществляется ежегодно и отображается в отчетных документах разного уровня управления. Основные количественные характеристики – это количество реализуемых направлений подготовки, количество программ по направлениям, общее количество обучающихся и количество обучающихся по программам, количество групп по программам, возраст обучающихся, сохранность контингента (сопоставление нормативных единиц с фактическими) и другие показатели.

### **Оценка качества осуществления образовательного процесса педагога ДОД**

При оценивании качества осуществления образовательного процесса педагога берется во внимание учебно-воспитательная работа, а также профессиональный уровень педагогов – образование, квалификация, прохождение повышения квалификации по образовательным программам и современным требованиям. Оценивается качество планирования учебного занятия и его реализация, владение учебным материалом и умелое проведение занятий с использованием эффективных традиционных и инновационных форм и методов обучения и воспитания, умение заинтересовать детей.

Измерение качества уровня воспитательной работы и профессионального уровня педагогов отмечается соответственно в табл. 1 и табл. 2. По соответствующим показателям.

Контроль образовательной деятельности включает: подготовку кабинета, ведение

учебных занятий, контроль охраны труда, ведение нормативной документации, анкетирование детей и их родителей.

Таблица 1

## Измерение качества уровня воспитательной работы

№ п/п	Дата	Название мероприятия	Место проведения	Ф.И.О. педагога	Результат
<i>Участие в воспитательных мероприятиях</i>					
<i>Работа с родителями</i>					

Таблица 2

## Измерение профессионального уровня педагогов

<i>Общие сведения о педагогических работниках</i>		
	Основные педагоги	Совместители
Всего педагогических работников:		
по образованию		
высшее		
среднее профессиональное		
по итогам аттестации		
высшая категория		
первая категория		
вторая категория		
по педагогическому стажу		
от 0 до 5 лет		
от 5 до 10 лет		
от 15 лет до 20 лет		
свыше 20 лет		
по возрасту		
от 20 лет до 25 лет		
от 25 лет до 35 лет		
от 35 лет до 45 лет		
от 45 лет до 55 лет		
от 55 лет и старше		
<i>Сведения о повышении квалификации педагогических работников</i>		
Ф.И.О. педагога	Программа	Форма и сроки

## Оценка методической работы педагога ДОД

При оценивании методической работы педагога выявляется качественный уровень личностно-профессионального развития и обучающей деятельности педагогов. Измерение качественного уровня личностно-профессионального развития осуществляется по уровню профессиональных знаний педагогического работника, публикационной активности, участие педагогов в различных конкурсах разного уровня, награждение педагогов (табл. 3).

Таблица 3

## Оценка методической работы педагога дополнительного образования детей

<i>Публикации педагогов</i>				
№ п/п	Ф.И.О. педагога	Название статьи (работы)	Выходные данные	Соавторы
<i>Участие педагогов в конкурсах профессионального мастерства</i>				
№ п/п	Ф.И.О. педагога	Название конкурса	Уровень конкурса	Результат
<i>Награждение педагогов</i>				
№ п/п	Ф.И.О. педагога	Год награждения	Место награждения	Вид награждения

Практика работы МБОУ ДОД ДЮЦ «Ровесник» показывает, что педагоги дополнительного образования должны постоянно участвовать в семинарах, конкурсах, научных конференциях, проводимых на уровнях учреждения, района, области и России, вести работу в педагогических советах, а также активно сотрудничать с коллективами телевидения и печатных изданий, отражая новости спортивной жизни.

Педагоги ДОД совместно с спорткомитетом администрации города/района/ области/региона должны принимать ежегодное участие как организаторы, так и члены жюри в проведении праздников, посвящённых, например, Дню посёлка/города/района и т.д., Дню молодёжи, Дню физкультурника, юбилейным датам.

## Оценка результативности деятельности обучающихся

*Оценка результативности деятельности* ведётся по следующим показателям:

- по уровню усвоения теоретических знаний и практических навыков обучающихся. Для определения данного показателя на каждого обучающегося учреждения составляется индивидуальная карта освоения образовательной программы, где отражаются в баллах теоретическая и практическая компетентность, личностное развитие, личностные достижения обучающегося согласно возрастным особенностям детей и образовательной программы.

Мониторинг уровня усвоения знаний и навыков обучающихся осуществляется ежегодно в течение учебного года и разделяется на несколько этапов:

1) начальный – проводится в начале учебного года в виде тестовых заданий, собеседований, просмотров, фиксируя исходный уровень обучающегося;

2) текущий – проводится в течение учебного года для выявления уровня овладения обучающимися знаниями, умениями и навыками;

3) промежуточный – как правило, совпадает с этапами педагогического контроля, обозначенными в образовательной программе, результаты выполнения данных контрольных заданий, упражнений, нормативов и фиксируются в журнале учета работы группы;

4) итоговый – проводится в конце учебного года с целью определения уровня освоения образовательной программы, реализации поставленных задач в обучении, воспитании и развитии и соотнесения полученного результата с целью образовательной программы.

Результаты диагностического мониторинга заносятся в таблицу;

- по итогам участия в выставках, конкурсах, соревнованиях (табл. 4).

Одним из показателей оценки результативности деятельности – это результаты участия в мероприятиях центра (клуба, секции), районных, областных и всероссийских конкурсах, выставках, соревнованиях.



Таблица 4

## Учет участия обучающихся в конкурсах, выставках, соревнованиях

п/п	Название конкурса	Сроки	Уровень конкурса	Творческое объединение, принявшее участие	Участники конкурса	Итог конкурса

## Вывод

При отсутствии федеральных нормативно-правовых документов, регламентирующих систему оценивания результативности деятельности в учреждениях ДОО, каждое образовательное учреждение обязано выстраивать свою модель оценивания. В словосочетании «Дополнительное образование» главным является слово «образование», т.е. те образовательные услуги, которые должны быть высокого качества, а создание системы оценки достижения результатов и является гарантом качества работы образования.

## Библиографический список

1. Дубик, Е.А. Инновационная образовательная система – основа инновационного развития экономики // Экономика в промышленности. 2014. №2(22). С. 32–36.
2. Дубик, Е.А. Развитие человеческого капитала в промышленно-экономических системах // Экономика, статистика и информатика. Вестник УМО. 2014. №2. С. 68–72.
3. Дубик, Е.А. Непрерывное и интегрированное профессиональное образование в развитии человеческого капитала // Экономика, статистика и информатика. Вестник УМО. 2013. №6. С. 34–36.
4. Концепция долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 г. – М., 2010.
5. Дубик, Е.А. Инвестиции в человеческий капитал на разных стадиях жизненного цикла / Е.А. Дубик, С.Н. Митяков // Креативная экономика. 2013. № 9. С. 3–13.
6. Недвижимость. Полезная площадь. [Электронный ресурс]. – URL: <http://ppl.nnov.ru/category/716> (дата обращения: 10.10.2015).
7. Дубик, Е.А. Формирование человеческого капитала: здоровый образ жизни как составляющий фактор // Креативная экономика. 2014. № 2. С. 53–63.

Дата поступления  
в редакцию 25.01.2016

L.N. Basova<sup>1</sup>, A.V. Mironov<sup>2</sup>

**QUALITY WORK SYSTEM OF ADDITIONAL EDUCATIONAL INSTITUTIONS  
FOR CHILDREN IN THE DEVELOPMENT OF HUMAN CAPITAL**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev<sup>1</sup>,  
Municipal budgetary educational institution of additional education for children  
«Children and Youth centre «Rovesnik»<sup>2</sup>

The article is devoted to the monitoring system in educational institution of additional education for children for quality educational process in several directions: the general quantitative characteristics value of the institution, the value of the teacher's educational process quality, the teacher's methodical work value and the performance evaluation of the students.

*Key words:* human capital, monitoring, additional education for children, physical culture, sports.

УДК 316

И.Н. Терентьева

**КОММУНИКАТИВНОЕ ПРОЧТЕНИЕ ОРГАНИЗАЦИОННО-УПРАВЛЕНЧЕСКОЙ  
КОНЦЕПЦИИ Г.П. ЩЕДРОВИЦКОГО  
(КОНСТРУКТИВИСТСКАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ МЕТОДОЛОГИИ)**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева

Предметом статьи является коммуникативная составляющая организационно-управленческой концепции и практики самого Г.П.Щедровицкого. В теме работы отражены ее задачи: выявить управленческий потенциал коммуникативной компоненты схемы мыследеятельности и тем самым выяснить, раскрывает ли коммуникативное содержание схемы ее конструктивистский характер. Целью работы является теоретическая реконструкция коммуникативной компоненты «схемы мыследеятельности», как рассмотрение взаимосвязи ее элементов и как применение принципов этой схемы к определенным проблемным ситуациям.

На материале текстов Г.П.Щедровицкого, исследований его современников и последователей, с использованием биографического метода, системного описания и теоретической реконструкции сделан вывод о конструктивистском содержании организационно-управленческой концепции Г.П. Щедровицкого. Результаты работы рассматриваются, во-первых, как методические основы для разработок в области управленческих коммуникаций, их организации и использования; во-вторых, как составная часть разработок в области теории и технологий коммуникации, т.е. коммуникативистики.

*Ключевые слова:* акт коммуникации, схема мыследеятельности, организационно-управленческая практика, система, системный подход, управление, социальное конструирование.

Наследие Г.П. Щедровицкого прочно заняло место в отечественной теории и практике управления как его методологический дискурс. Об этом свидетельствует популяризация его наследия [1], описание и анализ консультационной и экспертной работы его учеников и последователей [2], [3], [4]. Но прежде всего об этом свидетельствует содержание опубликованного корпуса текстов самого Г.П.Щедровицкого, представленных как в электронной библиотеке Некоммерческого научного фонда «Институт развития имени Г.П. Щедровицкого», так и в специализированных сериях книг [5], и материалов его творческой биографии [6]. Разработка схемы «акта коммуникации» предшествовала появлению базовой для методологии схемы мыследеятельности [7], и затем оставалась необходимой частью ее рефлексии [8], [9]. Коммуникация, как самостоятельная тема в методологическом наследии Г.П. Щедровицкого, относительно недавно привлекла внимание исследователей [10]. Однако проблемы коммуникации ранее рассматривались в связи с исследованиями знания [11], языка [12], онтологии деятельности [13].

Почему же рассмотрение коммуникативной компоненты наследия Г.П.Щедровицкого стало актуальным? Коммуникация, как необходимый элемент управленческой практики, рассматривается сейчас даже в учебной литературе по менеджменту [см., напр. 14, с. 530–558]. Базовой для рассмотрения управленческой коммуникации остается модель К.Шеннона и У.Уивера, восходящая к кибернетическим идеям Н.Винера [14, с. 534]. Однако оказалось, что это отнюдь не всеобщая модель, она описывает технические и биологические, а не деятельностные системы, т.е. фактически игнорирует «искусственность» организации как базовое качество этой системы. На это указывал и сам Г.П.Щедровицкий [5, с. 90–91], и его последователи [15, с. 320–321].

Таким образом, коммуникация, важнейший для управленческой деятельности процесс, который в ряде сфер превратился в особый объект управления, до сих пор не имеет адекватного теоретического представления для практики управления. Сам Г.П. Щедровицкий отмечал, что даже такие узкие специалисты по организационным коммуникациям, как Роджерс и Агарвала, не выясняют специфики этого явления. Действительно, если мы обра-

тимся к тексту их чрезвычайно информативной в плане организационных коммуникаций книги, то перед нами вновь схема регулирования с обратной связью, относительно которой указание на общение между людьми и формирование значений не выглядят убедительными [16, с. 24–27].

Определение специфического предмета управленческой деятельности (деятельности над деятельностью других людей) в концепции Г.П.Щедровицкого опиралось, в том числе, и на разработку коммуникативных и мыслительных основ такой деятельности. Схема акта коммуникации в работе «Смысл и значение» оказалась в центре его будущей схемы мыследеятельности [17, с. 104].

### **Акт коммуникации и мыследеятельность**

Акт коммуникации, как идеальный объект, т.е. результат исследовательских интеллектуальных операций, соединяет действующих в практической ситуации индивидов, их целевые установки, осмысление ситуации (относительно целей в данной практической деятельности и построение текстов), понимание текстов-сообщений и действия в «воссозданной ситуации» в соответствии с целевыми установками и содержанием сообщения [7], [11, с.307].

Важно, что создание сообщений как создание знаковой формы, «замещающей» объекты, происходит в результате соотнесения и связности элементов ситуации. Воссоздание этих связей входит в задачу «исследователя», занимающего внешнюю по отношению к самому акту коммуникации позицию и принимающего во внимание и содержание сознания участников коммуникации, и свою собственную позицию.

Не менее важно наличие «двойного процесса»: осмысление ситуации и принадлежащих ей текстов извне приспособляется к действиям в ситуации; деятельность «внутри» ситуации изменяется под влиянием «внешних» представлений, «задающих новое содержание и новую действительность» [7], [11, с. 311]. Теперь это учитывает, например, концепция пост-неклассической рациональности, принимающая во внимание взаимодействие исследователя и его объекта. Смысл как «общая соотнесенность и связь всех относящихся к ситуации явлений» становится доступным для участников акта коммуникации. Структуры смысла проецируются на элементы ситуации, выполняя организующие функции.

Для коммуникативной концепции Г.П.Щедровицкого важно различение процессов коммуникации и трансляции. Появление участников деятельности, которым необходимо получить, понять и использовать сообщения, помимо взаимосвязи основных коммуникантов, объясняет появление «конструкции значений» и лиц, создающих эти «конструкции» как дополнительные средства, обеспечивающие понимание текста. Так добавляется еще один важный для деятельности момент: «значение», что в терминологии Г.П.Щедровицкого подразумевает связь между словами и «объектами», выраженными в других словах. Эти связи и образуют реальность человеческой деятельности, определяя все остальные ее моменты. Значения и смыслы связаны деятельностью понимающего человека.

В дальнейшем, в связи с исследованием деятельности, схема акта коммуникации дополняется новыми элементами. Схему дополняют логические законы, которым подчинено мышление. Она включает идеальные объекты, которыми оперируют участники ситуации. Также схему дополняет культура, задающая целевые установки. Наконец, сама «мыследеятельность», т.е. деятельность, включающая моменты познания, целеполагания и рефлексии. Она и занимает место пространства формирования смысла [8].

В схеме мыследеятельности, разработанной уже непосредственно для ситуаций управления, акт коммуникации (полифонической и полипарадигматической мысли-коммуникации, М-К), выступает связующим звеном процессов мышления в невербальных формах (М) и процессов социально-организованной и культурно закрепленной деятельности (мД) [9], [13]. Создание текстов и их понимание осуществляется «коммуницирующими позиционерными», т.е. носителями различных целевых установок. Поэтому перед нами поле борьбы и взаимоотрицаний, полилог, не подчиненный различению правильного и неправильного. Центральное место мысли-коммуникации определяет необходимость создания

единого целого, соединения мышления и деятельности, и, видимо, преодоления конфликтов и противоречий «позиционером».

Использование этой схемы предполагает, что, во-первых, сама мыследеятельность – часть специального языка для условий организационно-деятельностной игры; во-вторых, схема «ничего не изображает, – она лишь фиксирует принцип множественности существования рассматриваемого объекта»; в-третьих, «перед нами схема-принцип, а не изображение и не проект некой конкретной мыследеятельности» [17, с. 105, 115].

### **Рефлексия управленческой практики как объект коммуникативного исследования**

Системомыследеятельностный подход как особый подход к представлению, трактовке и анализу человеческой деятельности, а также опыт организационно-деятельностных игр стали источником и основанием разработки концепции управленческой деятельности, специфику которой в совокупности определяют такие черты как организация, руководство, управление (ОРУ). Как педагог и практикующий методолог Г.П.Щедровицкий выступил с лекциями на курсах повышения квалификации руководящих работников и специалистов Минэнерго в 1981 году. Работа с аудиторией предполагала проекции методологических принципов на конкретные ситуации, в которых «работала» вся концепция.

Одна из таких проекций входит в тему «Вступление в должность: средства организации представлений». Автор предполагал дать средства самоорганизации в этом процессе, ориентировал на его технологизацию и задал координаты такой самоорганизации: индивидуальность, социальное происхождение, социальное окружение, мыследеятельность, коммуникация и самосознание [5, с. 48–49].

Ситуация определяет круг «коммуницирующих позиционером»<sup>1</sup>. На наш взгляд, управленческие выводы из этой ситуации имеют принципиальный характер и должны быть сделаны на основе системного и деятельностного подходов, а также акта коммуникации в схеме мыследеятельности. Во-первых, определение организации и должности не может быть ограничено набором функциональных обязанностей ее членов, каждая организация – часть более широкой социальной системы, как и каждая должность, предполагает не только служебные, но и социальные отношения. Во-вторых, реальность социальных слоев, групп, отношений может быть выражена как в адекватной, так и неадекватной знаковой форме. В-третьих, самоопределение человека в должности предполагает соотнесение своей позиции с другими факторами ситуации. В-четвертых, ситуация не определяется единством пространства и времени, она определяется единством реального и идеального. В-пятых, процесс деятельности и мышления неразрывен с коммуникацией и возможностью действий, в конечном счете, определяется умением соотнести реальное и идеальное, т.е. умением установить

<sup>1</sup> Сюжет ситуации, относящейся к 1980-м гг., определялся особенностями административного деления Подмосковья и ведомственного управления, когда в небольшом поселке могли находиться несколько крупных военных заводов и вузов, руководители которых, естественно, составляли сельский совет. Герой сюжета, известный и заслуженный человек, назначен ректором института. Ориентированный исключительно на «работу», т.е. служебные функции, он не придает значения социальному окружению и социальным связям, которые на самом деле и «создают» его должность и возможность работы в ней. Руководители заводов и прочих учреждений в поселке, напротив, придают значение включению нового человека в свой круг. Их статус маркируют служебные «Чайки» и черные «Волги», мебель служебных и общественных помещений, связи с партийным руководством и рычаги непрямого властного воздействия. С другой стороны, их статус маркирован вхождением в сельский совет, заседание которого они решают использовать для знакомства с новым ректором. Статус сельского совета маркирован тематикой заседания: «Природосбережение», плохой пишущей машинкой и, видимо, не слишком ответственной секретаршей: приглашение на заседание было едва пропечатано на некачественной бумаге. «Распознавание» ситуации в институте, где новым было все руководство, произошло как раз по этой бумаге, которая была понята как знак неважности, незначительности мероприятия. На заседание сельсовета был отправлен «истопник дядя Вася». Собравшиеся руководители расценили такого делегата как знак неуважения. Реакция собрания была выражена не напрямую, а, согласно статусу участников, через серию публикаций в центральной печати о недостатках воспитательной работы в вузе и последовавших партийных взысканий. В конце концов, ректору объяснили, что стало поводом его несчастий, и он занялся восстановлением социальных связей [5, с. 55–57].

смысл знаков, выражающих ситуацию. Наконец, системообразующее значение коммуникации выражается в том, что основу сюжета создает неправильно понятое сообщение (приглашение на заседание сельского совета). А ведь смысл его определялся как раз соотношением всех элементов ситуации. Ошибка героя-коммуникатора была связана не только с расхождением содержания и знаковой формы, но и с неспособностью определить свою ситуацию в системе социальных координат.

### **Факты творческой биографии как объект коммуникативного исследования**

Интересные примеры практики принципиальных схем коммуникации дает нам творческая биография Г.П.Щедровицкого. К документам такой биографии, на наш взгляд, в полной мере относятся публичные лекции по философии, прочитанные им в 1989 году [18]. Изданные на основе расшифровки магнитофонных записей тексты лекций передают, во-первых, особенности авторского стиля публичной коммуникации и, во-вторых, демонстрируют, как разворачивается мыследеятельность в конкретной ситуации и каким образом осуществляется управление, в данном случае управление аудиторией.

Для понимания лекций и для оценки их значения важен социально-культурный и социально-политический «фон» конца восьмидесятых годов, который сегодня можно было бы назвать «позднеперестроечным». Частью этого фона была инспирированная интеллектуалами практически массовая рефлексия по поводу исторического прошлого СССР. Характерен также интерес к философии, яркое проявление идеоцентрического (по П.А. Сорокину) характера не только советской системы, но и, пожалуй, всей российской ментальности. Этот «фон» постоянно представлен на лекциях, как в вопросах аудитории, так и в ответах лектора, их взаимной напряженности, практически личностном характере возникающих диалогов.

Диалог в ситуации этих лекций постоянно выходит за рамки формальных «вопросов и ответов». Он превращается в «сократический диалог», предполагающий не просто изложение содержания и не только приращение сведений, а рождения нового знания. Такой диалог предполагает выводы, которые должен сделать каждый участник, включенный в процесс мышления. Сократический характер всего творчества Г.П. Щедровицкого особо отмечен одним из его соратников-оппонентов [19]. Отстаивая необходимость собственных работ в противовес заимствованию, цитатам и пересказам англоязычных авторов, М.А.Розов подчеркивает, что задачей Г.П.Щедровицкого всегда была организация коллективного творческого поиска, в котором выдвинутые идеи перерабатываются, дополняются и подвергаются критическому осознанию [19, с. 145]. Публичное поведение, ярким примером которого стали эти лекции, подобно Сократу, становилось «возмутительно» свободной интеллектуальной работой, участником которой должен был стать каждый, кто задавал вопросы, пытался мыслить и тем самым заявлял себя на подлинную роль человека, обреченного на самоопределение.

Редактор и комментатор текста лекций отмечает, что фактически они превращаются в организационно-деятельную игру, поскольку автор «не только рассказывает о философских проблемах, но и организует дискуссию таким образом, чтобы создать столкновение позиций и рефлексию проблем» [18, с. 22]. Если М.А.Розов отмечает в качестве одной из неоспоримых заслуг методологического движения анализ систем с рефлексией, то анализ текста и ситуации лекций демонстрирует нам «запуск» рефлексии в системе мыследеятельности (или, по крайней мере, попытку этого).

Сознательное столкновение или необходимое совмещение позиций – еще одна особенность «организованной коммуникации», предполагающей и мыслительные результаты, и последующие действия. В данном случае в столкновение приходят позиции аудитории и лектора, соответственно идентифицированные как «абеляровско-кантовская» и «гегелевская», а сам лектор сознательно совмещает позиции «гегельянца», «игротехника» и «философа» [18, с. 26]. Важен для процесса коммуникации и уровень его осуществления, в связи с чем, например, и осуществляется переход от «коммунального конфликта» к конфликту содержательному, задаются философские рамки обсуждения тем.

Важной особенностью личной коммуникативной практики Г.П.Щедровицкого было его постоянное самоопределение в пространстве философских направлений и практических подходов. Отметим, что иногда чрезвычайно резко: «Наука умерла», «Я не философ, а методолог». В рассматриваемом тексте важно самоотнесение автора к марксизму, апелляция к «деятельностно» прочитанному Марксу, предписавшему философии и человеку одну задачу: изменять мир [18, с. 65]. Отметим, что это именно авторское прочтение Маркса, которого, например, К.Поппер критиковал за «историцизм», лишаящий человека всяческой свободы и активности.

Какую же задачу решал Щедровицкий-лектор, организуя столь многоплановую и напряженную коммуникацию со своей аудиторией? Скорее всего, как и следует из примечаний и комментариев к книге, это его всегдашняя задача: «выращивание» форм коллективной мыследеятельности.

### Выводы

Кибернетическая модель не соответствует базовым характеристикам организации, как системы деятельности, не раскрывает специфического содержания этой системы, следовательно, задача формирования теории коммуникации и разработка ее «приложений» для сферы управления остается актуальной; интеллектуальный и практический («мыследеятельный») опыт Г.П.Щедровицкого сохраняет потенциал развития.

«Принципиальный» характер схемы акта коммуникации в составе схемы мыследеятельности предполагает, что она не только используется для анализа, но и должна развиваться применительно к каждой проблемной ситуации. Это, на наш взгляд, вполне отражено в работах его учеников [20]. Программа развития коммуникативных элементов наследия Г.П.Щедровицкого также актуальна с учетом уникальной принадлежности этого наследия и к философскому, и к практическому уровню разработок, т.е. имеет гуманитарно-технологический характер [21].

Области применения существующей модели просматриваются на личностном, организационном и социетальном уровнях в ситуациях управления и самоуправления (самоопределения). На личностном уровне это необходимый для самоопределения постоянный процесс коммуникации как соотнесения своей позиции с существующим культурным фоном и позициями референтных групп. Личная история Г.П.Щедровицкого в этом смысле предстает как напряженная коммуникация, соединяющая «разрывы» между действительностью мышления и реальностью жизнедеятельности [6, с. 142]. Это воспроизведение непрерывных актов коммуникации в деятельности человека, самоопределившегося для того, чтобы «делать историю» [6, с. 149]. На организационном и социетальном уровне это процессы осмысления и понимания, определенные ситуацией, а не только содержанием сообщений. Можно сказать, что «смысл» принадлежит ситуации, с элементами которой и соотносится содержание сообщения. Организации ситуаций понимания становится, таким образом, специальной управленческой задачей.

Становление и практика организационно-управленческой деятельности Г.П. Щедровицкого это опыт коммуникации в социальной проектной деятельности, когда коммуникация становится процессом конституирующим реальность, в которой осуществляются действия. Иными словами, люди принимают решения и действуют в той ситуации, которую сами определяют, они действуют в соответствии со своим самоопределением в этой ситуации.

Рассмотрение схемы акта коммуникации и проведенный анализ практики коммуникации подтверждают, что проектная деятельность методологического движения носила отчетливо конструктивистский характер. Сам этот характер уже был отмечен [22, с. 321–323]. Нами же выявлена конструктивистская, в терминах социологии знания, роль коммуникации. Именно в этом процессе происходит отбор аспектов рассмотрения ситуации и системы; сформированный в ситуации смысл «возвращается» в деятельность, вновь определяя ее направление и вновь предполагая выход в рефлексивную позицию. Можно заметить также, что коммуникативная задача методологического движения была направлена на сформирова-

ние «коллективного субъекта», который не нуждается во внешнем «конструировании значений», а создает их сам.

Разработку проблем коммуникации в работах Г.П.Щедровицкого соотносят с теорией «коммуникативного действия» Ю. Хабермаса [23], а в традиции языкознания – с разработками М.Мерло-Понти [12, с. 295–298]. Однако, на наш взгляд, мы имеем здесь опыт постоянной, практически и теоретически важной, критической рефлексии. Но это рефлексия не над результатами социальной инженерии (К.Поппер), а над проектной деятельностью, причем охватывающей и самого человека.

#### Библиографический список

1. **Путеводитель по методологии Организации, Руководства и Управления:** Хрестоматия по работам Г. П. Щедровицкого / сост. В.В. Христенко. – М., 2003. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.pvl-rco.kz/files/putevoditel%20po%20metodologii.pdf>
2. **Марача, В.Г.** От социального проектирования к консалтингу и снова к социальным проектам? / В.Г. Марача, В.М. Розин // Социальное проектирование в эпоху культурных трансформаций. – М., 2008. С. 6–50.
3. **Тихонов, А.В.** Социология управления: стратегии, процедуры и результаты исследования / А.В.Тихонов. – М., 2010. – С. 473–474, 548–549.
4. **Розин, В.М.** Философия управления: основные направления, предмет, сущность управления // Философия управления: проблемы и стратегии. – М., 2010. С. 37–39.
5. **Щедровицкий, Г.П.** Оргуправленческое мышление: идеология, методология, технология: курс лекций / Из архива Г.П. Щедровицкого. Т. 4. М.: 2000. – 384 с.
6. **Щедровицкий, Г.П.** Я всегда был идеалистом... / Г.П. Щедровицкий. – М., 2001. – 368 с.
7. **Щедровицкий, Г.П.** Смысл и значение [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.fondgp.ru/gp/biblio/rus/68> Дата обращения 19.02.2016.
8. **Щедровицкий, Г.П.** О значении исследования коммуникации для развития представлений о мыследеятельности [Электронный ресурс.] Режим доступа: [http://russcomm.ru/rca\\_biblio/sch/Schedrovitsky\\_O\\_znachenii.doc](http://russcomm.ru/rca_biblio/sch/Schedrovitsky_O_znachenii.doc) Дата обращения 19.02.2016.
9. **Щедровицкий, Г.П.** Схема мыследеятельности – системно-структурное строение, смысл и содержание [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.fondgp.ru/gp/biblio/rus/57> Дата обращения 19.02.2016.
10. **Рац, М.В., Розина, И.Н.,** Коммуникативистика: проблемы и пути развития [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://mic.org.ru/3-nomer-2012/135-kommunikativistika-problemy-i-puti-razvitiya> Дата обращения 22.02.2016.
11. **Данилова, В.Л.** Концепция знания в работах Г.П. Щедровицкого: на пути к новому синтезу// Георгий Петрович Щедровицкий / под ред. П.Г.Щедровицкого, В.Л.Даниловой. – М., 2010. С. 261–318.
12. **Литвинов, В.П.** Мышление по поводу языка в традиции Г.П.Щедровицкого// Познающее мышление и социальное действие (наследие Г.П.Щедровицкого в контексте отечественной и мировой философской мысли). – М., 2004. С. 249–305.
13. **Дубровский, В.В.** Онтология деятельности Г.П.Щедровицкого. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://gtmarket.ru/laboratory/expertize/6553>. Дата обращения 22.02.2016.
14. **Дафт, Р.Л.** Менеджмент/ Р.Л. Дафт. – СПб., 2000. С. 530–558.
15. **Рац, М.В.** «Искусственное» и «естественное» // Георгий Петрович Щедровицкий / под ред. П.Г.Щедровицкого, В.Л.Даниловой. – М., 2010. С. 319–358.
16. **Роджерс, Э., Агарвала-Роджерс, Р.** Коммуникации в организациях. – М., 1980. – 176 с.
17. **Щедровицкий, П.Г.** Я вырос в архиве ММК/ П.Г.Щедровицкий; Сост. М.С.Хромченко. – М., 2006. – 174 с.
18. **На досках. Публичные лекции по философии Г.П.Щедровицкого.** – М., 2004. – 196 с.
19. **Розов, М.А.** Введение к книге «Сократ XX века Г.П. Щедровицкий. (Проблемы и идеи)»// Идеи и идеалы. 2011. № 1(7). Т. 1. С. 143–152.
20. **Презентация книги С.Семина «Время коммуникации»** [Электронный ресурс] Режим доступа: [http://www.fondgp.ru/lib/chteniya/27/46/prezentatsiya\\_Semin\\_itogovaya.pdf](http://www.fondgp.ru/lib/chteniya/27/46/prezentatsiya_Semin_itogovaya.pdf) Дата обращения 19.02.2016.

21. Данилова, В.Л., Матьяш, О.А. Идея коммуникации у Г.П. Щедровицкого и communication studies: презентация [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.fondgp.ru/lib/chteniya/27/46> Дата обращения 19.02.2016.
22. Юдин, Б.Г. Точка зрения искусственного// Познающее мышление и социальное действие (наследие Г.П.Щедровицкого в контексте отечественной и мировой философской мысли). – М., 2004. С. 307–334.
23. Громыко, Ю.В., Системно-мыследеятельностный подход и теория коммуникативного действия Юргена Хабермаса. Точки соотнесения и несопоставимости [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.fondgp.ru/lib/chteniya/viii/materials/6> Дата обращения 21.02.2016.

*Дата поступления  
в редакцию 02.03.2016*

**I.N. Terentyeva**

**COMMUNICATIVE READING OF ORGANIZATIONAL MANAGEMENT  
THE CONCEPT OF G. P. SHCHEDROVITSKY  
(CONSTRUCTIVIST COMPONENT IN THE METHODOLOGY)**

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

The subject of the article is the communicative component of organizational management concept and practices of the G. P. Shchedrovitsky. In the theme of the work reflects its objectives: to identify managerial potential communicative components of the scheme of thinking activity and thereby find out whether the communication reveals the contents of its constructivist nature.

The aim of this work is a theoretical reconstruction of the communicative component of the "scheme of thinking activity", as the consideration of interrelations of its elements and how the application of the principles of this scheme to certain problematic situations.

On the material of texts by G. P. Shchedrovitsky, studies of his contemporaries and followers, using the biographical method, system descriptions and theoretical reconstruction concluded the constructivist content of organizational management the concept of G. P. Shchedrovitsky.

The results of the work are considered, first, as a methodical basis for working out in the field of management communications, to their organize and use; secondly, as an integral part of developments in the field of theory and technology of communication, i.e. communication studies.

*Key words:* the act of communication, the scheme of thinking activity, organizational management practice, system, system approach, management, social construction.



УДК 517.587

В.М. Галкин, Е.К. Китаева, Л.Н. Ерофеева, С.В. Лещева

ЗАМЕЧАНИЕ ОБ  $L$  – ФУНКЦИЯХ И ОРТОГОНАЛЬНЫХ МНОГОЧЛЕНАХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Дается построение систем ортогональных многочленов, связанных с  $L$  – функциями Дирихле. При этом коэффициенты многочленов оказываются рациональными числами.

*Ключевые слова:* вес, ортогональность, непрерывная дробь, характер Дирихле.

Идущий от петербургской математической школы XIX в подход к изучению ортогональных многочленов основывается на разложении [2, 3]

$$\int_a^b \frac{f(t)dt}{x-t} = \frac{a_0}{x-b_1 - \frac{a_1}{x-b_2 - \frac{a_2}{x-\dots}}} \quad (1)$$

Подходящие дроби непрерывной дроби в правой части  $\frac{Q_1(x)}{P_1(x)}, \frac{Q_2(x)}{P_2(x)}, \frac{Q_3(x)}{P_3(x)}, \dots, \frac{Q_n(x)}{P_n(x)}, \dots$  дают нужную систему ортогональных многочленов  $P_0(x)=1, P_1(x), P_2(x), \dots, P_n(x), \dots$  на интервале  $[a, b]$  с весом  $f(x)$ . В частности, три последовательных многочлена связаны рекуррентным соотношением

$$P_{n+1} = (x-b_n)P_n - a_n P_{n-1}, n \geq 1. \quad (2)$$

Классические ортогональные системы (Лежандра, Эрмита, Чебышева и др.) обладают следующими свойствами:

1. Коэффициенты многочленов есть рациональные числа.
2. Коэффициенты  $a_n, b_n$  в (2) также рациональны.
3. Вес  $f(x)$  достаточно просто устроен.

Свойства пунктов 1 и 2 обеспечены, если в формальном разложении

$$\int_a^b \frac{f(t)dt}{x-t} = \frac{1}{x} M_0 + \frac{1}{x^2} M_1 + \frac{1}{x^3} M_2 + \dots \quad (3)$$

моменты  $M_k = \int_a^b t^k f(t)dt$  являются рациональными числами, разложение правой части (3) в непрерывную дробь из (1) производится с помощью простых алгебраических операций. Далее мы показываем, что легко обозримые весовые функции могут быть получены из рассмотрения так называемых  $L$  – функций Дирихле.

Приведем основные сведения о  $L$  – функциях [1]. При  $\operatorname{Re} s > 1$   $L$  – функция определяется сходящимся рядом  $L(s, \chi) = \sum_{n=1}^{\infty} \chi(n)n^{-s}$ , в котором функция целочисленного аргумента  $\chi(n)$ , называемая характером Дирихле, обладает следующими свойствами:

- 1) функция  $\chi(n)$  периодическая с периодом  $k$ ;
- 2)  $\chi(nm) = \chi(m)\chi(n)$ ;
- 3)  $\chi(n) = 0$ , если  $n$  не взаимно просто с  $k$ . В частности,  $\chi(1) = 1$ .

Функция  $L(s, \chi)$  аналитически продолжается на всю плоскость комплексного перемен-

ного  $s$ , за исключением, быть может, точки  $s = 1$  и для действительно значных характеров удовлетворяет функциональному уравнению

$$L(1-s, \chi) = \begin{cases} 2(2\pi)^{-s} k^{s-\frac{1}{2}} \Gamma(s) \cos \frac{\pi s}{2} L(s, \chi), & \text{если } \chi(-1) = 1, \\ 2(2\pi)^{-s} k^{s-\frac{1}{2}} \Gamma(s) \sin \frac{\pi s}{2} L(s, \chi), & \text{если } \chi(-1) = -1. \end{cases} \quad (4)$$

Правда, характер  $\chi(n)$  надо подчинить дополнительному условию – условию первообразности. Последнее технически громоздко определяется, но для стандартных теоретико-числовых функций оно выполняется. Под стандартными характерами мы далее понимаем функции  $\chi_{-1}(n) = (-1)^{\frac{n-1}{2}}$  с  $k = 4$ ,  $\chi_2(n) = (-1)^{\frac{n^2-1}{8}}$  с  $k = 8$ ,  $\chi_p(n) = \left(\frac{n}{p}\right)$  с  $k = p$ , где  $\left(\frac{n}{p}\right)$  – символ Лежандра [4], а также произведения предыдущих.

Напомним, что при  $n$  не взаимно простом с  $k$  правые части надо положить равными нулю.  $L(s, \chi)$  при  $\operatorname{Re} s > 1$  допускает интегральное представление

$$L(s, \chi) = \frac{1}{\Gamma(s)} \int_0^{\infty} t^{s-1} \varphi(t, \chi) dt, \quad \text{где } \varphi(t, \chi) = \sum_{n=1}^{\infty} \chi(n) e^{-nt}. \quad (5)$$

Функция  $\varphi(t, \chi)$  будет в дальнейшем служить «прототипом» весовой функции системы ортогональных многочленов.

Периодичность  $\chi(n)$  позволяет просуммировать ряд для  $\varphi(t, \chi)$ :

$$\varphi(t, \chi) = \sum_{n=1}^{k-1} \frac{\chi(n) e^{-nt}}{(1 - e^{-kt})}.$$

**Лемма.** Функция  $\varphi(t, \chi)$  четна при  $\chi(-1) = -1$  и нечетна при  $\chi(-1) = 1$ .

Доказательство мы опускаем, поскольку в конкретных примерах это свойство функции  $\varphi(t, \chi)$  легко проверяется.

Если характер  $\chi(n)$  первообразный, то  $\sum_{n=1}^{k-1} \chi(n) = 0$  и  $\varphi(t, \chi)$  регулярна в точке  $t = 0$ , т.е.

может быть разложена в степенной ряд. Более того, значения  $\chi(n)$  есть  $0, \pm 1$ , а потому степенной ряд имеет рациональные коэффициенты.

Эти коэффициенты выражаются через значения  $L$ -функций в силу следующего утверждения.

**Предложение**

$$\varphi(t, \chi) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m}{m!} L(-m, \chi) t^m. \quad (6)$$

**Доказательство.** Наиболее короткий путь состоит в использовании расходящихся рядов и суммирования их по Абелю [6], надо просто разложить экспоненту в  $\varphi(t, \chi)$  в степенной ряд и после этого подсчитать коэффициент при  $t^m$  в  $\varphi(t, \chi)$ .

Перейдем теперь к построению ортогональных систем многочленов. Интервал, на котором определяется весовая функция, возьмем равным  $(-\infty, +\infty)$ . Весовую функцию  $\theta(x, \chi)$  определяем равенствами

$$\theta(x, \chi) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{k}} \varphi\left(\frac{2\pi}{k} x, \chi\right), & \text{для } \chi(-1) = -1, \\ \frac{x}{\sqrt{k}} \varphi\left(\frac{2\pi}{k} x, \chi\right), & \text{для } \chi(-1) = 1. \end{cases}$$

Заметим, что в обоих случаях вес – четная функция, а потому моменты нечетного порядка равны нулю.

Вычисление моментов четного порядка проведем лишь для первого случая, когда  $\chi(-1) = -1$ . Для второго случая приведем только результат, поскольку, по существу, дублируются вычисления для первого случая.

Итак, пусть  $\chi(-1) = -1$ , т.е.  $\varphi(x, \chi)$  – четная функция. При  $m$  четном функциональное уравнение (4) дает

$$L(-m, \chi) = 2(2\pi)^{-m-1} k^{\frac{m+1}{2}} \Gamma(m+1) \sin \frac{\pi(m+1)}{2} L(m+1, \chi).$$

Пользуясь равенством (5), преобразуем правую часть к виду

$$2 \left( \frac{2\pi}{k} \right)^{-m-1} \frac{1}{\sqrt{k}} (-1)^{\frac{m}{2}} \int_0^\infty t^m \varphi(t, \chi) dt.$$

Замена переменной интегрирования  $t = \frac{2\pi}{k} r$  дает тогда

$$L(-m, \chi) = 2(-1)^{\frac{m}{2}} \int_0^\infty r^m \theta(r, \chi) dr = (-1)^{\frac{m}{2}} M_m.$$

Таким образом, моменты могут быть найдены из разложения (6).

В случае  $\chi(-1) = 1$ , оказывается, что для  $m$  нечетного  $L(-m, \chi) = (-1)^{\frac{m+1}{2}} M_{m-1}$ , т.е. вновь моменты находятся из разложения (6).

В заключение приведем несколько примеров, иллюстрирующих изложенное. Предварительно отметим, что при четном весе и симметричном интервале интегрирования в (1) коэффициенты  $b_m$  обращаются в нуль и  $P_n(-x) = (-1)^n P_n(x)$  [2]. Рекуррентное соотношение принимает вид

$$P_{n+1}(x) = xP_n(x) - a_n P_{n-1}(x), \quad P_0 = 1, \quad P_1 = x.$$

**Пример 1.**  $\chi = \chi_3, k = 3$ .

$n$	1	2	3
$\chi(n)$	1	-1	0

$$\varphi(x, \chi) = \frac{1}{1 + 2 \operatorname{ch} x} = \frac{1}{3} - \frac{1}{9} x^2 + \frac{1}{36} x^4 - \frac{7}{1080} x^6 + \frac{809}{54432} x^8 - \dots$$

Здесь первые члены последовательности  $\{a_n\}$  таковы

$$\frac{2}{3}, \frac{7}{3}, \frac{36}{7}, \frac{572}{63}, \frac{1400}{99}, \frac{2907}{113}, \dots$$

Полученные значения можно записать в виде  $a_n = \frac{n^2(9n^2 - 1)}{4(4n^2 - 1)}$ .

**Пример 2.**  $\chi = \chi_{-1}, k = 4$ .

$n$	1	2	3	4
$\chi(n)$	1	0	-1	0

$$\varphi(x, \chi) = \frac{1}{2 \operatorname{ch} x}.$$

В [7] показано, что  $a_n = \frac{n^2}{4}$ .

**Пример 3.**  $\chi = \chi_5, k = 5$ .

$n$	1	2	3	4	5
$\chi(n)$	1	-1	-1	1	0

$$\varphi(x, \chi) = \frac{2 \operatorname{sh} x}{1 + 2 \operatorname{ch} x + 2 \operatorname{ch} 2x}.$$

Здесь первые члены последовательности  $\{a_n\}$  таковы

$$1, 5, \frac{42}{5}, \frac{108}{5}, \frac{88}{3}, \frac{152}{3}, \frac{5967}{95}, \frac{8758}{95}, \frac{476520}{4379}, \frac{640125}{4379}, \frac{5237284}{31295}, \dots$$

**Пример 4.**  $\chi = \chi_2, k = 8$ .

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8
$\chi(n)$	1	0	-1	0	-1	0	1	0

$$\varphi(x, \chi) = \frac{\operatorname{sh} x}{\operatorname{ch} 2x}.$$

Первые члены последовательности  $\{a_n\}$  имеют вид

$$11, \frac{240}{11}, \frac{585}{11}, \frac{4928}{65}, \frac{8267}{65}, \frac{1338480}{8267}, \frac{1926985}{8267}, \frac{107933952}{385397}, \frac{142959495}{385387}, \dots$$

**Пример 5**  $\chi = \chi_{-2}, k = 8$ .

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8
$\chi(n)$	1	0	1	0	-1	0	-1	0

$$\varphi(x, \chi) = \frac{\operatorname{ch} x}{\operatorname{ch} 2x}.$$

Для  $\{a_n\}$  получены значения 3, 16, 35, 64, 99, 144, 255, 324, ....

$$\text{По-видимому } a_n = \begin{cases} 4n^2 - 1, & \text{при } n \text{ нечетном,} \\ 4n^2, & \text{при } n \text{ четном.} \end{cases}$$

Сделаем некоторые замечания по приведенным примерам.

В примерах 3 и 4 авторам не удалось даже установить закон образования членов последовательности.

В примерах 1, 2 и 5 закон подобрать удалось, но строгим доказательством авторы располагают лишь для примера 2. С его структурой можно ознакомиться в [7], где разбираются

многочлены с весом  $\frac{x}{\operatorname{sh} \frac{\pi x}{2}}$ .

### Библиографический список

1. **Чудаков, Н.Г.** Введение в теорию  $L$ -функций Дирихле / Н.Г. Чудаков. – М.: ОГИЗ, 1947.
2. **Сегё, Г.** Ортогональные многочлены / Г. Сегё. – М., 1962.
3. **Чебышев, П.Л.** Избранные математические труды / П.Л. Чебышев. – М.–Л., 1946.
4. **Хассе, Г.** Лекции по теории чисел / Г. Хассе. – М., 1953.
5. **Харди, Г.** Расходящиеся ряды / Г. Харди. – ИЛ, М. 1951.
6. **Galkin, V.M.** Orthogonal polynomials associating with Cauchy distribution / V.M. Galkin, L.N. Erofeeva, S.V. Lescheva // Научные исследования и их практическое применение // Современное состояние и пути развития 2014: материалы Межд. научно-практической конференции: сб. науч. тр. SWorld. 2014. Вып. 3(36). Т. 2. С. 83–85.

7. **Галкин, В.М.** Ортогогальная система многочленов с весом  $\frac{x}{\operatorname{sh} \frac{\pi x}{2}}$  / В.М. Галкин [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2015. №2(109). С. 256–260,

*Дата поступления  
в редакцию 13.10.2016*

**V.M. Galkin, E.K. Kitaeva, S.V. Lescheva, L.N. Erofeeva**

## **A NOTE ON L-FUNCTIONS AND THE ORTHOGONAL POLYNOMIALS**

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

**Purpose:** The series of systems of orthogonal polynomials are constructed. The coefficients of these polynomials are integers.

**Design/methodology/approach:** For a building taken approach based on application of the continued fraction and theory of moments.

**Findings:** The built polynomials are new. There some natural questions that require further researches.

**Research/limitations/implications:** There are some unresolved questions.

**Originality/value:** Unexpected connections with the analytic number theory are found out.

*Key words:* weight, orthogonality, continued fraction, Dirichlet character.

УДК 519.21, 519.22

И.А. Степанов

**МЕТОД ВЫИГРЫВАНИЯ В АНГЛИЙСКУЮ ЛОТЕРЕЮ DAILY PLAY 7 ИЗ 27**Институт фундаментальных наук и инновационных технологий,  
Лиепайский университет

Найдены некоторые эмпирические закономерности, которые позволяют регулярно выигрывать в английскую лотерею Daily Play 7 из 27. Этот же метод позволяет регулярно выигрывать в лотерею 6 из 49. Использование идеального генератора случайных чисел значительно улучшает результаты. Найденные закономерности представляют значительный математический интерес.

*Ключевые слова:* теория вероятностей, статистика, математика лотерей, Daily Play, English National Lottery, Lotto Plus 5.

**Введение**

Автор – физик-теоретик, играл в Англии в лотерею Daily Play 7 из 27. Она шла каждый день, кроме воскресенья. За угадывание четырёх номеров платили 5 фунтов стерлингов, за пять номеров – 30 фунтов, за шесть номеров – 300 фунтов и за семь номеров – £30 000. Шары выбрасывались на одной из четырёх машин, заранее неизвестно на какой; использовались несколько наборов шаров, заранее неизвестно какой. Автор нашёл некоторые эмпирические закономерности, которые позволяют выигрывать в эту лотерею многие десятки и сотни фунтов ежемесячно. Этот же метод применим и к лотерее English National Lottery 6 из 49 и позволяет выигрывать в неё регулярно сотни и тысячи фунтов. Показано, что применение идеального генератора случайных чисел значительно улучшает результаты игры.

**Теория**

Автор ловил выигрышные числа в интервал из 11-ти чисел и составлял четыре комбинации по 7 из 11-ти (4 лотерейных билета). Один билет стоил один фунт. Комбинации составлялись с помощью генератора случайных чисел, написанного на фортране. Если в интервал попадали 4 выигрышных числа, то эти четыре билета давали выигрыш примерно в каждом третьем случае. Если в интервале было 5 чисел, то выигрыш был почти всегда, если 6 чисел, то выигрыш был обязательно несколько десятков фунтов, а если 7 чисел, то выигрыш был сотни фунтов. (Сейчас ясно, что надо было составлять пять комбинаций, пять билетов. Это намного повысило бы результативность).

Автор играл следующим способом. Составлялся интервал из 11-ти чисел от 1-го до 27, полученных генератором случайных чисел, эти числа упорядочивались и этот интервал принимал участие в розыгрыше. Если в интервал попадало меньше четырёх выигрышных чисел, то составлялся новый интервал, который участвовал в следующем розыгрыше. Если попадало четыре или больше чисел, то следующий розыгрыш проводился с тем же интервалом. Однажды тот же интервал выиграл около двадцати раз подряд, около трёх недель. Каждый день выпадало от четырёх до шести выигрышных номеров. Потом было выиграно три номера, а затем около недели тот же интервал выигрывал от четырёх до шести номеров. Автор предположил, что это не случайное событие, а иногда случайный процесс попадает в такое состояние, что каждые следующие произведённые случайные числа попадают в тот же интервал много раз подряд. Автор научился моделировать такие состояния на компьютере и успешно выигрывать в лотерею Daily Play. Это и есть основная эмпирическая закономерность, позволяющая выигрывать в лотерею.

Моделирование происходило так. В фортран-программу вносились тиражи лотереи за

последние три дня (вчерашний, позавчерашний и за день до позавчерашнего). Программа создаёт интервал из 11-ти случайных чисел и сравнивает с тиражом, который был три дня назад. Если угадывается меньше четырех номеров, то создаётся новый интервал и процесс начинается сначала. Если угадывается четыре или больше номеров, то сравнивается тираж, который был два дня назад. Если угадывается меньше пяти номеров, то процесс начинается сначала (создаётся интервал из 11-ти чисел и сравнивается с тиражом, который был три дня назад и т. д.). Если угадывается пять или больше номеров, то интервал сравнивается со вчерашним тиражом. Если угадывается меньше четырех номеров, то изменяется посевное число генератора случайных чисел (он уже производит другие случайные числа) и программа запускается опять. Если угадывается четыре или больше номеров, то интервал сравнивается с сегодняшним тиражом, который выпадет вечером и ещё не занесён в компьютер. Если при этом угадано четыре или больше номеров, можно смело играть – интервал будет выигрывать несколько дней подряд. Автору удавалось создавать интервалы, которые выигрывали 12 дней подряд.

Автор нашёл интересную закономерность. Числа в интервале из 11-ти упорядоченных случайных чисел можно пронумеровать: 1-е, 2-е, ..., 11-е. Из них можно составить следующие четыре комбинации, четыре билета:

- |                        |     |
|------------------------|-----|
| 1, 2, 3, 5, 7, 9, 11,  | (1) |
| 1, 3, 5, 7, 9, 10, 11, | (2) |
| 1, 2, 4, 6, 8, 10, 11, | (3) |
| 2, 3, 4, 6, 8, 9, 10.  | (4) |

Здесь числа являются номерами чисел в интервале. Соотношения (1), (2) получены по такому правилу. Берутся все нечётные числа в интервале и добавляется одно чётное число. В (3), (4) ко всем чётным числам интервала добавляются два нечётных числа симметрично слева и справа. На основании большой статистики было установлено, что эти комбинации дают следующие результаты. Если интервал выигрывает четыре шара, то эти четыре комбинации выигрывают реже, чем четыре комбинации, полученные с помощью генератора случайных чисел. Но если интервал выигрывает пять шаров, то одна из комбинаций (1)–(4) часто выигрывает именно пять шаров; если интервал выигрывает шесть шаров, то одна из комбинаций (1)–(4) часто выигрывает именно шесть шаров; если интервал выигрывает семь шаров, то одна из комбинаций (1)–(4) часто выигрывает именно семь шаров. Автор неоднократно выигрывал семь шаров, играя виртуально, т.е., не ставя деньги.

Играя виртуально, было найдено, что разработанный метод позволяет выигрывать в лотерею Daily Play многие десятки и сотни фунтов в месяц. Автор стал играть на деньги, выиграл несколько десятков фунтов, но Daily Play прекратила своё существование. Я перешёл на English National Lottery 6 из 49 и разработал методы выигрывания в неё. Они основаны на той же эмпирической зависимости, но сильно отличаются в деталях.

English National Lottery 6 из 49 проходит по средам и субботам. За угадывание трёх номеров платили 10 фунтов, за четыре номера – около сотни, за пять номеров – одну – две тысячи и за шесть номеров – порядка миллиона. Один билет в лотерею 6 из 49 стоил один фунт. Шары выбрасывались на одной из двух машин, заранее неизвестно на какой; использовались несколько наборов шаров, заранее неизвестно какой. Параллельно с этой лотереей шла Lotto Plus 5, тоже 6 из 49. Она имела дополнительный характер. Она проводилась по понедельникам, вторникам, четвергам, пятницам и воскресеньям. За дополнительную плату в один фунт билет, купленный на тираж в среду, принимал участие в тиражах Lotto Plus 5 в четверг и пятницу, а билет, купленный на тираж в субботу, принимал участие в тиражах Lotto Plus 5 в воскресенье, понедельник и вторник. Шары выбрасывались только на одной машине, не принимающей участия в тиражах в среду и субботу. Автор играл в English National Lottery и в смесь English National Lottery с Lotto Plus 5 по средам и субботам не менее эффективно. Об этом будет изложено далее.

Автор разработал несколько методов выигрывания в English National Lottery. Шары

ловились в интервалы от 11-ти чисел и выше. Найденная ранее закономерность, что интервалы выигрывают несколько раз подряд, годится не только для интервалов длины 11. Удавалось создавать интервалы, которые выигрывали 8–12 раз подряд. Затем эти интервалы сокращались до девяти, используя статистику и исключая очень маловероятные числа. В большинстве из методов составлялось пять комбинаций по 6 из 9-и (5 билетов), в одном – 20 билетов. Эти методы позволяют выигрывать регулярно сотни и тысячи фунтов. Автор играл виртуально, стал играть на деньги, выиграл £216, но ему пришлось уехать из Англии.

Найдена ещё одна интересная закономерность. Для игры использовалась полугодовая статистика игры в English National Lottery. Однако автор скомбинировал статистику English National Lottery со статистикой Lotto Plus 5. То есть, составлялся файл – набор тиражей, в котором тираж происходил каждый день: по средам и субботам – на English National Lottery, по понедельникам, вторникам, четвергам, пятницам и воскресеньям – на Lotto Plus 5. (Это значит, что я играл в смесь English National Lottery с Lotto Plus 5). Такая статистика выигрывала по средам и субботам несколько не хуже основной статистики. Чистая статистика Lotto Plus 5, конечно, не может выигрывать по средам и субботам. Это ясно из общих соображений и проверено экспериментально. По понедельникам, вторникам, четвергам, пятницам и воскресеньям автор играл в смесь English National Lottery с Lotto Plus 5 виртуально, предполагая, что можно купить билет на каждый её тираж.

Также установлено, что идеальный генератор случайных чисел намного улучшает эффективность выигрывания в лотерею 6 из 49. Идеальный генератор создавался таким образом. Например, надо получить  $N$  случайных чисел. Брался тираж, например, номер 50 и его числа вычёркивали из числового интервала 1–49. Затем из этого интервала вычёркивали числа тиража 49, затем тиража 48 и так далее, покуда оставалось  $N$  чисел. Работа с таким интервалом из  $N$  чисел была намного более эффективна, чем с интервалом, полученным с помощью генератора случайных чисел. Изменение посевого числа генератора случайных чисел в случае 6 из 49 уже не помогает создавать выигрывающие интервалы как в лотерее 7 из 27 и, как установлено, причина этого – неидеальность чисел, произведённых этим генератором.

### **Выводы**

Найденные эмпирические закономерности нуждаются в детальном математическом обосновании и дальнейшем исследовании. Представляет интерес адаптация комбинаций (1) – (4) к лотерее 6 из 49.

### **Приложение**

В начале восьмидесятых годов в отделениях Спортлото раздавалась листовка "Наиболее вероятные комбинации при игре в Спортлото 6 из 49". В ней были даны 40 наиболее вероятных комбинаций по 6 из, кажется, 12-ти (т.е., для случая, если три и больше шаров попали в интервал 12 чисел). Билет стоил 60 копеек, так что метод стоил 24 рубля. Изучив статистику игры, автор заметил, что если три или больше шаров попадали в интервал 1–12 в левой части числового интервала 1–49 или 38–49 в правой части, то в следующем тираже три или больше шаров были не дальше, чем в интервале 1–15 в левой части или 35–49 в правой части соответственно. (Автор точно не помнит размеры интервалов, но суть метода это не меняет). То есть, шары далеко не отскакивали. Группы шаров часто попадали в такие крайние положения. Наихудший результат был, если только три шара попадали в крайний интервал. Тогда, как правило, только три шара попадали в расширенный интервал в следующий тираж (но могли попасть и пять шаров). Далее играть было просто. Допустим, попало четыре шара в интервал 1–12. Предполагая, что эти числа в следующем тираже уже не выпадут и три из них можно вычеркнуть из интервала (так было как правило), мы имели интервал 1–15 с 12-ю числами, в который попадало четыре – пять шаров в следующем тираже. Так автор выиграл несколько сотен рублей за год, не ставя деньги, стал играть на деньги, поймал три шара в крайнем интервале, которые привели к выпадению трёх шаров в расширенном интервале и выиграл 12 руб., затратив 24. Сра-



зу после этого правила изменились: шары стали выбрасываться поодиночке и перестали группироваться у бортов. До этого они выбрасывались одновременно.

Следует отметить, что сначала в лотерее Daily Play шары выбрасывались на двух машинах, заранее неизвестно, на какой. Автор заметил, что шары часто группируются у краёв интервала и стал играть так. Сегодня шары ловятся в интервал 1–11, завтра – в интервал 17–27, послезавтра – опять в 1–11 и т. д. Составлялись четыре комбинации по 7 из 11-ти. Не ставя деньги, автор выиграл много десятков фунтов каждый месяц в течение нескольких месяцев, стал играть на деньги, выиграл несколько десятков фунтов, но правила изменились: шары стали выбрасываться на четырёх машинах и перестали группироваться у бортов.

В начале восьмидесятых годов в отделениях Спортлото раздавалась листовка "Наиболее вероятные комбинации при игре в Спортлото 6 из 49". В ней были даны 40 наиболее вероятных комбинаций по 6 из, кажется, 12-и (то есть, для случая, если три и больше шаров попали в интервал 12 чисел). Билет стоил 60 копеек, так что метод стоил 24 рубля. Изучив статистику игры, автор заметил, что если три или больше шаров попадали в интервал 1–12 в левой части числового интервала 1–49 или 38–49 в правой части, то в следующем тираже три или больше шаров были не дальше, чем в интервале 1–15 в левой части или 35–49 в правой части, соответственно. (Автор точно не помнит размеры интервалов, но суть метода это не меняет). То есть, шары далеко не отскакивали. Группы шаров часто попадали в такие крайние положения. Наихудший результат был, если только три шара попадали в крайний интервал. Тогда, как правило, только три шара попадали в расширенный интервал в следующий тираж (но могли попасть и пять шаров). Далее играть было просто. Допустим, попало четыре шара в интервал 1–12. Предполагая, что эти числа в следующем тираже уже не выпадут и три из них можно вычеркнуть из интервала (так было как правило), мы имели интервал 1–15 с 12-ю числами, в который попадало четыре – пять шаров в следующем тираже. Так автор выиграл несколько сотен рублей за год, не ставя деньги, стал играть на деньги, поймал три шара в крайнем интервале, которые привели к выпадению трёх шаров в расширенном интервале и выиграл 12 руб., затратив 24. Сразу после этого правила изменились: шары стали выбрасываться поодиночке и перестали группироваться у бортов. До этого они выбрасывались одновременно.

Следует отметить, что сначала в лотерее Daily Play шары выбрасывались на двух машинах, заранее неизвестно, на какой. Автор заметил, что шары часто группируются у краёв интервала и стал играть так. Сегодня шары ловятся в интервал 1–11, завтра – в интервал 17–27, послезавтра – опять в 1–11 и т. д. Составлялись четыре комбинации по 7 из 11-ти. Не ставя деньги, автор выиграл много десятков фунтов каждый месяц в течение нескольких месяцев, стал играть на деньги, выиграл несколько десятков фунтов, но правила изменились: шары стали выбрасываться на четырёх машинах и перестали группироваться у бортов.

*Дата поступления  
в редакцию 13.10.2016*

**I.A. Stepanov**

## **METHOD OF WINNING IN THE ENGLISH LOTTERY DAILY PLAY**

Institute of Fundamental Science and Innovative Technologies, Liepaja university (Latvia)

We found some empirical regularities that allow regular win in British Daily Play lottery 7 of 27. The same method allows to regularly winning in the lottery 6 of 49. The use of the ideal random number generator greatly improves the results. Found regularities are of considerable mathematical interest.

*Key words:* probability theory, statistics, lottery mathematics, Daily Play, English National Lottery, Lotto Plus 5.

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 621.3

Д.А. Кудряшов, Е.В. Рошин

### ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ МОЩНЫХ РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С СЕТЬЮ СОБСТВЕННЫХ НУЖД АЭС

АО «ОКБМ Африкантов»

Проанализированы аспекты влияния и способы обеспечения электромагнитной совместимости мощных регулируемых асинхронных электроприводов с сетью собственных нужд атомных электростанций.

*Ключевые слова:* электромагнитная совместимость, электропривод, атомная электростанция, преобразователь частоты, фильтродемпфирующий компенсатор.

В последние десятилетия мощный регулируемый электропривод находит все большее применение в системах регулирования расхода теплоносителей главных контуров АЭС. В дальнейшем возможно использование преобразователей частоты (ПЧ) для сетевых, питаемых и конденсатных насосов. С ростом суммарной мощности электроприводов главных циркуляционных насосов (ГЦН), а она составляет в среднем 2-2,5% от выходной мощности блока, растут единичные мощности электроприводов ГЦН, которые достигают 5 МВт (для блока БН-800). Это ставит на один из первых планов проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС) электроприводов в системе собственных нужд (СН) АЭС [1].

В данной статье рассматривается влияние низкочастотных кондуктивных помех на сеть СН блока АЭС БН-800 при подключении к ней мощных регулируемых электроприводов ГЦН.

В нормальном режиме работы потребители СН блока АЭС БН-800 получают питание от двух-трех обмоточных трансформаторов собственных нужд (ТСН). От каждой вторичной обмотки ТСН запитаны два мощных регулируемых электропривода ГЦН первого и второго контура. Суммарная мощность асинхронных двигателей регулируемых электроприводов, подключенных к одной полуобмотке ТСН, составляет порядка 25% мощности этой полуобмотки.

В качестве регулируемых электроприводов ГЦН выбраны преобразователи частоты PowerFlex 7000 фирмы Allen-Bradley, обеспечивающие близкую к синусоидальной форме кривых тока и напряжения двигателя, что исключает заметный дополнительный нагрев двигателя, а также нагрузку на его изоляцию. Преобразователи частоты регулируемых электроприводов ГЦН выполнены по схеме автономного инвертора тока (АИТ) с 18-ти пульсным выпрямителем и широтно-импульсным инвертором. Производителем заявлено, что коэффициент искажения синусоидальности кривой потребляемого тока преобразователем частоты составляет 6,6 % (до 49 гармоники). Температура двигателя при работе от частотно-регулируемого привода возрастает примерно на 3 °С по сравнению с работой двигателя от сети. Значение  $du/dt$  в кривой напряжения не превышает 10 В/мкс. Амплитуда напряжения, приложенного к изоляции двигателя, соответствует величине действующего напряжения, деленной на 0,707.

Проблемы отраженной волны и  $du/dt$ , часто связываемые с приводами на основе инвертора напряжения, не являются актуальными для АИТ. Благоприятные для двигателя формы тока и напряжения получены за счет использования метода селективного подавления гармоник в инверторе. Этот метод позволяет устранить высшие гармоники главного порядка и в сочетании с выходным конденсатором (в составе привода) фильтровать гармоники при работе на высоких скоростях. Также к достоинствам ПЧ на основе АИТ с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) относится то, что на длину соединительного кабеля между инвертором и двигателем не накладывается никаких ограничений (до 15 км) и его можно сопрягать со стандартными асинхронными двигателями без снижения их номинальной мощности.

Иначе обстоит дело при применении ПЧ на основе автономного инвертора напряжения (АИН) с ШИМ. В этих преобразователях при высоковольтном исполнении применяются модули IGBT или последовательно соединенные IGCT. Такие преобразователи получили широкое распространение в мощных частотно-регулируемых асинхронных электроприводах, но при их применении необходимо обеспечить снижение воздействий импульсов выходного напряжения АИН на изоляцию обмотки статора и локализацию волновых процессов в соединительном кабеле между инвертором и двигателем, сопровождающихся перенапряжениями (проблема «длинного кабеля»).

В зависимости от длины кабеля возможно появление отраженной волны напряжения на выводах статора двигателя, достигающего в худшем случае практически двукратного значения, как результат несогласованности волнового сопротивления кабеля с входным сопротивлением двигателя, определяемым индуктивностью рассеяния статора и эквивалентной частотой фронта импульса. Вероятность повреждения изоляции тем выше, чем меньше время нарастания импульсов выходного напряжения АИН, т.е. чем выше  $du/dt$ .

Для устранения негативных последствий, связанных с формой выходного напряжения, на практике в высоковольтных ПЧ применяют резонансные ( $LC$ ) фильтры, подключаемые к выходу АИН. [1]

При проведении пуско-наладочных работ (ПНР) регулируемых электроприводов ГЦН было обнаружено, что при их подключении к системе СН АЭС происходит искажение напряжения на питающих шинах СН (рис. 1). По результатам полученных данных были проведены работы по исследованию причин возникновения искажений напряжения и принятию мер, улучшающих качество питающего напряжения на шинах 6 кВ СН АЭС.

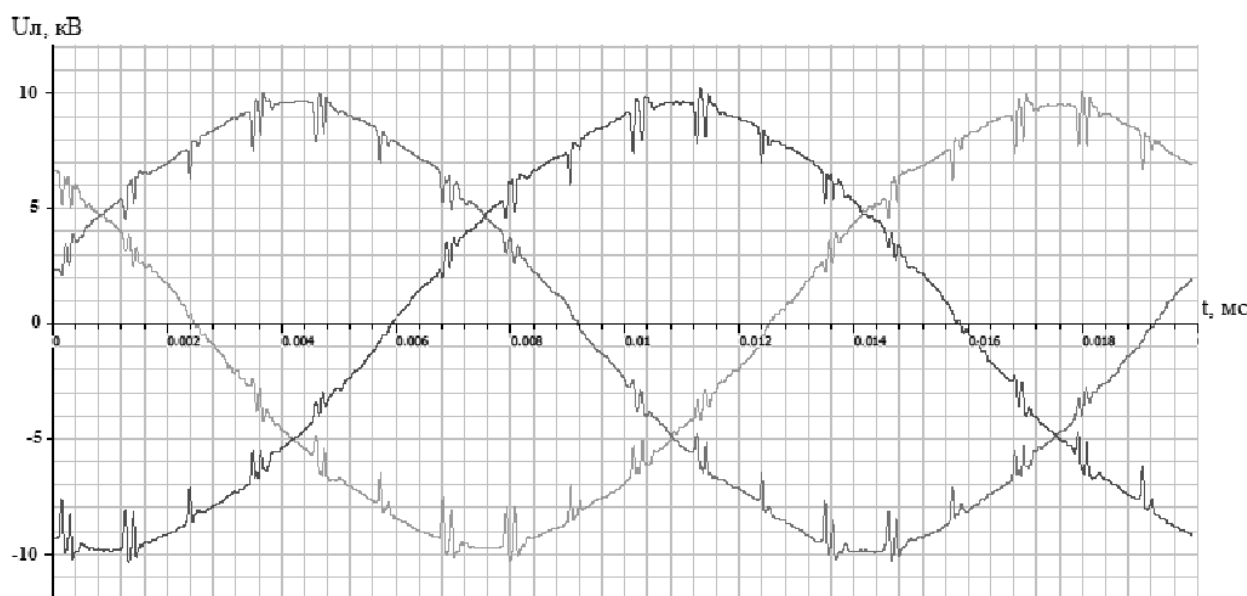


Рис. 1. Оциллограмма линейного напряжения на шинах СН АЭС при работе электроприводов ГЦН

Основной причиной появления гармонических помех является оборудование с нелинейной вольт-амперной характеристикой. Такое оборудование может рассматриваться как источник гармоник тока, вызывающих гармоническое падение напряжения на полном сопротивлении сети. Гармоники тока от различных источников складываются геометрически. Из-за влияния емкостных нагрузок и емкостной проводимости кабелей в сети может возникнуть последовательный и параллельный резонанс и вызвать увеличение гармоник напряжения даже в точках, удаленных от искажающей нагрузки.

Значительные токи гармоник генерирует оборудование с фазовым управлением и большой мощностью; неуправляемые выпрямители, особенно со сглаживающими конденсаторами (например, используемыми в преобразователях частоты и газоразрядных лампах со встроенными электронными пуско-регулирующими устройствами). Генерируемые ими гармоники совпадают по фазе, поэтому гармоники от разных выпрямителей складываются друг с другом, приводя к увеличению их общего уровня. В зависимости от режима работы оборудования гармоники могут быть относительно стабильными или изменяющимися во времени [2].

ГОСТ Р 51317.2.5 «Совместимость технических средств электромагнитная. Электромагнитная обстановка. Классификация электромагнитных помех в местах размещения технических средств» в общем случае характеризует виды электромагнитных помех, создаваемых техническим средством и (или) воздействующих на техническое средство. ГОСТ Р 51317.2.5 определена следующая номенклатура видов электромагнитных помех:

- кондуктивные низкочастотные электромагнитные помехи;
- излучаемые низкочастотные электромагнитные помехи;
- кондуктивные высокочастотные электромагнитные помехи;
- излучаемые высокочастотные электромагнитные помехи;
- электростатические разряды.

Нас интересуют кондуктивные низкочастотные электромагнитные помехи, к которым относятся:

- гармоники, интергармоники напряжения электропитания;
- напряжения сигналов, передаваемых в системах электропитания;
- колебания напряжения электропитания;
- провалы, кратковременные прерывания и выбросы напряжения электропитания;
- отклонения напряжения электропитания;
- несимметрия напряжений в трехфазных системах электроснабжения;
- изменения частоты питающего напряжения;
- наведенные низкочастотные напряжения;
- постоянные составляющие в сетях электропитания переменного тока [3].

Дополнительно было произведено осциллографирование напряжения и замеры гармонических составляющих напряжения на шинах собственных нужд при работающих и отключенных регулируемых электроприводах ГЦН.

Значение коэффициента  $n$ -й гармонической составляющей напряжения  $K_{U(n)i}$  в процентах как результат  $i$ -го наблюдения вычисляется по формуле

$$K_{U(n)i} = \frac{U_{(n)i}}{U_{1(i)}} 100, \quad (1)$$

где  $U_{(n)i}$  - действующее значение  $n$ -й гармонической составляющей напряжения, В;  $U_{1(i)}$  - действующее значение напряжения основной частоты на  $i$ -м наблюдении, В.

Значение коэффициента искажения синусоидальности кривой междуфазного напряжения  $K_{U_i}$  в процентах как результат  $i$ -го наблюдения вычисляется по формуле

$$K_{Ui} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)i}^2}}{U_{1(i)}} 100, \quad (2)$$

где  $\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)i}^2}$  - действующее значение всех высших гармоник, В.

При работающих электроприводах ГЦН суммарный коэффициент нелинейных искажений напряжения составил 6,1 % на шинах 6 кВ СН АЭС. Коэффициенты нелинейных искажений напряжения по гармоникам приведены на рис. 2, а. На осциллограммах были зафиксированы значительные резонансные возмущения в напряжении (перепад напряжения относительно амплитудного значения составляет 28,6 %) с частотой коммутации 18-пульсного выпрямителя электропривода (период возмущений 1,111 мс).

Очевидной причиной резонансного переходного процесса при коммутации тиристорov выпрямителя электропривода является наличие колебательного контура, образуемого эквивалентной емкостью сети (кабельные линии и мощные электродвигатели) присоединенной к секциям шин 6 кВ и индуктивностью сети. При анализе осциллограмм была определена эквивалентная емкость сети  $\sim 1,5$  мкФ.

Возникновение резонансных колебаний при взаимодействии статических преобразователей частоты PowerFlex 7000 с проектируемой сетью СН до настоящего времени не имело precedентов, и поэтому не могло быть учтено на стадии проектирования, осуществляемого по существующим нормативным документам. В дальнейшем возможность возникновения подобных режимов должна быть учтена в методических указаниях по проектированию, используемых в проектных организациях.

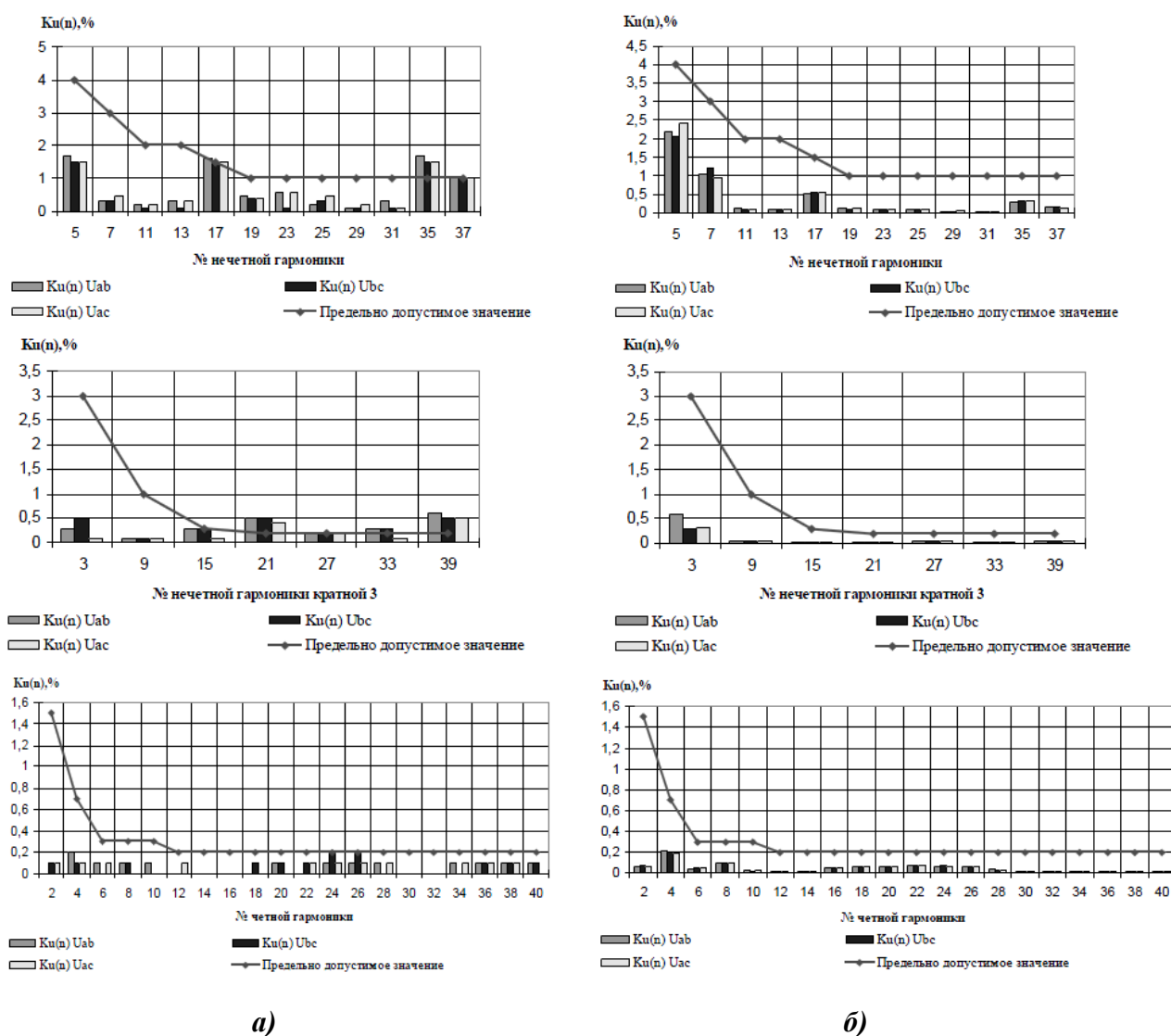
Для выполнения установленных норм необходимы специальные меры обеспечения ЭМС, эти меры должны быть четко установлены. С учетом условий применения эти меры могут включать:

- значение минимального и максимального допустимого полного сопротивления сети электропитания;
- использование экранированных и специальных кабелей (силовых и/или управления);
- требования к соединению экранов кабелей;
- значение максимальной допустимой длины кабелей;
- разделение кабелей;
- использование внешних устройств (например, фильтров);
- правильное присоединение к функциональному заземлению [4].

Для приведения питающего напряжения на шинах СН АЭС к требованиям ГОСТ Р 51317.2.4-2000 (класс электромагнитной обстановки 2) и ГОСТ 32144-2013 было принято решение применить фильтродемпфирующие компенсаторы (ФДК).

Для определения оптимальных параметров ФДК было произведено компьютерное моделирование сети СН АЭС с работающими регулируруемыми электроприводами ГЦН и подключенными фильтрами к тем же шинам 6 кВ СН АЭС, что и электропривода. Параметры фильтра подбирались таким образом, чтобы питающее напряжение на шинах СН АЭС соответствовало требованиям по содержанию гармоник, а с другой стороны, необходимо подавить резонансные возмущения, возникающие при коммутации тиристорov. Высокочастотные (резонансные) возмущения не могут влиять на уровень канонических гармоник (17, 19, 35, 37 и т.д.), кратных частоте сети. Фильтры, содержащие звенья, каждое из которых настроено в резонанс на каноническую гармонику, которая должна быть подавлена, не могут эффективно воздействовать на высокочастотные возмущения и сами могут являться источниками коле-

баний напряжения при динамических воздействиях. Таким образом, высокочастотные возмущения, возникающие при коммутации тиристоров, должны быть подавлены широкополосным демпфированным фильтром.



**Рис. 2. Коэффициенты нелинейных искажений напряжения по гармоникам:**

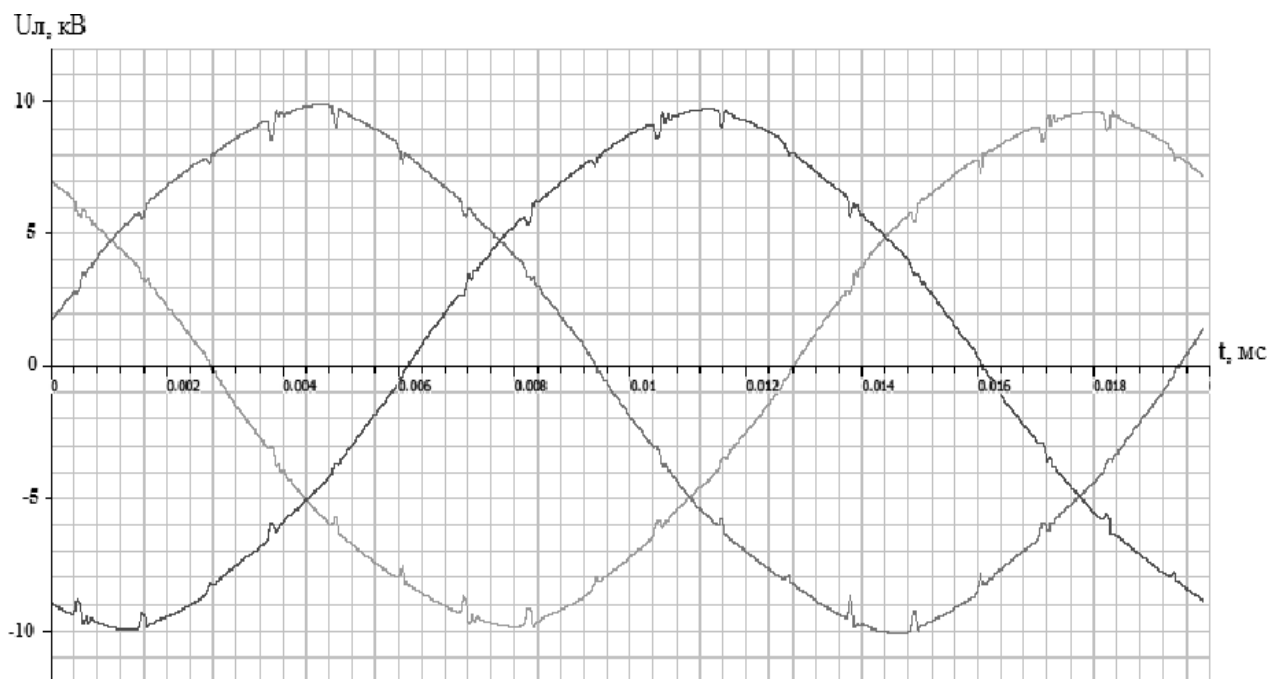
*a* – при работе электроприводов ГЦН без ФДК;

*б* – с подключенным ФДК

На первом этапе выбора типа фильтрующей установки были определены параметры сети СН АЭС (индуктивность и эквивалентная «паразитная» емкость сети и активное сопротивление, учитывающее затухание колебаний в соответствии с характером резонансных возмущений). В качестве исходных данных были взяты переходные процессы, заснятые на осциллограмме рис. 1, и параметры нагрузок сети СН АЭС: параметры потребителей, тип и длина кабельных трасс, по которым запитаны потребители.

На втором этапе было произведено компьютерное моделирование сети СН АЭС с работающими регулируемыми электроприводами ГЦН и подключенными фильтрами к тем же шинам 6 кВ СН АЭС, что и электропривода. Параметры фильтра подбирались таким образом, чтобы питающее напряжение на шинах СН АЭС соответствовало требованиям ГОСТ Р 51317.2.4-2000 (класс электромагнитной обстановки 2) и ГОСТ 32144-2013.

Сравнение результатов, полученных при наладке на объекте электроприводов ГЦН без ФДК, и с подключенным ФДК, представлено на рис. 2 и рис. 3.



**Рис. 3. Оциллограмма линейного напряжения на шинах СН АЭС при работе электроприводов ГЦН с подключенным ФДК**

Из полученных результатов следует, что фильтродемпфирующие компенсаторы позволили решить основную задачу – обеспечить соответствие питающего напряжения на шинах 6 кВ СН АЭС требованиям ГОСТ Р 51317.2.4-2000 (класс электромагнитной обстановки 2) и ГОСТ 32144-2013 по содержанию гармоник, а также задачу подавления резонансных возмущений, возникающих при коммутации тиристоров в 18-пульсных выпрямителях преобразователей частоты PowerFlex 7000.

#### Библиографический список

1. **Анишев, Е.Ю.** Проблемы электромагнитной совместимости регулируемых электроприводов главных циркуляционных насосов АЭС / Е.Ю. Анишев, Е.В. Рощин // Труды Нижегородского технического университета им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2010. № 4 (83).
2. **РД 50-713-92 (МЭК 1000-2-1).** Руководящий нормативный документ. Методические указания. Совместимость технических средств электромагнитная. Электромагнитная обстановка. Виды низкочастотных кондуктивных помех и сигналов, передаваемых по силовым линиям, в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Изд-во стандартов, 1993.
3. **ГОСТ Р 51317.2.5-2000 (МЭК 61000-2-5-95).** Совместимость технических средств электромагнитная. Электромагнитная обстановка. Классификация электромагнитных помех в местах размещения технических средств. – М.: Госстандарт России, 2000.
4. **ГОСТ Р 51524-2012 (МЭК 61800-3:2012).** Совместимость технических средств электромагнитная. Системы электрического привода с регулируемой скоростью. Ч. 3. Требования ЭМС и специальные методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2014.

Дата поступления  
в редакцию 25.01.2016

---

**D.A. Kudriashov, E.V. Roschin**

**PROBLEMS OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF VARIABLE ELECTRIC DRIVES WITH IN-HOUSE POWER SUPPLY SYSTEM OF NPP**

Joint stock company «OKBM Afrikantov»

The technical treatments of overcoming the low-frequency conductive interferences that originate in interaction between static frequency converters and in-house power supply system of NPP are described in this article.

The results of measuring distortion voltage in-house power supply system of NPP under operating the electric drives of the main circulation pump without filter-damping complex and with it are presented.

At the expense of application of filter-damping complex a task in correspondence of supply voltage on the bus bar 6 kV in-house power supply system of NPP to requirements of the standard documents is performed.

*Key words:* electromagnetic compatibility, electric drives, nuclear power plant, frequency converter, filter-damping complex.



УДК 62-52-83:656.56

А.С. Стеклов, А.В. Серебряков, В.Г. Титов

**СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ  
СУДОВОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Разработана математическая модель для диагностики синхронного генератора судовой энергетической станции в условиях эксплуатации. В работе показана реализация одного из модулей экспертной системы с применением аппарата нечёткой логики для диагностики технического состояния судового синхронного генератора. Получена поверхность нейро-нечеткого вывода, позволяющая установить зависимость значений выходной переменной от значений входных переменных нечеткой модели. Предложена модель оценки технического состояния на основе нечеткой логики с учетом неисправности оборудования, обеспечивающая повышение экономичности, увеличение ресурсных характеристик и продление межремонтного периода эксплуатации судовых синхронных генераторов

*Ключевые слова:* синхронный генератор, диагностика, нечёткая логика.

Основная трудность в создании адекватной системы диагностики состоит в том, что эксплуатация судового электрооборудования характеризуется нестабильностью. Это связано характерными для морской эксплуатации факторами: качка, переменные температура, давление окружающей среды и влажность, влияние человеческого фактора, необходимость осуществления маневров и связанные с этим переменные нагрузочные режимы.

Одним из направлений, определяющих повышение качества информационных технологий контроля и диагностики технического состояния, следует считать интеллектуализацию процессов обработки диагностической информации с использованием технологии экспертных систем, которые способны обеспечить повышение качества распознавания технического состояния объекта [1].

В настоящее время используется и разрабатывается много информационных систем, методов и средств контроля и диагностики технического состояния электрооборудования. Вместе с тем, необходимо совершенствование существующих и разработка новых технологий и практических методов, которые обеспечивали бы эффективное техническое обслуживание и ремонт электрооборудования по техническому состоянию [2].

Наиболее эффективной системой технического обслуживания и ремонта электрооборудования в настоящее время является система с методами организации ремонта, базирующимися на индивидуальном наблюдении изменения технического состояния в процессе эксплуатации путем контроля и диагностики, проводимых с установленными технической документацией глубиной и периодичностью.

Для определения технического состояния элементов судовых энергетических установок применение аппарата нечёткой логики позволяет работать с существующей неопределенностью, неполнотой и нечеткостью информации. Выбор решения по числовой информации в условиях неопределенности (риска) возникает в том случае, когда с каждым принимаемым решением связано некоторое множество возможных результатов с известными условными вероятностями.

В нечетких системах можно выделить составные компоненты:

- базу данных, содержащую функции принадлежности и их описание;
- множество нечетких правил;
- механизм вывода и агрегирования [2, 3].

В модели экспертной системы для определения технического состояния синхронного генератора входными переменными являются сопротивление изоляции  $R_{iz}$ , мощность актив-

ная  $P$ , мощность реактивная  $Q$ , температура обмотки статора  $t_{stat}$ , температура обмотки ротора  $t_{rot}$ , температура подшипника  $t_{podch}$ , вибрация генератора  $vibracia$ . Выходом является техническое состояние синхронного генератора.

На рис. 1 представлена структурная схема определения технического состояния синхронного генератора [4]. Входами являются перечисленные параметры синхронного генератора, выходом – его вероятные состояния, характерные для данных входных параметров.

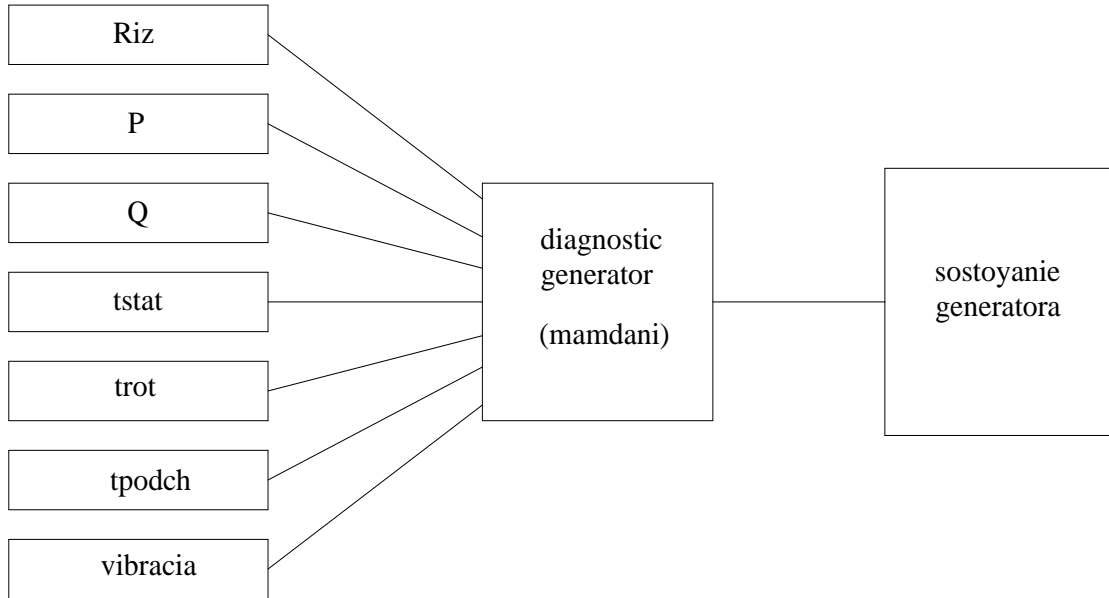


Рис. 1. Структурная схема определения технического состояния синхронного генератора

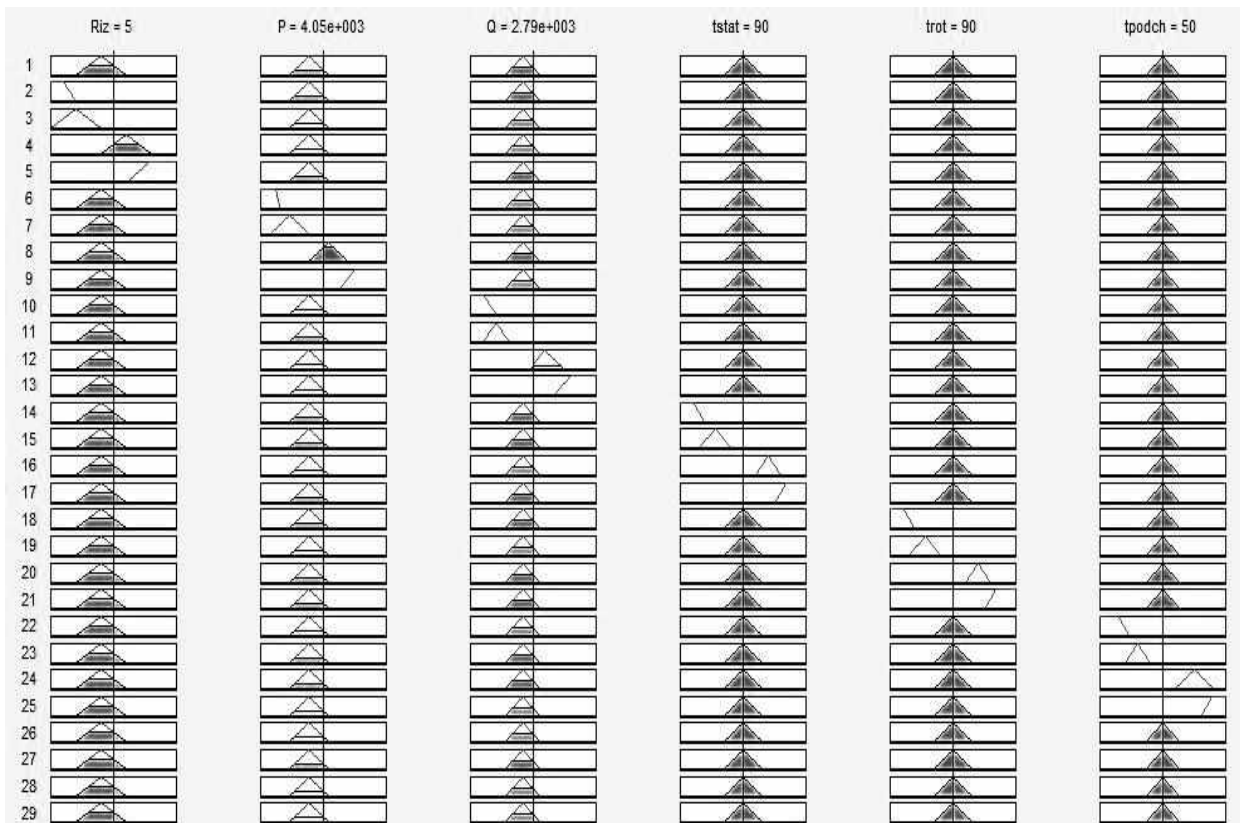


Рис. 2. Фрагмент редактора базы правил

Лингвистическая оценка значения выходной переменной производится с помощью пяти термов: {«очень низкое», «ниже нормы», «нормальное», «выше нормального», «очень высокое»} [5].

Причинно-следственные связи между значениями параметров и неисправностью формализуются в виде совокупности нечётких логических правил. Формат базового правила вывода «если – то» (if – then) называется нечёткой импликацией. Условием правила может быть утверждение « $R_{iz}$  низкое», где «низкое» – терм заданный нечётким множеством на универсальном множестве лингвистической переменной  $R_{iz}$ . Следствием (заключением) для данного условия может быть «состояние генератора 0».

Нечёткая база знаний с информацией о зависимости «значение параметров – неисправность» содержит лингвистические правила.

Правила задаются экспертами на основе субъективных предпочтений о причине неисправности и не носят случайного характера. Информация может быть представлена в форме правил нечетких продукций. На рис. 2 представлен фрагмент редактора базы правил.

Можно выполнить визуальный анализ поверхности вывода для нейросетевой модели, которая также позволяет оценить значения выходной переменной. Выполнить анализ можно посредством визуализации поверхности нечеткого вывода. Для этой цели следует воспользоваться программой просмотра поверхности системы нечеткого вывода (рис. 3).

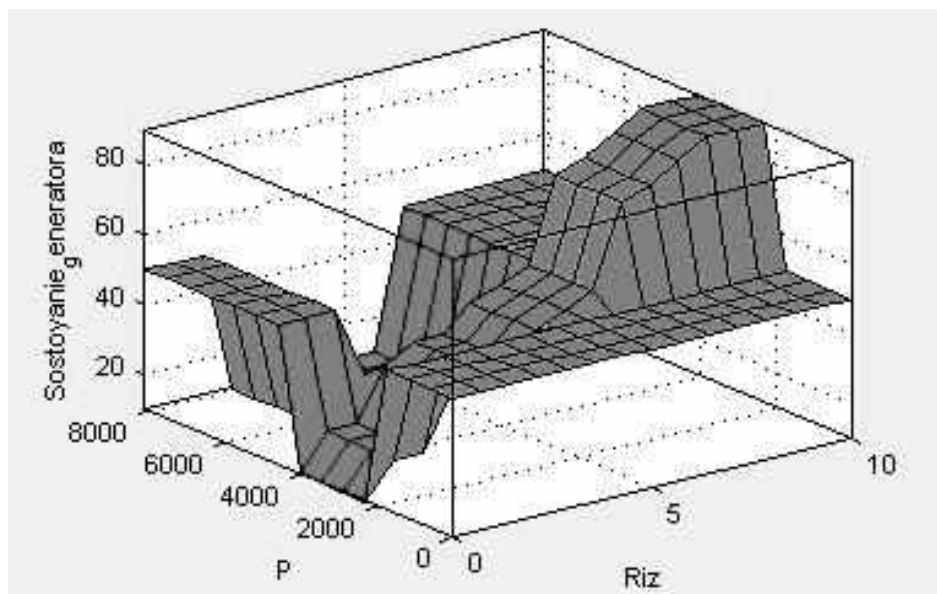
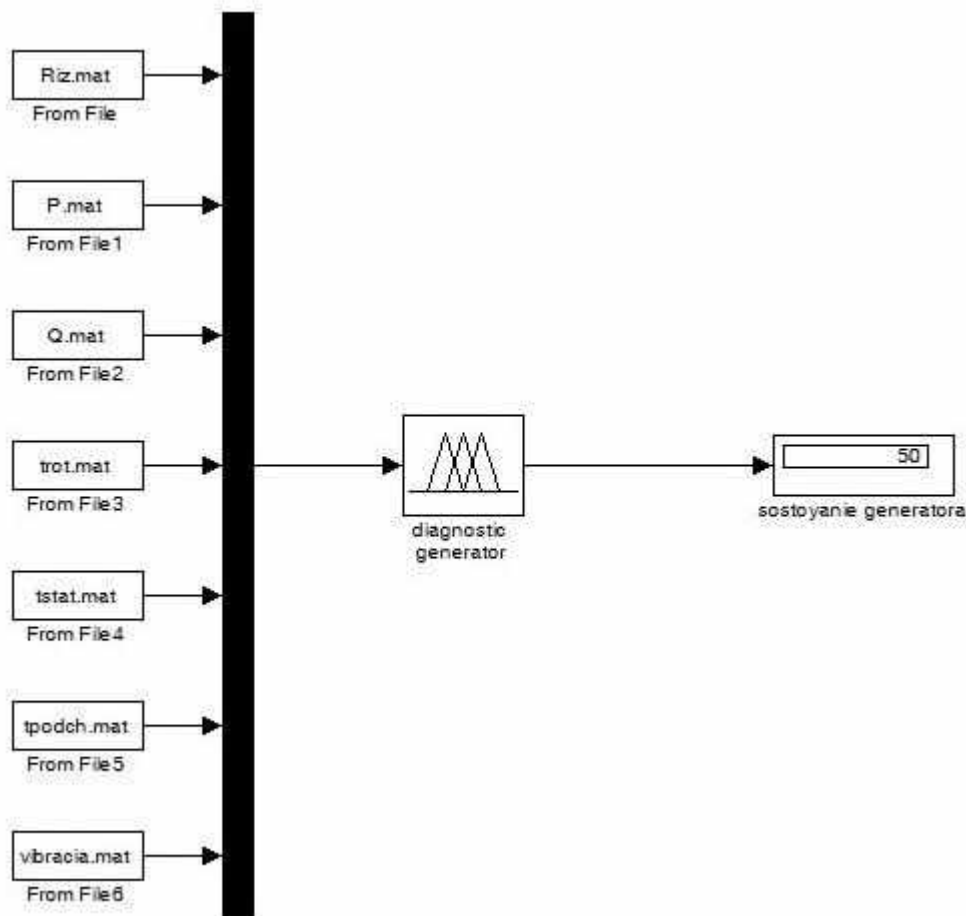


Рис. 3. Поверхность системы нейро-нечёткого вывода

Поверхность нечеткого вывода позволяет установить зависимость значений выходной переменной от значений входных переменных нечеткой модели. Кроме того, имеется возможность установления зависимости выходной переменной от одной из входных. Получение подобных зависимостей может послужить основой для программирования контроллера или аппаратной реализации соответствующего нечеткого алгоритма в форме таблицы решений.

На рис. 4 изображена модель диагностики технического состояния синхронного генератора.

Схема состоит из следующих элементов:  $R_{iz}.mat$ ,  $P.mat$ ,  $Q.mat$ ,  $trot.mat$ ,  $tstat.mat$ ,  $trodch.mat$ ,  $vibracia.mat$  – массивы данных сопротивления изоляции, активной мощности, реактивной мощности, температуры обмотки статора, температуры обмотки ротора, температуры подшипника, вибрации генератора соответственно по выбранной неисправности из общего спектра в определенные промежутки времени; «diagnostic generator» - контроллер нечеткой логики анализа неисправности оценки общего состояния генератора. На выходе из системы мы имеем значение общего состояния генератора в процентном соотношении от общего ресурса.



**Рис. 4. Модель, разработанная в MATLAB Simulink для диагностики технического состояния синхронного генератора**

При формировании вывода были заданы следующие отношения по общему состоянию генератора:

- от 0 до 20% - уровень состояния «очень низкое». Требуется вывод оборудования из строя вследствие или для предотвращения аварии;
- от 20 до 40% - уровень состояния «низкое». Требуется техническое обслуживание (замена подшипников, проверка состояния изоляции и т.д.), возможен временный вывод оборудования из строя;
- от 40 до 60% - уровень «нормальное». Требуется техническое обслуживание (ревизия, осмотр, проверка состояния узлов) без вывода оборудования из строя;
- от 60 до 80% - уровень «выше нормального». Требуется дополнительная обработка данных, полученных в ходе диагностики. Уровень подразумевает обработку данных для определения возможных неконтролируемых в данный момент неисправностей, косвенно влияющих на значения контролируемых параметров;
- от 80 до 100 % - уровень «очень высокое». Синхронный генератор находится в рабочем состоянии, никаких дополнительных действий, кроме записи показаний системы, не требуется.

Для реализации работы модели задавались массивы данных, имитирующие получаемые спектры сопротивления изоляции, активной мощности, реактивной мощности, температуры обмотки статора, температуры обмотки ротора, температуры подшипника, вибрации генератора. Затем из диапазонов каждого параметра выбиралось усредненное значение, данные подавались на вход нейро-нечеткого контроллера.

На выходе из системы мы будем иметь конкретный результат диагностики о состоянии синхронного генератора в режиме реального времени. В нашем случае состояние генератора – 50 %, требуется техническое обслуживание (ревизия, осмотр, проверка состояния узлов) без вывода оборудования из строя[6].

### Вывод

Разработанная модель диагностики технического состояния судового синхронного генератора по диагностическим параметрам с использованием графических средств системы MATLAB может выполнить оценку системы нечеткого вывода для задачи диагностики.

Предложенная модель оценки технического состояния на основе нечеткой логики с учетом неисправности оборудования обеспечивает повышение экономичности, увеличение ресурсных характеристик и продление межремонтного периода эксплуатации судовых синхронных генераторов.

### Библиографический список

1. **Онищенко, Г.Б.** Развитие энергетики России. Направления инновационно-технологического развития / Г.Б. Онищенко, Г.Б. Лазарев. – М.: РСА, 2008. – 200 с.
2. **Стеклов, А.С.** Нейро-нечеткая модель диагностирования технического состояния синхронного генератора / А.С. Стеклов, Д.С. Подковырин // Главный энергетик. 2015. № 11–12. С. 34–42.
3. **Васенин, А.Б.** Нечеткие модели и алгоритмы управления ветроэнергетическими установками / А.Б. Васенин, О.В. Крюков, А.В. Серебряков // Управление в технических системах (МКПУ-2012). – СПб.: ИПУ им. В.А. Трапезникова (РАН). 2012. С. 467–469.
4. **Серебряков, А.В.** Оптимизация диагностирования электромеханической части ветроэнергетических установок // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2013. № 3. С. 39–46.
5. **Серебряков, А.В.** Дифференцирование нагрузки в системах электроснабжения автономных потребителей / А.В. Серебряков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2015. № 2 (109). С. 203–209.
6. **Крюков, О.В.** Метод и система принятия решений по прогнозированию технического состояния электроприводных газоперекачивающих агрегатов / О.В. Крюков, А.В. Серебряков // Электротехнические системы и комплексы. 2015. № 4 (29). С. 35–38.

*Дата поступления  
в редакцию 15.01.2016*

**A.S. Steklov, A.V. Serebryakov, V.G. Titov**

### SYSTEM OF DIAGNOSTICS OF TECHNICAL STATE MARINE SYNCHRONOUS GENERATOR

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

A mathematical model for diagnostics of the synchronous generator of ship power station in operation. The paper shows the implementation of one of the modules of the expert system with application of fuzzy logic to diagnostics of technical condition of ship's synchronous generator. The obtained surface neuro-fuzzy inference, allowing to establish the dependence of values of the output variable from the values of the input variables for the fuzzy model. The model of estimation of technical condition on the basis of fuzzy logic taking into account equipment failures, providing increase of efficiency, increase of resource characteristics and extension of overhaul period of operation of ship synchronous generators

*Key words:* synchronous generator, diagnostics, fuzzy logic.

УДК 621.311.26

Е.Н. Соснина, А.В. Шалухо, И.А. Липужин, Т.А. Александрова

**ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ  
ВЕТРО-ДИЗЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
ЭНЕРГОУДАЛЕННЫХ ПОСЕЛЕНИЙ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Статья посвящена обоснованию экономической эффективности применения комбинированных источников энергии на основе дизель-генераторных и ветровых энергетических установок при проектировании и реконструкции локальных систем электроснабжения энергоудаленных объектов. Приведены основные этапы проектирования ветро-дизельной электростанции и методика оценки экономической эффективности ее сооружения. На примере энергоудаленного поселения Мурманской области даны расчеты экономической эффективности замены существующих дизельных энергоустановок на ветро-дизельную электростанцию. Результаты расчета показали, что сооружение комбинированной ветро-дизельной электростанции позволит снизить себестоимость вырабатываемой электроэнергии более чем на 40%.

*Ключевые слова:* ветро-дизельная электростанция, энергоудаленный потребитель, локальная система электроснабжения, экономическая эффективность.

В России зона децентрализованного электроснабжения охватывает около 70% территории страны [1]. Электроснабжение энергоудаленных потребителей или потребителей, присоединение которых к централизованной электрической сети невозможно (из-за дефицита мощности, в силу особенностей рельефа и др.), осуществляется от автономных источников энергии, как правило, от дизельных электростанций (ДЭС). К основным преимуществам ДЭС относят высокую производительность, надежность, компактность, многообразие их модификаций и типов исполнений. Однако ДЭС имеют серьезные недостатки: высокая стоимость привозного дизельного топлива, зачастую трудности и перебои в доставке топлива, необходимость постоянной дозаправки, высокий уровень шума, вредные выбросы.

Комбинированное использование ДЭС с возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ) является решением проблем высокой стоимости топлива и экологической безопасности.

Для районов с высокими скоростями ветра (более 5 м/с) наиболее перспективным вариантом комбинирования источников энергии является ветро-дизельная электростанция (ВДЭС). При этом ДЭС обеспечивает гарантированное питание электропотребителей, а ветроэнергетическая установка (ВЭУ) позволяет сократить затраты на топливо и снизить вредные выбросы в окружающую среду. В России уже имеется опыт эксплуатации ВДЭС в республиках Коми, Карелия, Саха, в Ленинградской, Архангельской, Ростовской и Мурманской областях, на Курильских островах, в Красноярском крае, на Камчатке [2]. Однако российские инвесторы не спешат вкладывать деньги в сооружение ВДЭС, поскольку технологии возобновляемой энергетики считаются дорогостоящими при низкой эффективности.

Цель проводимых исследований заключается в обосновании экономической эффективности применения ВДЭС в локальных системах электроснабжения (ЛЭС) энергоудаленных объектов. Объектом исследований выбрано с. Чапома численностью 81 чел., расположенное в Мурманской области на берегу Белого моря. Расстояние до ближайшего районного центра 320 км. Сообщение с другими поселениями осуществляется только воздушным транспортом. В селе функционирует рыбный колхоз. Энергообеспечение с. Чапома осуществляется от ДЭС.

Задачи исследования:

- на примере выбранного объекта рассмотреть основные этапы проектирования ВДЭС;
- провести анализ экономической эффективности проекта.

Основными результатами исследований должны стать ориентировочный срок окупаемости проекта и сравнительная оценка себестоимости электроэнергии от ВДЭС с существующим вариантом генерации электроэнергии от ДЭС.

### Основные этапы проектирования ветро-дизельной электростанции и методика оценки экономической эффективности проекта

Основные этапы проектирования ВДЭС включают: оценку целесообразности использования ВЭУ; определение мощностей ВЭУ и ДЭС; разработку электрической структурной схемы; выбор электрооборудования.

1. Целесообразность использования ВЭУ определяется двумя основными факторами: потенциалом ветровой энергии местности расположения объекта и графиком электрической нагрузки объекта.

Оценка потенциала ветровой энергии заключается в анализе данных скоростей ветра. Анализируется средняя скорость ветра; ее изменения в течение суток, месяца, года; определяются максимальная и минимальная скорости ветра; рассчитываются частота изменений скорости ветра и повторяемость градаций скорости ветра. Полученные данные будут использованы для определения вырабатываемой мощности ВЭУ.

Вывод о целесообразности использования ВЭУ делается после сравнения графика вырабатываемой мощности ВЭУ с графиком нагрузки объекта.

2. Выбор мощностей ВЭУ и ДЭС производится на основе данных о графиках нагрузки (ГН) и потребления электроэнергии объектом.

Построение ГН основано на данных о количестве, мощности, коэффициентах загрузки  $K_3$  и коэффициентах включения  $K_в$  электроприемников (ЭП).  $K_3$  и  $K_в$  необходимы для расчета коэффициента использования  $K_и$ , который учитывается при определении средней за месяц потребляемой мощности каждого ЭП:

$$P_{\text{ср}} = P_{\text{уст}} \cdot K_{\text{и}}, \quad (1)$$

где  $P_{\text{ср}}$  – средняя за месяц мощность ЭП;  $P_{\text{уст}}$  – установленная мощность ЭП;  $K_{\text{и}}$  – коэффициент использования.

Коэффициент использования определяется по формуле

$$K_{\text{и}} = K_3 \cdot K_{\text{в}}, \quad (2)$$

где  $K_3$  – коэффициент загрузки;  $K_{\text{в}}$  – коэффициент включения.

Групповой ГН объекта строится суммированием индивидуальных ГН отдельных ЭП.

Мощность ДЭС должна покрывать всю потребляемую мощность, чтобы в периоды безветрия электроснабжение потребителей не прерывалось.

При значительной нагрузке генерацию лучше осуществлять несколькими маломощными ВЭУ, чем одной энергоустановкой с большой установленной мощностью. В этом случае при выходе ВЭУ из строя будет потеряна меньшая доля возобновляемой электроэнергии.

На этапе проектирования необходимо не только выбрать мощности источников питания, но и определить оптимальное соотношение их мощностей. Для экономии дизельного топлива в периоды работы ВЭУ рекомендуется, чтобы мощность ВЭУ покрывала 50 % потребляемой мощности объекта.

3. Разработка структурной схемы ВДЭС.

Для эффективной работы ВДЭС схема сопряжения источников и нагрузки должна позволять осуществлять три режима работы, когда потребляемая объектом мощность обеспечивается:

- ветроустановкой;
- дизельной электростанцией;
- параллельной работой ВЭУ и ДЭС.

Наиболее распространенными схемами, позволяющими ВДЭС осуществлять данные режимы, являются схемы сопряжения источников с шиной переменного или постоянного

тока. Выбор схемы производится с учетом требований к качеству выдаваемой электроэнергии и стоимости проекта.

4. При проектировании ВДЭС важными вопросами являются выбор типа и модели ВЭУ и ДЭС.

Ключевыми параметрами при выборе ВЭУ являются: мощность; стартовая скорость ветра, при которой начинает вращаться турбина; стоимость и тип генератора. Стоимость ВЭУ напрямую связана с ее мощностью. С увеличением мощности, как правило, увеличиваются начальная, номинальная, рабочая и предельная скорости ветра. Величина начальной скорости ветра накладывает ограничения на выбор ВЭУ в местах с небольшой и нестабильной скоростью ветра (например, где скорость ветра носит сезонный характер или в определенный продолжительный период времени отсутствует).

Необходимо выбирать ВЭУ одного типа и одной фирмы для более удобного обслуживания. Выбор ДЭС зависит от мощности, расхода топлива, условий эксплуатации и стоимости. Работа ДЭС со значительной недогрузкой недопустима, поэтому рекомендуется выбирать несколько дизельных генераторов, для возможности отключения части неработающих установок в часы минимума нагрузки.

Для оценки экономической эффективности проекта выполнен сравнительный анализ себестоимости 1 кВт·ч электроэнергии, произведенной ДЭС и ВДЭС.

Себестоимость 1 кВт·ч электроэнергии  $C_{эл}$ , руб/кВт·ч, [3],

$$C_{эл} = \frac{H_n \cdot K + C}{W}, \quad (3)$$

где  $H_n$  – нормативный коэффициент амортизации;  $K$  – общие капиталовложения, руб.;  $C$  – общегодовые эксплуатационные расходы, включающие расходы на оплату труда обслуживающего персонала, на плановый ремонт и топливо, руб.;  $W$  – общее количество электроэнергии, вырабатываемое электростанцией в течение года, кВт·ч.

При эксплуатации только ДЭС вся электроэнергия вырабатывается только ее генераторами. Для расчета себестоимости определяется общее потребление объектом электроэнергии за год.

При использовании ВДЭС, в учете себестоимости электроэнергии учитывается только величина энергии, вырабатываемая ДЭС, а энергия, вырабатываемая ВЭУ, считается бесплатной. Таким образом, для расчета по формуле (3) необходимо определить долю энергии, вырабатываемую только ДЭС.

Для определения общегодовых эксплуатационных затрат необходимо рассчитать затраты на топливо в год, руб., по формуле

$$C_{топ} = Q \cdot p \cdot k, \quad (4)$$

где  $Q = W \cdot M$  – количество топлива в год, л;  $p$  – стоимость дизельного топлива, руб./л;  $k$  – поправочный коэффициент на доставку топлива, учитывающий район и сложность поставки.

Расход топлива для выработки 1 кВт·ч электроэнергии

$$M = \frac{q}{P}, \quad (5)$$

где  $q$  – расход топлива в час, л. (определяется по паспортным данным ДЭС);  $P$  – вырабатываемая ДЭС мощность, кВт.

Положительный эффект  $\Delta$  от сооружения ВДЭС

$$\Delta = (C_{эл.ДЭС} - C_{эл.ВДЭС}) \cdot W, \quad (6)$$

где  $C_{эл.ДЭС}$  и  $C_{эл.ВДЭС}$  – себестоимости 1 кВт·ч электроэнергии, вырабатываемой ДЭС и ВДЭС соответственно.

Эффективность проекта установки ВДЭС определяется на основе расчета показателей экономической эффективности: чистого дисконтированного дохода  $NPV$ , индекса доходности  $PI$ , внутренней нормы доходности  $IRR$  и срока окупаемости.



### Проектирование ветро-дизельной электростанции

Для оценки целесообразности установки ВДЭС выполнена оценка потенциала ветровой энергии в месте расположения с. Чапома. Для этого использованы данные архива погоды с метеостанции в с. Пялица, находящемся в 31 км от объекта исследования (ближайшая метеостанция) [4]. За период с 01.12.2014 по 30.11.2015 рассчитана средняя скорость ветра за каждые сутки, определена повторяемость скорости ветра в течение каждого месяца (градации скорости ветра), построен график среднемесячных скоростей ветра (рис. 1).

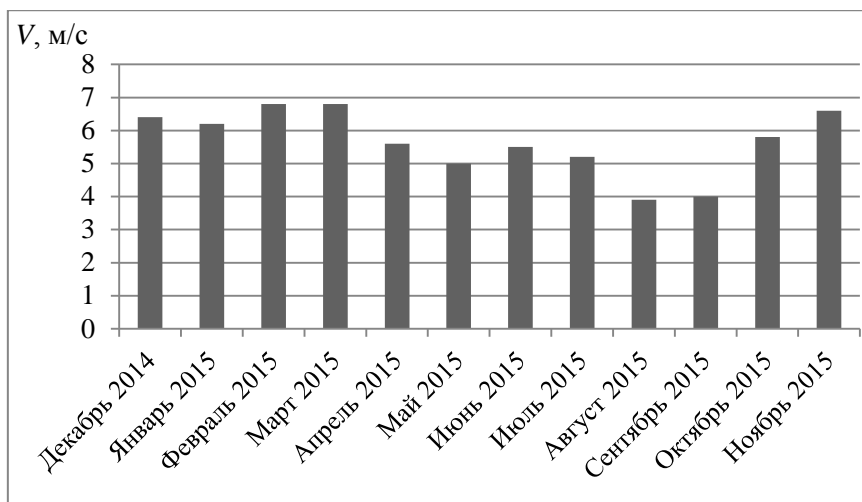


Рис. 1. График среднемесячных скоростей ветра

По результатам расчета среднегодовая скорость ветра составила 5,65 м/с, что характеризует перспективность использования ВЭУ.

При построении графика нагрузки п. Чапома все ЭП разделены на три группы: ЭП, относящиеся к жилым домам, и силовое оборудование; ЭП, используемые в рыбных цехах; освещение. Количество ЭП определено на основании того, что в селе находится 30 жилых домов и два рыбных цеха рыболовецкого колхоза.

Приняты допущения, что график нагрузки ЭП в жилых домах и силового оборудования не изменяется по месяцам, а график нагрузки рыбного цеха изменяется в зависимости от времени года (от улова рыбы). При расчете нагрузки освещения учитывалась средняя по месяцам продолжительность светового дня в Мурманской области и время использования светильников в жилых домах.

Полученный годовой групповой график нагрузки поселения представлен на рис. 2.

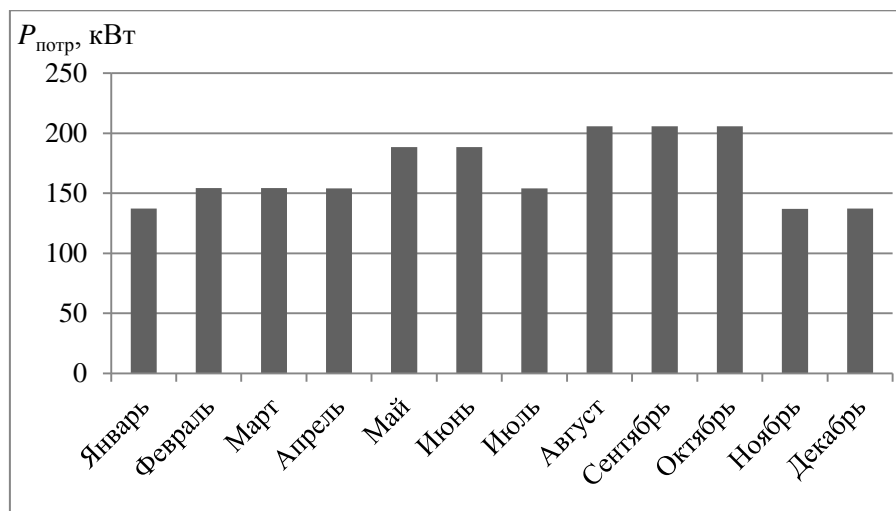
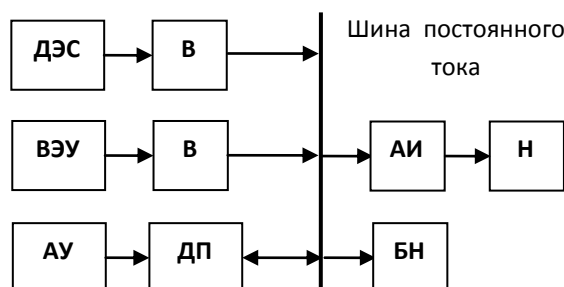


Рис. 2. Групповой график нагрузки села Чапома

Годовая средняя мощность, потребляемая поселением, составила 168,55 кВт. Максимальная за год мощность наблюдается в октябре (205,85 кВт).

Для сопряжения ВЭУ и ДЭС выбрана схема со вставкой постоянного тока [5] (рис. 3).



**Рис. 3. Структурная схема ВДЭС с шиной постоянного тока:**

АИ – автономный инвертор; АУ – аккумуляторное устройство; БН - балластная нагрузка; В – выпрямитель; ДП - двунаправленный преобразователь; Н - нагрузка

Преимуществом выбранной схемы является улучшение качества электроэнергии благодаря применению шины постоянного тока. Также в схеме не требуется синхронизация различных источников энергии, что может позволить наращивать или уменьшать установленную мощность энергетического комплекса по принципу модульности. Однако использование схемы усложняет конструкцию (требуется установка выпрямителей и инвертора), что увеличивает стоимость энергетического комплекса и усложняет систему управления.

Выбор типа энергоустановок основан на сравнительном анализе характеристик нескольких моделей фирм-производителей, производства которых расположено наиболее близко к объекту исследования. В результате в качестве источников энергии выбраны:

- ВЭУ Condor Air в количестве четырех штук мощностью 50 кВт каждая [6];
- ДЭС Iveco в количестве трех штук мощностью 40 кВт каждая и одна ДЭС Iveco мощностью 100 кВт.

Кроме источников энергии, выбраны аккумуляторные батареи, выпрямители и инвертор. Полный перечень оборудования приведен в табл. 1.

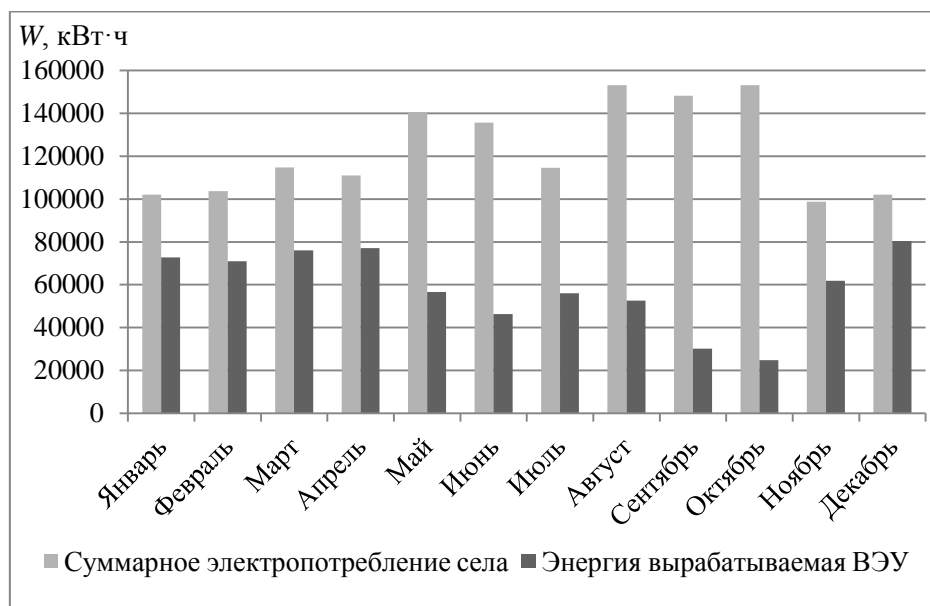
*Таблица 1*

**Оборудование ВДЭС**

Оборудование	Количество, шт.
Ветроустановка Condor Air - 50 кВт (модель CONDOR AIR WES 380/50-50)	4
Аккумулятор Delta DTM 12200 (AGM), 200 Ач	160
Выпрямитель ИПС-3000-380/220В-15А-3U	4
Инвертор PI 50000 Вт (380В)	1
Дизельная электростанция Iveco (FPT) GE F3250 (40 кВт)	3
Дизельная электростанция Iveco (FPT) GE NEF125M (100 кВт)	1

На основе результатов оценки потенциала ветровой энергии, суммарного группового графика нагрузки поселения и мощностных характеристик выбранных ВЭУ определено соотношение годового потребления и выработки электроэнергии (рис. 4). На рис. 4 показана доля в электропотреблении, которая будет покрываться за счет ВЭУ.

Из графика видно, что с ноября по апрель доля ВЭУ в покрытии требуемой электроэнергии будет составлять не менее 60%. Это позволит значительно сократить расход дизельного топлива по сравнению с вариантом электроснабжения только от ВДЭС.



**Рис. 4. Соотношение потребляемой электроэнергии и вырабатываемой ветроустановками**

#### Результаты анализа экономической эффективности проекта

Для расчета себестоимости электроэнергии определен расход топлива ДЭС по формуле (5). Из паспортной характеристики дизель-генераторов известно, что расход топлива для Iveco (FPT) GE F3250 (40 кВт) при 80% нагрузке составляет 10,2 л/ч; а для Iveco (FPT) GE NEF125M (100 кВт) при 75% нагрузке – 24,1 л/ч [7]. Для обеих ДЭС расход топлива для выработки 1 кВт·ч электроэнергии равен 0,32 л.

Стоимость дизельного топлива в Мурманской области составляет 37,7 руб./л [8]. Учитывая электропотребление п. Чапома 1477251 кВт·ч в год, себестоимость 1 кВт·ч электроэнергии, рассчитанная по формуле (3), равна 18,51 руб./кВт·ч.

При эксплуатации ВДЭС, электропотребление поселения, непокрытое ВЭУ, составит 771852,68 кВт·ч в год (рис. 4). Тогда себестоимость 1 кВт·ч электроэнергии от ВДЭС составит 10,74 руб./кВт·ч.

Из проведенного расчета видно, что внедрение четырех установок ВЭУ типа Condor Air - 50 кВт с заменой старых дизель-генераторов на новые: (три дизель-генератора 40 кВт и 1 дизель-генератор 100 кВт) является эффективным способом снижения стоимости электроэнергии. Себестоимость 1 кВт·ч электроэнергии снизилась в 1,723 раза, или на 41,98 %.

Капитальные вложения на сооружение ВДЭС, приобретение, доставку и установку оборудования (табл. 1) составят 22,260 млн руб. Положительный эффект от сооружения ВДЭС, определенный по формуле (6), уже в первом году с учетом текущей цены на топливо составил 11,5 млн руб.

Чистый дисконтированный доход составил 949 307,46 руб., индекс доходности равен 1,043 руб., что указывает на эффективность проекта. Внутренняя норма доходности также превышает коэффициент дисконтирования. Рассчитан срок окупаемости проекта (рис. 5).

Недисконтированный срок окупаемости составляет 2 года, дисконтированный - 3 года. Таким образом, доказывается высокая эффективность проекта, в котором инвестиции окупаются уже на третий год эксплуатации ВДЭС. Учитывая, что срок службы основного оборудования ВДЭС составляет 20 лет, проект гарантирует конечную окупаемость инвестиций по истечении срока его реализации.

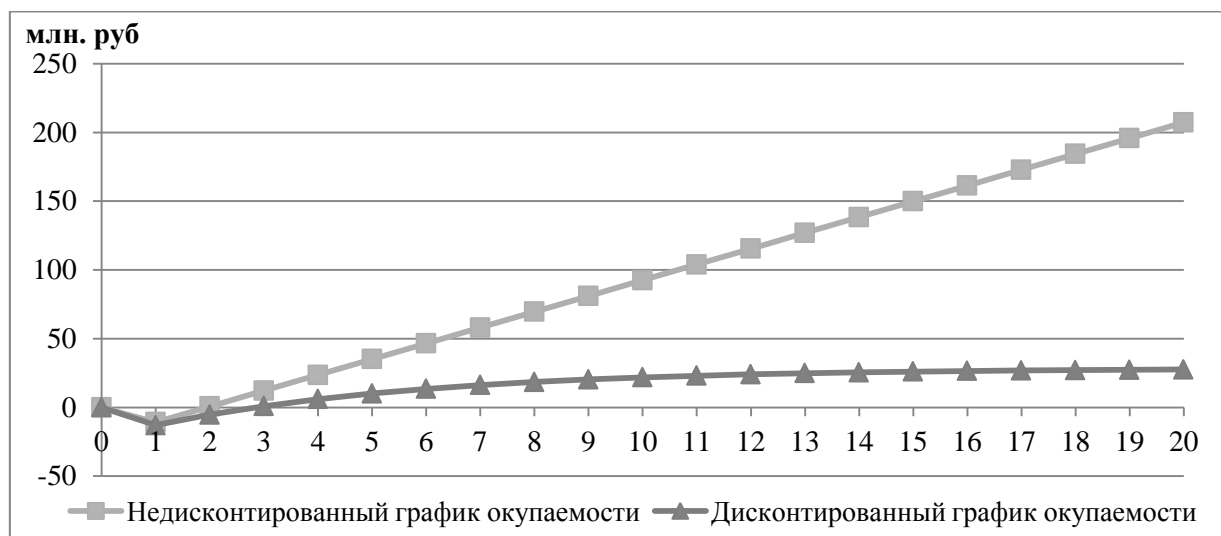


Рис. 5. Недисконтированный и дисконтированный срок окупаемости

### Выводы

Произведен технико-экономический анализ применения ВДЭС для электроснабжения энергоудаленных потребителей.

На примере с. Чалома Мурманской области рассмотрен вариант замены существующих ДЭС на ВДЭС, определены основные этапы проектирования ВДЭС и проведены соответствующие расчеты. Для объекта исследования выбрана комбинация источников энергии: ВЭУ Condor Air в количестве четырех штук мощностью 50 кВт каждая, ДЭС Ivesco в количестве трех штук мощностью 40 кВт каждая и одна ДЭС Ivesco мощностью 100 кВт, позволяющая покрывать большую часть потребляемой мощности за счет ВЭУ.

Выполнен сравнительный анализ себестоимости 1 кВт·ч электроэнергии при существующем варианте электроснабжения (только от ДЭС) и при сооружении ВДЭС. Экономическая оценка показала, что проект эффективен и позволяет снизить количество потребляемого ДЭС топлива на 225 727,49 л в год. Вследствие этого снижается себестоимость 1 кВт·ч электроэнергии на 42 %.

### Библиографический список

1. **Ермоленко, Г.В.** Оптимизация схем децентрализованного энергоснабжения с использованием возобновляемых источников и накопителей энергии / Г.В. Ермоленко, Б.В. Ермоленко, Ю.А.Фетисова // Энергия: экономика, техника, экология. 2013. № 12. С. 11–19.
2. Возобновляемые источники энергии [Электронный ресурс]. URL: <http://russiagreen.ru> (дата обращения: 13.09.2015).
3. **Лукутин, Б.В.** Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями: учеб. пособие / Б.В. Лукутин, И.О. Муравлев, И.А. Плотников. – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2015. – 128 с.
4. Архив погоды в Пялице // Расписание погоды [Электронный ресурс]. URL: [http://rp5.ru/Архив\\_погоды\\_в\\_Пялице](http://rp5.ru/Архив_погоды_в_Пялице) (дата обращения: 03.12.2015).
5. **Соснина, Е.Н.** Исследование устойчивости электротехнических комплексов с ветродизельными электростанциями / Е.Н. Соснина [и др.] // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева / НГТУ им. Р.Е. Алексева. – Нижний Новгород, 2015. № 1 (108). С. 203–208.
6. Ветрогенератор Condor Air 380-50 кВт // EDS Group [Электронный ресурс]. URL: <http://energy-ds.ru/catalog/generating/vetrogenerator/vetrogenerator-condor-air-20-60kvt/vetrogenerator-condor-air-380-50-kvt.html> (дата обращения: 20.12.2015)

7. Дизельная электростанция Iveco (FPT) GE F3250 (40 кВт) // Бриз Моторс® – дизельные электростанции. Авторизованный дистрибьютор Iveco Motors [Электронный ресурс]. URL: <http://www.brizmotors.ru/equipment/iveco/gef50ma/> (дата обращения: 24.12.2015).
8. Цены на бензин, ДТ, газ в Мурманской области // Цены на бензин и карта АЗС России [Электронный ресурс]. URL: [http://www.benzin-price.ru/price.php?region\\_id=51](http://www.benzin-price.ru/price.php?region_id=51) (дата обращения: 20.12.2015).

*Дата поступления  
в редакцию 15.01.2016*

**E.N. Sosnyna, A.V. Shalukho, I.A. Lipuzhin, T.A. Alexandrova**

### **FEASIBILITY STUDY OF WIND-DIESEL POWER STATIONS FOR ELECTRIC POWER SUPPLY OF ENERGY REMOTE SETTLEMENTS**

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

**Purpose:** The article is devoted to the justification of the economic efficiency of combined energy sources on the basis of diesel generator and wind power plants in the design and reconstruction of local power supply systems of energy remote facilities.

**Methodology:** The main stages of the design of wind-diesel power station and technique of assessing the economic efficiency of its construction are presented. There are three stages of wind-diesel power station design: evaluation of the feasibility of using wind turbines; determining the power of power plants and diesel generator; developing an electric block diagram; selection of electrical equipment.

**Results:** The economic efficiency replacing the existing diesel power plants in the wind-diesel power station are calculated on the example of energy remote settlements of the Murmansk region. The construction of a combined wind-diesel power station will reduce the generated electricity cost by more than 40% showed the calculation results.

*Key words:* wind-diesel power station, energy remote consumer, local power supply system, economic efficiency.

УДК 621.039

**П.В. Арсенов, А.В. Варенцов, Д.В. Доронков, К.С. Коновалов,  
Е.Н. Полозкова, А.Е. Хробостов**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛОКАЛЬНОЙ  
ГИДРОДИНАМИКИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ТВС-КВАДРАТ РЕАКТОРА PWR  
ПРИ ПОСТАНОВКЕ ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕЙ ДИСТАНЦИОНИРУЮЩЕЙ РЕШЕТКИ  
С «ДЕФЛЕКТОРАМИ УВЕЛИЧЕННОЙ ПЛОЩАДИ»**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приведены результаты экспериментальных исследований локальной гидродинамики теплоносителя в тепловыделяющих сборках реакторов PWR за перемешивающей дистанционирующей решеткой, снабженной дефлекторами увеличенной площади. Исследования проводились на аэродинамическом стенде методом диффузии газового трассера. Анализ результатов исследований течения теплоносителя в пучках твэлов ТВС–КВАДРАТ позволяет выявить ряд особенностей, важных для оценки эффективности перемешивающих решеток. Полученные результаты используются для уточнения локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя при обосновании теплотехнической надежности активных зон реакторов PWR, являются базой данных для верификации CFD-кодов и программ детального поэлементного расчета активных зон ядерных реакторов с ТВС–КВАДРАТ.

*Ключевые слова:* ядерный реактор, тепловыделяющая сборка, гидродинамика теплоносителя, перемешивающая дистанционирующая решетка.

В АО «ОКБМ Африкантов» разработана конструкция ТВС–КВАДРАТ для активной зоны реакторов типа PWR, конкурентоспособная с зарубежными аналогами по надежности, безопасности, экономичности и технологичности. В частности, в конструкции ТВС–КВАДРАТ использованы апробированные и зарекомендовавшие себя в ТВС для реакторов ВВЭР конструкторские решения по силовому каркасу и дистанционирующей решетке, которые позволяют повысить эксплуатационную надежность ядерного топлива [1].

Одна из конструктивных особенностей ТВС–КВАДРАТ – наличие перемешивающих дистанционирующих решеток (ПДР) и перемешивающих решеток (ПР), одними из функций которых являются турбулизация потока теплоносителя и интенсификация процессов теплообмена. Установка подобных элементов влияет на эффективность перемешивания теплоносителя и, как следствие, на величину критических тепловых потоков и запаса до кризиса теплоотдачи. В поперечном сечении кассеты условно выделяют две характерные области: область стандартных ячеек и ячейки в районе направляющего канала (НК). В данных областях, различающихся геометрическими характеристиками, параметрами теплового потока и формированием потока теплоносителя, важно знать локальные гидродинамические характеристики.

В настоящее время в конструкции отечественной ТВС–КВАДРАТ планируется применение решеток с новыми дефлекторами увеличенной площади, что требует обоснования теплотехнической надежности активных зон и определения влияния конструкции решеток на гидродинамику теплоносителя.

Изучение гидродинамики пучков твэлов и активных зон реакторов целесообразно проводить на масштабных и полноразмерных моделях кассет и активных зон на аэро- и гидродинамических стендах. Ввиду этого экспериментальное исследование локальных характеристик потока является актуальной задачей, решение которой позволяет обосновать теплотехническую надежность активных зон реакторов PWR [2].

#### **Описание экспериментального стенда**

Исследования проводились на экспериментальном стенде, представляющем собой аэродинамический разомкнутый контур, через который прокачивается воздух [3]. Экспериментальная модель, представляющая собой 49–стержневой фрагмент ТВС–КВАДРАТ реак-

тора PWR, выполнена с коэффициентом геометрического подобия  $K_{\Gamma}=4,2$ , и состоит из твэлов-имитаторов, имитаторов направляющего канала, поясов дистанционирующих и перемешивающих решеток [4]. Исследуемые пояса выполнены в виде пластинчатых решеток, их верхние кромки снабжены дефлекторами увеличенной площади.

### Измерительный комплекс

В состав измерительного комплекса входят: газоанализатор, расходомер газа EL-FLOW, сигнализатор концентрации газа X 22.1, ПЭВМ с соответствующим программным обеспечением, трубки Пито-Прандтля, блок аналоговых преобразователей давления.

Измерение концентрации углеводородов  $C_nH_m$  в газо-воздушной смеси осуществлялось с помощью газоанализатора. Погрешность измерения при этом составляет  $\pm 1,5\%$  (1000...10000 ppm). Для поддержания заданного расхода газа использовался массовый расходомер EL-FLOW, погрешность составляет не более 0,5%. Для определения градиента перераспределения концентрации из зоны подачи трассера в соседние ячейки изготовлено два измерительных твэл-имитатора. На каждый твэл-имитатор крепились 15 Г-образных отборных штуцеров (рис. 1). Затеснение проходного сечения характерной ячейки Г-образными штуцерами не превышает 2%.



Рис. 1. Общий вид твэл-имитаторов с устройствами отбора трассера

Снятие показаний с трубки Пито-Прандтля производилось блоком аналоговых преобразователей давления, представляющих собой набор преобразователей избыточного давления САПФИР-22Р-ДИ и разности давлений САПФИР-22Р-ДД. Диапазон измерений данных преобразователей 0-4 кПа. Предел допускаемой основной погрешности составляет  $\pm 0,25\%$ .

### Методики исследования гидродинамики теплоносителя на экспериментальном стенде

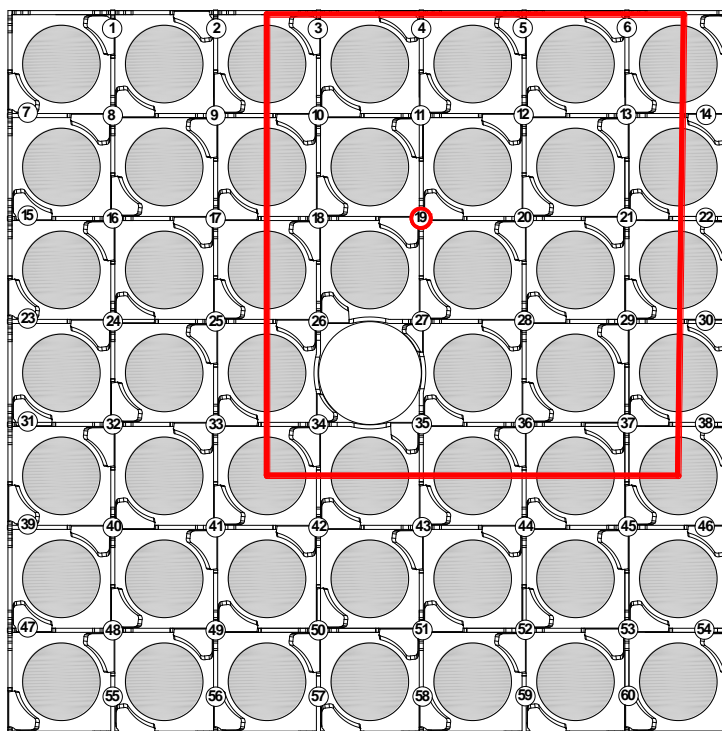
Изучение картины течения потока теплоносителя в экспериментальной модели проводили методом диффузии примесей (метод трассера). Метод основан на регистрации поперечного потока массы по некоторой переносимой субстанции (краски, соли, газа и т.д.). В качестве трассера использовался газ пропан, поскольку он обладает наиболее близкими к воздуху свойствами, возможностью быстрой и достаточно точной регистрации, что позволяет получать большие объемы данных в ограниченное время.

Изложим методику проведения экспериментальных исследований локальной гидродинамики на экспериментальном стенде:

1. Поперечное сечение ЭМ разбивается на ячейки, каждой из которых присваивается свой индивидуальный порядковый номер (рис. 2).

2. Газовый трассер через впускной зонд подается в характерную ячейку ЭМ до пояса перемешивающей дистанционирующей решетки по ходу течения потока теплоносителя. Далее с помощью двух измерительных твэлов-имитаторов производится замер концентрации трассера газоанализатором во всех ячейках за поясом ПДР и в характерных сечениях по длине ЭМ.

3. По полученным данным строятся картограммы и графики зависимости распределения концентрации трассера от относительной координаты для характерных зон поперечного сечения ЭМ.



**Рис. 2.** Поперечное сечение экспериментальной модели ТВС-КВАДРАТ с указанием зоны подачи газового трассера 19 и исследуемой области

Определение расхода теплоносителя в отдельных ячейках экспериментальной модели производилось измерением осевой скорости по центрам ячеек трубкой Пито-Прандтля.

Расходы через исследуемые ячейки Гяч ЭМ определяются по формуле (1.1), а среднеинтегральные скорости через ячейки по формуле (1.2):

$$G_{\text{яч}} = \int_0^{F_{\text{яч}}} W_i \cdot dF \quad (1.1)$$

$$\overline{W}_{\text{яч}} = \frac{G_{\text{яч}}}{F_{\text{яч}}} \quad (1.2)$$

где  $\overline{W}_{\text{яч}}$  – среднеинтегральная скорость в ячейке;  $F_{\text{яч}}$  – площадь проходного сечения ячейки;  $W_i$  – скорость в  $i$ -й точке в ячейке.

### Представительность исследований

Важным этапом проведения любого экспериментального исследования является подтверждение его представительности. В активной зоне реактора PWR число Рейнольдса достигает  $4,5 \cdot 10^5$ , что труднодостижимо в лабораторных условиях. Но поскольку течение воды высокого давления в моделях ТВС моделируется воздухом на основе теории гидродинамического подобия, то в области автомодельности профиль относительной скорости ( $W_{\text{лок}}/W_{\text{ср.расх}}$ ) остается неизменным. Следовательно, исследования в зоне автомодельности позволят перенести результаты эксперимента на натурные условия течения теплоносителя в штатных ТВС. Соответственно для обоснования представительности исследований были проведены эксперименты по определению участков гидродинамической стабилизации потока и границ зон автомодельного течения [5].

Основной задачей исследования зоны автомодельности являлось нахождение нижней границы. Исследования в диапазоне чисел  $Re=2 \cdot 10^4 - 1 \cdot 10^5$  заключались в построении эмпирической зависимости коэффициента гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса. Согласно результатам, область автомодельного течения начинается в диапазоне чисел  $Re = (8,5-9) \cdot 10^4$ , что заведомо ниже числа Рейнольдса, достигаемого в экспериментальных исследованиях.



На аэродинамическом стенде были также экспериментально определены коэффициенты гидравлического сопротивления (КГС) исследуемой перемешивающей дистанционирующей решетки. Необходимость работ вызвана требованием соблюдения равенства местного гидравлического сопротивления натуральных решеток и решетки экспериментальной модели. Анализ результатов показывает, что конструкция перемешивающей решетки в диапазоне требуемых чисел Рейнольдса обеспечивают необходимое гидравлическое сопротивление, а их значения соответствуют гидравлическому сопротивлению натуральных решеток.

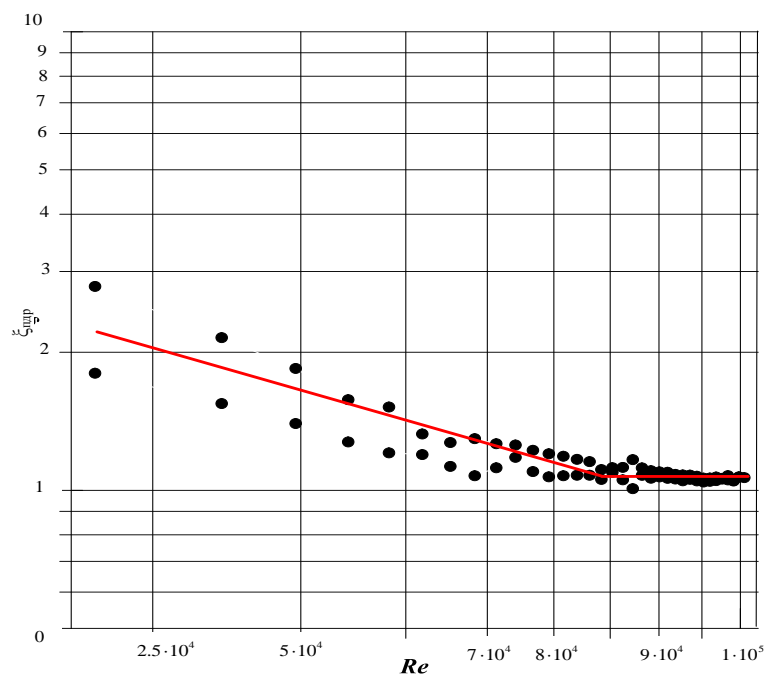


Рис. 3. Зависимость коэффициента местного гидравлического сопротивления перемешивающей решетки от числа  $Re$

### Результаты исследования распределения концентрации трассера

Комплексный анализ результатов измерения концентрации трассера по длине модели для характерных зон позволил выявить основные закономерности движения потока теплоносителя за поясом ПДР:

а) по построенным картограммам (рис. 4) и графику распределения концентрации трассера (рис. 5) видно симметричное распространение трассера из зоны подачи по направлению турбулизирующих дефлекторов. Такое движение продолжается на расстоянии  $\Delta l/d=10$  после ПДР.

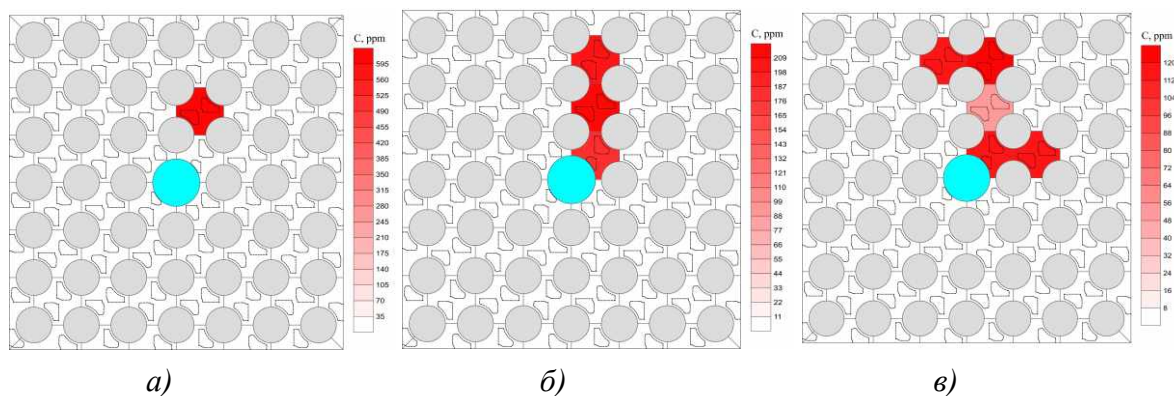
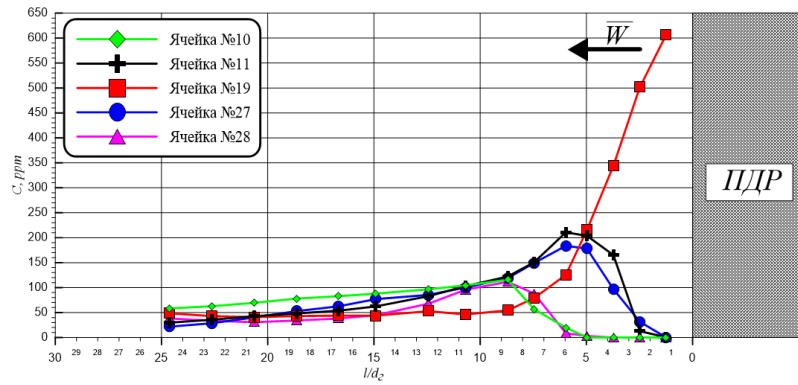


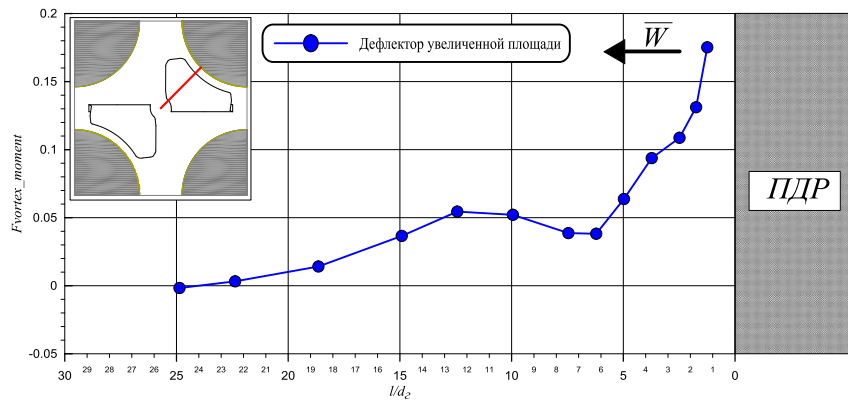
Рис. 4. Распределение концентрации трассера по сечению экспериментальной модели ( $w = 33,29$  м/с,  $Re=89000$ ):

$a - l/d = 1,24$ ;  $b - l/d = 4,97$ ;  $в - l/d = 8,7$

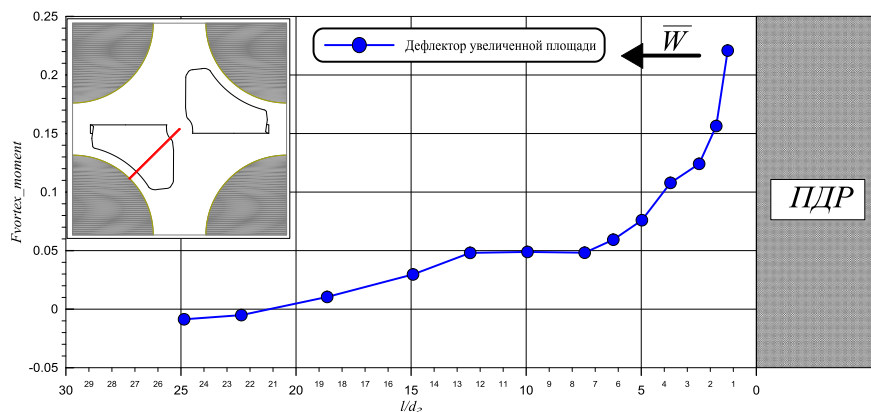


**Рис. 5.** График распределения концентрации трассера за поясом ПДР с дефлекторами увеличенной площади ( $\bar{w} = 33,29$  м/с,  $Re=89000$ )

б) графики распределения концентрации трассера, представленные на рис. 6 и рис. 7, свидетельствуют о направленном, плавно затухающем движении потока теплоносителя согласно ориентации турбулизирующих дефлекторов.

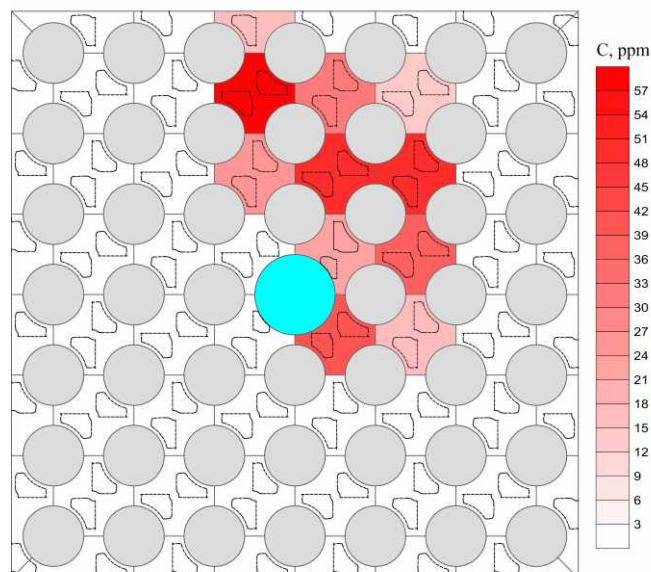


**Рис. 6.** График изменения коэффициента, определяющего интенсивность воздействия дефлекторов в исследуемой ячейке по соответствующему направлению



**Рис. 7.** График изменения коэффициента, определяющего интенсивность воздействия дефлекторов в исследуемой ячейке по соответствующему направлению

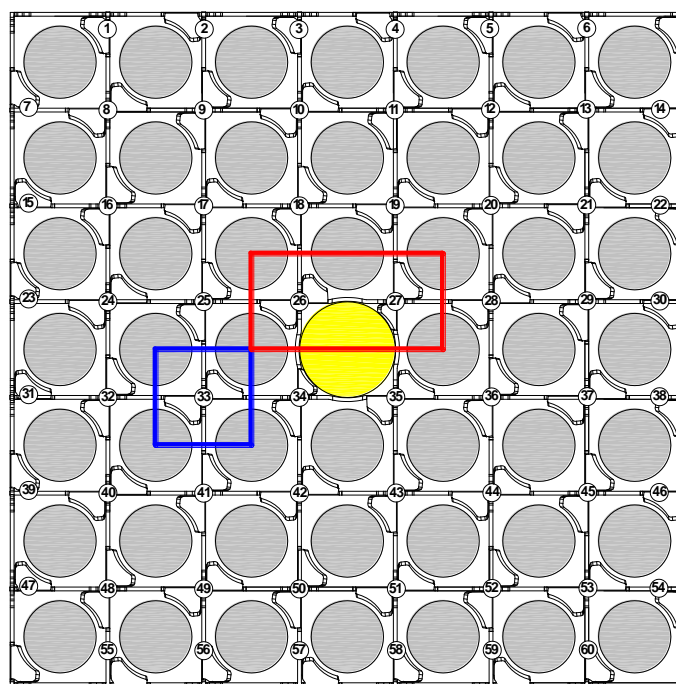
в) затухание массообменных процессов за поясом ПДР с дефлекторами увеличенной площади происходит на расстоянии  $\Delta l/d_г=17\div 20$ . В выходном сечении ЭМ трассер из зоны инъекции 19 распространился в 11 ячеек (рис. 8).



**Рис. 8. Распределение концентрации трассера по сечению экспериментальной модели для  $l/d = 24,61$  ( $\bar{w} = 33,29$  м/с,  $Re=89000$ )**

#### **Обобщение результатов исследований для определения расхода теплоносителя в модели ТВС – КВАДРАТ**

Экспериментальные исследования распределения осевой скорости, которые проводились в двух ячейках, прилежащих к направляющим каналам 26, 27, и в ячейке 33 (рис. 9), позволили определить перераспределение расхода теплоносителя в данной области, обусловленное различием в площадях проходного сечения ячеек, прилежащих к НК, по сравнению с площадью проходного сечения регулярной ячейки ТВС-КВАДРАТ и особенностями расположения дефлекторов в области НК (рис. 10).



**Рис. 9. Поперечное сечение экспериментальной модели ТВС-КВАДРАТ с указанием исследуемой ячейки 33, 26 и 27**

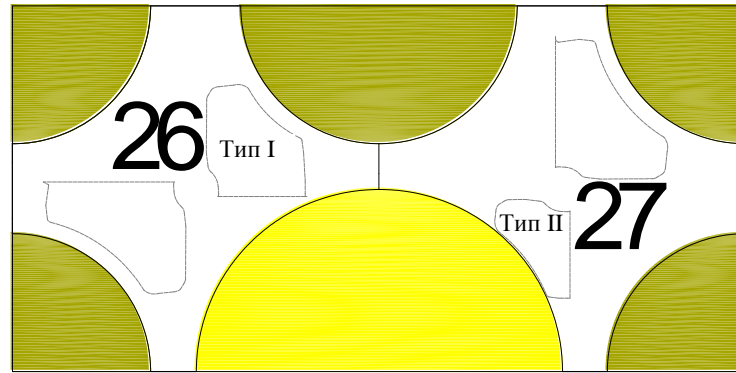


Рис. 10. Особенности конструкции турбулизирующих deflectоров в области НК

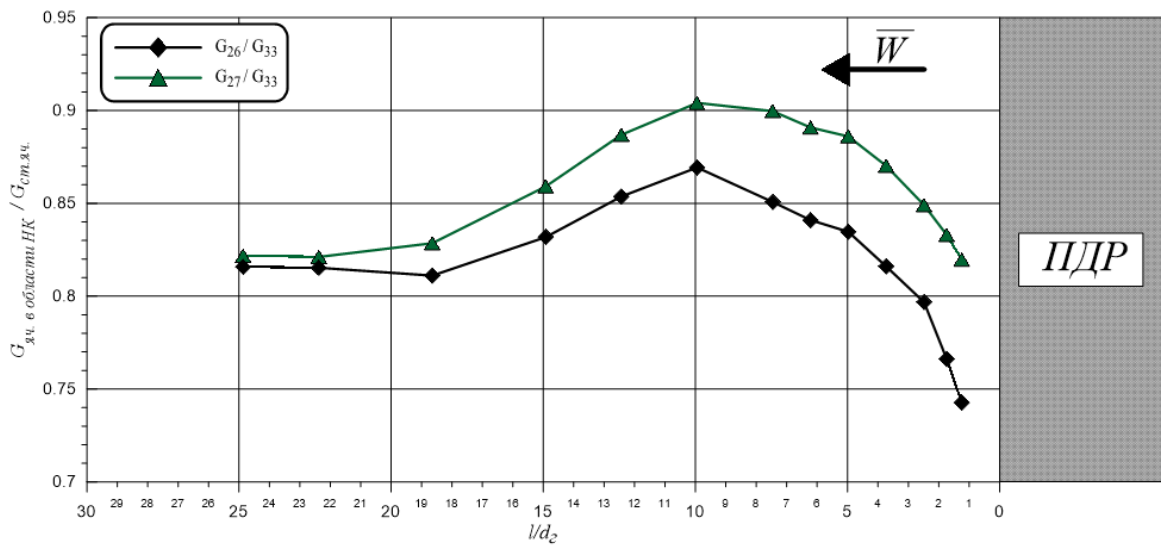


Рис. 11. Отношение расходов теплоносителя через ячейки 26 и 27, прилежащие к НК, к регулярной ячейке 33 при постановке ПДР с дополнительными deflectорами в области НК ( $\bar{w} = 33,29$  м/с,  $Re=89000$ )

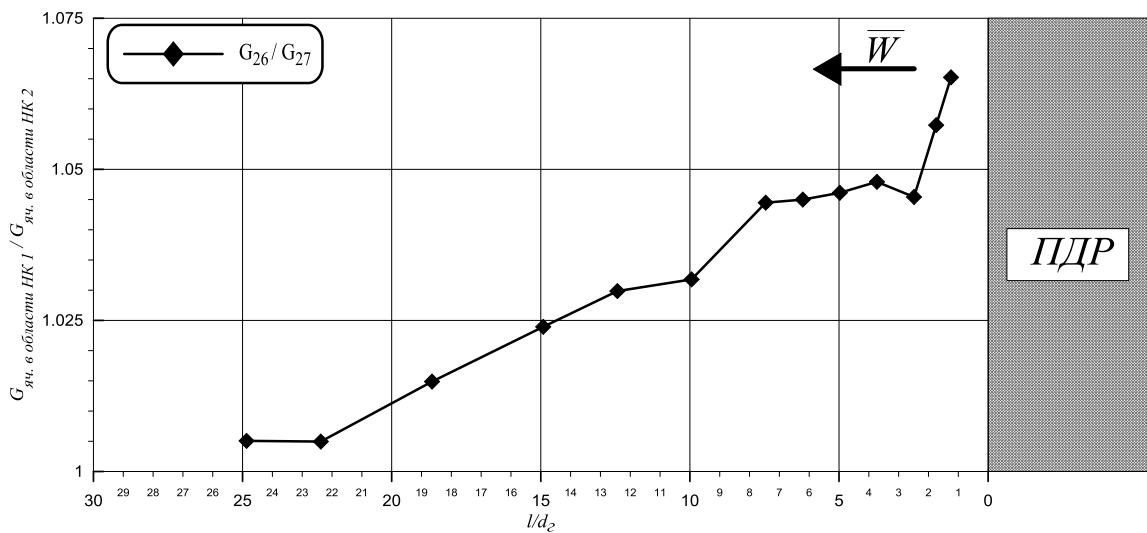


Рис. 12. Распределение расходов теплоносителя через ячейки 26 и 27 области НК ( $\bar{w} = 33,29$  м/с,  $Re=89000$ )

Определив осевую скорость и учитывая площадь проходного сечения ячеек, можно рассчитать расходы теплоносителя через регулярную ячейку и прилежащие к НК ячейки. Анализ полученных данных показал, что расход теплоносителя через ячейки области НК составляет 80% от расхода через регулярную ячейку. Данное расхождение в расходах практически неизменно на расстоянии  $\Delta l/d_T = 23$ .

Выравнивание расходов теплоносителя через ячейки области НК с различной конструкцией турбулизирующих элементов происходит через  $\Delta l/d_T = 25$ .

### Заключение

Комплексный анализ результатов исследований позволил выявить следующие закономерности формирования потока теплоносителя:

- движение потока за решетками происходит согласно ориентации дефлекторов. Данный факт указывает на то, что основным влиянием на формирование структуры течения потока оказывает направление дефлектора;
- возмущения, вносимые дефлекторами перемешивающей дистанционирующей решетки, носят затухающий характер. Затухание массообменных процессов за решеткой происходит на расстоянии  $\Delta l/d_T = 17 \div 20$ ;
- расход теплоносителя через ячейки области направляющего канала составляет 80% от расхода через стандартную ячейку, перераспределение расхода обусловлено различием в площадях проходного сечения, а также особенностями расположения дефлекторов в области направляющего канала;
- в области направляющего канала выравнивание расходов теплоносителя через ячейки с различной конструкцией турбулизирующих элементов происходит через  $\Delta l/d_T = 25$ .

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. **Бых, О.А.** Основное оборудование АЭС с корпусными реакторами на тепловых нейтронах / О.А. Бых [и др.]; под ред. С.М. Дмитриева. – М.: Машиностроение. 2013. – 203 с.
2. **Дмитриев, С.М.** Экспериментальное исследование локальной гидродинамики теплоносителя в ТВС – КВАДРАТ реактора PWR при постановке перемешивающих решеток с различными типами дефлекторов / С.М. Дмитриев [и др.] // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2015. №3 С. 63-70.
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.** Исследование локальной гидродинамики и межъячейкового массообмена потока теплоносителя в районе направляющих каналов тепловыделяющих сборок реакторов PWR / С.М. Дмитриев [и др.] // Промышленная энергетика. 2013. №12. С. 45–50.
5. **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. 252–257.

Дата поступления  
в редакцию 02.02.2016

---

P.V. Arsenov, A.V. Varentsov, D.V. Doronkov, K.S. Konovalov,  
E.N. Polozkova, A.E. Khrobostov

**INVESTIGATION OF LOCAL HYDRODYNAMICS OF THE COOLANT  
FLOW BEHIND THE MIXING GRID HAVING «LARGE SCALE» TYPE  
OF VANES 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 TVS-KVADRAT 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:** The study investigated local hydrodynamics in the nuclear reactor FA. The study revealed the heat carrier flow features in TVS-KVADRAT fuel assemblies of PWR reactors.

**Research limitations/implications:** The special databank created on the base of the experiment results. The data used for verifying CFD-codes to reduce conservatism on estimating the PWR reactor heat engineering reliability. Joint Stock Company OKBM Afrikantov now uses the results of the research.

**Originality/value:** Topically of this article is in local hydrodynamics of the coolant flow in TVS-KVADRAT fuel assemblies of PWR reactors to physical laws. Therefore, we can prove heat engineering reliability of the PWR reactor active zone with TVS-KVADRAT fuel assemblies.

*Key words:* nuclear reactor, core, fuel assembly, spacing grid, coolant hydrodynamics.



УДК 621.039

Ю.И. Аношкин, А.В. Варенцов, А.О. Куревин, М.А. Легчанов

**РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ РЕЖИМОВ ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ В КОНТУРАХ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО СТЕНДА ПРОЦЕССОВ СМЕШЕНИЯ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева

**Предмет, тема, цель работы:** Представлены основные результаты расчетного исследования режимов стенда потоковых процессов, целью которого являлось определение параметров теплоотвода в системе охлаждения при естественной циркуляции теплоносителей.

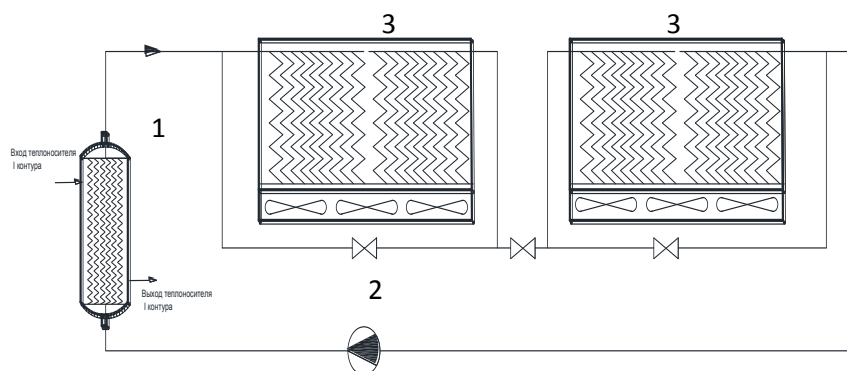
**Метод или методология проведения работы:** Используя и дополняя методы расчета естественной циркуляции теплоносителя в замкнутом контуре, была разработана методика и программа расчета системы охлаждения стенда потоковых процессов, включая контур отвода тепла в аппаратах воздушного охлаждения.

**Результаты и область их применения:** В результате исследования (при принятых ограничениях по температурам теплоносителей) определена мощность теплоотвода в контурах системы охлаждения стенда при проектных геометрических параметрах контуров циркуляции. Кроме того, определены оптимальные геометрические и схемные параметры контуров, обеспечивающие максимальный отвод тепла в системе охлаждения стенда при естественной циркуляции теплоносителей. Полученные результаты могут быть использованы при составлении программ экспериментальных исследований, а также при анализе нормальных и аварийных режимов работы стенда.

**Выводы:** Оптимизация геометрических и схемных параметров контуров системы охлаждения позволяет существенно увеличить мощность теплоотвода системы в режиме естественной циркуляции теплоносителей, что положительно повлияет на энергозатраты и безопасность стенда.

*Ключевые слова:* контур циркуляции, естественная циркуляция, тепловая мощность, теплообменник, аппарат воздушного охлаждения.

В лаборатории ИЯЭ и ТФ НГТУ им. Р.Е. Алексева ведутся работы по созданию исследовательского стенда потоковых процессов, предназначенного для рассмотрения процессов смешения потоков теплоносителя в РУ ЯЭУ с целью получения экспериментальных данных, необходимых для верификации CFD программ [1]. Стенд позволяет имитировать режимы работы оборудования РУ, включая режимы при высоких параметрах теплоносителя основного контура. В последнем случае для отвода тепла от теплоносителя основного контура предусмотрена система отвода тепла (рис. 1).

**Рис. 1. Схема системы отвода тепла**

В состав системы охлаждения входят:

- теплообменник ХВ-600.00.00 1;
- циркуляционный насос 2;
- два аппарата воздушного охлаждения АВО10-01.00.00 3;
- трубопроводы;
- запорная арматура
- характеристики контуров системы отвода тепла на номинальном режиме стенда приведены в табл. 1.

В теплообменнике тепло от теплоносителя (воды) основного контура стенда передается теплоносителю (тосола) промежуточного контура системы отвода тепла. В АВО тепло от тосола отводится в окружающий воздух. Циркуляция тосола и воздуха осуществляется циркуляционным насосом и вентиляторами соответственно. Следовательно, обеспечение надежной циркуляции сред в системе отвода тепла требует затрат энергии и бесперебойности её подвода, что делает актуальным вопрос уменьшения затрат энергии при нормальной работе системы и обеспечение отвода тепла в случае частичного или полного обесточивания. Известным и эффективным способом решения этой задачи в энергетике является использование естественной циркуляции. Для решения этой задачи применительно к системе отвода тепла стенда в данной работе проведена расчетная оценка уровня ЕЦ в системе отвода тепла при проектных параметрах и геометрии контуров циркуляции.

Кроме того, проведена оптимизация геометрических параметров контуров системы отвода тепла с целью увеличения отводимого тепла при ЕЦ теплоносителей, а также определена тепловая мощность, отводимая в АВО за счет ЕЦ воздуха при неработающих вентиляторах.

**Таблица 1**

**Характеристики контуров системы отвода тепла**

Наименование	Значение
<i>Характеристики греющей среды основного контура</i>	
Теплоноситель	Вода
Температура на входе в холодильник, °С	110
Температура на выходе холодильника, °С	98
Номинальный расход, кг/с	20,83
Номинальная мощность, кВт	1000
<i>Характеристики промежуточного контура охлаждения</i>	
Теплоноситель	Тосол
Поверхность теплообмена холодильника, м <sup>2</sup>	28,6
Температура на входе в холодильник, °С	50
Температура на выходе в холодильник, °С	70
Номинальный расход, кг/с	14,66
Диаметр трубопровода, м	0,1
Высота контура, м	4,2
<i>Характеристики воздушного контура</i>	
Теплоноситель	Воздух
Поверхность теплообмена АВО, м <sup>2</sup>	588
Номинальный расход, м <sup>3</sup> /с	15

**Методика проведения расчетов**

Для проведения расчетов режимов с естественной циркуляцией теплоносителя контуров системы охлаждения стенда потоковых процессов в среде программирования MATLAB была разработана расчетная программа Raschot.m. Программа позволяет производить расчет системы отвода тепла при двух вариантах подключения аппаратов воздушного охлаждения: последовательного и параллельного. Расчет мощности системы охлаждения включал в себя последовательное определение тепловой мощности каждого из составляющих контуров в режиме ЕЦ с использованием метода итераций. Блок-схема программы Raschot.m приведена на рис. 2.



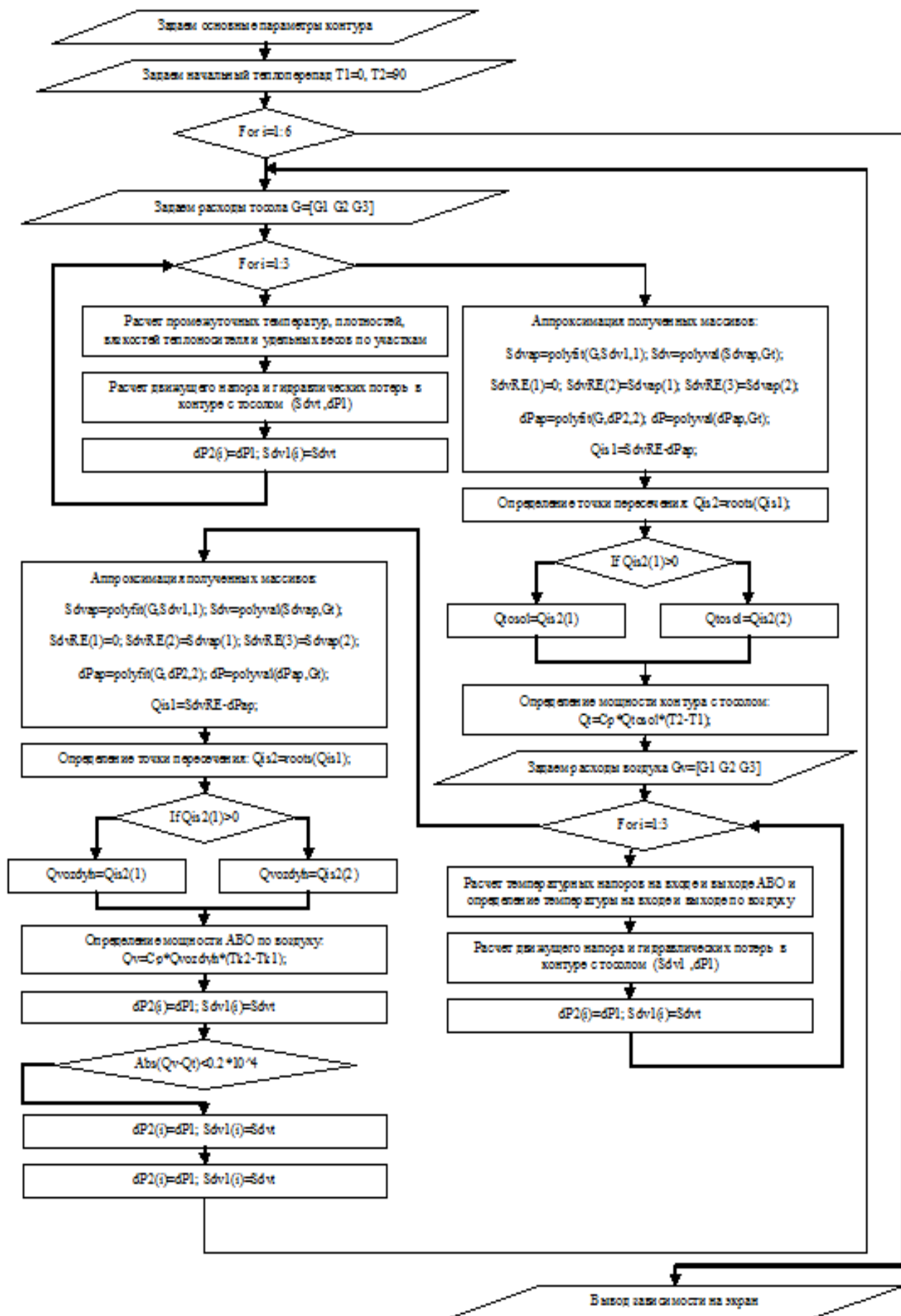


Рис. 2. Блок-схема программы Raschot.in для последовательного подключения АВО

Расчет тепловой мощности, отводимой в АВО от промежуточного контура при отключенных вентиляторах, определялся из условия максимальной температуры тосола  $90^{\circ}\text{C}$ , при номинальном его расходе и средней температуре воздуха в июле в месте установки АВО, равной  $28^{\circ}\text{C}$ . Учитывая предполагаемую тепловую изоляцию контуров стенда, потерями тепла в окружающую среду в системе отвода тепла пренебрегали.

### Результаты расчетов

Так как в рассматриваемой системе отвода тепла замыкающим является воздушный контур аппарата воздушного охлаждения, максимальная мощность, которую может отвести система отвода тепла стенда в режиме естественной циркуляции теплоносителей, будет определяться уровнем естественной циркуляцией воздуха в АВО. В табл. 2 приведены результаты расчета тепловой мощности, отводимой в АВО при естественной циркуляции воздуха (при неработающих вентиляторах) при штатной циркуляции тосола и температуре окружающего воздуха  $28^{\circ}\text{C}$ .

**Таблица 2**  
**Результаты расчета отводимой тепловой мощности**  
**в системе при ЕЦ только в контуре воздуха**

Наименование	Значение
<i>Исходные данные</i>	
Высота АВО, м	2,2
Поверхность теплообмена АВО, $\text{м}^2$	588
Атмосферное давление, кПа	100
Температура окружающего воздуха, $^{\circ}\text{C}$	28
Температура тосола на входе в АВО, $^{\circ}\text{C}$	90
Расход тосола, кг/с	14,6
<i>Результаты расчета</i>	
Коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/\text{м}^2\text{с}$	21
Температура воздуха на выходе из АВО, $^{\circ}\text{C}$	85
Температура тосола на выходе из АВО, $^{\circ}\text{C}$	64
Расход воздуха, кг/с	9,1
Мощность контура, кВт	535

Из приведенных результатов расчета видно, что максимальная мощность, отводимая системой от стенда при данных условиях, равна 535 кВт, что составляет 53,5% от номинальной мощности стенда. Кроме того, этот результат указывает на возможность экономии электроэнергии за счет отключения вентиляторов при мощности стенда, не превышающей полученную. Очевидно, что эта максимальная мощность будет возрастать при уменьшении температуры окружающего воздуха.

Поскольку в системе отвода тепла предусмотрена работа двух АВО, то очевидно, что схема подключения их (последовательно или параллельно) будет влиять на гидравлику промежуточного контура, а следовательно, на отводимую тепловую мощность системой при ЕЦ теплоносителя. В табл. 3 приведены исходные данные и результаты расчета отводимой тепловой мощности при последовательном (а) и параллельном (б) подключении АВО при ЕЦ в контурах тосола и воздуха и при проектной геометрии контуров системы.

Таким образом, при номинальных геометрических параметрах контуров системы отвода тепла она способна отвести 73 кВт (при последовательном подключении) и 87,9 кВт (при параллельном подключении), что составляет 7,3 и 8,8 % тепловой мощности стенда соответственно.

С целью анализа оптимальности геометрических параметров контуров системы отвода тепла с точки зрения величины отводимой тепловой мощности при ЕЦ теплоносителей был проведен расчет влияния на эту величину диаметра трубопровода и высоты промежуточного контура циркуляции. Результаты расчета приведены на рис. 3 – рис. 5.

Таблица 3

Результаты расчета отводимой тепловой мощности в системе при ЕЦ во всех контурах отвода тепла при последовательном (а) и параллельном (б) подключении АВО

а)		б)	
Параметр	Значение	Параметр	Значение
Температура окружающего воздуха, °С	28	Температура окружающего воздуха, °С	28
Температура тосола на выходе из АВО, °С	90	Температура тосола на выходе из АВО, °С	90
Расход тосола, кг/с	1,07	Расход тосола, кг/с	1,31
Расход воздуха, кг/с	6,71	Расход воздуха, кг/с	6,9
Мощность контура, кВт	73,07	Мощность контура, кВт	87,93

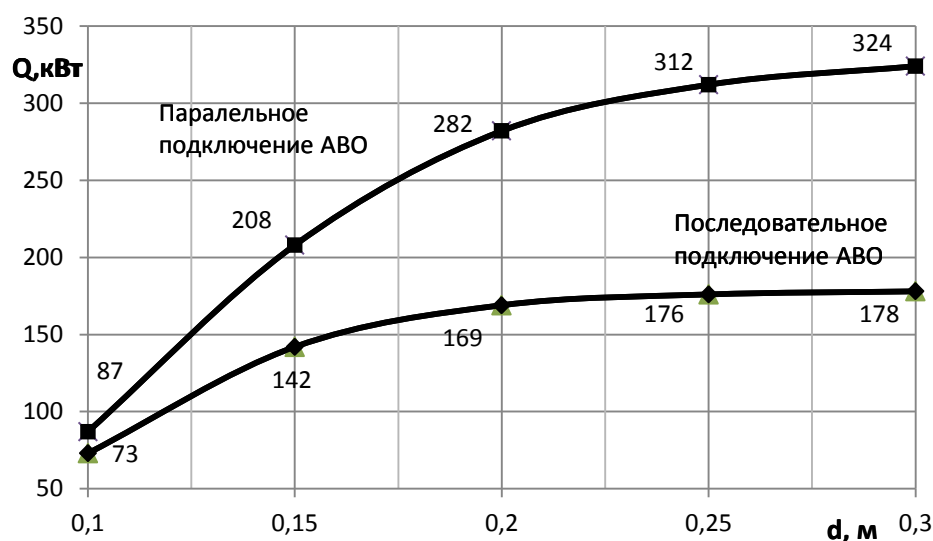
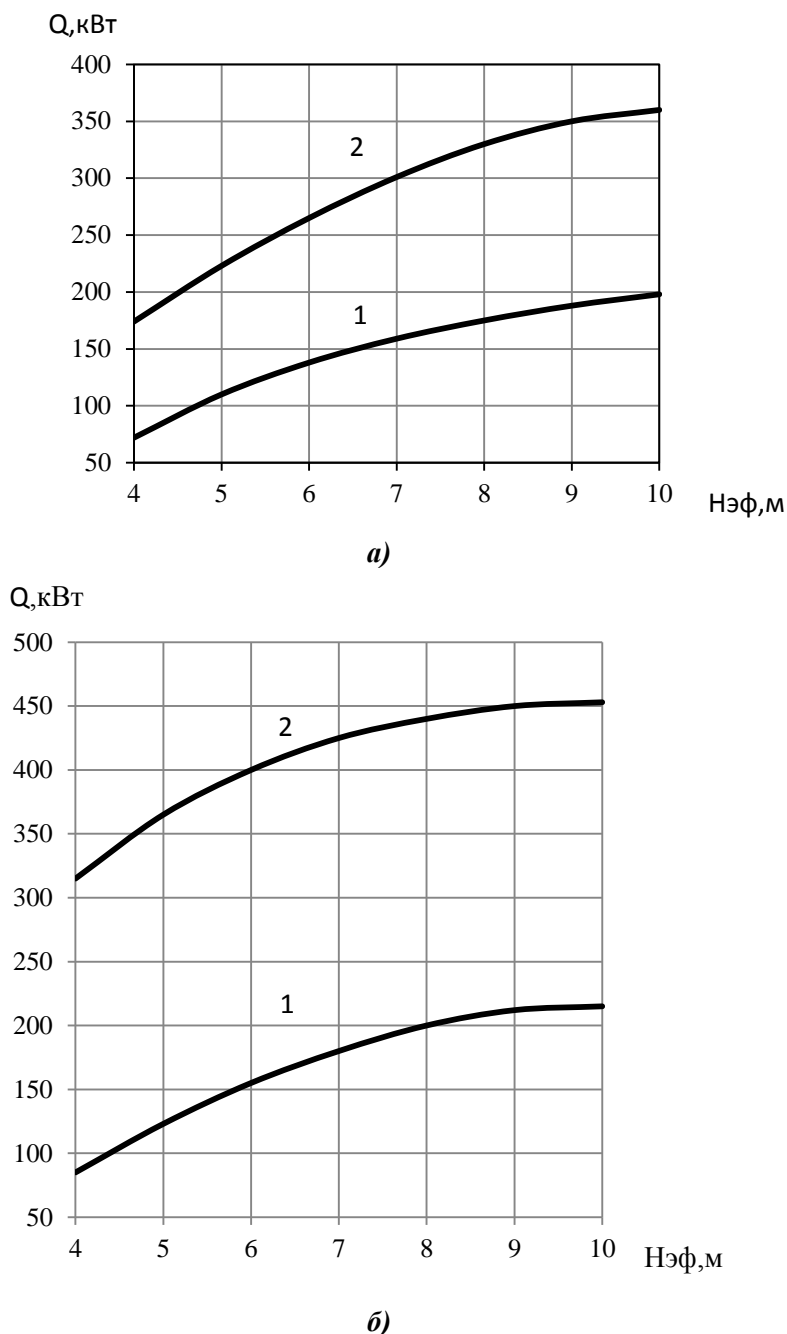


Рис. 3. Зависимость тепловой мощности контура охлаждения от диаметра трубопровода и схемы подключения АВО

Из приведенных на рис. 3 результатов следует, что при увеличении диаметра трубопровода относительно проектного значения существенно возрастает отводимая контуром тепловая мощность при обеих схемах подключения АВО. При этом влияние диаметра трубопровода на отводимую мощность при ЕЦ более существенно при параллельном подключении АВО (в 3,7 раза), чем при последовательном (в 2,4 раза) из-за большего влияния гидравлических потерь трубопровода на гидравлические потери контура в целом. И в том и другом случае, начиная с некоторого диаметра ( $d = 0,23$  м, при последовательном подключении АВО и  $d = 0,27$  м, при параллельном подключении АВО) влияние диаметра становится незначительным и отводимая тепловая мощность несущественно отличается от максимального значения. Именно эти диаметры трубопровода можно считать оптимальными для соответствующей схемы подключения АВО. Таким образом, увеличивая диаметр трубопровода до оптимального значения, можно увеличить отводимую при ЕЦ тепловую мощность до 175 кВт (17,5% номинальной мощности стенда) и 318 кВт (31,8% номинальной мощности стенда) при соответствующей схеме подключения АВО.

Представленные на рис. 4 результаты показывают, что увеличение эффективной высоты промежуточного контура циркуляции против проектного значения также увеличивает тепловую мощность, отводимую системой при ЕЦ теплоносителей в контурах. Это влияние менее значительное, чем влияние диаметра трубопровода, и также зависит от диаметра трубопровода и схемы подключения АВО. При этом увеличение высоты контура циркуляции до значений более 10 м нецелесообразно, поскольку при росте габаритов системы существенно увеличивается отводимая тепловая мощность не происходит. При этом максимальная отво-

димая тепловая мощность, равная 450 кВт (45% номинальной мощности стенда), может быть получена при оптимальном диаметре трубопровода контура ( $d=0,27$  м), высоте контура 10 м и параллельном подключении АВО. Эта тепловая мощность приближается к предельной тепловой мощности, отводимой в АВО при ЕЦ только воздушного контура (535 кВт).



**Рис. 4. Зависимость тепловой мощности контура охлаждения от высоты контура ЕЦ при проектном (1) и оптимальном (2) диаметре трубопровода контура:**  
 а – последовательном подключении АВО; б – при параллельном подключении АВО

#### Выводы:

1. Результаты проведенных расчетных исследований позволяют определить тепловую мощность системы отвода тепла стенда потоковых процессов при проектных параметрах контуров в условиях ЕЦ теплоносителей, а также выбрать оптимальные геометрические характеристики промежуточного контура, с целью получения максимальной отводимой тепловой мощности системы отвода тепла в целом.

2. Максимальная тепловая мощность, отводимая в АВО при ЕЦ только в воздушном контуре, полученная при средней температуре самого жаркого месяца в месте установки стенда, равна 535 кВт, что составляет 53,5% номинальной мощности стенда. Этот результат позволяет оценить возможную экономию энергопотребления при работе вентиляторов за счет регулирования мощности или отключения их электродвигателей.

3. При проектных геометрических характеристиках промежуточного контура тепловая мощность системы отвода тепла при ЕЦ теплоносителей составляет 7,3% от номинальной мощности стенда.

4. При оптимальных геометрических характеристиках промежуточного контура максимальная тепловая мощность системы отвода тепла при ЕЦ теплоносителей может быть увеличена до 45% от номинальной мощности стенда, что близко к максимальной тепловой мощности, отводимой в АВО при ЕЦ воздуха. Такое существенное увеличение мощности системы теплоотвода в режиме ЕЦ теплоносителей, безусловно, положительно повлияет на энергозатраты и безопасность стенда.

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. **Техническое задание** на экспериментальный стенд для исследования процессов смешения потоков теплоносителя в моделях реактора РИТМ-200, утвержденное 10.12.2014 г.
2. **Терентьев, В.Д.** Основы тепловых и гидравлических расчетов судовых ядерных реакторов и парогенераторов / В.Д.Терентьев, Н.М. Синев. – Ленинград: Судостроение, 1967. – 208 с.
3. **Идельчик, И.Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1975. – 180 с.
4. **Бойко, Е.А.** Расчёт естественной циркуляции в контурах барабанных котлов: учеб. пособие / Е.А. Бойко, И.С. Деринг, Т.И. Охорзина. – Красноярск, 2006. – 47 с.

*Дата поступления  
в редакцию 02.02.2016*

**Y.I. Anoshkin, A.O. Kurevin, M.A. Legchanov**

#### COMPUTATIONAL ANALYSIS OF GRAVITY COOLANT CIRCULATION MODES IN THE COOLING CIRCUITS OF THE FLOW PROCESSES RESEARCH STAND

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

**Subject, theme, objective:** Presents the main results of computational study the modes of flow processes stand, the purpose of which was to determine parameters of heat removal in the cooling system with gravity coolant circulation.

**Method of work:** Using and complementing the calculation methods of gravity coolant circulation in closed circuit, we developed a method and program for calculating the cooling system of the flow processes stand, including the heat removal circuit in air coolers.

**Results and field of application:** If adopted restrictions on coolant temperature, as a result of the study, it was determined heat removal capacity in the circuits of cooling system of the stand, when the geometric design parameters of the circuits. In addition, there were determined the optimal geometrical and circuit parameters of the circuits, that provide the maximum heat removal in the cooling system of the stand with gravity coolant circulation.

The results can be used in the programming of experimental studies and also it can be applied in the analysis of normal and emergency modes of operation of the stand.

**Conclusions:** Optimization of the geometrical and circuit parameters of the cooling system circuits can significantly increase the heat removal capacity of the system in the gravity coolant circulation mode, that have a positive impact on the energy consumption and the safety of the stand.

This work has been carried out with support of the Ministry of Education and Science of Russian Federation within the bounds of contract № 02.G25.31.0124 03/12/2014 (Government Regulation № 218 from 09/04/2010)

*Key words:* Circuit, gravity circulation, thermal capacity, heat exchanger, air cooler.

УДК 621.039

А.В. Комаров, В.А. Фарафонов

**ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕРА ВНУТРЕННЕГО ДИАМЕТРА  
КОЛЬЦЕВОГО ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА  
ДЛЯ РЕАКТОРОВ С НАТРИЕВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приведён теплогидравлический расчёт кольцевого тепловыделяющего элемента для реакторов с натриевым теплоносителем, выбран оптимальный размер внутреннего диаметра, при котором расходы и скорости теплоносителя с наружной и внутренней стороны равны.

*Ключевые слова:* температура, топливо, теплоноситель, оболочка, сердечник.

Реакторы на быстрых нейтронах позволяют осуществлять расширенное воспроизводство ядерного топлива, что радикально решает проблему энергообеспечения АЭС, так как открывается возможность дальнейшего роста ядерной энергетики практически без ограничения со стороны топливных ресурсов.

Обеспечение высокой эффективности и надежности в работе быстрых реакторов – важная проблема, решение которой в значительной степени определяется уровнем теплофизического обоснования реакторов.

Особенности условий работы быстрых реакторов (высокие нейтронные и тепловые потоки, большие выгорания и давления газообразных продуктов деления в твэлах, высокие температуры топлива и оболочки), особенности физики и геометрии активной зоны, значительные неопределенности в параметрах выдвигают задачу более глубокого проникновения в суть теплофизических процессов, протекающих в реакторах, и познания новых явлений, отвечающих современному уровню знаний в области теплофизики реакторов как науки. Межканальный гидродинамический и тепловой обмен, переменное энерговыделение и начальные тепловые участки, деформированные решетки твэлов и нестандартные каналы, несимметричные тепловые нагрузки и оребренные системы твэлов – далеко не полный перечень вопросов, выдвигаемых в настоящее время практикой реакторостроения и имеющих решающее значение при теплофизическом обосновании быстрых реакторов.

Учет перечисленных факторов в теплогидравлическом расчете делает его весьма сложной задачей. Среди требований к теплогидравлическому расчету – большая информативность, комплексность, высокая достоверность результатов, прежде всего, по локальным гидродинамическим и тепловым характеристикам: с одной стороны, большие запасы по параметрам теплоносителя недопустимы (ограничиваются мощностью и КПД установки), с другой – превышение локальных температур сверх допустимых пределов может обусловить выход реактора из строя.

Представленный материал по теплогидравлическому расчету ТВС быстрых реакторов учитывает специфику гидродинамики и теплообмена в активных зонах быстрых реакторов и направлен на решение перечисленных вопросов.

В данных реакторах предлагается использовать кольцевой тепловыделяющий элемент и выбрать оптимальный размер его внутреннего диаметра с применением вытеснителей.

**Теплогидравлический расчет реакторов типа БН [2]**

Теплогидравлический расчет необходим для обоснования проекта ядерной энергетической установки, ее теплотехнической оптимизации и повышения теплотехнической надежности. При теплогидравлическом расчете определяют распределение расхода теплоносителя по ТВС

активной зоны реактора, распределение давления по контуру циркуляции, температуры в элементах реактора, а также параметры оборудования первого контура установки.

В связи с невозможностью в данном проекте учесть всю сложность и многообразие элементов, далее во многих случаях вводятся упрощающие предпосылки и усредненные коэффициенты, которые, вообще говоря, должны быть разными для разных реакторов. Использование этих коэффициентов позволяет в какой-то мере учесть сложность конструкции, но, безусловно, делает расчеты неточными.

### Исходные данные и методика расчета

Все расчетные параметры – тепловые потоки, температуры, параметры теплоносителя – определяются для центральной тепловыделяющей сборки, работающей в самых тяжёлых условиях. Расчет проводится для девяти точек по высоте активной зоны с координатами  $z = -0,50; -0,37; -0,25; -0,12; 0,00; 0,12; 0,25; 0,37; 0,50$  м. Результаты расчета сведены в таблицы.

Приведем основные характеристики реактора, используемые в расчете:

#### Активная зона:

- тепловая мощность реактора  $Q_T = 2100$  МВт;
- высота активной зоны  $H_0 = 0,998$  м;
- экстраполированная добавка к размерам зоны  $\delta = 0,1996$  м.

#### Теплоноситель:

- температура воды на входе в реактор  $t_{вх} = 374^\circ\text{C}$ ;
- температура воды на выходе из реактора  $t_{вых} = 547^\circ\text{C}$ .

#### Тепловыделяющая сборка:

- материал оболочки твэла Нержавеющая сталь;
- ядерное топливо Диоксид урана ( $\text{UO}_2$ );
- расположение твэлов в решетке (упаковка) Треугольная;
- доля энерговыделения в твэле  $\kappa = 0,94$ ;
- количество ТВС  $n_{\text{ТВС}}=340$ ;
- количество твэлов  $n_{\text{ТВЭЛ}}=127$ ;
- наружный диаметр твэла  $d_2 = 9,1$  мм;
- внутренний диаметр твэла  $d_1 = 5,1$  мм;
- диаметр дистанцирующей проволоки  $d_{\text{пр}} = 1,05$  мм;
- диаметр вытеснителя внутри твэла  $d_{\text{в}} = 1,05$  мм;
- диаметр вытеснителя у периферийных твэлов  $d_{\text{вп}} = 1,8$  мм;
- количество вытеснителей:  $n_{\text{вп}}=24$ ;
- относительный шаг твэла  $\chi=1,17$ .

### Теплогидравлический расчет кольцевого твэла для реактора БН-800

Геометрические характеристики активной зоны ТВЭЛ и ТВС приведены в табл. 1.

Таблица 1

Геометрические характеристики твэла и ТВС

Параметр		Наружная сторона твэла	Внутренняя сторона твэла
1		2	3
Диаметр оболочки твэла	$d_{\text{об}}$ , мм	8,3	5,9
Диаметр топливного сердечника твэла	$d_{\text{с}}$ , мм	8,1	6,1

Окончание табл. 1

1		2	3
Проходное сечение ячейки	$S_{яч}, м^2$	0,04951	
Проходное сечение теплоносителя	$S_{яч}, м^2$	0,025	0,024
Гидравлический периметр сечения для прохода теплоносителя	$\Pi_r, м$	4,183	2,432
Гидравлический диаметр сечения для прохода теплоносителя	$d_r, м$	0,002471	0,00403
Тепловой периметр сечения для прохода теплоносителя	$\Pi_r, м$	4,048	2,432
Тепловой периметр оболочки твэла	$\Pi_{об}, м$	3,310	1,714
Тепловой периметр газового зазора твэла	$\Pi_з, м$	3,230	2,433

**Расчет тепловых потоков и параметров теплоносителя по высоте активной зоны [2],[3]**

Коэффициенты неравномерности энерговыделения (по стандартным проектам БН) представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Коэффициенты неравномерности энерговыделения**

Коэффициенты	БН-350	БН-600	БН-800	БН-1600
Коэффициент неравномерности по радиусу $K_r$	1,30	1,23	1,23	1,21
Коэффициент неравномерности по высоте $K_z$			1,22	

Коэффициент неравномерности энерговыделения по объему активной зоны

$$K_V = K_r K_z = 1,23 \cdot 1,22 = 1,5. \tag{1}$$

Высота активной зоны с учетом экстраполированной добавки, м,

$$H = H_0 + 2\delta = 0,998 + 2 \cdot 0,1996 = 1,3972. \tag{2}$$

Расход теплоносителя через активную зону, кг/с,

$$G = \frac{Q_T}{C_p \Delta t} = \frac{2100}{1,272 \cdot (547 - 374)} = 9894. \tag{3}$$

Средний расход теплоносителя через одну ТВС, кг/с,

$$G_{ТВС} = \frac{G_{корп}}{n_{ТВС}} = \frac{9894}{340} = 29,1. \tag{4}$$

Доля мощности, выделяемая в активной зоне от общей тепловой мощности реактор  $Q_T$ ,

$$\eta_{АЗ} = 0,9$$

Мощность активной зоны, кВт,

$$Q_{АЗ} = \eta_{АЗ} Q_T = 0,9 \cdot 2100 = 1890.$$

Линейный тепловой поток в центральной плоскости реактора в расчете на средненагруженный твэл, кВт/м,

$$q_{l,0} = \frac{Q_{АЗ}}{NH_0} K_z = \frac{1898 \cdot 10^3}{340 \cdot 0,998} \cdot 1,22 = 6795. \tag{5}$$

В самых тяжелых условиях работает центральная кассета. Линейный тепловой поток в центральной плоскости реактора в расчете на максимально нагруженный твэл, кВт/м,



$$q_{l,0}^{\max} = \frac{Q_T}{NH_0} K_V = \frac{2100 \cdot 10^3}{340 \cdot 1,025} \cdot 1,5 = 9038. \quad (6)$$

В центральной кассете выбираем центральный твэл и разбиваем его на восемь участков. Предполагается, что распределение по высоте подчиняется косинусоидальному закону

$$q_l(z) = q_{l,0}^{\max} \cos \frac{\pi z}{H}. \quad (7)$$

В табл. 3 приведены численные значения тепловых потоков, приходящихся на одну ТВС, усреднённые по высоте.

Таблица 3

Значения тепловых потоков для тепловыделяющей сборки

z, м	-0,50	-0,37	-0,25	-0,12	0,00	0,12	0,25	0,37	0,50
q <sub>l</sub> , кВт/м	3631	5572	7078	8032	8358	8032	7078	5572	3631

#### Расчет расходов теплоносителя, омывающего наружную и внутреннюю стороны твэла [4]

Расход теплоносителя через внутреннюю и наружную стороны, кг/с,

$$G_{1,2} = G u_{1,2}. \quad (8)$$

Коэффициенты разделения потоков снаружи и внутри твэла

$$u_2 = \frac{S_{\text{яч}2}}{S_{\text{яч}}}; \quad u_1 = \frac{S_{\text{яч}1}}{S_{\text{яч}}}, \quad (9)$$

где  $S_{\text{яч}1,2}$  - площади прохода теплоносителя с наружной и внутренней стороны твэла;  $S_{\text{яч}}$  - общая площадь прохода теплоносителя.

Получаем

$$u_2 = 0,505, \quad u_1 = 0,495, \quad G_2 = 14,694 \frac{\text{кг}}{\text{с}}, \quad G_1 = 14,406 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

#### Расчет тепловых потоков для внутренней и наружной стороны твэла [3]

Теплоноситель общим расходом  $G$  поступает на вход в канал с температурой  $T_1$ , омывает кольцевой твэл как внутри, так и снаружи и на выходе из твэла после смещения имеет температуру  $T_2$ . Поскольку теплоотвод идёт в обе стороны, внутри топливного сердечника устанавливается нейтральная поверхность, представляющая собой для любого сечения окружность радиусом  $r_0$ . При этом тепловой поток разделяется на два:  $q_{l1}(x)$  - направлен внутрь и  $q_{l2}(x)$  - направлен наружу.

Если предположить, что объёмное тепловыделение по сечению кольцевого твэла постоянно, то получаем

$$q_{l1}(z) = q_l(z) \cdot \left( \frac{r_0^2(z) - \left(\frac{d_1}{2}\right)^2}{\left(\frac{d_2}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_1}{2}\right)^2} \right) \quad (10)$$

$$q_{l2}(z) = q_l(z) \cdot \left( \frac{-r_0^2(z) + \left(\frac{d_2}{2}\right)^2}{\left(\frac{d_2}{2}\right)^2 - \left(\frac{d_1}{2}\right)^2} \right).$$

Вполне очевидно, что сумма тепловых потоков  $q_{11}(z)$  и  $q_{12}(z)$  равна общему тепловому потоку  $q_l(z)$ :

$$q_l(z) = q_{11}(z) + q_{12}(z). \quad (11)$$

Результаты расчётов представлены в табл. 4.

Таблица 4

Значения тепловых потоков для наружной и внутренней стороны

z, м	-0,50	-0,37	-0,25	-0,12	0,00	0,12	0,25	0,37	0,50
$q_{11}$ , кВт/м	1743,8	2676,2	3399,6	3857,6	4014,3	3857,6	3399,6	2676,2	1743,8
$q_{12}$ , кВт/м	1887,0	2896,0	3678,8	4174,4	4344,0	4174,4	3678,8	2896,0	1887,0
$r_0$ , мм	3,654	3,653	3,653	3,652	3,652	3,651	3,650	3,649	3,648

### Определение теплофизических параметров теплоносителя [2]

Находим температуру теплоносителя в следующей точке по уравнениям:

$$t_1(z) = t_{1вх} + \frac{q_{l,1} \Delta z}{G_1 C_p} + \Delta t_{Н.Т.Э}, \quad (12)$$

$$t_2(z) = t_{2вх} + \frac{q_{l,2} \cdot \Delta z}{G_2 \cdot C_p} + \Delta t_{Н.Т.Э}.$$

Величину  $\Delta t_{Н.Т.Э}$  принимаем  $4^\circ\text{C}$  [6].

Полученные значения энтальпий и теплофизические параметры теплоносителя, омывающего внутреннюю стенку твэла, приведены в табл. 5.

Таблица 5

Теплофизические параметры теплоносителя, омывающего внутреннюю стенку твэла

Координата расчетной точки, z, м	-0,50	-0,37	-0,25	-0,12	0,00	0,12	0,25	0,37	0,50
Температура, $t_{t1}$ , $^\circ\text{C}$	378,0	396,2	419,4	445,6	473,0	499,2	522,4	540,6	552,5
Плотность, $\rho_1$ , $\text{кг/м}^3$	861,7	859,3	854,6	847,4	840,3	833,1	828,3	823,4	821,0
Теплопроводность, $\lambda_1$ , Вт/м·К	72,16	71,68	70,71	69,25	67,79	66,34	65,37	64,4	63,91
Кинематическая вязкость, $\nu_1$ , $10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$	33,64	33,15	32,25	31,04	29,99	29,06	28,51	27,99	27,75
Число Прандтля, $Pr_1 \cdot 10^{-2}$	0,517	0,5107	0,493	0,4846	0,4724	0,4622	0,4567	0,4519	0,4477

Полученные значения энтальпий и теплофизические параметры теплоносителя, омывающего наружную стенку твэла, приведены в табл. 6.

Таблица 6

Теплофизические параметры теплоносителя, омывающего наружную стенку твэла

Координата расчетной точки, z, м	-0,50	-0,37	-0,25	-0,12	0,00	0,12	0,25	0,37	0,50
Температура, $t_{t2}$ , $^\circ\text{C}$	378,0	395,9	418,6	444,3	471,1	496,8	519,5	537,4	549,0
Плотность, $\rho_2$ , $\text{кг/м}^3$	861,7	859,3	854,6	847,4	840,3	833,1	828,3	823,4	821,0
Теплопроводность, $\lambda_2$ , Вт/м·К	72,16	71,68	70,71	69,25	67,79	66,34	65,37	64,4	63,91
Кинематическая вязкость, $\nu_2$ , $10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$	33,64	33,15	32,25	31,04	29,99	29,06	28,51	27,99	27,75
Число Прандтля, $Pr_2 \cdot 10^{-2}$	0,517	0,5107	0,493	0,4846	0,4724	0,4622	0,4567	0,4519	0,4477

### Расчет среднего коэффициента теплоотдачи [5]

Средние значения коэффициентов теплоотдачи  $\alpha(z)$  на участках вокруг расчетных точек могут быть рассчитаны по формулам:

- для наружной стенки

$$\text{Nu}_2(z) = 24,15 \cdot \lg(-8,12 + 12,76\chi - 3,65\chi^2) + 0,0174 \cdot (1 - \exp(-6 \cdot (\chi - 1))) \cdot (\text{Pe}_2(z) - 200)^{0,9}; \quad (13)$$

- для внутренней стенки

$$\text{Nu}_1(z) = 5 + 0,025 \cdot (\text{Pe}_1(z))^{0,8}, \quad (14)$$

где  $\chi$  – относительный шаг твэлов;  $\text{Nu}_1(z)$ ,  $\text{Nu}_2(z)$  – средние на расчетных участках значения чисел Нуссельта;  $\text{Pe}_1(z)$ ,  $\text{Pe}_2(z)$  – критерий Пекле:

$$\text{Pe}_{1,2}(z) = \text{Pr}_{1,2}(z) \cdot \text{Re}_{1,2}(z). \quad (15)$$

Для чисел Нуссельта и Рейнольдса имеют место соотношения:

$$\text{Nu}(z) = \frac{\alpha(z)d_r}{\lambda(z)}; \quad \text{Re}(z) = \frac{w(z)d_r}{\nu(z)}; \quad w(z) = \frac{G_i}{s_{\text{яч}}\rho(z)}, \quad (16)$$

где  $w(z)$  – скорость теплоносителя в расчетных точках.

Значения коэффициентов теплоотдачи

$$\alpha(z) = \frac{\lambda(z)}{d_r} \cdot \text{Nu}(z). \quad (17)$$

Расчётные скорости теплоносителя, чисел Рейнольдса, Нуссельта, Пекле, а также коэффициент теплоотдачи занесём в табл. 7.

Таблица 7

Сводная таблица

$z$ , м	-0,50	-0,37	-0,25	-0,12	0,00	0,12	0,25	0,37	0,50
$w_1$ , м/с	6,821	6,840	6,878	6,936	6,995	7,055	7,096	7,138	7,159
$w_2$ , м/с	6,821	6,840	6,878	6,936	6,995	7,055	7,096	7,138	7,159
$\text{Re}_1$ , $10^5$	0,620	0,631	0,652	0,683	0,713	0,742	0,761	0,779	0,788
$\text{Re}_2$ , $10^5$	0,501	0,510	0,527	0,552	0,576	0,600	0,615	0,630	0,637
$\text{Pe}_1$	320,365	322,036	321,307	330,933	336,717	342,958	347,386	352,204	352,978
$\text{Pe}_2$	258,996	260,347	259,758	267,540	272,216	277,262	280,841	284,737	285,362
$\text{Nu}_1$	5,253	5,254	5,253	5,259	5,263	5,267	5,270	5,273	5,273
$\text{Nu}_2$	10,604	10,694	10,655	11,170	11,476	11,804	12,036	12,286	12,326
$\alpha_1$ , кВт/м <sup>2</sup> К	153,416	152,426	150,350	147,416	144,407	141,423	139,428	137,437	136,403
$\alpha_2$ , кВт/м <sup>2</sup> К	309,732	310,278	304,959	313,080	314,883	316,960	318,452	320,264	318,865

### Расчет температурного поля твэлов [3],[5]

На рис. 1 представлен разрез твэла и распределение поля температур в нем.

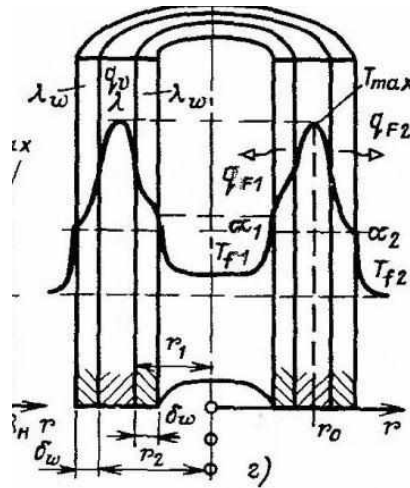


Рис. 1. Распределение температур в кольцевом твэле

Распределение температуры наружной поверхности оболочки твэла по высоте активной зоны

$$t_{об}^H(z) = t_{ти}(z) + \kappa \frac{q_{ли}(z)}{\prod_{ти} \alpha(z) c_{pi}} \quad (18)$$

По среднему значению температуры наружной поверхности оболочки твэла, равному примерно 500°C, из таблиц теплофизических свойств нержавеющей стали 12X18H10T определяем теплопроводность оболочки твэла  $\lambda_{об} = 23,0 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ .

Температура внутренней поверхности оболочки твэла

$$t_{обв}^{BH}(z) = t_{обв}^H(z) + \kappa \cdot \frac{q_{ли}(z) \delta_{об}}{\prod_{обв} \lambda_{об}} \quad (19)$$

Коэффициент теплоотдачи (проводимость) контактного слоя для внутренней стороны твэла:

$$\delta_{ззз}/d_{вн1} = 0,0176,$$

$$\alpha_{ззз1} = f(\delta_{ззз} / d_{вн1}) = 2,4 \cdot 10^3 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}.$$

Коэффициент теплоотдачи (проводимость) контактного слоя для наружной стороны твэла:

$$\delta_{ззз}/d_{вн2} = 0,0109,$$

$$\alpha_{ззз2} = f(\delta_{ззз} / d_{вн2}) = 2 \cdot 10^3 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}.$$

Температура наружной поверхности топливного сердечника

$$t_{ci}^H(z) = t_{обв}^{BH}(z) + \kappa \frac{q_{ли}(z)}{\prod_{зи} \alpha_{зззи}} \quad (20)$$

Для определения температуры внутренней поверхности топливного сердечника в расчетных точках необходимо знать теплопроводность топливного сердечника. Так как теплопроводность диоксида урана обратно пропорциональна температуре топлива, то теплопроводность будем рассчитывать по максимальной температуре, которая устанавливается на нейтральной поверхности, расположенной на радиусе  $r_0$ , так как теплопроводность при этой температуре будет наименьшая.

Теплопроводность топливного сердечника при температуре  $t_c$  рассчитывается по зависимости

$$\lambda_c(t_c) = \frac{4 \cdot 10^3}{130 + (t_c + 273)} + 3,4 \cdot 10^{-14} \cdot (t_c + 273)^4 \quad (21)$$

Температура топливного сердечника с наружной стороны

$$t_{c2}(z) = t_{c2}^H(z) + \kappa \frac{q_{12}(z)}{4\pi l \lambda_c(z)} \cdot \left( 1 - \frac{2r_0^2(z)}{\left(\frac{d_2}{2}\right)^2 - r_0^2(z)} \cdot \ln \frac{\frac{d_2}{2}}{r_0(z)} \right). \quad (22)$$

Температура топливного сердечника с внутренней стороны

$$t_{c1}(z) = t_{c1}^H(z) + \kappa \frac{q_{11}(z)}{4\pi l \lambda_c(z)} \cdot \left( \frac{2r_0^2(z)}{\left(-\left(\frac{d_1}{2}\right)^2 + r_0^2(z)\right)} \cdot \ln \frac{r_0(z)}{\frac{d_1}{2}} - 1 \right). \quad (23)$$

Очевидно, что температура топливного сердечника одна, и не важно, с какой стороны мы будем её находить, поэтому можно записать очевидное равенство

$$T_{c1}(z) = T_{c2}(z). \quad (24)$$

Результаты расчёта температурного поля твэлов в расчётных точках по высоте активной зоны даны в табл. 8.

**Таблица 8**

**Результаты расчёта температурного поля твэлов в расчётных точках**

z, м	-0,50	-0,37	-0,25	-0,12	0,00	0,12	0,25	0,37	0,50
$t_{062}^{BH}, ^\circ\text{C}$	390,103	414,434	442,182	471,046	498,911	523,556	543,064	555,907	561,098
$t_{c1}^H, ^\circ\text{C}$	681,828	862,536	1011,82	1118,05	1172,87	1171,98	1115,36	1007,48	856,715
$t_{c2}^H, ^\circ\text{C}$	651,597	815,746	951,976	1049,51	1100,88	1102,02	1052,85	957,220	822,592
$\lambda_c, \text{Вт/м}\cdot\text{К}$	3,657	3,116	2,803	2,642	2,579	2,585	2,661	2,840	3,173
$t_c, ^\circ\text{C}$	700,115	909,328	1086,71	1213,30	1276,15	1270,03	1196,01	1061,67	882,250
$t_{061}^H, ^\circ\text{C}$	381,448	401,545	426,223	453,565	481,389	507,494	529,761	546,492	556,335
$t_{062}^H, ^\circ\text{C}$	379,111	397,563	420,750	446,728	473,605	499,237	521,632	539,036	550,105
$t_{061}^{BH}, ^\circ\text{C}$	401,056	431,639	464,452	496,943	526,530	550,872	567,989	576,585	575,944

### Выводы:

1. Оптимально выбранный внутренний диаметр позволяет получить примерно одинаковые расходы, скорости, температуры снаружи и внутри твэла, а также равные площади проходного сечения теплоносителя. Применены проволочные вытеснители на внутренней стороне тепловыделяющего элемента для профилирования расхода.

2. Температурный уровень теплоносителя и твэлов, а также тепловые нагрузки лежат в пределах допустимых величин. Максимальная температура топливного сердечника твэла в наиболее энергонапряженном твэле не превышает  $1276^\circ\text{C}$ , следовательно, в реакторе существует запас по температуре топлива. Сравнивая с тем же параметром для стержневого твэла, можно сделать вывод, что топливо в кольцевом твэле работает в более благоприятных условиях, и это значительно улучшает его свойства.

3. Снижение температуры топлива способствует уменьшению температурных градиентов в топливе и увеличению теплопроводности.

4. Выбранный наружный диаметр позволяет повысить прочностные характеристики кольцевых твэлов.

### Библиографический список

1. Теплогидравлический расчет ТВС быстрых реакторов с жидкометаллическим охлаждением / А.В. Жуков [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 160 с.
2. **Фарафонов, В.А.** Теплогидравлические и прочностные расчеты реакторов БН / В.А. Фарафонов; Нижегородский гос. тех. ун-т им. П.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 1998. – 40 с.

3. **Дмитриев, С.М.** Применение кольцевых тепловыделяющих элементов в реакторах ВВЭР со сверхкритическими параметрами / С.М. Дмитриев, А.В. Комаров, В.А. Фарафонов // Труды Нижегородского технического университета им. Р.Е. Алексеева. 2015. № 2 (109). С. 129.
4. **Фарафонов, В.А.**, Расчет тепловой мощности кольцевых твэлов для реакторов ВВЭР. Сравнение тепловой мощности активной зоны при использовании кольцевых и стержневых топливных элементов / В.А. Фарафонов [и др.] // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. 2015. № 3 (110). С. 144.
5. **Кириллов, П.Л.** Справочник по теплогидравлическим расчётам / П.Л. Кириллов, Ю.С. Юрьев, В.П. Бобков. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 360 с.
6. **Усынин, Г.Б.** Реакторы на быстрых нейтронах: учеб. пособие для вузов / Г.Б. Усынин, Е.В. Кусманцев; под ред. Ф.М. Митенкова. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 288 с.

*Дата поступления  
в редакцию 02.02.2016*

**A. V. Komarov, V. A. Farafonov**

## **THE CHOICE OF THE OPTIMAL SIZE OF THE INNER DIAMETER OF THE ANNULAR FUEL ELEMENT FOR REACTORS WITH SODIUM COOLANT**

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

**Purpose:** The main purpose of the thermal-hydraulic calculation of reactors with sodium coolant is to set the heat flux and temperature on the reactor core, to find the maximum fuel temperature in order to confirm the impossibility of melting in the fuel elements with high thermal load.

**Design/methodology/approach:** All the thermal-hydraulic parameters - heat flow, temperature, coolant parameters, hydraulic resistance - are determined for the maximally loaded fuel element (cell). The calculation is carried out for 9 points on the core height coordinates  $z = -0,5; -0,37; -0,25; -0,12; 0,00; 0,12; 0,25; 0,37; 0,5$  m. Calculation results are summarized in the table.

**Findings:** Optimally selected internal diameter allows to get roughly the same coolant flow, speed, temperature inside and outside of the fuel rod, and equal coolant flow areas. The resulting temperature field of fuel rods suggests that thermal loads are within acceptable limits.

**Research limitations/implications:** The calculation results show that the annular fuel rods with the selected parameters can be used in reactors with sodium coolant.

**Originality/value:** The originality of this article is in the identification of the benefits of the annular fuel rods in sodium coolant reactors. Also, the working conditions of these fuel rods are determined for the given parameters.

*Key words:* temperature, fuel, coolant, shell core.

УДК 621.382

В.В. Бирюков, В.А. Грачев, Т.В. Кожевникова

**РЕЛЯТИВИСТСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК КРУГЛОГО И ПРЯМОУГОЛЬНОГО ВОЛНОВОДОВ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрено решение краевой электродинамической задачи с импедансными граничными условиями методом, основанным на инвариантности уравнений Максвелла относительно преобразований Лоренца. Приведено сравнение результатов решения задач о распространении волн в круглом и прямоугольном волноводах с неидеально проводящими ограничивающими поверхностями с известными результатами.

*Ключевые слова:* круглый волновод, прямоугольный волновод, уравнение Гельмгольца, дисперсионное уравнение, импедансные граничные условия, преобразования Лоренца.

В настоящее время для телекоммуникаций и радиолокации освоен диапазон частот до 60 ГГц. Однако потребности этих и других областей знаний (медицины, радиосвязи, радиолокации и т.д. ставят задачи интенсивного освоения коротковолновой части миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн.

Базовыми узлами любой сверхвысокочастотной системы являются пассивные направляющие структуры, которые представляют собой, в самом простейшем случае, экранированные волноводы с каноническими формами поперечных сечений (прямоугольные, круглые, эллиптические). Данные структуры в указанных диапазонах имеют существенные потери, связанные с конечной проводимостью материала стенок и не идеальностью их механической обработки. Однако существующие на сегодняшний день методы расчета направляющих структур либо учитывают конечную проводимость стенок в некотором приближении, либо достаточно сложны и применимы лишь к узкому классу структур.

В связи с погрешностями расчётов, вызванными использованием приближений, реальные потери в направляющих структурах миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов могут быть существенно выше расчетных. Поэтому снижение погрешностей при расчетах для широкого класса волноведущих структур с конечной проводимостью материала стенок является актуальной задачей. Решению данной проблемы посвящено большое число работ [1]-[6].

Строгое решение уравнений Максвелла для адекватных реальным устройствам моделей представляет весьма трудную задачу. Один из эффективных методов упрощения этой задачи – метод эквивалентных граничных условий, позволяющий исключить из рассмотрения некоторую область пространства (и поле в ней), задавая соответствующие условия на ее границе [1]. Классическим примером такого подхода является использование импедансных граничных условий Щукина-Леонтовича, описывающих поглощение энергии электромагнитного поля в хорошо проводящих средах.

Основная сложность такого подхода состоит в необходимости получения точного выражения для поверхностного импеданса, учитывающего не только параметры материала, но и структуру электромагнитного поля в волноводе. В большинстве работ [2]-[5] используется приближенное выражение для импеданса проводящей поверхности [6], обеспечивающее точное выполнение граничных условий лишь при нормальном падении волны на поверхность металла.

Обойти эту трудность можно в ряде случаев соответствующим выбором движущейся системы отсчета (СО), в которой падение волны на стенки волновода будет нормальным, а граничные условия Щукина-Леонтовича – точными. Полученные при этом компоненты электромагнитного поля и волнового вектора можно затем с помощью преобразований Лоренца

пересчитать к исходной системе отсчета [7]-[9]. Но в новой системе отсчета электромагнитная волна падает на движущуюся проводящую поверхность. В случае идеального проводника это, очевидно, роли не играет, в случае же реального проводника с конечной удельной проводимостью коэффициент отражения электромагнитной волны зависит от её поляризации и скорости проводника.

В работах [8], [9] приведено рассмотрение трансформации структур поля электромагнитных волн круглого и прямоугольного волноводов с идеально проводящими стенками при переходе в движущуюся систему отсчета. Анализируются зависимости постоянной распространения, частоты, компонент полей и вектора Умова-Пойнтинга от скорости движущейся системы отсчета. Из результатов анализа следует, что строгое выполнение импедансных граничных условий возможно в рассматриваемом частотном диапазоне для волн типа квази- $E_{mn}$  в прямоугольном волноводе и азимутально симметричных волн типа квази- $H_{0q}$  и квази- $E_{0q}$  в круглом волноводе. Для остальных типов направляемых волн граничные условия Щукина-Леонтовича будут являться уточненными.

Для введения поправок в импедансные граничные условия необходимо провести рассмотрение нормального падения плоских электромагнитных волн двух взаимно ортогональных поляризаций на поверхность движущегося со скоростью  $v_{пр}$  проводника (рис. 1, а).

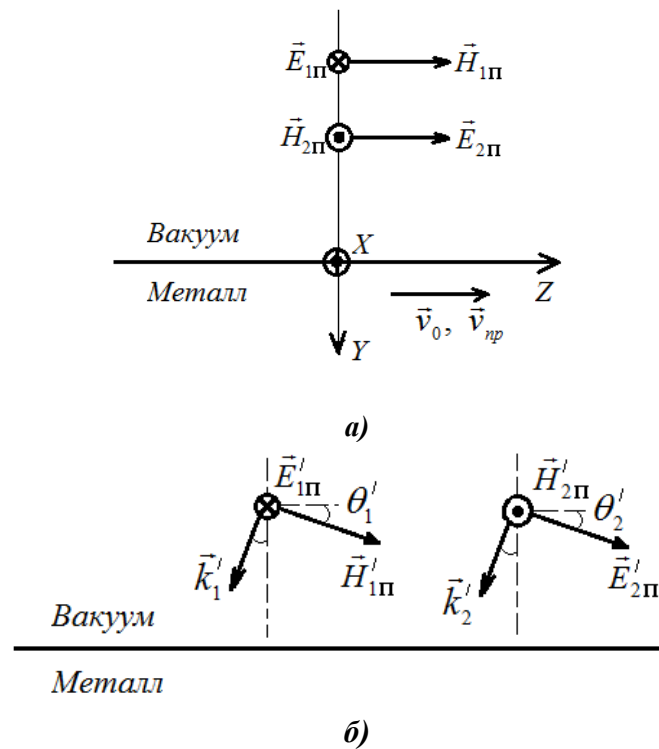


Рис. 1. Падение волн ортогональных поляризаций на металлическую поверхность в неподвижной (а) и движущейся (б) системах отсчета

В неподвижной системе отсчета выражения для полей падающих волн имеют вид:

- $s$ -поляризация  $\vec{E}_{1n} = -E_0 \mathbf{x}^0, \vec{H}_{1n} = H_0 \mathbf{z}^0$ ;
- $p$ -поляризация  $\vec{E}_{2n} = E_0 \mathbf{z}^0, \vec{H}_{2n} = H_0 \mathbf{x}^0$ .

То есть компоненты полей падающих волн в исходной системе отсчета равны

$$E_{1nx} = -E_0, E_{1ny} = 0, E_{1nz} = 0, H_{1nx} = 0, H_{1ny} = 0, H_{1nz} = H_0;$$

$$E_{2nx} = 0, E_{2ny} = 0, E_{2nz} = E_0, H_{2nx} = H_0, H_{2ny} = 0, H_{2nz} = 0.$$

Используя преобразования Лоренца для компонент электромагнитного поля, найдем его структуру в системе отсчета, где проводник неподвижен. Для этого система отсчета



должна двигаться со скоростью, равной скорости проводника в исходной СО:

- для s-поляризованной волны:

$$E'_{1nx} = \frac{E_{1nx} - v_0 B_{1ny}}{\sqrt{1 - (v_0/c)^2}} = -\frac{E_0}{\sqrt{1 - (v_0/c)^2}}, \quad E'_{1ny} = \frac{E_{1ny} + v_0 B_{1nx}}{\sqrt{1 - (v_0/c)^2}} = 0; \quad E'_{1nz} = E_{1nz} = 0;$$

$$H'_{1nx} = \frac{H_{1nx} + v_0 D_{1ny}}{\sqrt{1 - (v_0/c)^2}} = 0; \quad H'_{1ny} = \frac{H_{1ny} - v_0 D_{1nx}}{\sqrt{1 - (v_0/c)^2}} = \frac{v_0 \varepsilon_0 E_0}{\sqrt{1 - (v_0/c)^2}}; \quad H'_{1nz} = H_{1nz} = H_0.$$

- для p-поляризованной волны:

$$E'_{2nx} = 0, \quad E'_{2ny} = \frac{v_0 \mu_0 H_0}{\sqrt{1 - (v_0/c)^2}}; \quad E'_{2nz} = E_0, \quad H'_{2nx} = \frac{H_0}{\sqrt{1 - (v_0/c)^2}}; \quad H'_{2ny} = 0, \quad H'_{2nz} = 0.$$

Если коэффициент отражения от проводящей поверхности для волны s-поляризации равен  $\rho_1$ , а для волны p-поляризации –  $\rho_2$ , то суммарное поле над поверхностью проводника будет иметь вид

$$E'_{1\Sigma x} = E'_{1x}(1 + \rho_1), \quad H'_{1\Sigma y} = H'_{1y}(1 - \rho_1), \quad H'_{1\Sigma z} = H'_{1z}(1 - \rho_1);$$

$$E'_{2\Sigma y} = E'_{1y}(1 + \rho_1), \quad E'_{2\Sigma z} = E'_{2z}(1 + \rho_1), \quad H'_{2\Sigma x} = H'_{2x}(1 - \rho_1).$$

Таким образом, в движущейся системе отсчета рассматриваемые волны падают на поверхность неподвижного проводника под некоторыми углами  $\theta'_1$  и  $\theta'_2$ , которые можно найти из соотношений компонент полей падающих волн (рис. 1, б):

$$\operatorname{tg} \theta'_1 = \frac{H'_{1ny}}{H'_{1nz}} = \frac{v_0 \varepsilon_0 E_0}{H_0 \sqrt{1 - (v_0/c)^2}} = \frac{Z_0 v_0 \varepsilon_0}{\sqrt{1 - (v_0/c)^2}};$$

$$\operatorname{tg} \theta'_2 = \frac{E'_{2ny}}{E'_{2nz}} = \frac{v_0 \mu_0 H_0}{E_0 \sqrt{1 - (v_0/c)^2}} = \frac{v_0 \mu_0}{Z_0 \sqrt{1 - (v_0/c)^2}},$$

где  $Z_0 = E_0/H_0$  - волновое сопротивление среды, в которой распространяется волна.

Используя соотношения  $Z_0 \varepsilon_0 = Z_0^{-1} \mu_0 = c^{-1}$ , получим

$$\operatorname{tg} \theta'_1 = \operatorname{tg} \theta'_2 = \frac{v_0/c}{\sqrt{1 - (v_0/c)^2}}.$$

Соответственно другие тригонометрические функции угла падения, необходимые в дальнейших выражениях, равны

$$\cos \theta' = \sqrt{1 - \left(\frac{v_0}{c}\right)^2}, \quad \sin \theta' = \frac{v_0}{c}.$$

Преломленные волны в металле с конечной проводимостью представляют собой плоские неоднородные волны, у которых поверхности равных фаз и амплитуд не совпадают. При этом истинный угол преломления в металле определяется выражением [10]

$$\operatorname{tg} \theta_m = \frac{k \sin \theta_0}{\operatorname{Re} \sqrt{k_m^2 - k^2 \sin^2 \theta_0}},$$

где  $k$  и  $k_m$  – волновые числа в среде, из которой падает волна, и металле соответственно;  $\theta_0$  – угол падения.

Знаменатель в этом выражении можно преобразовать к виду  $\operatorname{Re} \sqrt{X} = \sqrt{(|X| + \operatorname{Re} X)}/2$ , следовательно

$$\operatorname{tg} \theta_m = \frac{k \sin \theta_0}{\operatorname{Re} \sqrt{\frac{1}{2} (|k_m^2 - k^2 \sin^2 \theta_0| + \operatorname{Re}(k_m^2 - k^2 \sin^2 \theta_0))}} = \frac{k \sin \theta_0}{\sqrt{\frac{1}{2} \left[ \sqrt{(\operatorname{Re} k_m^2 - k^2 \sin^2 \theta_0)^2 + (\operatorname{Im} k_m^2)^2} + \operatorname{Re} k_m^2 \right]}}.$$

где  $k_m = k_0 \sqrt{\varepsilon_k} = k_0 \sqrt{\varepsilon_m - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}}$  ( $\sigma$  – проводимость металла,  $\omega$  – круговая частота электромагнитного поля).

Поскольку  $\operatorname{Re} k_m^2 = k_0^2 \varepsilon_m$ ,  $\operatorname{Im} k_m^2 = -k_0^2 \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}$ , то выражение для угла преломления в рассматриваемой системе отсчёта примет вид

$$\theta'_m = \arctg \frac{\frac{v_0}{c}}{\sqrt{\frac{1}{2} \left[ \sqrt{\left( \varepsilon_m - \left( \frac{v_0}{c} \right)^2} \right)^2 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \varepsilon_0^2} + \left( \varepsilon_m - \left( \frac{v_0}{c} \right)^2 \right) \right]}}.$$

Коэффициенты отражения связаны с углами падения и преломления согласно формулам Френеля:

$$\rho_1 = \frac{Z_m \cos(\theta') - Z_0 \cos(\theta'_m)}{Z_m \cos(\theta') + Z_0 \cos(\theta'_m)}, \quad \rho_2 = \frac{Z_0 \cos(\theta') - Z_m \cos(\theta'_m)}{Z_0 \cos(\theta') + Z_m \cos(\theta'_m)}.$$

Компоненты результирующего поля вблизи поверхности проводника в движущейся системе отсчёта имеют вид:

$$E'_{1x} = \frac{E_0}{\sqrt{1 - \left( \frac{v_0}{c} \right)^2}} (1 + \rho_1), \quad H'_{1y} = H_0 \frac{\frac{v_0}{c}}{\sqrt{1 - \left( \frac{v_0}{c} \right)^2}} (1 + \rho_1); \quad H'_{1z} = H_0 (1 - \rho_1),$$

$$E'_{2y} = \frac{E_0 \frac{v_0}{c}}{\sqrt{1 - \left( \frac{v_0}{c} \right)^2}} (1 - \rho_2); \quad E'_{2z} = \frac{E_0}{\sqrt{1 - \left( \frac{v_0}{c} \right)^2}} (1 - \rho_2); \quad H'_{2x} = H_0 \frac{(1 + \rho_2)}{\sqrt{1 - \left( \frac{v_0}{c} \right)^2}}.$$

Тангенциальные компоненты поля в исходной системе отсчёта в соответствии с преобразованиями Лоренца:

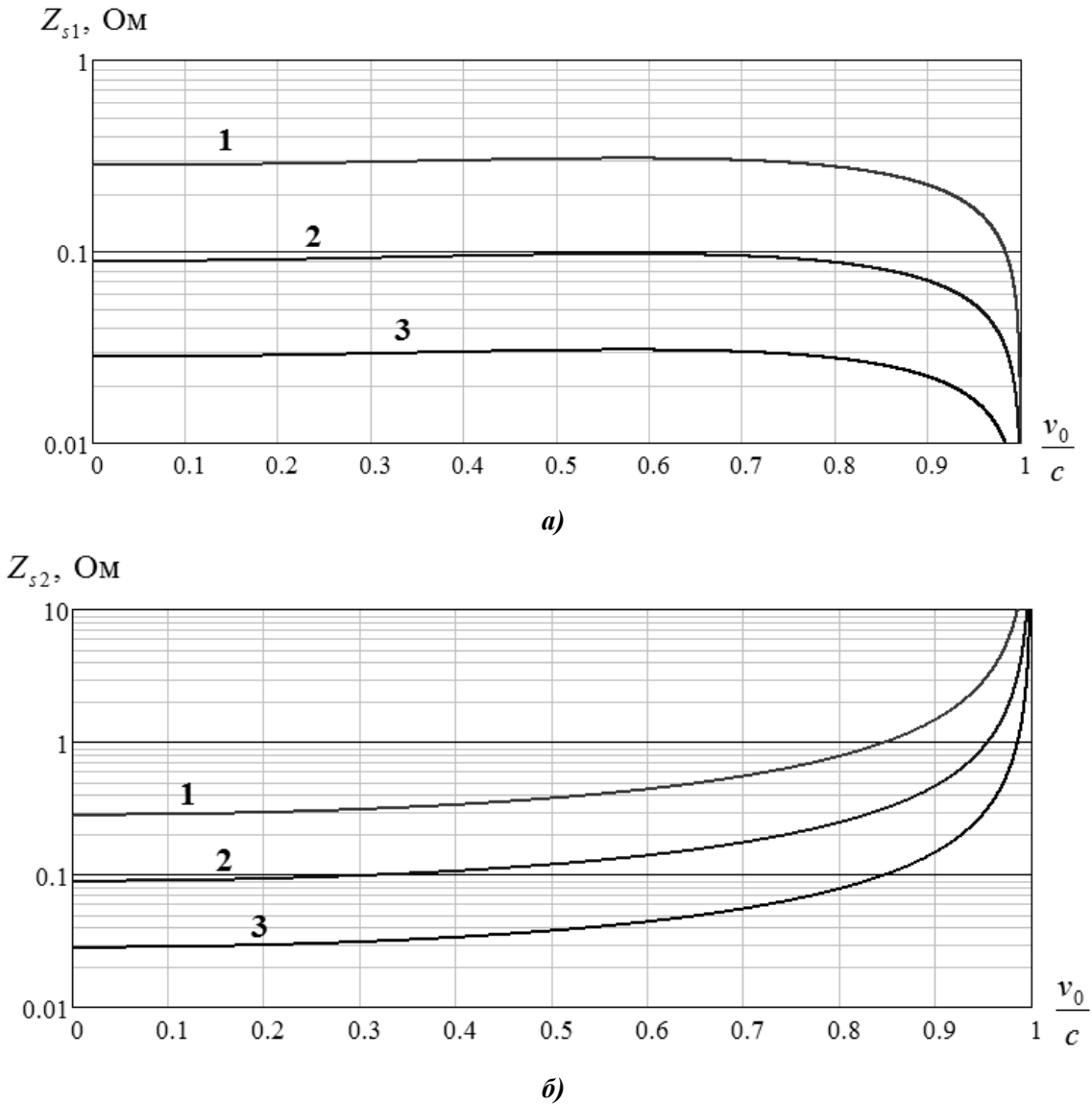
$$E_{1x} = \frac{E_0 \left( 1 + \left( \frac{v_0}{c} \right)^2 \right)}{\sqrt{1 - \left( \frac{v_0}{c} \right)^2}} (1 + \rho_1); \quad H_{1z} = H_0 (1 - \rho_1); \quad E_{2z} = \frac{E_0}{\sqrt{1 - \left( \frac{v_0}{c} \right)^2}} (1 - \rho_2); \quad H_{2x} = H_0 (1 + \rho_2).$$

Таким образом, импеданс движущейся проводящей поверхности для волн различной поляризации определяется выражениями:

$$Z_{s1} = \frac{E_{1x}}{H_{1z}} = \frac{1 + \rho_1}{1 - \rho_1} \left( 1 + \left( \frac{v_0}{c} \right)^2 \right) Z_1 = \frac{Z_m}{\cos \theta'_m} \sqrt{1 - \left( \frac{v_0}{c} \right)^2} \left( 1 + \left( \frac{v_0}{c} \right)^2 \right);$$

$$Z_{s2} = \frac{E_{2z}}{H_{2x}} = \frac{1 - \rho_2}{1 + \rho_2} \frac{1}{\sqrt{1 - \left( \frac{v_0}{c} \right)^2}} Z_1 = Z_m \cos \theta'_m \frac{1}{1 - \left( \frac{v_0}{c} \right)^2}.$$

На рис. 2 приведены зависимости от скорости рассматриваемой системы отсчета поверхностных импедансов для волн перпендикулярной ( $s$ ) и параллельной ( $p$ ) поляризации соответственно.

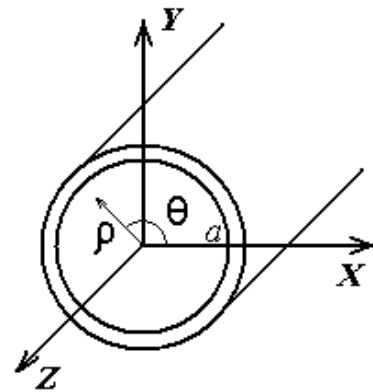


**Рис. 2.** Зависимость поверхностного импеданса проводящей поверхности для волны *p*-поляризации от скорости рассматриваемой системы отсчёта ( $f = 10$  ГГц) при:  
 1 -  $\sigma = 10^6$  См/м; 2 -  $\sigma = 10^7$  См/м; 3 -  $\sigma = 10^8$  См/м

Полученные выражения можно применять для любой проводящей поверхности, радиус кривизны которой много больше толщины скин слоя. В частности, ими можно пользоваться при расчёте круглого и прямоугольного экранированных волноводов.

Рассмотрим круглый экранированный волновод без диэлектрического заполнения (рис. 3).

Считаем, что толщина проводящей стенки волновода много больше глубины проникновения поля. В случае конечной проводимости стенок волновода нельзя говорить только о *E*- либо *H*-волнах. Строго говоря, отличны от нуля все шесть компонент поля, т.е. волны являются гибридными. Выражения для компонент поля волн круглого волновода имеют вид:



**Рис. 3.** Поперечное сечение круглого экранированного волновода

$$\begin{aligned}
 E_\rho &= -j \left( \frac{A\beta}{\chi} J'_n(\chi\rho) + \frac{Bn\omega\mu_0}{\chi^2\rho} J_n(\chi\rho) \right) \cos n\theta \exp[j(\omega t - \beta z)]; \\
 E_\theta &= j \left( \frac{An\beta}{\chi^2\rho} J_n(\chi\rho) + \frac{B\omega\mu_0}{\chi} J'_n(\chi\rho) \right) \sin n\theta \exp[j(\omega t - \beta z)]; \\
 E_z &= A J_n(\chi\rho) \cos n\theta \exp[j(\omega t - \beta z)]; \\
 H_\rho &= -j \left( \frac{An\omega\varepsilon_0}{\chi^2\rho} J_n(\chi\rho) + \frac{B\beta}{\chi} J'_n(\chi\rho) \right) \sin n\theta \exp[j(\omega t - \beta z)]; \\
 H_\theta &= -j \left( \frac{A\omega\varepsilon_0}{\chi} J'_n(\chi\rho) + \frac{Bn\beta}{\chi^2\rho} J_n(\chi\rho) \right) \cos n\theta \exp[j(\omega t - \beta z)]; \\
 H_z &= B J_n(\chi\rho) \sin n\theta \exp[j(\omega t - \beta z)].
 \end{aligned} \tag{1}$$

Гибридность волн, связанная с наличием потерь в стенках волновода, не является ярко выраженной. Для значений конечной удельной проводимости имеется семейство волн с отношением амплитудных коэффициентов  $A/B \ll Z_0$ , которые при стремлении удельной проводимости к бесконечности переходят в  $H$ -волны, и семейство волн с отношением амплитудных коэффициентов  $A/B \gg Z_0$ , которые при стремлении удельной проводимости к бесконечности переходят в  $E$ -волны. То есть можно говорить о квази  $H$ -волнах и квази  $E$ -волнах.

Дисперсионное уравнение волн круглого экранированного волновода с неидеально проводящей стенкой

$$\left[ J_n(\chi a) - jZ_s \frac{\omega\varepsilon_0}{\chi} J'_n(\chi a) \right] \left[ j \frac{\omega\mu_0}{\chi} J'_n(\chi a) - Z_s J_n(\chi a) \right] = Z_s \left[ \frac{n\beta}{\chi^2 a} J_n(\chi a) \right]^2, \tag{2}$$

где  $\beta$  - постоянная распространения (в данном случае величина комплексная:  $\beta = \text{Re}\beta + j \text{Im}\beta$  ( $\text{Re}\beta$  - фазовая постоянная,  $\text{Im}\beta$  - коэффициент затухания)),  $Z_s$  - импеданс проводящей поверхности стенок волновода.

Решение данного дисперсионного уравнения для нескольких волн круглого волновода с медными стенками было дано в [2]. Однако дисперсионное уравнение было получено с использованием импедансных граничных условий, которые выполняются строго только в случае нормального падения волн на проводящую стенку. Данное ограничение можно обойти, если воспользоваться полученными ранее выражениями для поверхностного импеданса.

Сначала запишем выражения для полей в системе отсчёта, движущейся вдоль оси волновода со скоростью, при которой действительная часть постоянной распространения волны равна нулю. В этом случае падение парциальных волн, образующих азимутально симметричные направляемые моды, на поверхность проводящего экрана будет нормальным и граничные условия Шукина-Леонтовича выполняются строго.

$$\begin{aligned}
 E'_\rho &= -j \left( \frac{A\beta'}{\chi'} J'_n(\chi'\rho') + \frac{Bn\omega'\mu_0}{\chi'^2\rho'} J_n(\chi'\rho') \right) \cos n\theta' \exp[\text{Im}(\beta' z')] \exp[j\omega' t']; \\
 E'_\theta &= j \left( \frac{An\beta'}{\chi'^2\rho'} J_n(\chi'\rho') + \frac{B\omega'\mu_0}{\chi'} J'_n(\chi'\rho') \right) \sin n\theta' \exp[\text{Im}(\beta' z')] \exp[j\omega' t']; \\
 E'_z &= A J_n(\chi'\rho') \cos n\theta' \exp[\text{Im}(\beta' z')] \exp[j\omega' t']; \\
 H'_\rho &= -j \left( \frac{An\omega'\varepsilon_0}{\chi'^2\rho'} J_n(\chi'\rho') + \frac{B\beta'}{\chi'} J'_n(\chi'\rho') \right) \sin n\theta' \exp[\text{Im}(\beta' z')] \exp[j\omega' t']; \\
 H'_\theta &= -j \left( \frac{A\omega'\varepsilon_0}{\chi'} J'_n(\chi'\rho') + \frac{Bn\beta'}{\chi'^2\rho'} J_n(\chi'\rho') \right) \cos n\theta' \exp[\text{Im}(\beta' z')] \exp[j\omega' t'];
 \end{aligned}$$

$$H'_z = B J_n(\chi' \rho') \sin n\theta' \exp[\operatorname{Im}(\beta' z')] \exp[j\omega' t'].$$

Граничные условия записываются в виде

$$\frac{E'_z}{H'_0} = -Z_s, \quad \frac{E'_0}{H'_z} = Z_s, \quad \text{где в случае квази } H\text{-волн берётся } Z_{1s}, \text{ а в случае квази } E\text{-волн} - Z_{2s}.$$

В результате получаем дисперсионное уравнение

$$\left[ J_n(\chi'a) - jZ_s \frac{\omega' \epsilon_0}{\chi'} J'_n(\chi'a) \right] \left[ j \frac{\omega' \mu_0}{\chi'} J'_n(\chi'a) - Z_s J_n(\chi'a) \right] = Z_s \left[ \frac{n \operatorname{Im}(\beta')}{\chi'^2 a} J_n(\chi'a) \right]^2,$$

которое в сочетании с соотношением  $\chi'^2 - \operatorname{Im}^2(\beta') = \left(\frac{\omega'}{c}\right)^2$  позволяет найти зависимость  $\beta'(\omega')$ .

При переходе к неподвижной системе отсчета компоненты поля, волнового вектора и частота изменяются в соответствии с преобразованиями Лоренца:  $\chi = \chi'$ ,  $\omega = \frac{\omega' + v\beta'}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$ .

Продольное волновое число находится из выражения  $\beta = \sqrt{\left(\frac{\operatorname{Re}(\omega)}{c}\right)^2 - \chi^2}$ . Величина потерь на единицу длины волновода  $L(\text{дБ/м}) = 20 \lg(\exp(\operatorname{Im}(\beta)))$ .

На рис. 4 показана зависимость погонных потерь от частоты для волн  $H_{01}$  и  $E_{01}$  круглого экранированного волновода в случае медных стенок.

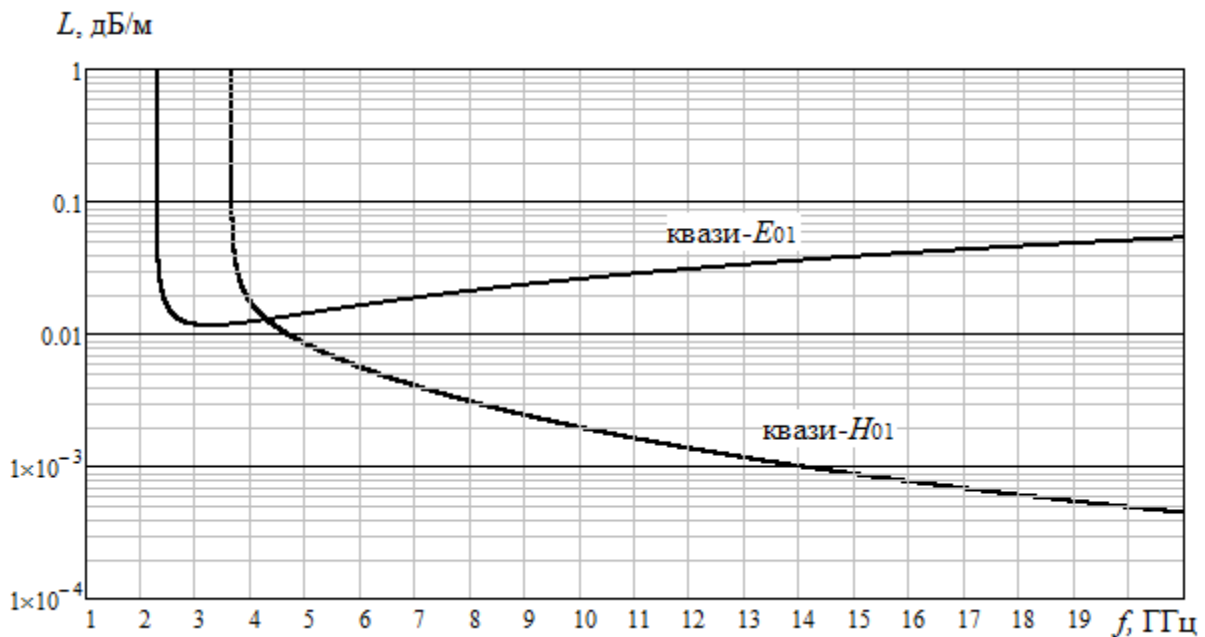
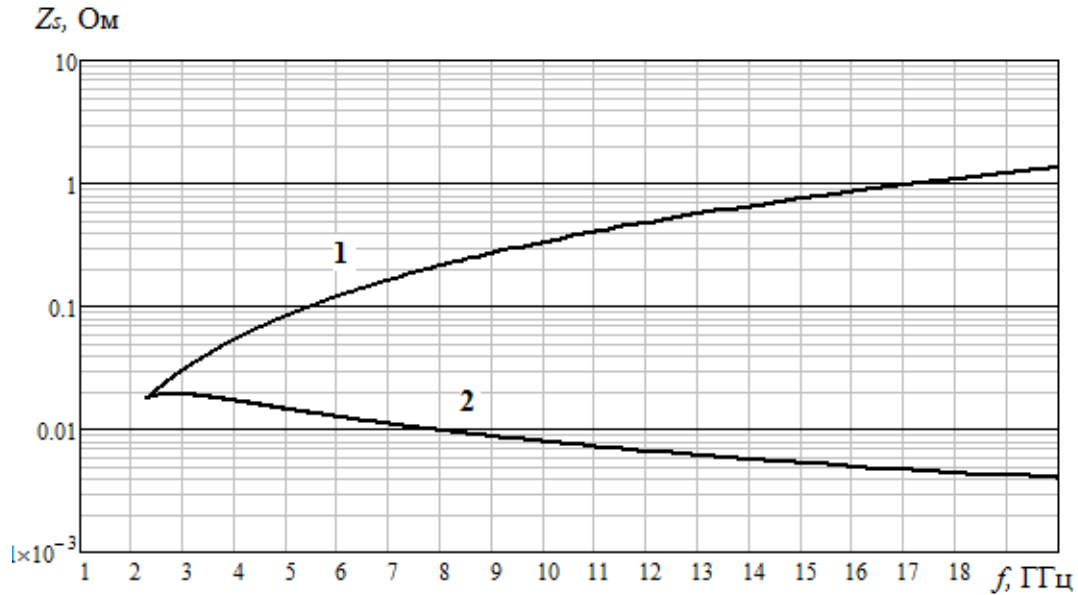


Рис. 4. Зависимость погонных потерь от частоты,  $a = 5$  см

Как видно из графиков, затухание обеих волн уменьшается при удалении от критической частоты. Однако далее характер зависимостей заметно различается. В то время как затухание волны  $H_{01}$  продолжает неограниченно уменьшаться, затухание волны  $E_{01}$  достигает минимума и далее начинает возрастать. Это связано с разной зависимостью поверхностного импеданса от частоты для полей разной структуры. Эти зависимости для рассматриваемых волн приведены на рис. 5.

Как видно из приведенных зависимостей погонных потерь от частоты результаты, полученные предлагаемым методом, хорошо согласуются с известными результатами [6], [10],

позволяя, кроме того, учесть зависимость импеданса экранирующей поверхности от частоты и структуры поля.



**Рис. 5. Зависимость от частоты импеданса поверхности:**  
 1 – для волны  $p$ -поляризации; 2 – для волны  $s$ -поляризации

Рассмотрим прямоугольный экранированный волновод без диэлектрического заполнения. Считаем, что толщина проводящих стенок волновода много больше глубины проникновения поля. В случае конечной проводимости стенок волновода отличны от нуля все шесть компонент поля – волны являются гибридными. Выражения для компонент поля волн прямоугольного волновода имеют вид:

$$E_x = -\frac{j}{\chi^2} (E_0 \gamma \chi_x - H_0 \omega \mu_0 \chi_y) \cos(\chi_x x + \varphi_x) \sin(\chi_y y + \varphi_y) e^{-j\gamma z};$$

$$E_y = -\frac{j}{\chi^2} (E_0 \gamma \chi_y + H_0 \omega \mu_0 \chi_x) \sin(\chi_x x + \varphi_x) \cos(\chi_y y + \varphi_y) e^{-j\gamma z};$$

$$E_z(x, y) = E_0 \sin(\chi_x x + \varphi_x) \sin(\chi_y y + \varphi_y) e^{-j\gamma z};$$

$$H_x = \frac{j}{\chi^2} (H_0 \gamma \chi_x + E_0 \omega \epsilon_0 \chi_y) \sin(\chi_x x + \varphi_x) \cos(\chi_y y + \varphi_y) e^{-j\gamma z};$$

$$H_y = \frac{j}{\chi^2} (H_0 \gamma \chi_y - E_0 \omega \epsilon_0 \chi_x) \cos(\chi_x x + \varphi_x) \sin(\chi_y y + \varphi_y) e^{-j\gamma z};$$

$$H_z(x, y) = H_0 \cos(\chi_x x + \varphi_x) \cos(\chi_y y + \varphi_y) e^{-j\gamma z};$$

где 
$$\varphi_x = \frac{1}{2}(m\pi - \chi_x a), \quad \varphi_y = \frac{1}{2}(n\pi - \chi_y b).$$

Дисперсионные уравнения волн прямоугольного экранированного волновода с неидеально проводящими стенками

$$\left\{ \begin{array}{l} \left( \frac{j\omega\mu_0\chi_y \operatorname{tg}(\chi_y b + \varphi_y)}{\chi_x^2 + \chi_y^2} + Z_s \right) \left( \frac{j\omega\epsilon_0\chi_y \operatorname{ctg}(\chi_y b + \varphi_y)}{\chi_x^2 + \chi_y^2} - \frac{1}{Z_s} \right) = \left( \frac{\gamma\chi_x}{\chi_x^2 + \chi_y^2} \right)^2; \\ \left( \frac{j\omega\mu_0\chi_x \operatorname{tg}(\chi_x a + \varphi_x)}{\chi_x^2 + \chi_y^2} + Z_s \right) \left( \frac{j\omega\epsilon_0\chi_x \operatorname{ctg}(\chi_x a + \varphi_x)}{\chi_x^2 + \chi_y^2} - \frac{1}{Z_s} \right) = \left( \frac{\gamma\chi_y}{\chi_x^2 + \chi_y^2} \right)^2. \end{array} \right.$$

Данные дисперсионные уравнения являются приближенными, поскольку получены с использованием импедансных граничных условий, которые выполняются строго только в случае нормального падения волн на проводящую стенку. Для получения строгих дисперсионных уравнений нужно воспользоваться полученными ранее выражениями для поверхностного импеданса.

Запишем выражения для полей в системе отсчёта, движущейся вдоль оси волновода со скоростью, при которой действительная часть постоянной распространения волны равна нулю. В этом случае падение парциальных волн, образующих квази- $E_{mn}$  направляемые моды, на поверхность проводящего экрана будет нормальным, и граничные условия Щукина-Леонтовича выполняются строго.

$$E'_x = -\frac{j}{\chi^2} (E_0 \gamma' \chi'_x - H_0 \omega' \mu_0 \chi'_y) \cos(\chi'_x x' + \varphi'_x) \sin(\chi'_y y' + \varphi'_y) \exp[\operatorname{Im}(\gamma' z')] \exp[j\omega' t'];$$

$$E'_y = -\frac{j}{\chi'^2} (E_0 \gamma' \chi'_y + H_0 \omega' \mu_0 \chi'_x) \sin(\chi'_x x' + \varphi'_x) \cos(\chi'_y y' + \varphi'_y) \exp[\operatorname{Im}(\gamma' z')] \exp[j\omega' t'];$$

$$E'_z = E_0 \sin(\chi_x x + \varphi_x) \sin(\chi_y y + \varphi_y) \exp[\operatorname{Im}(\gamma' z')] \exp[j\omega' t'];$$

$$H'_x = \frac{j}{\chi'^2} (H_0 \gamma' \chi'_x + E_0 \omega' \varepsilon_0 \chi'_y) \sin(\chi'_x x' + \varphi'_x) \cos(\chi'_y y' + \varphi'_y) \exp[\operatorname{Im}(\gamma' z')] \exp[j\omega' t'];$$

$$H'_y = \frac{j}{\chi'^2} (H_0 \gamma' \chi'_y - E_0 \omega' \varepsilon_0 \chi'_x) \cos(\chi'_x x' + \varphi'_x) \sin(\chi'_y y' + \varphi'_y) \exp[\operatorname{Im}(\gamma' z')] \exp[j\omega' t'];$$

$$H'_z = H_0 \cos(\chi'_x x' + \varphi'_x) \cos(\chi'_y y' + \varphi'_y) \exp[\operatorname{Im}(\gamma' z')] \exp[j\omega' t']$$

Граничные условия записываются в виде:

$$y' = 0; \quad b: \frac{E'_z}{H'_x} = -\frac{E'_x}{H'_z} = Z_S; \quad x' = 0, \quad a: \frac{E'_y}{H'_z} = -\frac{E'_z}{H'_y} = Z_S,$$

где в случае квази- $H$ -волн берётся  $Z_{1s}$ , а в случае квази- $E$ -волн –  $Z_{2s}$ .

В результате получаем систему дисперсионных уравнений:

$$\left[ \left( \frac{j\omega' \mu_0 \chi'_y \operatorname{tg}(\chi'_y b + \varphi'_y)}{\chi_x'^2 + \chi_y'^2} + Z_S \right) \left( \frac{j\omega' \varepsilon_0 \chi'_y \operatorname{ctg}(\chi'_y b + \varphi'_y)}{\chi_x'^2 + \chi_y'^2} - \frac{1}{Z_S} \right) = \left( \frac{\operatorname{Im}(\gamma') \chi'_x}{\chi_x'^2 + \chi_y'^2} \right)^2, \right.$$

$$\left[ \left( \frac{j\omega' \mu_0 \chi'_x \operatorname{tg}(\chi'_x a + \varphi'_x)}{\chi_x'^2 + \chi_y'^2} + Z_S \right) \left( \frac{j\omega' \varepsilon_0 \chi'_x \operatorname{ctg}(\chi'_x a + \varphi'_x)}{\chi_x'^2 + \chi_y'^2} - \frac{1}{Z_S} \right) = \left( \frac{\operatorname{Im}(\gamma') \chi'_y}{\chi_x'^2 + \chi_y'^2} \right)^2, \right.$$

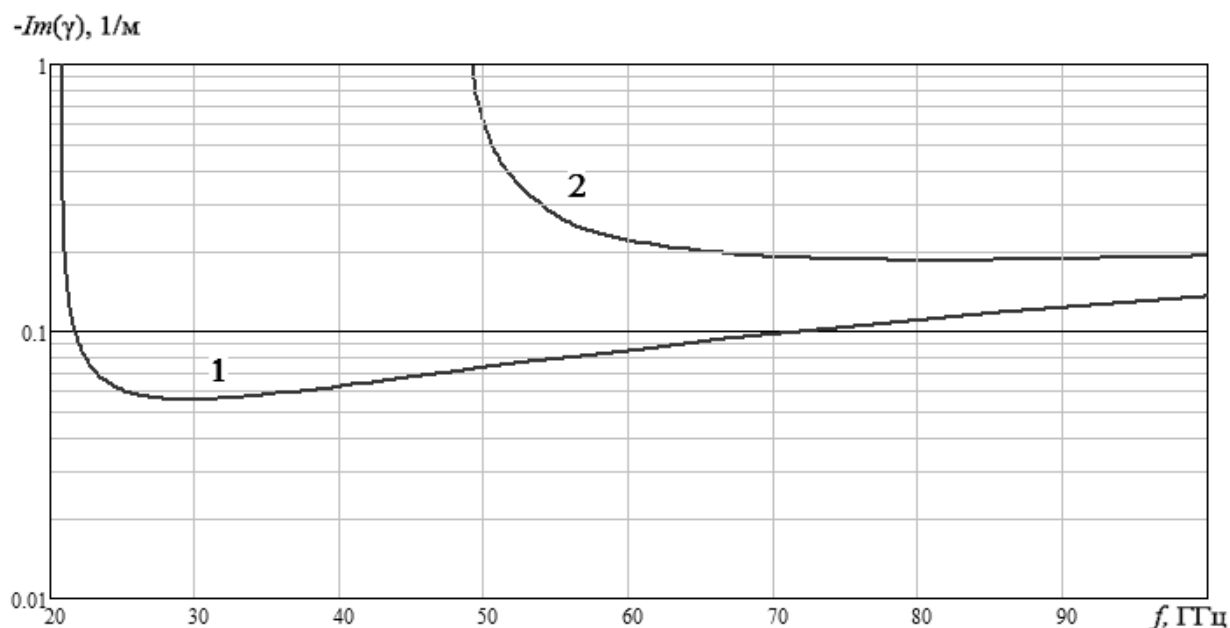
которая в сочетании с соотношением  $\chi'^2 - \operatorname{Im}^2(\gamma') = \left( \frac{\omega'}{c} \right)^2$  позволяет найти зависимость  $\gamma'(\omega')$ .

При переходе к неподвижной системе отсчета компоненты поля, волнового вектора и частота изменяются в соответствии с преобразованиями Лоренца

$$\chi = \chi', \quad \omega = \frac{\omega' + v\gamma'}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}.$$

Продольное волновое число находится из выражения  $\gamma = \sqrt{\left( \frac{\operatorname{Re}(\omega)}{c} \right)^2 - \chi^2}$ .

Зависимость коэффициентов затухания от частоты для волн квази- $H_{10}$  и квази- $E_{11}$  для прямоугольного волновода с размерами поперечного сечения 7,2x3,4 мм и проводимостью материала стенок  $\sigma = 5,8 \cdot 10^7$  см/м приведены на рис. 6.



**Рис. 6. Частотные зависимости коэффициента затухания направляемых мод при проводимости  $\sigma = 5,8 \cdot 10^7$  см/м:**  
 1 – квази- $H_{10}$ ; 2 – квази- $E_{11}$

Представленные зависимости погонных потерь от частоты, полученные предлагаемым методом, хорошо согласуются с известными результатами [6-8].

Таким образом, была поставлена и решена задача о нормальном падении электромагнитных волн взаимно ортогональных поляризаций на поверхность движущегося проводника. В результате решения этой задачи показано, что зависимости поверхностных импедансов от скорости движения проводника (или скорости рассматриваемой системы отсчета) имеют разный характер для волн ортогональных поляризаций.

На основании проведенных расчетов и полученных зависимостей сформулирована методика строгого электродинамического расчета направляющих структур, ограниченных неидеально проводящими поверхностями, учитывающая зависимости поверхностного импеданса от поляризации электромагнитной волны и проводимости материала ограничивающих стенок.

Приведены результаты расчета погонных потерь в круглом волноводе с неидеально проводящими стенками, рассчитанные с помощью разработанного метода, основанного на инвариантности уравнений Максвелла относительно преобразований Лоренца. При расчетах учтены зависимости поверхностного импеданса экранирующих поверхностей от их проводимости, а также частоты и поляризации направляемой моды.

#### Библиографический список

1. **Ильинский, А.С.** Колебания и волны в электродинамических системах с потерями / А.С. Ильинский, Г.Я. Слепян. – М. : Изд-во МГУ, 1983. – 232 с.
2. Conductor Loss in Hollow Waveguides Using a Surface Integral Formulation / M. Swaminathan [et al.]. – IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. V. 40. №. 11. 1992. P. 2034–20413.
3. **Кураев, А.А.** О влиянии конечной проводимости металлических стенок на характеристики мощных релятивистских приборов СВЧ с нерегулярными электродинамическими системами / А.А. Кураев, А.К. Сеницын // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМико 2006): материалы 16-й Междунар. Крымской конф., 11-15 сентября 2006 г. – Севастополь: Вебер, 2006. Т. 1. С. 238–240.



4. **Кураев, А.А.** Поля в продольно-периодических волноводах с учетом потерь в металлических стенках / А.А. Кураев, А.К. Сеницын, С.И. Яроменок // Доклады БГУИР. 2008. № 1(31). С. 48–53.
5. **Котельников, И.А.** О затухании в волноводе / И.А. Котельников // Журнал технической физики. 2004. Т. 74. № 9. С. 95–966.
6. **Никольский, В.В.** Электродинамика и распространение радиоволн / В.В. Никольский, Т.И. Никольская. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Наука, 1989. – 544 с.
7. **Бирюков, В.В.** Учет конечной проводимости при расчете волноводов СВЧ и КВЧ диапазонов на основе релятивистского подхода / В.В. Бирюков // Письма в ЖТФ. – 2008. Т. 34. Вып. 2. С. 75–82.
8. **Бирюков, В.В.** Структура электромагнитного поля круглого экранированного волновода в движущейся системе отсчета / В.В. Бирюков, В.А. Грачев // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. Вып. 14. С. 21–29.
9. **Бирюков, В.В.** Моделирование электромагнитного поля прямоугольного волновода с использованием преобразований Лоренца / В.В. Бирюков, В.А. Грачев // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2014. № 2(1). С. 164–169.
10. **Неганов, В.А.** Электродинамика и распространение радиоволн: учеб. пособие для вузов / В.А. Неганов, О.В. Осипов, С.Б. Раевский, Г.П. Яровой; под ред. В.А. Неганова и С.Б. Раевского. – М.: Радио и связь, 2005. – 648 с.
11. **Yeap, K.H.** Wave Propagation in Lossy and Superconducting Circular Waveguides / K.H. Yeap [at al.] // Radioengineering. 2010. V. 19. № 2. P. 320–325.
12. **Бирюков, В.В.** Влияние конечной проводимости стенок на структуру поля и характеристики круглого волновода / В.В. Бирюков, В.А. Грачев // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2014. Т. 17. № 1. С. 50–53.

*Дата поступления  
в редакцию 10.02.2016*

**V.V. Biryukov, V.A. Grachev, T.V. Kozhevnikova**

## **A RELATIVISTIC METHOD OF CALCULATION CHARACTERISTICS OF CIRCULAR AND RECTANGULAR WAVEGUIDES**

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

**Purpose:** The article presents the method of calculating the characteristics of the circular waveguide.

**Design/methodology/approach:** The solution of the boundary electrodynamic problem with impedance boundary conditions method, based on invariance of the Maxwell equations relative to the Lorentz transformations is presented.

**Finding:** The ability to use rigorous boundary conditions is shown.

**Research limitations/implications:** The article presents application of the proposed method, its comparison with known results.

**Originality/value:** It is shown that the transition to the moving reference frame and using the Lorentz transformations allows to achieve strict implementation of impedance boundary conditions throughout the frequency range.

*Key words:* circular waveguide, rectangular waveguide, Helmholtz equation, dispersion equation, impedance boundary conditions, the Lorentz transformations.

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

УДК 629.113

П.О. Береснев, В.И. Филатов, А.А. Еремин, А.М. Беляев, А.В. Папунин,  
В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, В.Е. Колотилин, В.В. Беляков, А.А. Куркин

## СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЫБОРА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ, МАССОИНЕРЦИОННЫХ, МОЩНОСТНЫХ И СКОРОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГУСЕНИЧНЫХ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматриваются зависимости и делаются выводы о влиянии грузоподъемности на мощность двигателя и скорость движения гусеничных транспортно-технологических машин, которые обуславливают их подвижность, производительность и эффективность. Приводится статистическая модель рационального выбора типа гусеничной машины, систем управления маневренностью, обеспечение общей потребной мощности, грузоподъемности, максимальной скорости движения. 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))

*Ключевые слова:* гусеничный движитель, гусеничная машина, гусеничный трактор, гусеничный трелевщик, гусеничная сочлененная машина, мощность и масса гусеничной транспортно-технологической машины.

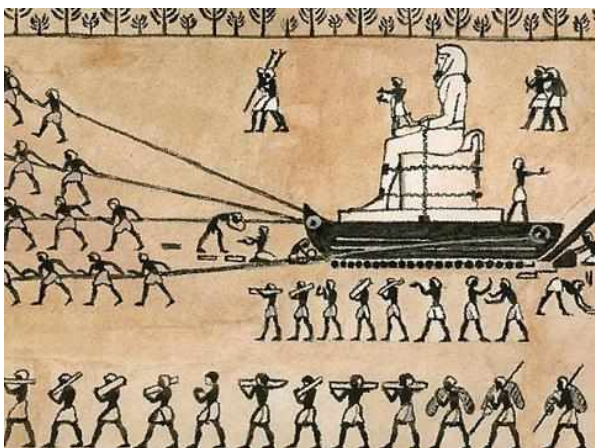
### Введение

Сегодня гусеничным движителем (ГД) примерно оснащено 25...30% всех транспортно-технологических машин (ТТМ) [1-3]. Во многих случаях он остается единственным типом опорно-тягового механизма для машин, работающих в тяжелых технических условиях и на бездорожье с преобладанием сложных рельефов, обилием профильных препятствий и доминированием слабонесущих материалов опорного основания.

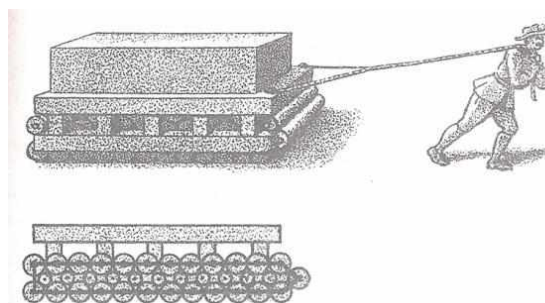
### Эволюция идеи гусеничного движителя

История изобретения гусеничного движителя относится к 1713 году, когда во французскую Академию наук изобретателем д'Эрманом был представлен проект «тележки нового устройства с приспособлением для уменьшения трения» (рис. 1) [7]. Идея его была очень проста. Между двумя платформами располагается катковая цепь («четки из катков», как называл их сам д'Эрман). Это изобретение своими корнями уходит в еще большую древность, когда для перемещения тяжёлых грузов применялись катки.

Цепь из катков перекачивается по таким же каткам, но несколько меньшего диаметра; катки вращаются на осях, укрепленных в нижней платформе. Изобретатель указывал, что в его тележке получается более равномерное распределение тяжести на большой опорной поверхности и устраняется перекашивание катков. Результатом этого и должно быть «уменьшение трения».



Возможное применение катков на строительстве Египетских пирамид



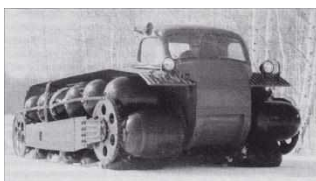
Катковый движитель д'Эрмана

Рис. 1. Катковый опорный движитель

Не рассматривая по существу предложение д'Эрмана, можно отметить, что давление на грунт в «катковом движителе» может быть меньше, чем давление на грунт в современных гусеничных движителях. В этом д'Эрман опережает не только свое время, но, возможно, и наше (рис. 2). Впрочем, уже сейчас появились платформы для перевозки негабаритных, тяжёлых объектов, где применяется набор колес (катков), представляющий собой своеобразный «катковый движитель». В свое время идея д'Эрмана, хотя и была одобрена французской Академией наук, но не нашла практического применения.



Танк Н. Циганова (БТ-5) с катково-гусеничным движителем (1935 г.)



Отечественный «ПКЦ-1» (1965 г.)



Американский «XM-759» «Аэрол»



Применение катково-гусеничного движителя на вездеходе типа Джигер

Рис. 2. Катково-гусеничный движитель



Рис. 3. Гусеничный движитель Эджворта-Джермана (1770 г.)

Первым проектом подлинно гусеничного движителя следует считать проект англичанина Ричарда Эджворта, предложенный им в 1770 г., после опытов французского инженера Николя Жозефа Кюньо, который в 1769 г. сконструировал первый паровой автомобиль. По проекту Эджворта (рис. 3) на передние и задние колеса повозки надевается замкнутая цепь, состоящая из скрепленных между собой деревянных брусьев. Перематываемая на ходу цепь расстилается перед повозкой, образуя бесконечную дорожку, по которой повозка легко преодолевает неровности пути. В 1801 г. ту же идею развивает Томас Джерман, предлагая «средство облегчить движение, заменив гусеничной цепью или серией катков обыкновенные колеса» (рис. 3).

Все позднейшие изобретения в этой области, так или иначе, варьируют проект Эджворда-Джермана, внося в него отдельные усовершенствования.

Историческая легенда утверждает, что годом создания гусеничного движителя можно считать 1818 год, когда француз Дюбоше (по некоторым версиям д'Боше) получил привилегию на способ «устройства экипажей с подвижными рельсовыми путями». Однако конкретных данных по этому изобретению не имеется.

Помимо гусеницы как части гусеничного движителя для автотранспортной техники и задолго до изобретения гусеничных амфибий, гусеница также применялась в качестве движителя для водного транспорта, такая гусеница представляла собой «конвейер с веслами». Она была предложена в 1782 г. изобретателем Десбланксом, но была запатентована в 1839 г. Уильямом Левенуорфом в США (рис. 4).

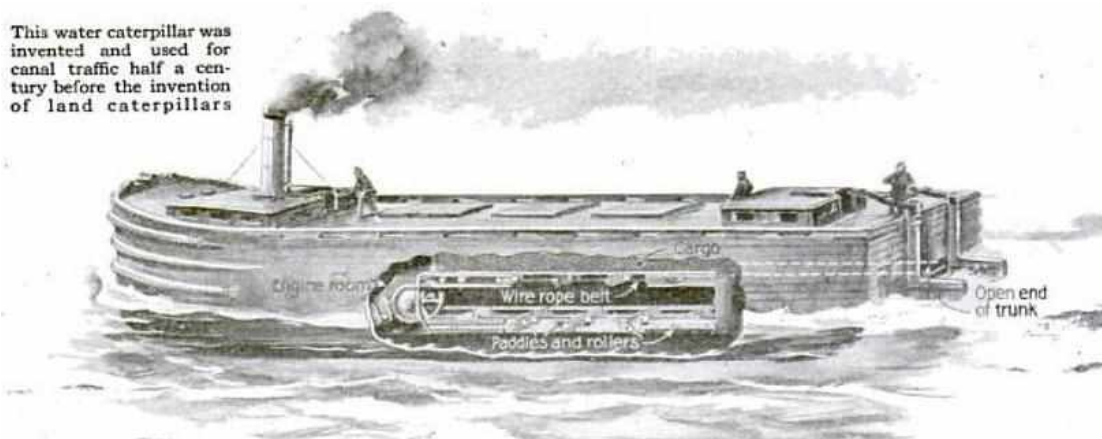


Рис. 4. Гусеничный движитель Десбланкса для водного транспорта (1782 г.)

Однако бурное развитие конструкции гусеничного движителя и создание транспортно-технологических машин на его основе относится к концу XIX - началу XX вв. Этот период ознаменовался тем, что развитие движителей для передвижения в условиях бездорожья осуществлялось двумя способами: созданием колесного движителя повышенной проходимости и созданием гусеничного движителя.

В 1821 г. англичанин Джон Ричард Бэрри получил патент на изобретение «бесконечных цепей, намотанных на два задних колеса повозки по одной с каждой стороны». На рис. 7 показано колесо с надетой на него гусеничной цепью - проект Льюиса Гомперса, (1831 г.). По идее разработки Гомперса, укладываемые на землю звенья цепи должны уменьшить давление колеса на грунт и тем самым повысить его проходимость по мягким грунтам.

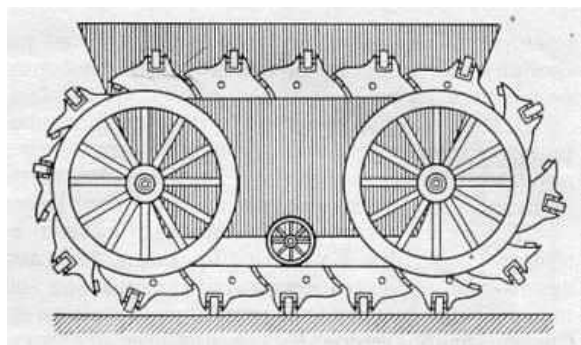


Рис. 5. Проект гусеничной повозки Кейля с поперечными роликами для облегчения поворота (Англия, 1825 г.)

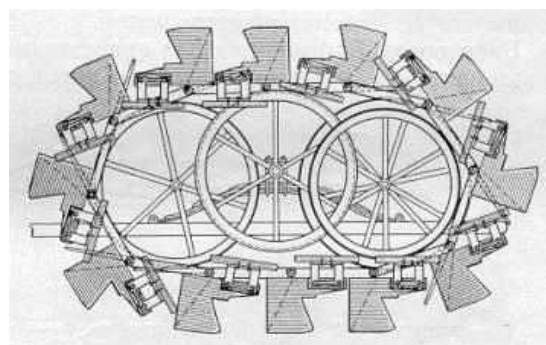


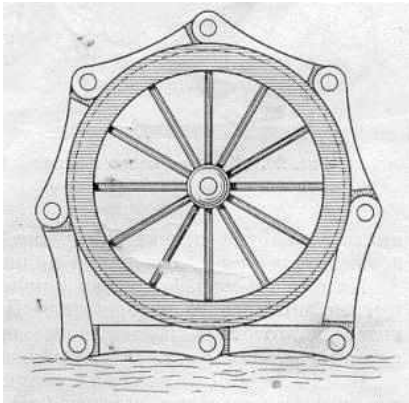
Рис. 6. Гусеничный движитель Уэлча (1857 г.)

К середине XIX в. относятся два знаменательных изобретения в области конструкций гусеничных движителей. На рис. 5 показан проект «универсальной рельсовой дороги» выда-

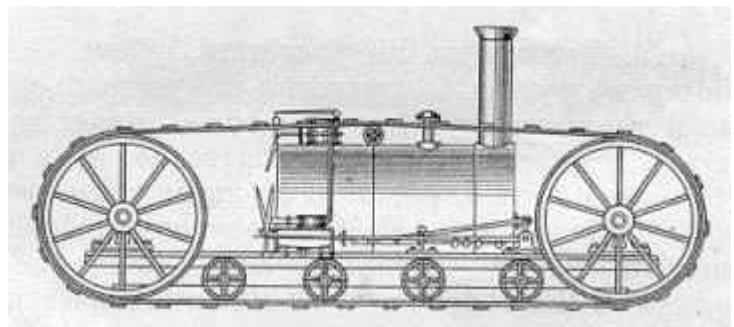
ющегося английского изобретателя Джорджа Кейля (1825 год). В нем следует отметить поставленные на звенья цепи поперечные ролики, которые должны служить для облегчения поворота. В 1857 году Джемс Уэлч получил патент на «усовершенствованную переносную рельсовую дорогу» (рис. 6).

Кроме самих разработок гусеничных лент и цепей, в XIX в. уже существовало ряд проектов паровых гусеничных тракторов. Первая паровая гусеничная машина английского изобретателя (рис. 8) использовалась в течение двух лет на разработке болотистых земель в Ланкашире. В 1832 г. Дж. Гиткота получил патент на машину «для осушки и разработки болотистых земель, слишком вязких для возделывания при помощи лошадей и рогатого скота». Паровой трактор Гиткота имел гусеницы, звенья которых состояли из деревянных рам, обтянутых полотном. Гусеницы охватывали два больших колеса, при помощи которых осуществлялось их перематывание. Вот что писали об этой машине современники Гиткота: «Описываемый нами патент является важнейшим из выданных за последнее время ... О достоинствах этой машины и о представляемых ею преимуществах можно было бы написать целые тома. В течение двух последних лет мы сами неоднократно видели, как эта машина работала на так называемом Красном болоте у города Болтона (в Ланкашире), и могли вполне оценить даваемые ею результаты».

Другой из разработок паровых гусеничных тракторов был проект 1884 г. машины Джорджа Пэйджа (рис. 9) из штата Мэриленд США, который так и не был практически реализован.



**Рис. 7.** Гусеничная цепь, надетая на колесо для повышения проходимости по мягким грунтам (Гомперс, 1831 г.)

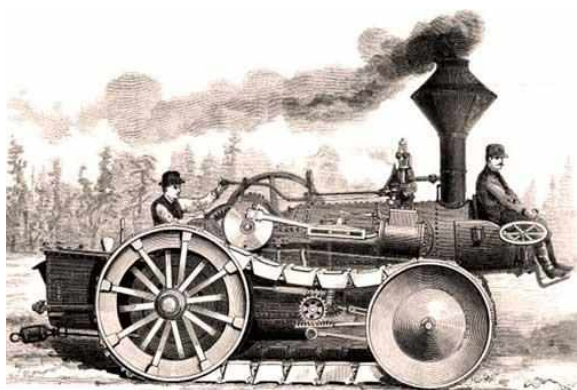


**Рис. 8.** Первый гусеничный паровой трактор Гиткота (Англия, 1832 г.)

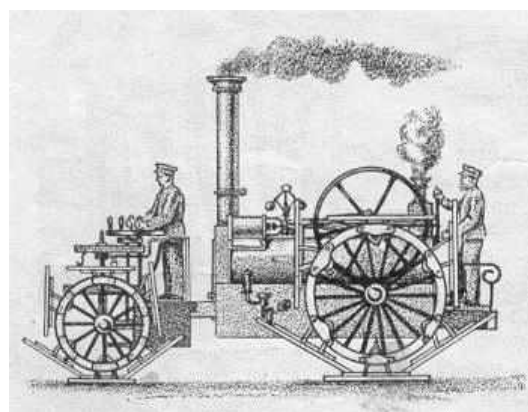
В 1856 году в Крымскую кампанию англичане применяли паровой трактор Бойделя (рис. 10). Эта машина привлекла внимание военных кругов своей высокой проходимостью по местности. Колеса трактора были снабжены широкими качающимися плитами, которые укладывались на дороге, уменьшая, благодаря своей большой площади, давление на грунт. Английское военное ведомство проводило и после войны опыты с трактором Бойделя.

Вот что писал корреспондент одного из журналов того времени: «В течение последней недели в Гайд-Парке производилось публичное испытание свойств великолепного локомотива для обыкновенных дорог, перед тем как машина и вагоны будут отправлены в Бомбей... Машина превосходно слушается управления, даже на самых крутых поворотах на обыкновенных улицах, и легко взбирается и спускается по крутым склонам... Машина свободно везет от 60 до 70 т груза по обыкновенной проселочной дороге со скоростью 4 мили в час. К машине было прицеплено пять огромных повозок, специально изготовленных для этой цели на фабрике Кроскиля... Сто шестьдесят гвардейских солдат в снаряжении были посажены в вагоны, и с этим грузом поезд легко двигался по лужайкам парка со скоростью 6 миль в час... Результаты испытания оказались в высокой степени удовлетворительными; нет сомнения, что машина окажется чрезвычайно полезной на плохих дорогах Индии, особенно летом, когда пересыхают реки. Для военных целей, как перевозка боеприпасов и орудий, подобная машина окажет неоценимую помощь. Две такие машины уже заказаны для египетского паши и предназначаются для перехода через пустыню».



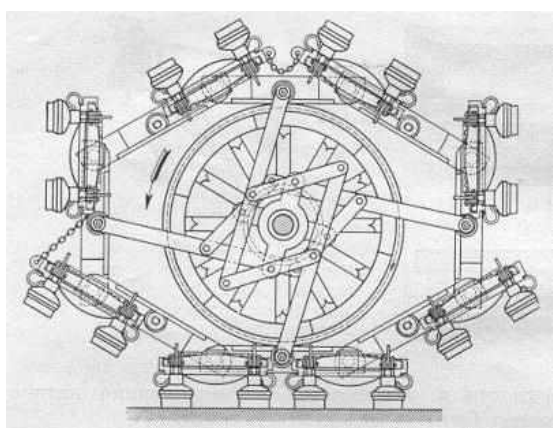


**Рис. 9. Проект гусеничного парового локомотива, разработанного Джорджем Пэйджем (1884 г.) из штата Мэриленд США**

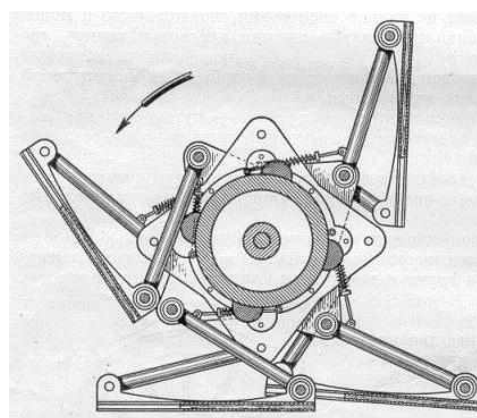


**Рис. 10. Английский паровой трактор Бойделя (1858 г.) со специальными плитами (плицами) на колесах для повышения проходимости по топким грунтам**

В 1861 г. Эндрю Денлоп взял патент на «усовершенствованную рельсовую дорогу для облегчения тяги повозок» (рис. 11). Это целая система рычагов, связанных с короткими рельсами, на которые установлены качающиеся рычаги с башмаками («ходячее колесо»). Весьма оригинальный проект «ходячего колеса» был предложен Кларком в 1891 г. (рис. 12). Это даже не колесо в обычном понимании, а сложный рычажный механизм, в котором нет ни обода, ни спиц. Над созданием таких «ходячих» механизмов работал также великий русский математик и механик Чебышев. Были и другие предложения «шагающих», «прыгающих» колес, колес «с ногами» и т. д. Все эти проекты оказались нежизненными, так как большая неравномерность движения не позволяла осуществить достаточно высокую скорость, а сложность механизмов их надежность.



**Рис. 11. «Ходячее колесо» Денлопа (1861 г.)**



**Рис. 12. «Ходячее колесо» Кларка (1891 г.)**

Над разработкой гусеничного движителя много работал француз Доминик Кабарюс (1836 год). О своих опытах он писал: *«Недалеко от Бордо в нарочито выбранной мною чрезвычайно песчаной местности я перевозил 800 фунтов груза с помощью лишь собственных рук на двухколесной тачке, причем подвижные рельсы, которыми я пользовался, были из простого дерева... Я уверен, что, будь они сделаны из металла, я смог бы везти 1200 фунтов»* [7]. На той же тачке, но без гусениц, изобретателю удавалось с огромным усилием перевозить всего 270 фунтов.

О будущем гусеничного транспорта Кабарюс писал так: *«Разве будет нелепостью думать, что экипаж, несущий на самом себе рельсовый путь и движимый силой пара, не сможет оказать великих услуг науке в деле исследования пустынь, где нет иной дороги, кроме морей зыбучего песка? Разве нельзя надеяться, что с помощью такого экипажа удастся успешно за-*

вершить отыскание прохода на северо-западе Америки? И если снега, покрывающие север Европы, скрывая все пути, как бы стремятся воспрепятствовать всякому передвижению, то разве не представляется целесообразным попытаться победить это препятствие при помощи подвижных рельсовых путей?» [7].

В 1857 году патент на «усовершенствованное устройство подвижных рельсов для буксирных паровых машин для движения по обыкновенным дорогам и вовсе без дорог» получает Вильям Ньютон. В это время над созданием гусеничного движителя работают изобретатели: Фаулер, Бертон; Риккат и др.

Большой интерес представляет проект гусеничного бронированного поезда Эдуарда Буйена (Франция, 1874 г.), который он назвал «Описание изобретения экипажей, катящихся по подвижным поворачивающимся рельсам и проходящих по большим дорогам, полям и пустырям» (рис. 13) [7]. Своему изобретению Буйен придает огромное значение. Он пишет: «Поставьте бронированную батарею на мою повозку, и вы получите самое грозное оружие войны, какое было когда-либо создано до сих пор» [7]. Он даже указывает, как тактически использовать его бронепоезд, подчеркивая необходимость его массового применения.

Бронепоезд Буйена представляет собой гусеничный паровоз с вагонами, на которые устанавливаются орудия, защищенные толстой броней. Вес поезда по расчетам Буйена - 120 т, скорость - 10 км/ч. Поезд вооружен 12 пушками и 4 митральезами (предшественники современного пулемета), которые обслуживает команда в 200 человек. Буйен получил патент на свое изобретение, но в жизнь оно не вошло.

Аналогичный проект был разработан в России (в 1911–1915 гг.) под названием «Танк Менделеева» (также «Бронированный автомобиль» Менделеева) - установившееся в историко-технической литературе обозначение первого русского и одного из первых мировых проектов танка. Будучи одним из первых в мире проектов сверхтяжёлого танка, отличался высочайшими для своего времени показателями огневой мощи и бронезащиты. Проект содержал большое количество оригинальных конструкторских решений и новшеств, однако не вышел из стадии чертежей и не был воплощён в металле, как и бронепоезд Буйена.

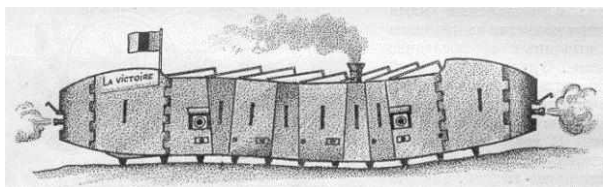


Рис.13. Проект гусеничного бронированного поезда Буйена (Франция, 1874 г.)

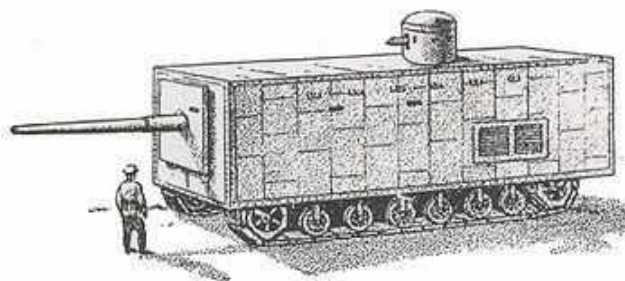


Рис.14. Танк Менделеева (Россия 1911-1914 гг.)

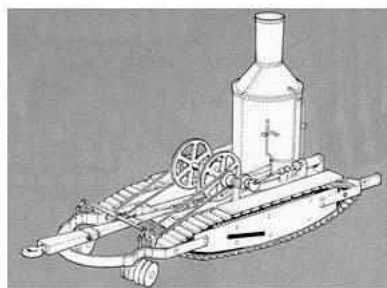
Первый патент на паровой гусеничный трактор в США был выдан только в 1888 году Ф. Беттеру (рис. 15). В Соединенных Штатах изобретение гусеничного хода восходит к концу XIX в., когда Дениэл Бест и Бенджамин Холт создали трактор с навешенным на него бульдозерным оборудованием - он и стал прообразом современного бульдозера. На рубеже веков Бест и Холт занимались модернизацией колесных тракторов с целью повышения их манёвренности и проходимости, а также проводили опыты по использованию портовых тракторов в сельском хозяйстве (1890 г). В 1925 году Бест и Холт создали компанию Caterpillar, в переводе означает «гусеница».

Таким образом, к 80-м годам XIX столетия идея гусеничного движителя окончательно оформилась. В этот же период (конец XIX – начал XX вв.) несколько фирм вели работу по созданию полугусеничных тракторов. Так, в 1904 г. в США выпускается трактор «Ломбард» (рис. 15).

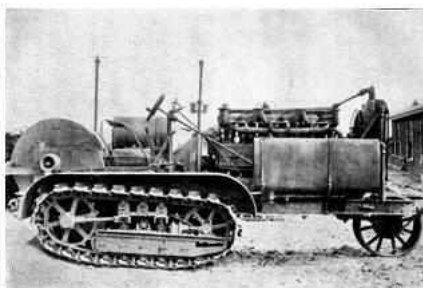
В Англии гусеничный трактор с двигателем внутреннего сгорания системы Горнсби, вместо паровых машин, был построен в 1907 году. В дальнейшем в 1912 г. появился американский гусеничный трактор с двигателем внутреннего сгорания «Холт». Хорошая для того



времени конструкция этого трактора и высокая проходимость подали авторам первых проектов гусеничных машин (Свинтон в Англии, Этьен во Франции) идею создания вездеходной гусеничной боевой машины - танка.



Трактор Ф Баттери



Трактор Холт



Трактор Холт-Катерпиллер



Трактор Горнсби



Трактор Ломбард



Трактор Рустон. Англия

Рис. 15. Первые конструкции тракторов начала XX в.

История и эволюция гусеничного движителя была бы не полной без упоминания отечественных разработчиков Блинова, Загряжского, Тертера, Маклакова, Маевского, Мимина, американца Ломбарда, англичанина Скотта, француза Кегресса и др.



Рис. 16. Федор Абрамович Блинов

**Трактор Блинова или история создания первого гусеничного движителя** (по материалам интернет-сайта <http://elso.ru/cont/ppl/230.html> и работы [4]). Одним из экспонатов Нижегородской промышленно-художественной выставка 1896 года, который даже не попал на снимки фотографов того времени, а значимость его имела мировой уровень, был первый в России и один из первых в мире гусеничный трактор Ф.А. Блинова (1831-1902 гг.).

Федор Абрамович Блинов (рис. 16) родился 25 июля 1831 года в семье старообрядцев. В юности, увлекшись пароходным делом, Федор Блинов стал подрабатывать на Волге. В период навигации он был кочегаром, затем помощником машиниста, а с осени до весны трудился в барской кузнице, занимаясь починкой сельскохозяйственного инвентаря, господских карет, бричек, крестьянских ходков и дрожек. Федор Абрамович часто наведывался в волостное село и в город к грамотным людям, у которых выпрашивал газеты, журналы и книги о сельскохозяйственных орудиях и снарядах. У Ф.А. Блинова в библиотеке хранились тома «Записок императорского русского технического общества», к которым в качестве приложения давался свод привилегий (патентов). (Впоследствии в этом своде поместят и привилегию крестьянина деревни Никольской.) Первой и любимой его



книгой был труд «О земледельных орудиях» русского профессора, агронома-рационализатора Ивана Комова.

Своими силами, своим умом, не кончая каких-либо учебных заведений, Федор Блинов - будущий великий изобретатель - пробивался к знаниям. В самообразовании виделся ему выход из деревенской темноты и суеверия. Старообрядцы из «беспоповского согласия» помогли семье Федора Блинова встать на ноги, а затем поддержали материально при постройке им «вагона на бесконечных рельсах», так именовался первый гусеничный движитель.

Работая на пароходе помощником, а потом машинистом и помощником механика, Блинов получал знания о паровых машинах. Он узнал, какие двигатели ставятся на пароходы, на паровозы, а какие служат стационарными установками и находят применение в промышленности и сельском хозяйстве. Плавая по Волге, Блинов загорелся идеей изготовления модели вагона с бесконечным цепообразным рельсом. Такая модель (рис. 17) была изготовлена в 1877 году. Блинов решил сам поехать в Петербург, хлопотать о привилегии на свое изобретение.

Поселившись временно на Калашниковской пристани, Блинов стал энергично хлопотать о признании своего изобретения. По совету графа Орлова-Денисова он встречался с влиятельным сановником К.Ф. Бентковским. Тот добился, чтобы техническое общество Петербурга заслушало самого Блинова о выгоды для России «сего вагона». Федор Абрамович имел беседу и с министром путей сообщения адмиралом К.Н. Посъетом, который и дал ход делу.

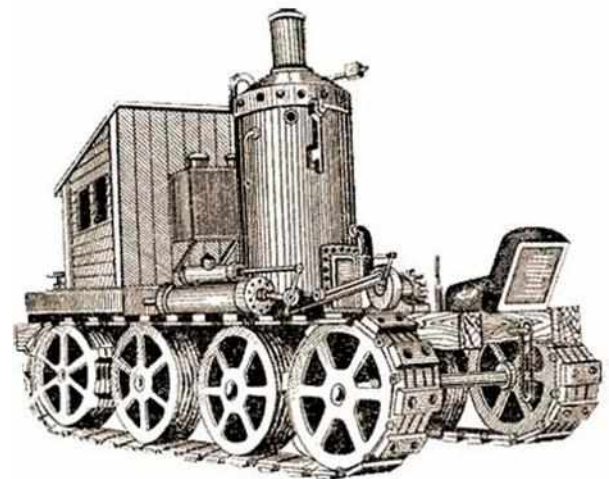
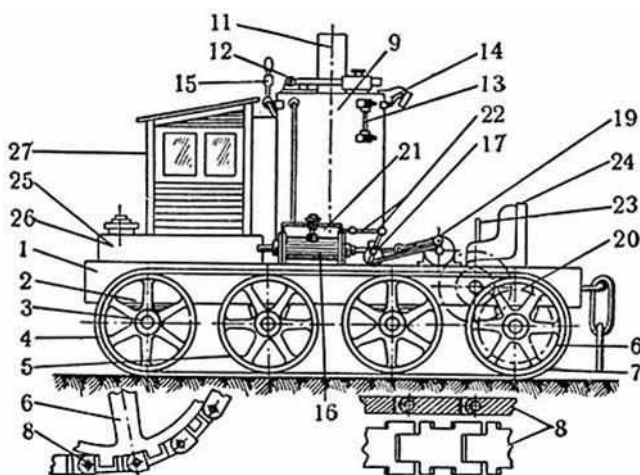
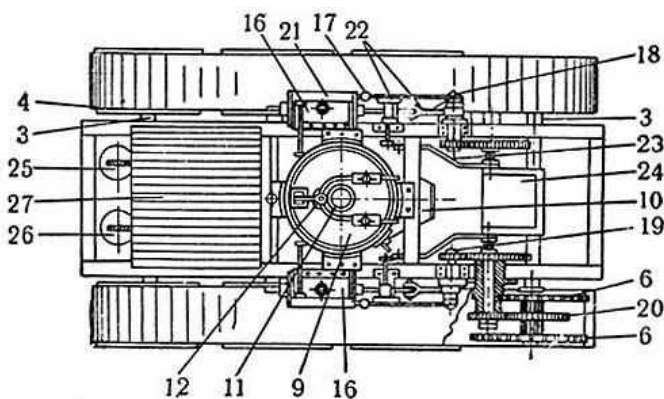


Рис 17. Вагон с бесконечным цепообразным рельсом (трактор Блинова):

1 - рама; 2 - опоры осей колес; 3 - оси колес; 4 - направляющие колеса; 5 - опорные катки; 6 - ведущие колеса; 7 - гусеница; 8 - звенья гусеницы; 9 - паровой котел; 10 - огневая камера; 11 - труба; 12 - предохранительный клапан; 13 - водомерное стекло; 14 - манометр; 15 - свисток; 16 - цилиндры паровой машины; 17 - шток; 18 - шатун; 19 - первая пара шестерен трансмиссии; 20 - вторая пара шестерен трансмиссии; 21 - золотниковая коробка; 22 - приводной механизм золотника; 23 - рычаги управления; 24 - сиденье; 25 - бак для воды; 26 - бак для нефти; 27 - будка



18 января изобретатель заплатил 40 копеек за гербовый сбор, а 21 января министерский писарь, наклеив гербовую марку, по его просьбе красивым крупным почерком оформил документ, ставший теперь историческим.

«Его Высокопревосходительству Господину Министру путей сообщения от Саратовской губернии Вольского уезда Черкасской волости собственника-крестьянина Федора Абрамова Блинова изобретя вагон и к нему цепообразный бесконечный рельс, описание и чертежи коих в семи видах, а равно и модель в 1/4 часть, при сем Вашему высокопревосходительству представляю и покорнейше прошу приказать рассмотреть мое изобретение и дать посему заключение в отношении применимости этого изобретения, с возвращением всех приложений»

Под прошением 46-летний изобретатель поставил подпись: «...крестьянин Федор Абрамов Блинов». В левом нижнем углу подписал: «21 января 1878 года. Жительство имею на Невском, на Калашиниковской пристани, дом Невской Лавры, № 69, кв. 21, Плигины».

Дело это закончилось довольно быстро, учитывая царскую бюрократическую структуру министерств, - 14 марта 1878 года Ф.А. Блинову был дан ответ:

«Министерство путей сообщения от 14 марта 1878 года № 3418 Федору Абрамовичу Блинову. ...Признав за вашим вагоном достоинство в достижении уменьшения в силе тяги от 6 до 7 раз сравнительно с обычным способом передвижения грузов по шоссе, Т. И. Ч. У. (техническо-инспекторская часть управления ж/д) воздерживается, однако, высказать заключение о возможности практического применения снаряда в том виде, как он Вами предложен, преимущественно ввиду значительного числа сопряжений цепи, способной разрываться в сопряжениях при неровностях пути, а также отсутствия достаточной игры в желобчатом рельсе при прохождении кривых, описанных радиусом в 100 фут. Чертежи и записку при сем возвращаем»

Подписали: «...за завед. тех. инспекторской частью инженер И. Кологривов, секретарь: и.д. делопроизводителя инженер Демин...».



Рис. 18. Привилегия крестьянина Федора Блинова

Блинова была выдана долгожданная привилегия за № 2245 (рис. 18), зарегистрированная в «Своде» под № 64: «При движении вагона колеса катятся по гладкой цепообразной поверхности рельсов. Лежащий же на колесах рельс будет переходить в переднюю направляющую (звездочку), укладываемую путь для дальнейшего движения, между тем как задняя направляющая снимет с дороги и передаст рельсы на следующую впереди направляющую. Таким образом, впереди вагона будет строиться по желаемому направлению постоянный, бесконечный путь».

Следует заметить, что у Ф.А. Блинова были предшественники и в России. Так, 2 марта 1837 года штабс-капитан русской армии Дмитрий Загряжский обратился в Министерство финансов с ходатайством о выдаче ему патента на экипаж с *плоскозвенчатой металлической*

На этом этапе в 1878 году в дело вмешался купец Канунников. Он уяснил, какую прибыль может ему дать применение блиновского вагона, ведь тогда в семь раз меньше потребуется подвод при перевозке зерна от хлебных амбаров к пристаням Волги. Имея связи в департаменте торговли и мануфактур и деньги на пошлины, Канунников на другой же день обратился туда с прошением о выдаче Блинову привилегии «на особаго устройства вагон с бесконечными рельсами для перевозки грузов по шоссеиным и проселочным дорогам». 20 сентября 1879 года на имя крестьянина-собственника Федора

*ской гусеницей* (рис. 19). В протоколе комиссии, рассматривавшей предложение, представленное изобретателем говорится: *«Из представленных Загряжским списания и чертежей сего изобретения видно, что около каждого обыкновенного колеса, на которых катится экипаж, обводится железная цепь, натягиваемая шестиугольными колесами, находящимися впереди обыкновенного. Бока шестиугольных колес равняются звеньям цепи, цепи сии заменяют до некоторой степени железную дорогу, представляя колесу всегда гладкую и твердую поверхность. Каждая цепь получает свое движение от обыкновенного колеса, которое, вертясь на своей оси, передает вперед освобождающиеся из-под него звенья и таким образом цепь, переходя через шестиугольное колесо, ложится опять под обыкновенное колесо экипажа. Шестиугольные колеса в случае ослабления цепей натягиваются особыми винтами. Польза сего изобретения, по объяснению г. Загряжского, состоит в том, что лошадь может везти в таких повозках двойную тяжесть, что для устройства их не требуется больших издержек, они могут быть употребляемы как на шоссе, так и на обыкновенных дорогах, преимущественно же полезны на песчаных и грязных, где цепь, окружающая колесо, не допускает его врезываться в песок или грязь, предоставляя ему всегда твердую и гладкую поверхность»*. Таким образом, речь идет об изобретении гусеничного хода с металлическими гусеницами, подобного применяемому на современных гусеничных машинах. Судьба этого изобретения была весьма печальна, Загряжский за свой патент вынужден был уплатить очень большую пошлину. На дальнейшие опыты у изобретателя не было средств, а денежную помощь ему не оказали.

Несколько позже в марте 1839 года, другой русский изобретатель - Василий Тертер получил патент на предложенную им *«переносную и подвижную железную дорогу с грузовым снарядам, катящимся по настилающейся всюду подвижной дороге»*.

Кроме В. Тертера, в середине XIX в. над проектами гусеничного хода, а затем и парового трактора работали Маклаков, Маевский и другие изобретатели. Так, в 1876 году Департамент торговли и мануфактур выдал патент штабс-капитану артиллерии Стефану Маевскому на предложенный им *«способ передвижения поездов и повозок с помощью локомотива, по обыкновенным дорогам»* (рис. 20). В тексте патента сказано *«Сущность изобретения состоит в передвижении повозок по обыкновенным грунтовыми дорогам посредством особой паровой машины, перемещающейся вместе с поездом по особому устройству бесконечной цепи, причем паровая машина не тянет за собой поезд, а наоборот, двигает его перед собою. Составляющие поезд вагоны и повозки, а равно и сама машина, снабжены для передвижения по цепи особыми желобчатыми колесами, располагаемыми по одному по продольной оси их, а следовательно, и всего поезда, причем с боков вагоны и повозки поддерживаются гладкими колесами или дисками. Цепь, по которой катятся колеса поезда при укладывании на землю, получает вид особой формы плоского рельса, почему и названа просителем рельсовой»*. И далее *«Чтобы рельсовая цепь могла служить более долгое время и чтобы на трение в сочленениях звеньев ее расходовалось возможно меньшее количество работы паровой машины, для этого в боковые ребра вертикальных звеньев с внутренней стороны должны быть вставлены специальные пластины»*.

В своем проекте Маевский предусматривает механизм, который позволяет менять силу тяги на гусенице. Этот механизм трансмиссии мы теперь называем коробкой передач. Устройство коробки передач Маевского описано в патенте так: *«Вал, служащий для наматывания рельсовой цепи, приводится во вращение от двигателя посредством нескольких зубчатых колес, на нем насаженных, разного диаметра, с целью изменения величины тяги при разных условиях, например подъеме. Зубчатые колеса эти соединены с валом паровой машины посредством бесконечной цевочной цепи. Последняя, сцепляясь постоянно с одним и тем же колесом паровой машины, может цепляться попеременно с каждым из зубчатых колес наматывающего вала, начиная с самого большого диаметра до наименьшего. Для этой цели зубчатое колесо, сидящее на вале, приводимом в движение двигателем, может перемещаться вдоль его, смотря по требуемой скорости»*.

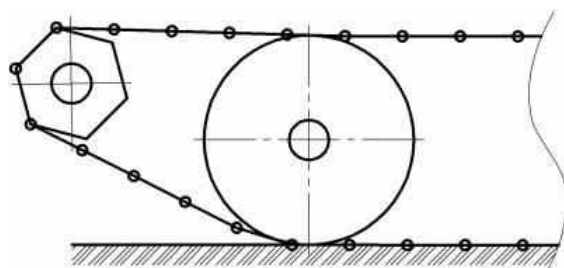


Рис. 19. Предполагаемая кинематическая схема гусеничного движителя Д.Загряжского

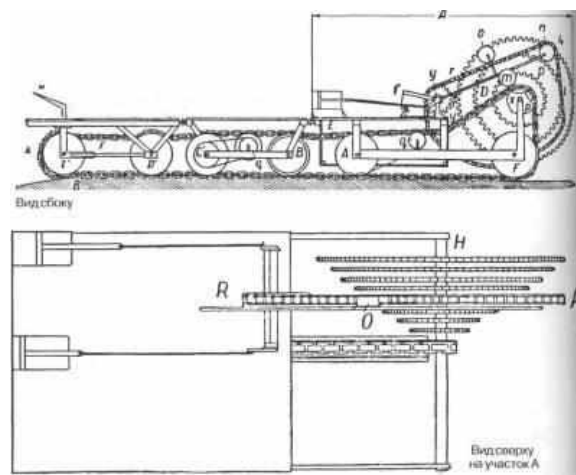


Рис. 20. Проект «способа передвижения поездов и повозок с помощью локомотива, по обыкновенным дорогам» С.Маевского»

Коробки передач современных колесных и гусеничных машин имеют два основных вала ведущий, связанный с двигателем, и ведомый, связанный с движителем, на обоих валах установлены шестерни (зубчатые колеса). При изменении зацепления шестерен изменяется скорость вращения ведомого вала, а тем самым и колес (или гусениц) движителя. Следовательно, коробка Маевского отличается от современных коробок передач лишь тем, что шестерня ведущего вала вращает любую шестерню ведомого вала не непосредственно, а через цепную передачу.

Трактор Маевского имел одну очень широкую гусеницу. Ее давление на грунт было мало, что повышало проходимость машины. Правда, при этом осложнялась задача обеспечения поворотливости (управляемости) трактора.

Здесь очень важно отметить тот факт, что Блинов, в отличие от других, как отечественных, так и зарубежных изобретателей, работавших над созданием гусеничного движителя, предложил не только саму звенчатую гусеничную ленту (цепь) движителя, но также и способ управления гусеничной машиной. Волжский механик-самородок создал первый реальный проект кинематической схемы поворота гусеничного транспорта. **Поворот платформы**, по мнению Блинова, **мог быть осуществлен остановкой одной гусеницы-рельса и продолжением движения другой**. Это делало вагон чрезвычайно маневренным. Так как в то время эта идея не была востребована другими создателями, многие гусеничные машины конца XIX - начала XX вв. были так называемыми полугусеничными машинами, которые управлялись поворотными опорами (колесами, лыжами, коньками) комбинированного движителя (колесно-гусеничного, лыжно-гусеничного, коньково-гусеничного).

В своем первом изобретении Блинов выдвигал и такую мысль, как использование на транспортных перевозках гусеничного поезда, состоящего из четырех гусеничных вагонов - прицепов (рис. 21).

В 1883 г. в городе Балаково Ф.А Блиновым было создано машиностроительное предприятие по выпуску пожарных насосов, из ворот сборочного цеха которого через пять лет, в 1888 г., вышел первый в мире опытный образец гусеничного трактора. В гусеничном самоходе платформа с грузовыми колесами получила поступательное движение (через гусеничную цепь) за счет вращательного движения ведущего колеса (звездочки). Ведущее колесо имело связь с паровой машиной через бортовую передачу. С первой задачей (вагон) изобретатель справился еще в 1880 году, а вот с постройкой паровоза, предназначенного для буксировки четырех вагонов, Блинову пришлось потрудиться около 16 лет.





**Рис. 21. Гусеничный вагон-прицеп конструкции Блинова**

Все лето 1889 года, не прекращая производства пожарных насосов, Блинов обкатывал по дорогам и на окраине Балакова свой самоход, находясь постоянно в поиске его усовершенствования. В 1894 году при строительстве новой модели самохода Блинов за счет переднего привода вынес в кабину рычаги управления бортовыми муфтами. Машинисту оставалось, сидя за котлом, выполнять роль кочегара и тормозить задние колеса. Из двух паровых машин Блинов собрал одну двухцилиндровую с общим валом. На концах полувазов бортовой передачи установили кулачковые муфты, которые приводились в зацепление с шестернями вилкой-рычагом из кабины капитана. Испытания нового самохода прошли успешно. Они окрылили изобретателя, который, наконец, решился показать специалистам и широкой публике свое изобретение на **Нижегородской ярмарке в 1896 году**. Но за гусеничный трактор Блинов получил лишь похвальный отзыв, тогда как за пожарную машину, которая произвела на знатоков пожарного дела большое впечатление, он был удостоен бронзовой медали выставки.

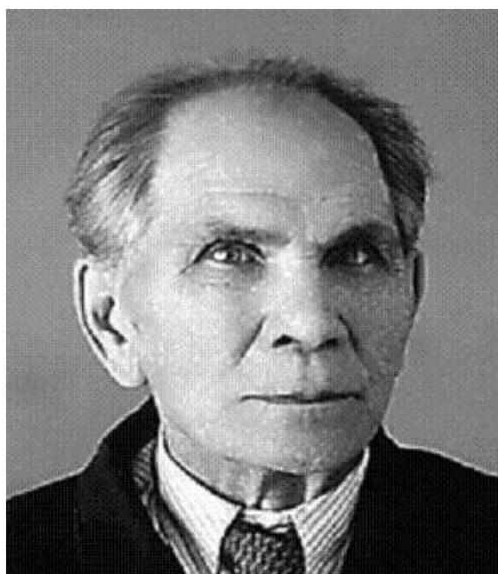
Какое-то время с Блиновым сотрудничал Яков Мамин (рис. 22). 20 июня 1898 года в Пензе открылась сельскохозяйственная выставка, организованная обществом сельского хозяйства юго-востока России. Организаторы выставки прислали приглашение и механику Блинову. Не желая тратить время на поездку, Федор Абрамович вместо себя послал Якова Мамина. Поездка для начинающего механика Мамин оказался весьма полезной. В июле выставку посетил министр земледелия Ермолов. Местная пензенская газета тогда писала:

*«Начался осмотр с отдела сельскохозяйственных орудий. Г. Министр обратил внимание на пожарную трубу самоучки Мамин и на автоматические весы работы экономии князя Шаховского... В отделе 12 «Сельскохозяйственных машин, орудий, повозок и сбруи», состоящем из 36 наименований, главными экспонатами были... Блинова и Беринга – пожарные насосы...»*

Внимание министра оказалось решающим для выставочного комитета, чтобы экспоненту Мамину выдать премию - 300 руб. После Пензенской выставки Яков Мамин твердо решил заняться самостоятельно изобретательской деятельностью. Он уволился с завода Блинова и вместе с младшим братом Иваном Маминым открыл свою мастерскую. В 1899 г. братья Мамины взяли в кредит немалую по тем временам сумму. Кредит в 22 тыс. руб. дал помещик В.Г. Кобзарь за то, что Яков Васильевич с братьями придумал *колесный самоходный локомобиль с двухтактным двигателем завода «Нобель и К<sup>о</sup>»* (рис. 22). Маминский локомобиль через ременный привод крутил просорушку или веялку и самостоятельно ездил от одного гумна до другого (рис. 22). В 1910 г. Маминым был построен колесный «Русский трактор» с нефтяным калоризаторным двигателем. Таким образом, Я. В. Мамин явился зачинателем внедрения в тракторостроение двигателей внутреннего сгорания, работающих на нефти. Позже Якова Васильевича Мамин назовут пионером тракторных дизельмоторов. Его трактора заложили основу отечественного колесного тракторостроения.

Изобретение нового типа четырехтактного двигателя внутреннего сгорания, работающего на сырой нефти, дало право Блиновым открыть на рубеже XIX и XX вв. новое производство с мудреным названием, учитывающим особую религиозность старообрядческого края: «Фабрика нефтяных двигателей и пожарных насосов «Благословение» П.Ф. Блинова». Фабрику Блинов-сын построил рядом с механическим заводом Ф.А. Блинова. На заводе отца работало в 1900 году всего 25 человек, а на фабрике сына было 150 человек. Сохранившийся рекламный листок и письменные бланки убеждают нас, что под конец жизни старый меха-

ник выделил в наследство младшему сыну новое производство, а старое завещал старшему сыну. В меру сил Федор Абрамович помогал сыновьям. На механическом заводе отца, которым фактически управлял Александр Блинов, ремонтировали паровые машины, пилорамы, котлы, мельничные постава, молотилки. На фабрике инженера Порфирия Блинова продолжали изготавливать пожарные насосы. До 1908 года их было выпущено около 6000 штук. Еще при жизни отца Порфирий Блинов начал готовить серийный выпуск нефтяных двигателей, на изобретение которых 10 мая 1903 года он подал заявку. Но только 30 ноября 1909 года он получил из Петербурга долгожданную привилегию за № 16236. К моменту, когда был получен патент, младший сын Блинова выпустил более 500 нефтянок. Это говорило о солидной мощности его предприятия.



Я.В. Мамин



«Русский Трактор-2» Мамин



Трактор «Карлик»



Трактор «Гном»

Рис. 22. Я.В. Мамин и его колесные трактора

Рядом с фабрикой инженера П. Блинова стояло каменное двухэтажное здание заводоуправления, где заведующим был механик Н.И. Орлов. В этом же здании внизу размещалась столовая, а наверху - кабинеты, где «на хлебах» жили приезжие рабочие и ученики Блинова. Частенько там жил и сам А.Ф. Блинов, особенно когда проектировался новый вариант гусеничного трактора. Долгое время в конторе хранились чертежи двух вариантов гусеничного трактора с двигателями внутреннего сгорания. Вместо парового котла и двух паровых машин Блинов спроектировал двухцилиндровый вертикальный двигатель, установленный на платформе сзади. Управление мотором он вынес в кабину, поставленную ближе к центру трактора. Претерпел конструктивное изменение и гусеничный движитель. Судя по сохранившимся эскизам, Блинова можно считать автором пионерского изобретения - фрикционной муфты, бортовой передачи, гусеничного штампованного звена с почвозацепами (трака) и полужест-

кой подвеской трактора в виде тележки с пятью парами опорных катков. В законченном виде конструкции имели направляющее колесо и ведущую звездочку.

Но воплотить в металле гусеничный трактор с двигателем внутреннего сгорания Блинову помешали болезнь и последовавшая за ней смерть. Через месяц после смерти отца, его младший сын Порфирий Блинов, закрыл механический завод и все внимание сосредоточил на серийном изготовлении нефтяных двигателей и пожарных насосов. Для строительства новых цехов нужны были средства, и пришлось залезть в долги. На этот раз кредит предоставил Анисим Мальцев - младший наследник купца-миллионера. К 1913 году ухудшился сбыт пожарных насосов и нефтянок П. Блинова. Владелец фабрики «Благословение» признал себя банкротом, и предприятие перешло в руки кредитора. Во время Первой мировой войны фабрика стала собственностью акционерного общества «Нечаев и К°», которое, не имея опыта в двигателестроении, окончательно развалило производство.

Следует отметить, что гусеничный движитель, как опорно-тяговый элемент конструкции транспортно-технологических машин впервые был использован на гражданских образцах самоходных систем.

**Паровой гусеничный снегоход «LOMBARD LOG HAULER» Элвина О. Ломбарда.** Развитие гусеничных транспортных средств связано с многими талантливыми изобретателями конца XIX - начала XX вв. Одно из таких имен, связанных с ранними датами (1901 г.) XX в., Элвин О. Ломбард (1856–1937 гг.), который в городе Вотервиль штат Мэн США, на предприятии «Iron Works», осуществил строительство серии паровых тягачей с гусеничным движителем. Он продал первый полугусеничный тягач - «Lombard Log Hauler» в 1901 году. Мощность паровой машины этого транспортного средства - 80 л.с., а полный вес самого тягача 20 т, который был в состоянии тянуть по грунту 300 т груза с максимальной скоростью 7 км/ч (рис. 23-30).



**Рис. 23. Паровой снегоходный поезд на базе трактора «Lombard Log Hauler» (фото 1914 г.)**

Всего с 1901 по 1917 гг. на предприятии «Iron Works» построены 83 машины, две из которых в настоящее время демонстрируются в «Owl's Head Transportation Museum» в г. Паттен, штат Мэн. Компания «Phoenix Centipede Company» строила эти тягачи по лицензии. Всего на планете, до нашего времени, сохранилось не больше 10 шт «Lombard Log

Hauler». С 1916 года, на «Lombard Log Hauler» предлагались к установке двигателя внутреннего сгорания вместо паровой машины. Но на лесозаготовках паровая машина была выгоднее!

На рис. 24 – рис. 26 показаны различные варианты конструкций полугусеничника «Lombard Log Hauler» и страницы из патента на эту машину и её гусеничный движитель. На рис. 29 представлены другие типы полугусеничных паровых транспортных средств начала XX в.



Рис. 24. Сборка полугусеничного трактора Элвина О. Ломбарда (1901 г.)

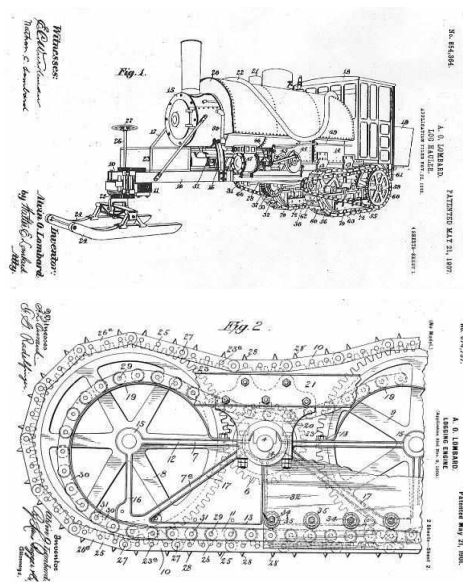


Рис. 25. Страницы патента полугусеничного трактора Элвина О. Ломбарда



Рис. 26. «Lombard Log Hauler» на лесозаготовках (1901-1914 гг.)

Появление двигателей внутреннего сгорания позволило оснастить ими вместо паровых машин гусеничные и полугусеничные транспортные средства (рис. 30).

Применение гусеничной техники в промышленности, сельском и лесном хозяйствах становилось очевидным преимуществом по сравнению с использованием гужевого тяги для колесных и санных прицепов, а также для навесной и прицепной сельскохозяйственной тех-



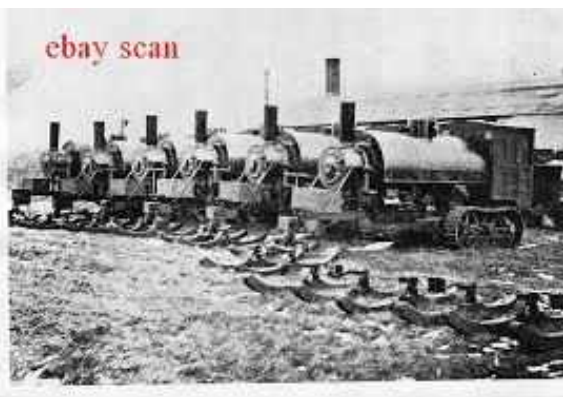
ники. В начале XX в. это преимущество пытались использовать полярные исследователи. Однако первые попытки заменить животную тягу (собачьи и олени упряжки) машинной оказались неэффективными в силу не совершенства конструкций этих гусеничных машин



**Рис. 27. Паровой снегоходный трактор Элвина О. Ломбарда «Lombard Log Hauler» (1901 г.)**



**Рис. 28. 120-мм САУ на базе трактора «Буллок-Ломбард» («Bullock-Lombard») 6-го тракторного дивизиона Морской тяжелой артиллерии Донской армии Вооруженных Сил Юга-России, (1919 г.)**



Circa 1906  
W.H. Linn on (road with hand on  
Steam tank.

Рис. 29. Паровые полугусеничные снегоходы начала XX в.



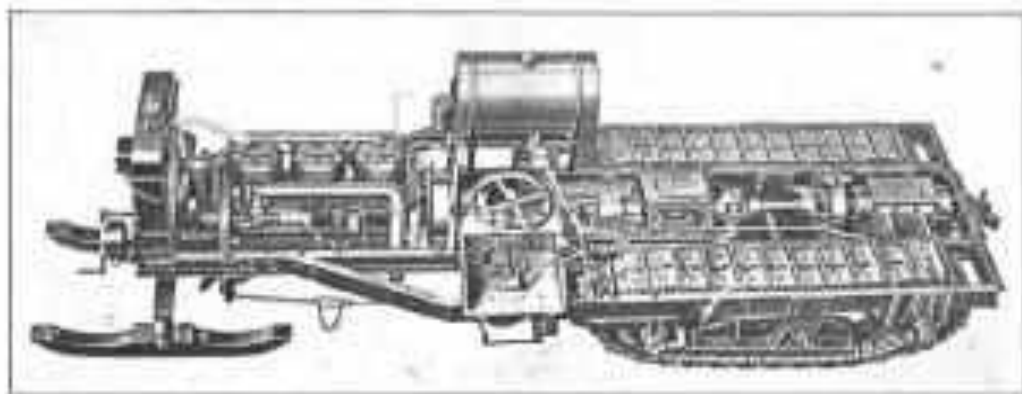


PLATE I.—LIMBARD TRACTOR CHASSIS—MODEL N



Рис. 30. Аналогичные полугусеничные снегоходы начала XX в. с паровой машиной и двигателем внутреннего сгорания



Рис. 31. Роберт Фолкон Скотт

**Снежный трактор «WOLSELEY» капитана Роберта Фолкона Скотта.** Неожиданным толчком в появлении компактных конструкций на базе гусеничных движителей, способных передвигаться по снегу, стали амбиции первооткрывателей полюсов Земли. Дело в том, что в начале XX в. на Северном полюсе (1909 г.) уже побывали, а вот Южный оставался белым пятном. И вот тут легендарный англичанин, капитан Роберт Фолкон Скотт (рис. 31) сделал ставку на моторные сани. В то время другие полярники полагались на собак, пони и даже дрессировали белых медведей, а идея механизированного передвижения по белому континенту казалась маловероятной.

Капитан Роберт Фолкон Скотт с 1908 года в Шотландии отработывал на практике конструкцию первого гусеничного транспортёра-тягача для Арктики и Антарктики (рис. 32, 33). Гусеничные снегоходы Скотта строились на заводе «Вольслей» (Wolsley Motor Company) с 1908 года. По названию производителя этот снегоход упоминается чаще, чем по фамилии создателя. Этот образец можно называть первым снегоходом, но снегоход Скотта можно считать и прототипом гусеничного трактора с необычной, среднемоторной компоновкой. На рис. 33 показан созданный Робертом Ф. Скоотом снегоход Wolseley, использовавшийся британской антарктической экспедицией 1911-1913 гг.

В XX столетии в Антарктиде были десятки научных экспедиций. 14 декабря 1911 г. известный полярный путешественник норвежец Руал Амундсен первым достиг Южного полюса. Спустя месяц, 17.01.1912 г., до этой самой южной точки Земли дошел англичанин Роберт Скотт, трагически погибший со своими спутниками на обратном пути к береговой базе.



Рис. 32. Гусеничный трактор «Wolseley» в Шотландии. (1910 г.)



Рис. 33. Трактор Wolseley во время британской антарктической экспедиции 1911-1913 гг. (Фото октябрь 1911 г.)



Рис. 34. Адольф Кегресс

**Полугусеничные машины Адольфа Кегресса.** Следующим существенным этапом стали работы по созданию машин-вездеходов с использованием гусеничного движителя, которые были начаты в 1910-1916 гг. изобретателем А.А. Кегрессом (рис. 34). Он предложил для повышения проходимости по снежному покрову и в условиях сезонного переувлажненного грунта вместо ведущих колёс заднего моста классического автомобиля использовать гусеницы. Нагрузка от задней части кузова распределяется набором опорных катков, что создавало малое давление на поверхность полотна пути и тем самым снижалось сопротивление движению.

Адольф Кегресс (Adolphe Kégresse) - французский инженер-механик и изобретатель родился 20 июня 1879 г. во Франции. В 1909 - 1917 гг. жил и работал в России. Был личным шофёром императора Николая II и заведующим технической частью императорского гаража в звании прапорщика.

Его судьба в России складывалась следующим образом, с 1904 г. он работал техником в моторном отделе завода фирмы «Лесснер», который поставлял царскому гаражу автомобили своей постройки. В 1906 году князь Орлов пригласил Адольфа Кегресса на пост технического директора императорского гаража в Царском Селе под Санкт-Петербургом. Так французский техник Адольф Кегресс стал заведующим технической частью императорского гаража.

Мастерские императорского гаража не только постоянно реконструировали и ремонтировали автомобили, но с 1906 по 1916 год под руководством А. Кегресса здесь шла постройка экспериментальных полугусеничных машин на шасси Mercedes, «Руссо-Балт» и «Packard». Самая первая разработка А. Кегресса в этой области была модернизация французской машины «ФЛ» (рис. 35).



Рис. 35. Первая работа А. Кегресса, французская машина «ФЛ» с дополнительной осью и цепями (фотография снята у императорского гаража в Царском Селе, за рулем сам изобретатель 1906-1916 гг.)

Кегресс занимался проблемой улучшения проходимости автомобиля по заснеженным трассам, что для России с ее заснеженными просторами на период от 5 до 10 месяцев в году было более чем актуально. Для чего он заменил передние колеса на лыжи, а задние - на мяг-



кие гусеницы, которые сначала изготавливали из сежи, а затем из толстого верблюжьего войлока. В дальнейшем такие гусеницы стали делать из резины. С этого времени Адольф Кегресс постоянно усовершенствовал свое изобретение и участвовал в испытаниях и автопробегах. Полугусеничные автосани Кегресса одержали победы в ряде гонок по снегу (см. рис. 36 – рис. 53). Результаты соревнований и испытаний были настолько успешны, что Адольф Кегресс на свое изобретение - «гусеничный движитель - Кегресс» 31 мая 1914 года получил привилегию (патент) № 26751-а «автомобильные сани, движущиеся посредством бесконечных ремней с нажимными роликами и снабженные поворотными полозьями на передней оси» (рис 37).



Рис. 36. Испытания А. Кегрессом полугусеничных автосаней собственной разработки

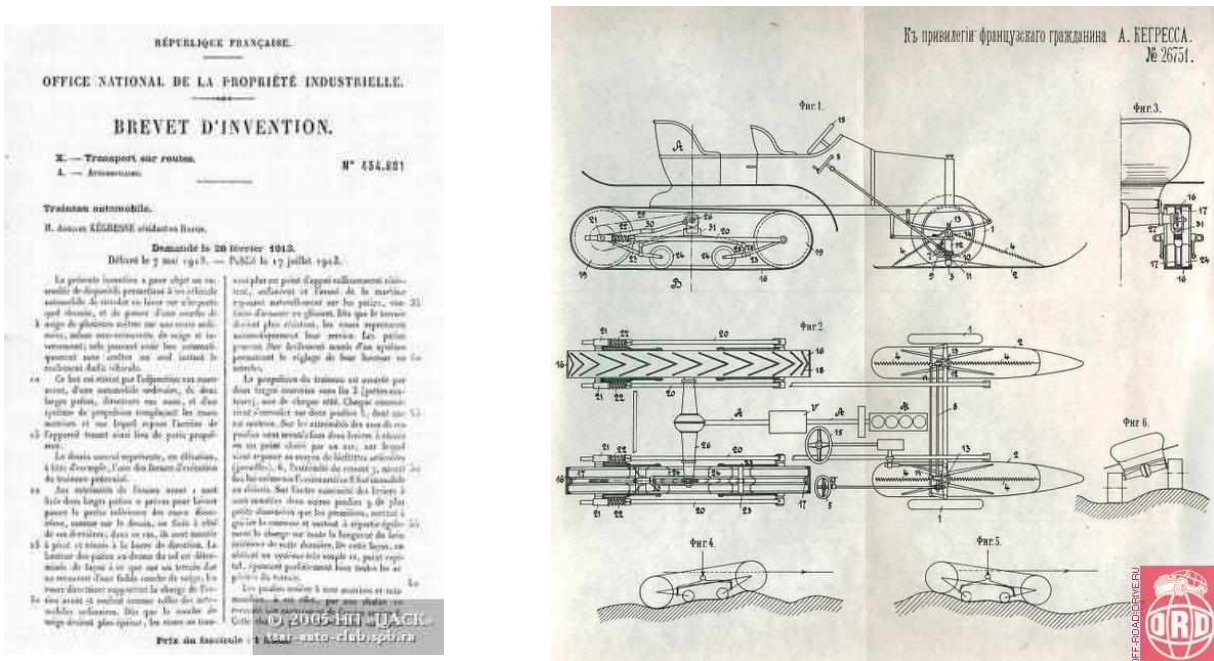


Рис. 37. Патенты на «автомобильные сани, движущиеся посредством бесконечных ремней с нажимными роликами и снабженные поворотными полозьями на передней оси»

Идеи Кегресса одобрял сам Император Николай II: вот запись из его дневника «15 января 1917 года, Царское Село. В 2 часа отправился со всеми детьми на снеговых моторах Кегресса к Пулкову; проезжали по разным оврагам, спустились с горы, ехали прямо полями и болотами вдоль Гатчинского шоссе и вернулись через Баболово. Нигде не застряли, несмотря на глубокий снег».

Зимой 1911 года Кегресс участвовал в первых испытаниях моторных средств транспорта при движении по снегу, на переоборудованном под полугусеничный снегоход автомобиле французской фирмы «ФЛ» (см. рис. 35). В 1912 году его приспособление в виде гусениц было установлено в царском гараже на автомобиль марки «Мерседес» с мощностью двигателя 45 л.с., который Кегрессу выделил Николай II «для опытов». В 1913 году было заклю-

чено соглашение с «Русско-Балтийским вагонным заводом» (РБВЗ) на установку гусениц на автомобили «Руссо-Балт», который демонстрировался на IV Международной автомобильной выставке (рис. 38).

С началом Первой мировой войны Адольфу Кегрессу присвоили звание прапорщика русской армии и предоставили возможность совершенствовать свое изобретение. Было изготовлено несколько полугусеничных автомобилей, принимавших участие в военных действиях. Кегресс разработал целую серию автомобилей на полугусеничном ходу. Это были легкие и грузовые машины: «ФЛ 30», «Мерседес 14-30», «Руссо-Балт С 24/30», «Руссо-Балт С 24/40», «Руссо-Балт М 24/35 санитарный», «Рено Б-16 санитарный», «Паккард Сикс» (2 или 3 штуки), «Остин Мк 2 броневик» (рис. 36 - 53).

В годы Первой мировой войны англичане не решились поставить ни один из своих двухбашенных броневиков фирмы «Остин» на гусеницы. Иногда употребляют термин «приспособление Кегресса», а точнее - «полугусеничный движитель Кегресса», который использовался на различных транспортных средствах, в том числе и на бронев автомобилях «Остин» (рис. 41 - 43). В октябре 1915 г. Кегресс обратился в Технический комитет Главного военного технического управления с предложением применить разработанное им шасси для нужд армии. Проект был одобрен, причем было высказано мнение, что *«крайне желательно испытать приспособление Кегресса на автомобилях разных систем, а особенно рассмотреть возможность его применения для броневых автомобилей»*.

Броневые автомобили на полугусеничном шасси, получившие название «Остин-Путиловец-Кегресс», собирались для Российской армии на Санкт-Петербургском Путиловском заводе на базе английских автомобилей, которые помимо установки нового типа движителя покрывались российской броней и имели диагональное расположение пулеметных башен. Впоследствии эти машины (уже после октябрьского переворота) выпускались и для нужд Красной армии, в которой они активно использовались в боях против армии генерала Юденича и в советско-польской войне. В ходе боев несколько машин захватили эстонцы и поляки, в армиях которых они прослужили до середины 30-х годов XX в., а в РККА их использовали вплоть до 1933 г. Столь долгой эксплуатации помогло, прежде всего, то, что к ним имелось большое количество запасных частей, завезенных в годы Первой мировой войны. Интересно, что по польской терминологии «остин-кегрессы» назывались **полутанками**, а у нас - **полугусеничными броневыми автомобилями** и даже **танками русского типа**, хотя в России такие машины больше не строились.

В августе 1916 года конструктор, получивший чин прапорщика, предъявил полугусеничный броневый автомобиль к испытаниям. В течение двух месяцев августа и сентября машина прошла обширную программу испытаний на проходимость в окрестностях Царского Села и Могилева, а затем и на продолжительность работы во время пробега Могилев-Царское Село. Результаты превзошли все ожидания: *«Автомобиль... свернул с дороги на целину, переехал придорожную канаву, затем пошел со значительной скоростью по мягкому травянистому грунту, свободно и плавно преодолевая различные неровности. ...Поднялся на Пулковскую гору напрямик по склону, по влажному растительному грунту. При подъеме шофер имел возможность местами ставить вторую скорость. Перегревания мотора замечено не было. Наконец, автомобиль без особых усилий перешел небольшое кочковатое болото, где местами вода сплошь покрывала почву. Никаких поломок замечено не было, за исключением погнутой левой направляющей дуг...»* Пробег «Могилев-Царское Село» позволил проверить «приспособление Кегресса» на выносливость при движении по шоссе, после которого машина прошла 286 верст по бездорожью.

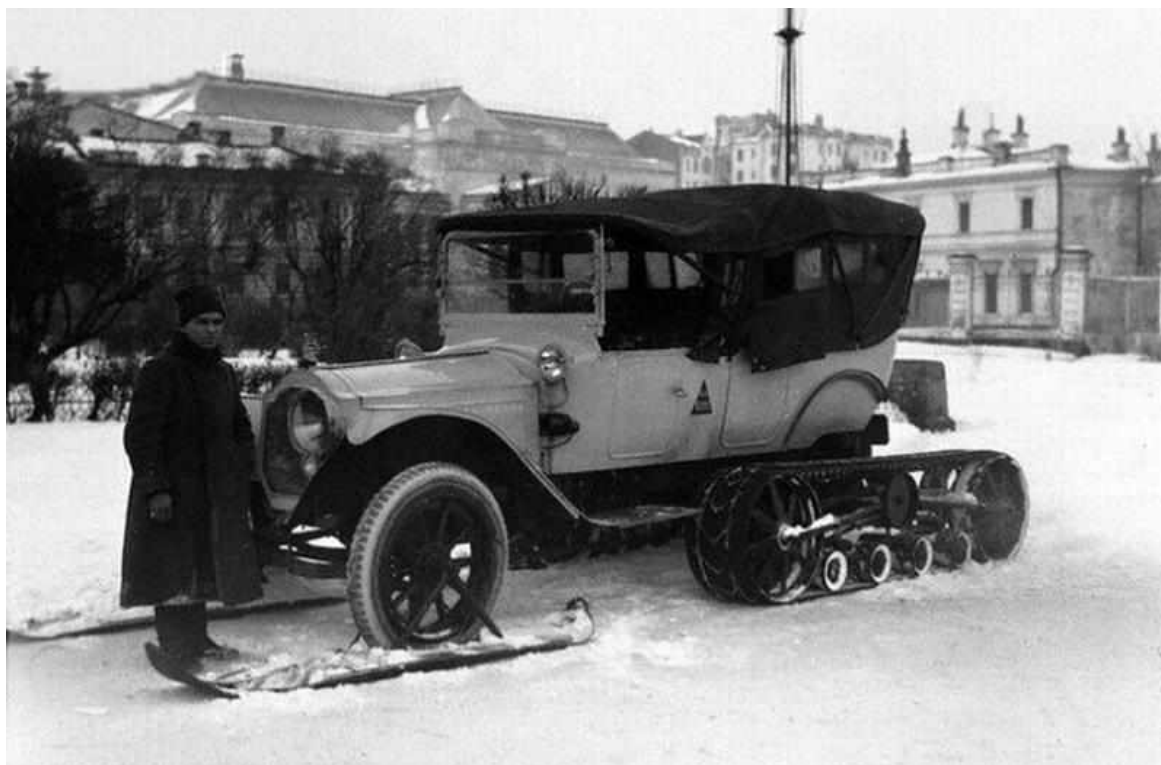
Поскольку результаты испытания обнадеживали, было решено поставить гусеничный движитель Кегресса на целый ряд российских броневых автомобилей, включая 39 броневиков марки «Остин» (рис. 41 - 43), поставки которых для армии должны были начаться к концу 1917 г.

В устройстве шасси Кегресса подкупала простота, для многих российских инженеров и военных являвшаяся чуть ли не главным достоинством любой предлагавшейся конструкции. Дело в том, что сама лента гусеницы Кегресса была по тем временам рекордно легкой - резинокордовой, на тканевой основе, а первые образцы лент так и вовсе были из кожи.



Рис. 38. Страница из каталога IV Международной автомобильной выставки 1913 г.





**Рис. 39. «Паккард-Сикс-Кегресс»**

Такой движитель можно было установить на заднюю ось практически любого автомобиля и превратить его в гусеничный, причем рулевое управление двумя передними колесами на нем не менялось. Поскольку гусеницы крепились только на самой оси, они могли на ней свободно поворачиваться и подниматься вверх-вниз, что вместе с применением дополнительных роликовых катков перед ними значительно повышало проходимость автомобилей при преодолении вертикальных препятствий. Конечно, цепной привод к заднему ведущему колесу каждой гусеницы был крайне уязвим, да и сами гусеницы Кегресса большой прочностью не отличались. Тем не менее, возможность действовать как летом, так и зимой (для этого передние колеса на таких машинах устанавливались на лыжи - вследствие небольшого веса такого движителя) заставляла не замечать эти недостатки.

После Февральской революции и последующего отречения Николая II от престола тридцатисемилетний Адольф Кегресс сдал все имущество царского гаража представителям Временного правительства, а сам, не дожидаясь окончания революционного процесса, с женой и тремя детьми уехал на автомобиле в Финляндию, откуда вернулся во Францию, где работал в компании «Citroën». Находясь во Франции, он сумел заинтересовать своим шасси целый ряд видных производителей автомобилей и вооружения, обеспечивших его изобретению второе рождение. Таким образом, вернувшись во Францию, Адольф Кегресс продолжил работу по совершенствованию своего движителя и созданию новых образцов полугусеничных машин. Компания «Ситроен» («Citroën») приобрела патент на его движитель и активно эксплуатировала эту идею.

В 1920-30-е гг. эта фирма «Ситроен» («Citroën») ставила на свои автомобили гусеницы Кегресса, усовершенствованные Жаком Анстеном (рис. 54). Однако первым французским полугусеничником стал броневый автомобиль «Пежо» периода Первой мировой войны, к моменту установки движителя «Peugeot-Kégresse» (рис. 55), он уже изрядно устарел. Машина эта была изготовлена в одном экземпляре и носила, главным образом, опытно-демонстрационный характер.

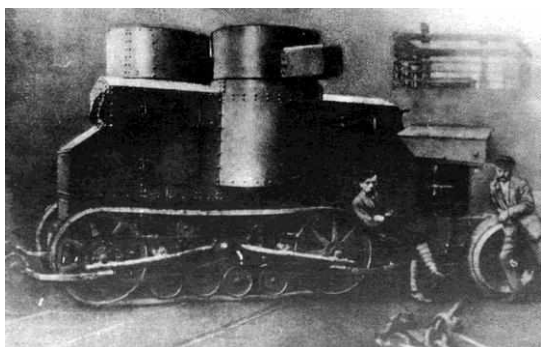


Рис. 40. Один из первых «Русских Остинов - Кегрессов» в цеху Путиловского завода, 1919 г.



Рис. 41. Бронеавтомобиль «Остин-Кегресс» (1920 г.)



Рис. 42. Остин-Кегресс на учениях Красной Армии в конце 20-х годов



Рис. 43. Испытание машины Руссо-Балт С 24/40 - Кегресс, императорский гараж, Царское Село, 1913 г.



Рис. 44. Санитарный автомобиль «Руссо-Балт М – Кегресс» с прицепом-санями у здания ИРАО на Дворцовой наб. д. 10, Санкт-Петербург, 1916 г.



Рис. 45. Испытание санитарных автосаней на шасси Рено 16 CV и Руссо-Балт М, 1916 г.



Рис. 45. Январь, 1917 г. Адольф Кегресс перед Александровским дворцом в Царском Селе на автомобиле Паккард (Packard SIX 3-38), который Кегресс переделал в так называемый «снеговой мотор» с гусеничным движителем собственной конструкции

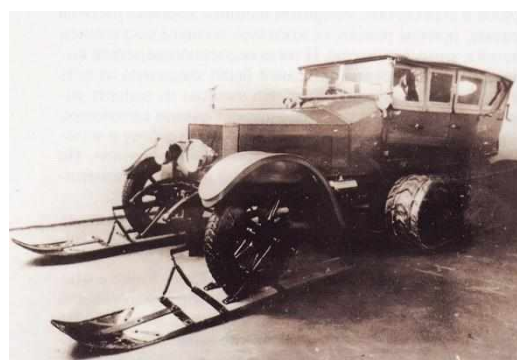


Рис. 45. Полугусеничный Роллс-Ройс Ленина, разработки А. Кегресса, построенный на «Путиловском заводе» в 1919 г.





**Рис. 48. Испытания автосаней Кегресса на базе «Руссо-Балта» 27 февраля 1915 года. Сзади прицеплены санки с живым «балластом»**



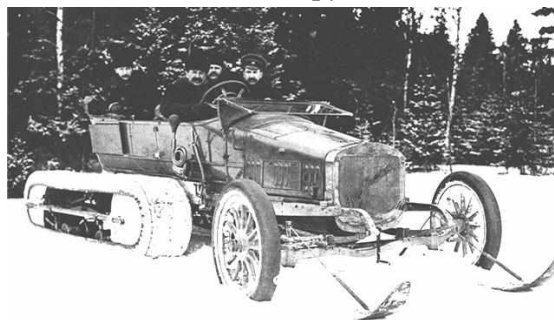
**Рис. 49. «Лесснер-Мерседес» с двигателем «кегресс» на испытаниях в июле 1912 г.**



**Рис. 50. Автосани Renault и «Руссо-Балт» из состава санитарной колонны ИРАО. Фотографии из репортажа в журнале «Автомобиль» № 4 за 1917 г**



**Рис. 51. Адольф Кегресс в Царскосельском императорском гараже на автомобиле Мерседес14-30 с гусеничным двигателем собственной конструкции. 1912 г.**



**Рис. 52. Автомобили Кегресса из царского гаража**



«Citroën-kégresse-type-a» (1920 г.)



«Citroën-Kégresse» - рейд через пустыню Сахара (1920-1923 гг.)



«P-7 bis» был выполнен на 20-сильном легковом шасси «В-10» (1927-1929 гг.)



«Citroën-Kégresse» - «Черный рейд» (1924-1925 гг.), «Желтый рейд» (1931-1932 гг.)



Четырехместный транспортер-тягач P-17 с 1929 года использовали в артиллерийских частях



«Citroën» шестиместный вариант P-19B образца 1930 г.



Бронированный полугусеничный носитель артиллерийских орудий P-26 и быстроходный разведывательный бронеавтомобиль P-28



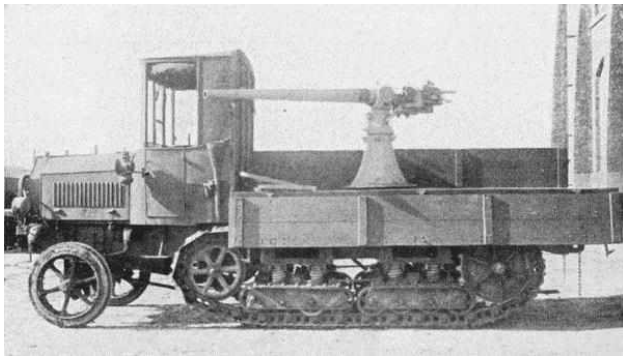
Самая популярная серия P-17



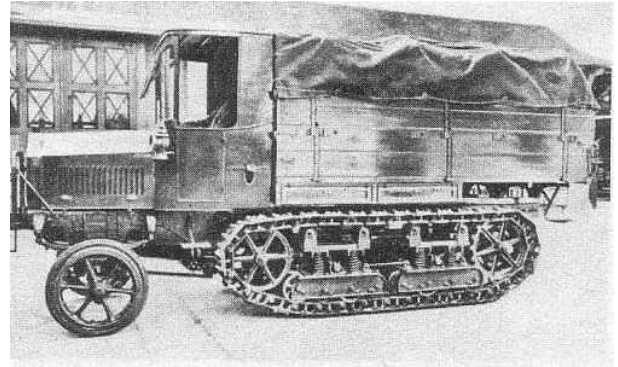
«Citroën-Kégresse» новой серии P-107 (1937 г.)

Рис. 53. Французские полугусеничные автомобили «Citroën-Kégresse»





**Daimler-Marienfelde «Marienwagen II» (Германия 1917 г.)**



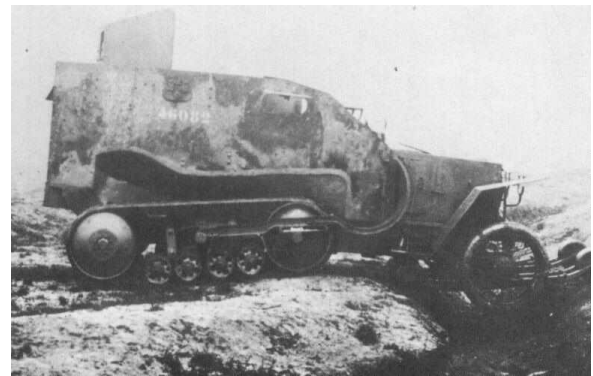
**Burford-Kegresse 30cwt half-track  
(Великобритания 1926 г.)**



**Samochod pancerny wz.28  
(Польша 1928 г.)**



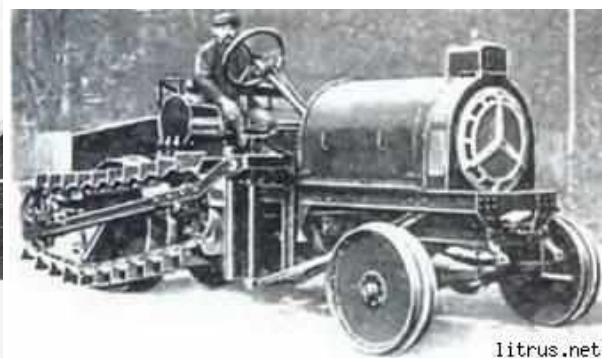
**Experimental Amphibious Car Sumida AMP  
(Япония 1929 г.)**



**Peugeot-Kégresse - полугусеничный  
Броневомобиль**



**Полугусеничный автобус Scania-Vabis  
(1922-1928 гг.)**



**Колесно-гусеничный тягач «Лефевр», 1914 г.**

**Рис. 54. Полугусеничные машины различных стран производителей**

Последующие образцы были созданы А. Кегрессом в период с 1923 по 1929 год в сотрудничестве с фирмами «Шнейдер-Крезо» («Schneider-Creusot»), «Ситроен» («Citroën») и «Панар» («Panhard»). На полугусеничных автомобилях фирма «Citroën» организовала два грандиозных автопробега - трансафриканский «Чёрный рейд» и трансазиатский «Жёлтый рейд».

Эти машины выпускались в значительных количествах и использовались для поддержки кавалерии и разведывательных целей. Кроме того, Кегрессом были разработаны несколько образцов полугусеничных бронетранспортеров, например, М29 - «Панар-Шнейдер-Кегресс» (рис. 55).

В 30-е годы XX в. не менее десятка образцов полугусеничных грузовиков и артиллерийских тягачей с двигателем Кегресса (см. рис. 54) выпускались и состояли на вооружении французской армии. Часть из них в качестве трофеев досталась немцам в 1940 году и активно использовалась в Вермахте.



Рис. 55. Полугусеничный броневеомобиль «Панар-Шнейдер-Кегресс» М29 (Франция 1929 г.)

Существенным недостатком двигателя Кегресса была относительно низкая, особенно на каменистых грунтах, живучесть резиноктаневой (на последних образцах армированной металлом) ленты по сравнению с металлической гусеницей. По мере совершенствования последней от резиновой гусеницы постепенно отказались. Однако эта выдающаяся конструкция, созданная в начале века и просуществовавшая до начала 40-х годов, внесла огромный вклад в развитие полугусеничных машин (рис. 40).

Адольф Кегресс продолжал свою изобретательскую деятельность до конца своих дней. Он умер 9 февраля 1943 г., Круасси-сюр-Сен, департамент Ивелин, Франция. В память об изобретателе мягкие гусеницы именуются «Кегрессами».

Идеи Кегресса, пропагандируемые фирмой Ситроен, нашли в 20–30-е гг. прошлого века своих подражателей во всем мире, патенты Кегресса купили такие автомобильные заводы, как Unic, SOMUA, St. Chammond (Франция), Crossley, Burford (Англия), Cunningham, Marmon-Herrington (США), Triangel (Дания) и некоторые другие.

С 1903 г. аналогичные работы по полугусеничным машинам велись в Германии, а чуть позже и в других странах мира: Великобритании, Италии, США, Японии (см. рис. 54).

В Советской России работы Кегресса тоже не были забыты, в 1919 году в Петрограде была изготовлена дюжина полугусеничных броневиков «Русский Остин» конструкции Путиловского завода, (в литературе их обычно называют «Остин-Кегресс»). Самый знаменитый «Кегресс» – это автомобиль Rolls-Royce Silver Ghost, переделанный на Путиловском заводе в том же 1919 году по заказу В. И. Ленина, на нем «вождь» ездил зимой из Москвы в Горки. Это единственный отечественный «Кегресс», сохранившийся до наших дней, он экспонируется в музее Ленина в Ленинских Горках (рис. 52).

Одним из этапов развития гусеничного двигателя и соответствующих боевых транспортных средств стало создание на базе тяжелых полугусеничных машин - бронетракторов (рис. 56-59). В основном эти разработки были сделаны в Вооруженных Силах Юга России (ВСЮР) в период Гражданской войны (1918-1921 гг.). Помимо бронетракторов, в период

Гражданской войны в России активно использовались импровизированные самоходные артиллерийские установки на тракторной базе. В частности, на базе тяжёлых полугусеничных тартаров «Буллок-Ломбард» («Bullock-Lombard») строились самоходные артиллерийские установки - САУ (см. рис. 28). Сама идея приспособить тракторное шасси для этой цели выдвигалась и ранее - ещё в период Первой мировой войны проекты таких машин разрабатывались во Франции, США и Великобритании, а также в Российской империи, но полноценно реализовать её на практике и использовать в бою впервые удалось на территории уже бывшей империи Белому движению. В 1919 году по заказу ВСЮР на заводе «Нельф-Вильде» в Таганроге приступили к бронированию и вооружению тракторов «Clayton» и «Bullock-Lombard». Было переоборудование их в САУ путём установки 120-мм морского орудия и массивного броневго щита в задней части. Впоследствии данные машины весьма успешно применялись в боевых действиях на фронтах Гражданской войны. Точное количество построенных на базе «Буллок-Ломбарда» («Bullock-Lombard») САУ остается неизвестным, но по фотоматериалам известно, что было создано не менее двух таких машин. Общее количество подобных машин на различных шасси было невелико, по-видимому, в общей сложности были построены единицы САУ всех типов.

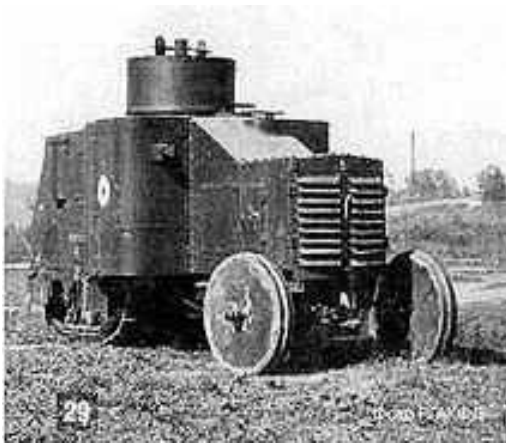


Рис. 56. Испытания бронетрактора «Буллок-Ломбард», построенного на заводе «Судосталь» (Район г.Новороссийска 1919 г.)

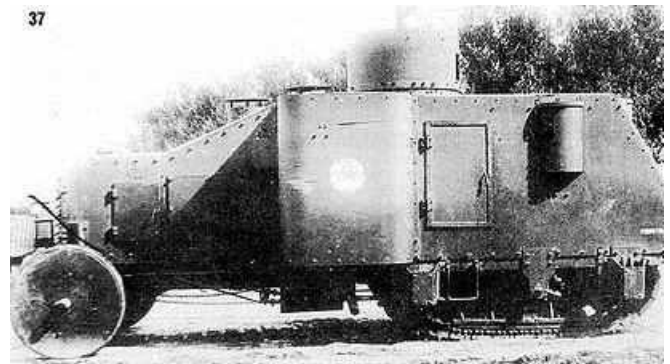


Рис. 57. Трофейный бронетрактор «Буллок-Ломбард», построенный на заводе «Судосталь» (Москва 1920 г.)

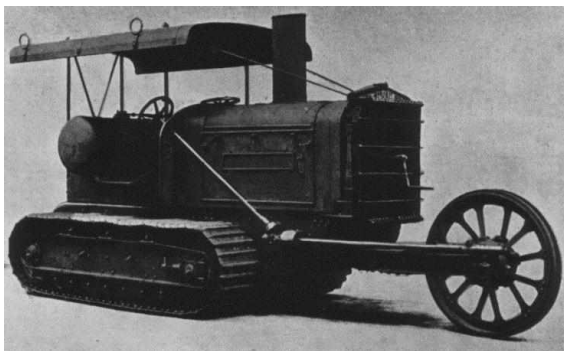


Рис. 58. Трактор «Холт» вероятная база бронетрактора «Клейтон»



Рис. 59. Трофейный бронетрактор «Клейтон» (Фото из журнала «Броневое дело»)

Довоенные 30-х годов XX в. полугусеничные вездеходы СССР [8]. Исторически сложилось так, что застрельщиками советского полугусеничного дела в прямом и переносном смысле выступили инженеры Научного автомоторного института (НАМИ), созданного по инициативе Евгения Чудакова.



В этот период разработки Кегресса в СССР были усовершенствованы. Кроме НАМИ, этими разработками в СССР также занимались Научный автотракторный институт (НАТИ) и автозаводы ЗИС и ГАЗ, которые выпускали полугусеничные автомобили мелкими сериями вплоть до 1943 года.

Первые советские полугусеничные автосани для езды по снегу самостоятельной отечественной конструкции были изготовлены в НАМИ в 1928 году. Машина, разработанная инженером А.С. Кузиным и получившая индекс НАМИ-1 (рис. 60), была оснащена двумя двигателями с резиновой лентой, расположенными по обе стороны кузова, каждый из которых имел в задней части одно ведущее, а в передней - одно направляющее колеса, а вместо передних колес использовались большие лыжи. По сути, это был первый советский полугусеничный снегоход, который мог развивать скорость до 60 км/ч по неглубокому снегу и около 15 км/ч по глубокому. Но на испытаниях зимой 1928 года в конструкции машины выявился ряд недостатков и в серию она не пошла.

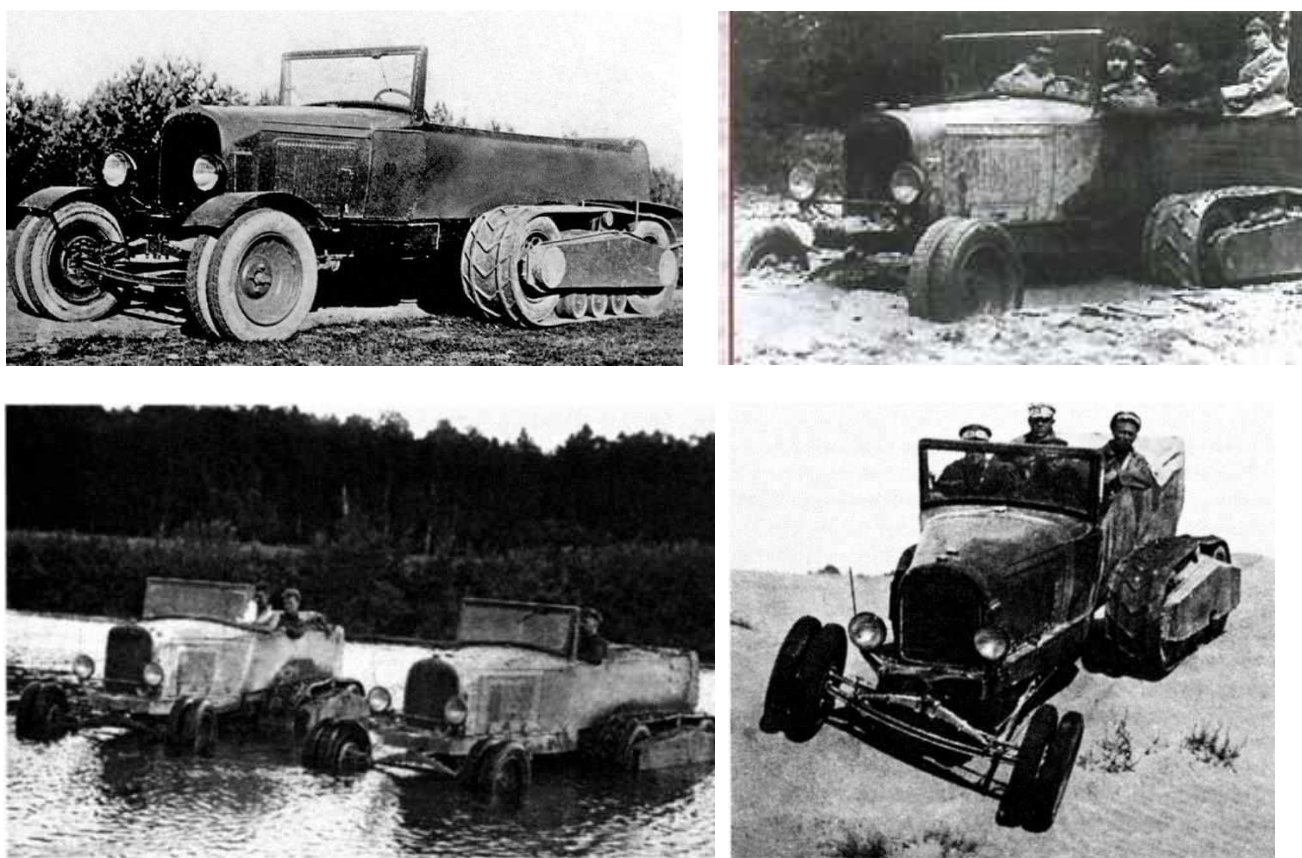


Рис. 60. Полугусеничный автомобиль НАТИ-2 (НАМИ-1)

Идеей выпуска полугусеничных автомобилей заинтересовалось руководство ОГПУ и Наркомата обороны, увидевшее в данном типе техники надежное транспортное средство для передвижения по бездорожью. Вся дальнейшая деятельность инженеров шла под пристальным вниманием силовых ведомств страны, была наполнена постоянной борьбой с несовершенством конструкции и в итоге окончилась безоговорочным провалом. Помирить колеса с гусеницами так и не удалось.

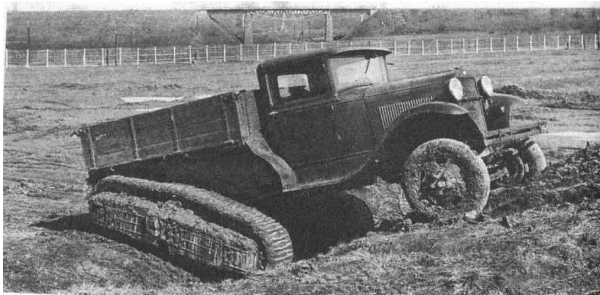
В 1930 г в НАМИ под руководством А.С. Кузина на шасси и агрегатах купленного в Америке грузового автомобиля «Форд АА» был построен первый ходовой образец советской полугусеничной машины, оснащенный двухскатными передними колесами и двумя двигателями, выполненными по одному из ранних образцов Кегресса (рис. 60). Двигатель представлял собой резинометаллическую гусеничную ленту, натянутую между двумя ведущими пневматическими колесами. В 1931 году вездеход получил открытый кузов, предназначен-



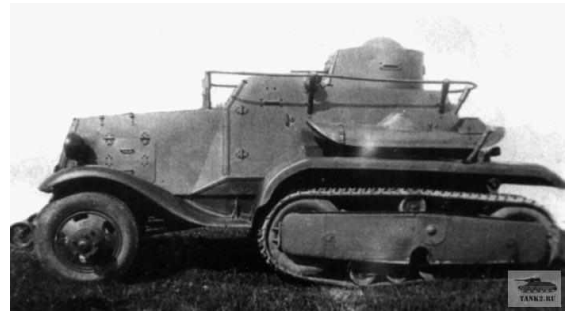
ный для перевозки 6-8 человек или до 1,2 т грузов. Тем временем в конце 1930 года НАМИ был передан во вновь организованное Всесоюзное автотракторное объединение (ВАТО) и с 7 февраля 1931 года переименован в НАТИ (автотракторный). В честь этого события автомобиль назвали НАТИ-2, хотя правильнее было бы его назвать НАТИ-1. Таким образом, автомобили НАМИ-1 и НАТИ-2 суть одно и то же.

Эти машины и стали основоположниками семейства советских полугусеничных вездеходов на шасси американского грузовика Форд АА, который с 1932 года начал выпускаться в СССР под индексом ГАЗ-АА. Инженеры героически боролись с постоянными поломками силового привода, по ходу вносили конструктивные изменения, но довести машину до совершенства так и не удалось. В итоге в 1933 году доработки машины были свернуты и ее выпуск признан неперспективным.

Началом эпопеи по созданию подлинно советских полугусеничных машин считается 1931-й год, когда группу инженеров, занятых производством машин полугусеничного типа, возглавил Григорий Абрамович Сонкин. Под его руководством началась разработка многочисленных моделей автомобилей этого типа, конструкции двигателей которых были заимствованы у французской фирмы Ситроен и являлись дальнейшим развитием идеи А.А. Кегресса (рис. 61).



НАТИ-3 (1935 г.) – гражданский вариант



НАТИ-3 (1937 г.) - броневедомитель (БА-30)



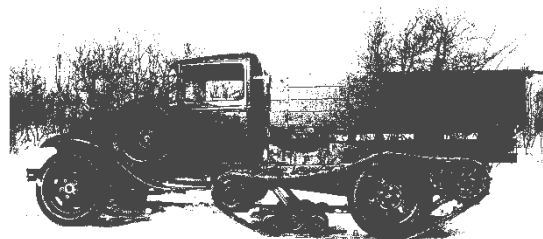
ЗиС-22 (1935-1940 гг.)



ЗиС-22М САУ (1941 г.)



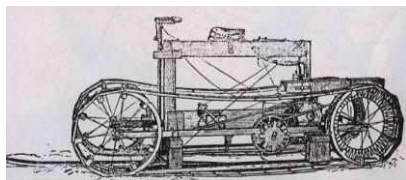
ЗиС-33 (1940 г.)



ГАЗ-65 (1940 г.)

Рис. 61. Некоторые варианты полугусеничных машин 30...40-х гг. XX в.

Интересна полугусеничная модификация броневомоля БА-64 с лыжно-гусеничным двигателем Неждановского (рис. 62). История эта началась с того, что для уверенного движения обычного грузового автомобиля ГАЗ-АА по снегу большой глубины по предложению работника конструкторско-экспериментального отдела (КЭО) ГАЗ С.С. Строева в январе 1942 г. был сделан снегоход ГАЗ-СХ с лыжно-гусеничным двигателем системы выдающегося русского ученого и изобретателя. С.С. Неждановского (1850-1940 гг.). Это была некая разновидность гусеничного двигателя Кегресса.



**Первые мотосани Неждановского с «лыжно-цепным» двигателем 1913 г.**



**ГАЗ СХ полугусеничный грузовик 1942 г.**



**Броневомоль БА-64-3 (зимний) 1943 г.**

**Рис. 62. Полугусеничные машины с двигателем Неждановского**

В 1932 году руководство фирмы Ситроен пришло к выводу, что полугусеничные тягачи не обладают достаточными тяговыми возможностями, являются слишком слабыми, переутяжеленными, тихоходными и ненадежными машинами, способными красиво ехать только на парадах по Елисейским полям, и стало задумываться над тем, как бы от них поскорее избавиться.

Привод двигателей машин, разработанных до 1940 г по французским образцам, был различных конструкций, но общей особенностью являлась передача крутящего момента от ведущих пневматических колес или колес с обрешиненной внешней поверхностью (барабанов) к резиноканевой (резинометаллической) гусенице, натянутой на эти колеса, посредством силы трения между шиной колеса и резиновой лентой гусеницы. Усилие передавалось либо двумя колесами, либо одним из них, в этом случае второе являлось направляющим, называлось «ленивец» и использовалось для натяжения гусеницы. С 1940 г. стали использоваться ведущие колеса в виде обрешиненных барабанов с зубчатыми венцами (звездочки). Между колесами в нижней части устанавливались опорные катки, которые частично выполняли функции подвески, а в верхней - поддерживающие катки. Для передачи крутящего момента использовался силовой привод обычного серийного автомобиля, на базе которого строился вездеход.

Несмотря на разнообразие конструкций, все они были объединены одной ключевой идеей: замена ведущих колес типовых автомобилей на гусеничные двигатели без внесения существенных изменений в силовой привод. Даже при самом неблагоприятном развитии ситуации всегда сохранялась возможность сделать шаг назад и вернуть автомобиль в его первоначальное состояние, заменив гусеничный двигатель стандартными колесами. Такой подход был изначально ошибочен, что и подтвердилось впоследствии. К 50-м годам XX в. в СССР по полугусеничным машинам были полностью свернуты.

**Первые американские полугусеничные снегоходы.** В период 20...40-х годов XX в., начиная с 1923 года американские конструктора и ученые также разрабатывают ряд вариантов полугусеничных и полностью гусеничных машин на базе автомобиля Форт. История утверждает, что в 1917 году Вирджил Д. Уайт (Virgil D. White) получил патент на модернизацию автомобиля модели «Ford T» в снегоход «Snowmobile» (рис. 63 – рис. 65), который он ещё в 1913 году построил в Оссипи, Нью-Гэмпшир. Но только в 1922 году после существенных переделок и усовершенствований машина была выставлена на продажу, как снегоуборочная тех-



ника. Как утверждают рекламные проспекты, машина предназначалась для всесезонных передвижений по бездорожью. Позже были созданы и другие модификации гусеничных и полугусеничных машин на базе узлов и агрегатов автомобилей «Ford» и «Buick» (рис. 65).

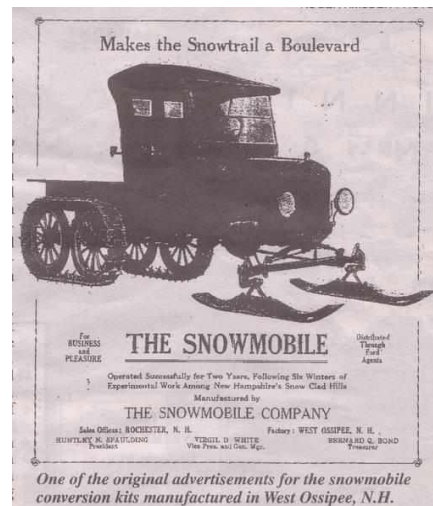
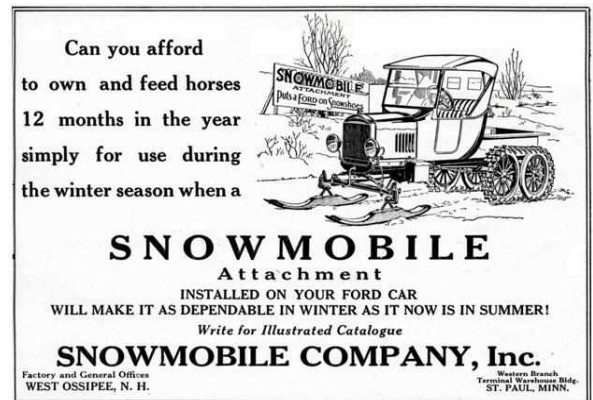


Рис. 63. Фотд Модели Т (Snowmobile) – базовый вариант

Эти машины выпускались в США вплоть до 1929 года и пользовались большой популярностью. Всего было выпущено различных образцов гусеничной и полугусеничной снегоходной техники на базе автомобиля «Ford T» около 3 500 штук.

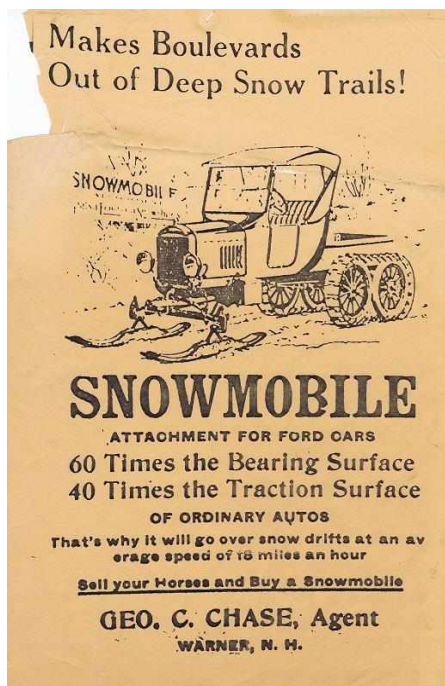


Рис. 64. Полугусеничный Форд Т (версии Snowmobile)





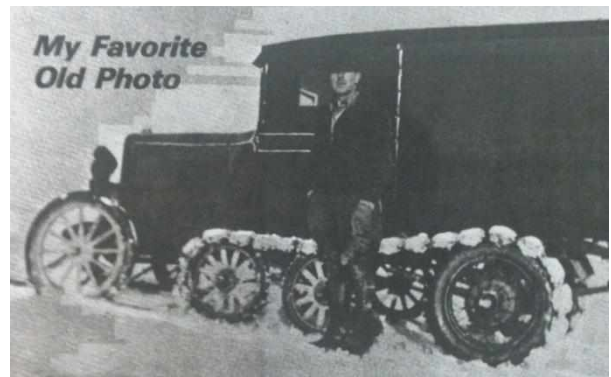
Форд Т Форум (1924 г.)



Форд Т гусеничный (1918-1922 гг.)



Model T Snowmobile 4



Model T Snowmobile (почтовая карточка)



Model T



Buick «Motor Sleigh»

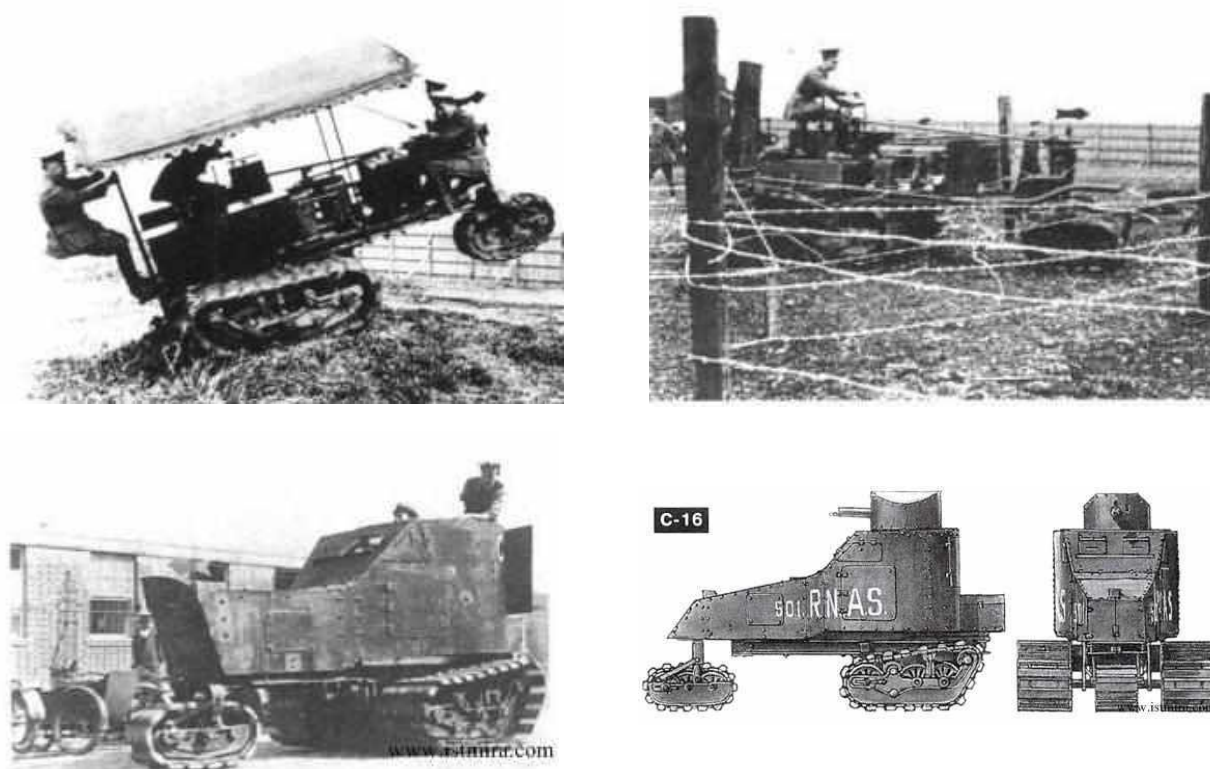


Model T-based tank



Рис. 65. Американские полугусеничные и гусеничные машины начала XX в.

**Первый модульно-гусеничный трактор и новая техническая идеология.** 30 июня 1915 года на полигоне в Вормвуд-Скрабс (США) проходили испытания гусеничного трактора «Киллен-Стрейт», ставшего базой для первого в истории танка (рис. 66).



**Рис. 66. Первый модульно-гусеничный трактор и танк «Киллен-Стрейт» (1910-1915 гг.)**

Сельскохозяйственный трактор «Киллен-Стрейт» выпускался в Америке с 1910 года. Его уникальной особенностью была ходовая часть из трех гусениц. Задняя пара была ведущей, а передняя гусеница - рулевой. Таким образом, трактор «Киллен-Стрейт» был первым прототипом модульно-гусеничных тракторов. Сами гусеницы тоже были необычными. Их пластинчатые траки изготавливались из твердого дерева и были скреплены между собой цепями. Для того чтобы уменьшить износ гусениц от трения о грунт, на «рабочей» поверхности траков крепились металлические пластины.

Трактор «Киллен-Стрейт» на испытаниях «Киллен-Стрейт» обладал приличной маневренностью и неплохой проходимостью. Верхний наклон задних гусениц позволял ему преодолевать задним ходом препятствия, непроходимые для других тракторов, которые испытывались как потенциальная база для танков. За свои ходовые качества «Киллен-Стрейт» был особо отмечен полковником Кромптоном, представителем Комитета по сухопутным кораблям (организации, занимавшейся созданием первых британских танков).

Однако испытания показали, что этот трактор не может быть использован в качестве основы для жизнеспособного проекта. Из-за малого веса он не мог рвать проволочные заграждения, а был вынужден их резать, что требовало больше времени, и не всегда было приемлемо. Кроме того, установленный на шасси «Киллен-Стрейт» корпус броневедомости «Делано-Бельвиль» делал силуэт машины слишком высоким, облегчая противнику возможность прицеливания. Но, несмотря на то, что танк на базе трехгусеничного трактора «Киллен-Стрейт» не пошел в серийное производство, он все равно остался в истории самым первым, опередив и «Маленького Вилли», и «Mark I».

В 1951 году американец Эммитт Такер (Emmitt Tucker) изобрел и запатентовал четырехгусеничный вездеход Sno-Cat для езды по глубокому снегу и транспортировки грузов (рис. 67). Через 10 лет после некоторых усовершенствований эта модель машины работала



уже на многих горнолыжных курортах Америки, хотя основной ее задачей по-прежнему оставалась перевозка людей и грузов, она также выполняла функции уплотнения снега. Это была подлинно модульно-гусеничная машина, которую в количестве четырех единиц в своем переходе через Антарктиду использовал английский исследователь Вивиан Фукс. Машина могла взять на борт до 15 человек либо 1400 кг груза. С такой нагрузкой «Снежный кот» («Tucker Snow Cat») мог без проблем преодолеть 35-градусный подъем, а на равнине развить максимальную скорость в 24 км/ч. Такие завидные на то время характеристики ему обеспечивала V-образная бензиновая восьмерка мощностью в 180 л. с. Трансмиссия была автоматической и имела понижающий ряд.



**Рис. 67. Tucker Snow Cat (1951-1958 гг.)**

В послевоенный период в СССР на базе грузового автомобиля ГАЗ-66 была создана машина модульно-гусеничной компоновки, оснащенная опорно-тяговыми элементами Неждановского (рис. 68). Информации по данной машине в открытой печати практически нет.



**Рис. 68. Автомобили ГАЗ-66 и ГАЗ-69 с модульно-гусеничным движителем (1960-1961 гг.)**

В работе [9] указывается, что более 30 лет назад основоположником практической космонавтики академиком С.П. Королевым была поставлена задача создания транспортного средства для передвижения по поверхности Луны. Большой коллектив советских ученых и инженеров под его руководством за несколько лет решил эту задачу. Советская передвижная лаборатория «Луноход-1» 17 ноября 1970 г. начал свою успешную работу на поверхности Луны. Позже в работе был советский планетоход - «Луноход-2», американские лунные самоходные транспортные средства «LRV» и марсоход. Однако чисто космическая проблема исследования планет и их естественных спутников нашла и земное применение в конструкциях различных мобильных робототехнических систем [10-13] и вездеходных транспортно-технологических машинах.

В числе главных проблем, от решения которых зависел успех работы по созданию планетоходов и мобильных робототехнических систем, была проблема надежного и устойчивого передвижения по опорным основаниям. С другой стороны, от решения проблемы создания высокоэффективных вездеходных транспортно-технологических машин, предназначенных для перемещения и работы в условиях бездорожья, во многом зависит способность



человека решать насущные задачи в экстремальных условиях эксплуатации, чаще всего связанных с естественными сложными природно-климатическими условиями или техногенными катастрофами. При этом ее решение влияет на дальнейшее совершенствование ходовых систем традиционных транспортно-технологических средств и разработку принципиально новых машин – мобильных робототехнических комплексов.

Как альтернатива надежного и эффективного движителя для планетоходов и мобильных роботов был предложен модульно-гусеничный движитель (рис. 69). В этот период были проведены полные теоретические и экспериментальные исследования этих гусеничных движителей.

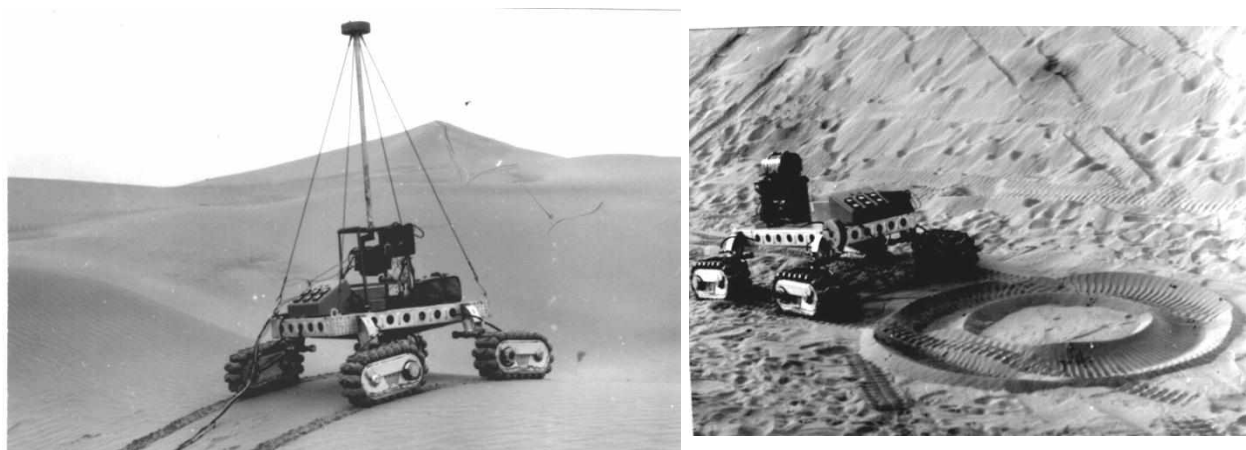


Рис. 69. Модульно-гусеничные роботизированные транспортно-технологические машины

Сегодня модульно-гусеничные движители в полной мере составляют альтернативу колесным движителям (рис. 70).



Рис. 70. Современные модульно-гусеничные машины

**Танки Первой мировой войны и гусеничные трактора начала XX в.** Экзотические гусеничные машины XIX в. обладали более высокой проходимостью, чем колесные машины, но вместе с тем не имели достаточной курсовой управляемости и скорости движения, а также сам движитель был конструкционно не надежен. В связи с чем эти гусеничные машины не имели достаточного уровня **подвижности** в соответствии с её концепцией, предложенной в работе [5]. Своим эволюционным скачком в развитии гусеничные машины обязаны Первой мировой войне.

После относительно краткого начального маневренного этапа боевых действий на фронтах установилось равновесие (так называемая «окопная война»). Глубоко эшелониро-

ванные линии обороны противников было сложно прорвать. Обычный способ подготовить наступление и вклиниться в оборону противника состоял в массированном использовании артиллерии для разрушения оборонительных сооружений и уничтожения живой силы с последующим вводом в прорыв своих войск. Однако выяснилось, что по перепаханному взрывами, с разрушенными дорогами, перекрываемому к тому же перекрёстным огнём с флангов участку «чистого» прорыва не удастся ввести войска достаточно быстро, к тому же противник по действующим железнодорожным и грунтовым дорогам в глубине своей обороны успевал подтягивать резервы и блокировать прорыв. Также развитие прорыва затруднялось сложностью снабжения через линию фронта. Ещё одним фактором, превращавшим маневренную войну в позиционную, являлось то, что даже длительная артподготовка не могла полностью уничтожить все проволочные заграждения и пулемётные гнёзда, которые затем сильно сковывали действия пехоты. Бронепоезда зависели от железнодорожных путей. В результате возникла мысль о принципиально новом самоходном боевом средстве с высокой проходимостью (добиться которой можно было только с помощью гусеничного шасси), большой огневой мощью и хорошей защищённостью (хотя бы против пулемётного и винтовочного огня). Такое средство могло бы с высокой скоростью преодолевать линию фронта и вклиниваться в глубину обороны противника, осуществляя, по крайней мере, тактические обходы [14]. Решение о постройке танков было принято в 1915 году практически одновременно в Великобритании [15], Франции и России [16].

Первая английская модель танка была готова в 1916 году, когда прошла испытания, и первый заказ на 100 машин поступил в производство. Это был танк Mark I (рис. 71) – довольно несовершенная боевая машина, выпускавшаяся в двух модификациях – «самец» (с пушечным вооружением в боковых спонсонах) и «самка» (только с пулемётным вооружением). Вскоре выяснилась низкая эффективность пулемётных «самок», которые не могли бороться с бронетехникой противника и с трудом уничтожали огневые точки. Тогда была выпущена ограниченная серия «самок», у которых в левом спонсоне по-прежнему был пулемёт, а в правом – пушка. Знаменательно, что к идее создания «сухопутного крейсера» был причастен и первый лорд Адмиралтейства Уинстон Черчилль. Именно с его одобрения было решено построить опытную машину, за которой потянулось обидное прозвище «Маленький Вилли». Дело в том, что под руководством морского Адмиралтейства был создан «Комитет сухопутных кораблей», который возглавил военный кораблестроитель Ю. Теннисон д'Энкур. Чуть больше месяца понадобилось инженерам У. Триттону и его коллегам из военного ведомства В. Вильсону и Г. Рикардо, чтобы на базе американского трактора «Холт» (который уже использовался в британской армии для буксировки артиллерии) создать боевую машину, успешно прошедшую ходовые испытания, и даже показанную королю Георгу V.



Рис. 71. Британский танк «Mark-1»

В 1915 г. полковник Этьен (Estienne), начальник артиллерии 6-й дивизии французской армии, написал главнокомандующему о том, что он считает целесообразным применить на фронте «бронированные повозки, обеспечивающие продвижение пехоты». Через год он повторил свое предложение: «Я считаю возможным, - писал он, - создание орудий с механиче-

ской тягой, позволяющих перевозить через все препятствия и под огнём со скоростью, превосходящей 6 км в час, пехоту с оружием, амуницией и пушкой». К письму Этьен приложил свой проект. Он хотел построить «сухопутный броненосец» весом 12 т на гусеничных цепях, вооруженный пулемётами и пушкой. «Броненосец должен иметь скорость до 9 км/ч, преодолевать окопы до 2 м шириной и разрушать неприятельские блиндажи. Кроме того, машина сможет буксировать на подъёмы до 20° семитонную бронированную повозку, в которую можно посадить команду из 20 человек с вооружением и амуницией». У Этьена мысль о создании гусеничного танка возникла в результате наблюдения за работой трактора Холт. Первые танки во Франции стала строить фирма «Schneider» по проекту инженера Brillie. Впоследствии заказ на строительство французских танков был передан «Обществу железоделательных и сталелитейных заводов», мастерские которого находились в Сен-Шамоне. Поэтому первые два французских танка получили название Шнейдер и Сен-Шамон (рис. 73).

Когда концерн «Schneider» получил заказ на разработку артиллерийского танка, то в январе 1915 г. компания послала своего инженера Eugène Brillie в командировку в американскую фирму «Holt», которая в это время проводила тестовые испытания тракторов в Великобритании. Brillie до этого уже занимался разработкой броневиков в Испании. По возвращении инженер начал разработку танка на базе шасси трактора Baby Holt. В июле 1915 г. разработки концерна Schneider объединили с государственной программой создания машины по преодолению проволочных заграждений под руководством инженера Жан-Луи Бретона. 9 декабря 1915 первый экземпляр танка был продемонстрирован военным. В военной комиссии был полковник Jean-Baptiste Eugène Estienne. 12 декабря полковник Estienne представил высшему командованию план создания бронированных сил. 25 февраля 1916 г. было заказано 400 машин по цене 56000 франков за штуку. Танк официально назывался «Штурмовой артиллерийский трактор». Первая поставка танков состоялась 5 сентября 1916 г. Первое подразделение из этих штурмовых танков было сформировано в марте 1917 г. Впервые испытаны в бою 16 апреля 1917 г. Танк не имел башни. 75-миллиметровое орудие было установлено в «спонсоне» в передней части танка. Внутреннее пространство танка было очень тесным - 90 см. от крыши до пола. Вначале танк был бронирован листами толщиной 11 мм. Позднее броню усилили на 5,5 мм, из-за этого масса танка увеличилась до 13,5 т. Россия пыталась купить у Франции Шнейдер СА-1 и Рено FT-17, но после первого боя Шнейдеров от их покупки решили отказаться. Рено FT-17 не попали в Россию из-за революции. Один экземпляр испытывался в Италии, но после испытаний от заказа в 1500 машин было решено отказаться. Первый бой состоялся 16 апреля 1917 г. Многие из 130 танков были разбиты германской артиллерией. После войны танк применялся в качестве транспортного и ремонтного танка. После Первой мировой войны танк участвовал в боях в Марокко в 1921 году и в Испании в 1939 г. Кроме СА-1, Schneider разрабатывал прототипы СА-2, СА-3, СА-4. Были изготовлены прототипы только СА-2 и СА-3. СА-4 существовал только на бумаге.

Танк Сен-Шамон был значительно тяжелее Шнейдера, но имел более высокую скорость. Это объяснялось большей мощностью его двигателя; мощность двигателя на танке Шнейдер равнялась 60 л. с., а на танке Сен-Шамон – 90 л. с. В танке Сен-Шамон впервые была установлена электрическая передача. С валом двигателя соединялся якорь динамомшины, которая вырабатывала ток и посылала его в два электромотора, соединённых с гусеницами. Вращаясь, валы электромоторов приводили во вращение гусеницы и заставляли танк двигаться. Если требовалось поворачивать машину, ток направляли в один электромотор, а другую гусеницу притормаживали. Машина поворачивалась в сторону заторможенной гусеницы. Благодаря такому устройству, танком мог управлять один человек, а не четыре, как на английских машинах, и это не требовало от него больших усилий. По своей внешней форме французские танки Шнейдер и Сен-Шамон значительно отличались от своих английских собратьев. Гусеницы их шли не поперек корпуса, а сбоку. Это являлось одновременно их преимуществом и недостатком. Скрытая корпусом гусеница меньше подвергалась поражению. С другой стороны, при верхнем расположении гусениц, как у английских танков, танки легче преодолевали препятствия - отвесные стенки, окопы. На французских танках были применены рессоры. Корпус танка подвешивался на спи-

ральных пружинах. При таком устройстве смягчались удары при движении машины по местности, танк мог иметь более высокую скорость, а экипажу обеспечивались более удобные условия работы. 15 сентября 1916 года, когда английские танки шли в бой на Сомме, французские танки проходили испытания на полигоне. Лишь через семь месяцев, 15 апреля 1917 года, французские танки были применены под Шмэн-де-Дам.



Французский танк фирмы Шнейдер (1916 г)



Французский танк Сен-Шамон (СА-1)



Рис. 72. Первые французские танки

Кроме представленных гусеничных «монстров» в Первую мировую войну французы сумели разработать и запустить в производство очень удачный лёгкий танк Рено FT-17 (рис. 73) - настолько удачный, что эксплуатировался ещё в начале Второй мировой войны в армиях Польши и Франции.



Французские танки «Рено FT-17» на передовой в Первой мировой войне



Первый советский танк КС - «Русский Рено»

Рис. 73. Французский танка «Рено FT-17»

При конструировании этого танка впервые были применены многие решения, ставшие затем классикой танкостроения. Он имел вращающуюся башню с установленной в ней лёгкой пушкой или пулемётом (в отличие от «спонсонного», т.е. в выступах по бокам корпуса, расположения вооружения в Mk.1), низкое давление на грунт и, как следствие, высокую проходимость, относительно высокую скорость и хорошую маневренность, что определило его высокую подвижность и эффективность. Этот танк собирался в модифицированном варианте в России на Нижегородском заводе «Красное Сормово» в послереволюционный период и именовался «Русский Рено». Танки аналогичной конструкции в первой половине XX в. выпускали в Италии, США, Японии.



5 сентября 1916 года на Сомме англичане впервые применили такое оружие, как танк. Несмотря на успехи англичан, немецкое командование поначалу сконцентрировалось не на развёртывании проектирования своих танков, а на организации противотанковой обороны. Однако уже к ноябрю немецким генералам стало ясно, что Тройственному союзу необходимы собственные танки. Для разработки этих машин решением Военного министерства кайзеровской Германии 13 ноября была создана техническая комиссия под руководством генерала Фридрикса, в которую входили представители вооружённых сил и известных немецких фирм, в частности, «Даймер», «Бенц», NAG, «Опель», «Брасс унд Херштейнт» и австрийского отделения «Холт-Катерпиллер». По решению комиссии главным конструктором танка был назначен 46-летний капитан Йозеф Фольмер, в группу которого вошло около сорока инженеров. Первый серийный A7V (рис. 74) удалось выпустить только к октябрю 1917.



**Рис. 74. A7V (Sturmpanzerwagen) — немецкий танк времён Первой мировой войны**

До сентября 1918 г. Германии удалось выпустить всего 20 таких танков (хотя планировалось производство не менее 100 машин), так что серьёзного боевого значения немецкие танки не имели. Для сравнения: Франция за годы войны выпустила 3997 танков всех типов, а Англия – 2905.

Ходовая часть A7V была выполнена по типу трактора «Холт», массивный броневой корпус уставлялся на прямоугольной коробчатой раме, в движение этого монстра приводили два 100-сильных карбюраторных двигателя «Даймер». Из-за чрезмерного веса машина была неповоротливой и слабoproходимой, но при этом хорошо бронированной. Броня защищала экипаж не только от бронебойных пуль, но и от осколков осколочно-фугасных снарядов артиллерии. Экипаж был достаточно велик - 18 человек - и должен был обслуживать многочисленное вооружение.

Если проанализировать первые танки времен Первой мировой войны, то в основе их конструкции лежала разработка американского трактора «Хольт» (см. рис. 58.)

Кроме боевых гусеничных машин (БГМ: танки, броневые автомобили, бронетрактора, самоходные артиллерийские установки, тягачи), к 20-м годам XX в. возникла мировая про-

мышленная система проектирования и производства гусеничных тракторов гражданского назначения.

В начале XX в. машиной, опередившей свое время, стал трактор Хорнсби (рис. 75). Гигантская стальная машина была создана, как вездеход и наделена новейшим гусеничным механизмом, а также паровым двигателем, так как использовалась она в тех краях, где были проблемы с топливом. Он был изготовлен в Англии в 1910 году в единственном экземпляре. Предназначен для перетаскивания грузов на Аляске - там с дорогами было плохо, колесные тягачи не обладали необходимой проходимостью, а лошади и собаки возить большие грузы не могли.



Рис. 75. Трактор Хорнсби (1910 г.)



Рис. 76. Опытный образец трактора Фаулер «Снэйктрак» (1923 г.)

Компания «Ричард Хорнсби и сыновья» начала свой бизнес еще в начале XIX в., производя различную технику, в основном сельскохозяйственного назначения. Со временем, компания перешла к производству паровых двигателей, в том числе и для тракторов. В 1904 году ее ведущий инженер, и по совместительству, управляющий директор Дэвид Робертс запатентовал устройство, получившее известность как Caterpillar track - гусеницу, составленную из отдельных звеньев, и являющуюся прародителем современной стальной гусеницы.

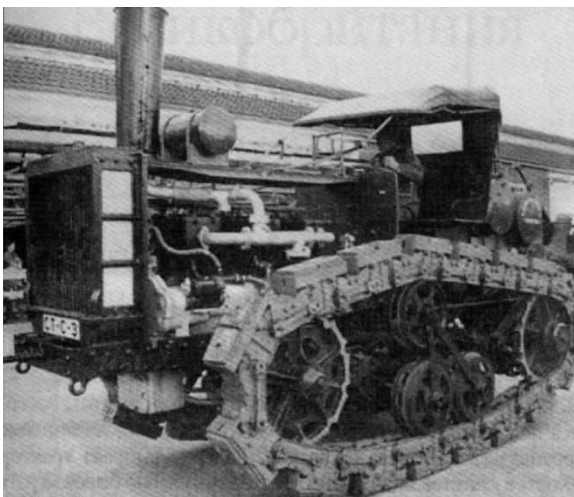


Рис. 77. Трактор «Литтл Катерпиллер» постройки «Горнсби энд Санз» (1907 г.)

Последний паровой гусеничный тягач «Снэйктрак» (см. рис. 76) разработала английская фирма «Фаулер» в 1923 году. Трактор «Снэйктрак», как и его собрат «Хорнсби», был полногусеничной машиной в отличие от паровых полугусеничных тракторов «Хольт» и «Ломбарди». Как и следовало ожидать, в условиях жесткой конкуренции с бензиновыми тракторами «Снэйктрак» не нашел своего покупателя и остался в единственном числе.

Наступал век полногусеничных тракторов с двигателями внутреннего сгорания. В 1907 г. британская армия испытывала гусеничный трактор фирмы «Горнсби энд Санз» си-

В середине 1909 г. компания «Ричард Хорнсби и сыновья» по заказу «Northern Light Power & Coal Co» разработала одну из последних технически продвинутых машин того времени - трактор с гусеничными траками. Новая машина должна была буксировать уголь в 40 милях от месторождения компании в Угольном ручье в возле города Доусон Юкон. Поставка угля должна была обеспечить возможность запуска тепловой электростанции в г. Доусоне, а также обеспечить нужды жителей города в угле для обогрева домов. Паровой трактор работал от угля, который сам и вез.

Последний паровой гусеничный тягач «Снэйктрак» (см. рис. 76) разработала ан-



стемы Д Робертса (рис. 77). Вскоре патенты Робертса использовала американская «Холт Компании». Английская, французская, русская тяжелая артиллерия выбрала трактор «Холт» в качестве тягача. Этим тракторам суждено было сыграть важную роль и в появлении как танков, так и гражданских тракторов.

Немецкая фирма «Lanz» в первой половине XX в. была крупнейшим производителем тракторов и различной сельскохозяйственной техники в Европе (рис. 78). Фирма ведет свою историю с 1859 года, когда молодой предприниматель Генрих Ланц (Heinrich Lanz) основал транспортно-экспедиционную компанию J.P. Lanz & Co. Позже при компании была построена ремонтная мастерская, которая преобразовалась в собственное полноценное производство, открытое в Манхайме 1870 г. Фирма специализируется на литье чугуна и выпуске различных сельскохозяйственных машин, ручных и паровых молотилок, локомотивов, многофункциональных двигателей и даже...дирижаблей! Чтобы оценить масштаб этого предприятия, достаточно перечислить города, в которых располагались представительства фирмы в начале XX в.: Бреслау, Берлин, Регенсбург, Амстердам, Афины, Москва, Мадрид, Лиссабон, Брюссель, Будапешт, Бухарест, Данциг, Гамбург, Кёнигсберг, Кёльн, Каир, Константинополь, Одесса, Мюнхен, Париж, Ростов-на-Дону, София, Тунис, Варшава. География впечатляет!

В 1912 г. один из первых тяжелых тракторов фирмы «Lanz» «Ландбаумотор» (Landbaumotor) с 15-литровым двигателем мощностью 90 л.с. стал использоваться в германской армии для буксировки тяжелых пушек и мишеней. Различные версии этого трактора получили широкое распространение на полях Первой мировой войны, выполняя различные роли. Самая мощная версия с бензиновым двигателем «выжимала» 120 л.с.



Рис. 78. Гусеничные тягачи и трактора фирмы «Lanz» начала XX в.

После поражения Германии в Первой мировой войне фирме пришлось сконцентрироваться на выпуске мирной продукции. В 1921 году появился первый трактор «Lanz-Bulldog», ставший родоначальником большого семейства тракторов, которые находились в производстве с 1921 по 1960 гг. За это время было выпущено более 220 тысяч «Бульдогов». Благодаря использованию одноцилиндровых двигателей трактора Ланц Бульдог обладали двумя важными достоинствами: неприхотливостью и низкой стоимостью, что обеспечило высокий спрос среди среднего класса населения Германии и Европы.

В конце 1915 года Луи Рено от французского министерства боеприпасов получил задание: разработать транспортер, способный перевозить орудия именно по полю боя. Конечно, существовал трактор «Холт». Но у его проходимость оставляла желать лучшего, к тому же просто так копировать его было нельзя: существовало патентное право. Но французское правительство решило, что патенты «Холта» отличаются от патентов «Шнейдера» и таким образом освободило Рено от всякой ответственности – «только сделай нам машину».

Порядка 50 машин было заказано уже 22 сентября 1916г. Затем 27 октября 1916 года этот заказ был увеличен до 350 машин. Первые транспортеры «Рено FB» (рис. 79) были поставлены в марте 1917 года. Предполагалось, что 8 таких транспортеров смогут перевозить за один рейс полную пушечную батарею из 4 полевых пушек или гаубиц, запас боеприпасов

и 40-50 офицеров и рядовых их обслуживающего персонала. Транспортёр был способен перевозить 75-миллиметровую полевую пушку обр. 1897 года, 105-миллиметровую пушку «Шнейдер» 1913 года и 155-миллиметровую гаубицу Шнейдера 1915 года.

Конструкция транспортёра была очень проста: гусеничное тракторное шасси, плоская «палуба» и привод от авиационного двигателя «Рено» в 110 л. с., плюс четырехступенчатая коробка передач. Оборудование было минимизировано до предела. «Рено FB» весил 14 т и мог нести нагрузку в 10 т. Максимальная скорость (без нагрузки) составляла около 6 км/ч. Использование авиационного двигателя оказалось не слишком удачным решением, так как он имел высокий расход топлива и требовал хорошего ухода. Транспортёр был достаточно громоздким и особой прочностью не отличался, поэтому рекомендовалось при выборе маршрута движения соблюдать осторожность.

К концу 1917 года около 120 машин поступили на службу. Они оказались очень успешными и часто привлекались для выполнения самых сложных заданий. Например, транспортировали грузовики с танками «Рено FT-17» в кузове! К моменту перемирия в ноябре 1918 года французская армия имела 256 таких транспортёров.

До конца войны были предложения модернизировать «Рено FB» таким образом, чтобы он мог бы нести на себе 155-миллиметровую пушку весом 11 т. Для этого на него поставили мощную лебедку, способную втащить это орудие на платформу. Было и предложение превратить его в САУ, закрыв тонкой броней, но из этого ничего не вышло.

В 1916 году французская армия была крайне заинтересована в артиллерийских тягачах на гусеницах, которые могли бы тянуть тяжелые орудия не только по дорогам, но и по бездорожью. Из-за их отсутствия сорвались планы по проведению наступательных операций в 1915 году. Зачастую пушки находились в одном месте, а нужны были в другом, но доставить на место их было нельзя. «Рено» выполнил задание, построил транспортёр с грузовой платформой, а вот фирма «Шнейдер» в конструкции своего тягача (рис. 80) использовала двигатель, шасси, трансмиссию и подвеску танка «Шнейдер СА1». Снаряды тяжелых орудий весили по 40-100 кг и доставлять их к орудиям в полевых условиях можно было только тракторами.

Шасси танка получило отделение управления в передней части корпуса, кабину и грузовую платформу с деревянным настилом в задней части. Защита от непогоды ограничивалась простым брезентом. Лебедка на транспортёре была очень мощной, а трос - толстым и прочным. Мощность двигателя составляла 60 л. с. Трактор весил 10 000 кг при грузоподъемности в 3 000 кг. Максимальная скорость с небольшой нагрузкой составляла 8,2 км/ч.



Рис. 79. Транспортёр-тягач «Рено FB» (1917 г.)



Рис. 80. Транспортёр «Шнейдер» (1917 г.)

Сначала армия заказала 50 таких тракторов, затем, в октябре 1916 года, уже 500. К моменту заключения перемирия в ноябре 1918 года армия располагала 110 тракторами этого типа.

Первая мировая осталась позади, а с ней и стабильный доход «Holt Manufacturing Company». Тракторы, предназначенные для военных сражений, на мирных полях остаются не у дел. Продажи изрядно упали, компания была вынуждена брать кредиты у банков. Ко

всему прочему, ещё и неизменный конкурент Клэрэнс Лео Бест выпустил удачную модель трактора «C. L. Best 60 Tractor» (рис. 81) и захватил большую часть тракторного рынка США. Эта модель трактора поступила в продажу начиная с 1919 года. Это был самый удачный трактор за всю историю «C.L. Best Tractor Company», он был настолько популярным, что после слияния компаний в 1925 году его продолжили выпускать под названием «Caterpillar Sixty» (рис. 81). В августе 1925 года в результате слияния «Holt Manufacturing Co» с конкурирующей «CL Best Tractor gaz Co» стала называться «Caterpillar Tractor Company».



Рис. 81. «Caterpillar Sixty» (1919 г.)

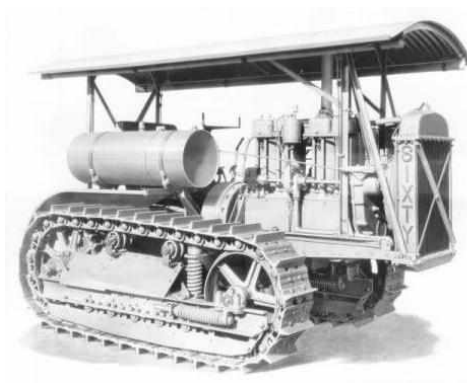


Рис. 82. Diesel Sixty



Рис. 83. Техника «Caterpillar Tractor Company»

Слияние компаний дало результаты практически сразу. Так, к 1929 году продажи «CaterpillarTractorCo.» достигают 52,8 млн долл. А во время «Великой депрессии» Caterpillar не только не теряет спрос, но и в 1931 году выпускает первый трактор с дизельным двигателем.

Diesel Sixty – так называют «дизельного» первенца (рис. 82 и 83), рождённого на сборочном конвейере Иллинойского завода в Восточной Пеории. Модель прошла все испытания, доказав выгодное использование нового топлива для данной техники. И в ноябре этого же года здесь, в промышленном центре США и Канады, с непрерывающимся потоком квалифицированных работников (в большинстве своём немецких колонистов) стартует производство тракторов следующего поколения.

Следует также отметить, что в 1930 году Челябинский тракторный завод (ЧТЗ) вводит производство трактора «Сталинец-60» (рис. 84) - брата-близнеца одного из тракторов Катерпиллар.

К 1940 году в линейку продукции САТ уже входят автогрейдеры, ножевые дорожные струги, грейдеры-элеваторы, террасеры и электрогенераторные установки. Помимо этого, увеличивается производство тракторов на бензиновых и дизельных двигателях. Спрос на технику, комплектующие, а также артиллерийское оборудование вновь повышается в военное время. Caterpillar получает заказ минобороны США на двигатели для танка М4. В дальнейшем этот проект становится основой для развития OEM-бизнеса компании, который она активно развивает и в наше время.

История отечественно гусеничного тракторостроения начинается после Октябрьского переворота 1917 года. В 1918 г. на Обуховском заводе в Петрограде началось производство тракторов по типу американского трактора фирмы «Холт» (как уже отмечалось, гусеничные тракторы этой фирмы послужили базой для создания первых танков), налаживается серийный выпуск тракторов на других машиностроительных заводах страны. Первый советский трактор назывался «Большевик» (рис. 84).

В 1923 году на Харьковском паровозостроительном заводе приступили к выпуску гусеничных тракторов «Коммунар» с двигателем мощностью 36,8 кВт и трехскоростной коробкой передач, которая обеспечивала скорость от 1,8 до 7 км/ч. Это был первый отечественный гусеничный трактор, который выпускался на промышленной основе.

Массовое производство гусеничных тракторов началось в 1930 г., когда вступил в строй первый в стране Сталинградский тракторный завод (ныне Волгоградский), затем в 1931 г. - Харьковский, которые изготавливали колесные тракторы. В 1933 г. Челябинский тракторный завод приступил к выпуску гусеничных тракторов С-60. В 1937 г. Сталинградский и Харьковский тракторные заводы перешли на выпуск гусеничных тракторов общего назначения (СХТЗ-НАТИ). Тогда же на Челябинском тракторном заводе началось производство гусеничных тракторов С-65 с дизельным двигателем. С этой модели начался переход тракторного парка страны на дизельные тракторы.

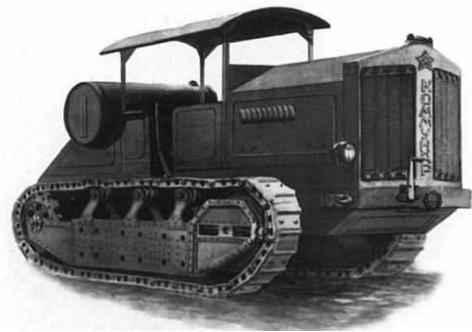
Здесь представлены далеко не все разработки гусеничных тракторов, которые проектировались, испытывались и выпускались в первой половине XX в. Большой толчок в развитии гусеничного движителя связан с Второй мировой войной (1936-1945 гг.).

Гусеничные снегоходы Элвина О. Ламбарда, Роверта Ф. Скотта и полугусеничные машины Адольфа Кегресса, трактора Хольта и другие ТТМ, которые в своей основе имеют гусеничный движитель и систему управления им - изобретение русского механика Ф.А. Блинова. Двадцатый век ознаменовался широким применением гусеничных движителей, как в военной технике, так и в транспортно-технологических машинах гражданского применения. Это были, как гусеничные трактора (ГТ), так и боевые гусеничные машины (БГМ): танки, бронетранспортеры, армейские тягачи, самоходные артиллерийские установки и др. Сегодня гусеничный движитель не утратил своего значения и активно используется конструкторами, как для оснащения классической гражданской транспортно-технологической техники, так в специализированных снегоболотоходных вездеходных машинах, лыжно-гусеничных снегоходах и в робототехнических системах. Большое применения в технике сегодня нашли модульно-гусеничные движители. Свое развитие гусеничный движитель нашёл в таких уникальных (экзотических) гусеничных машинах, как катковопланетарные («Аэроло») и пневмошагающие гусеничные машины.

Большое количество модернизируемой и вновь проектируемой гусеничной техники [41-52] требует правильного избрания её основных конструкционных и компоновочных схем, что можно осуществить благодаря статистическим моделям выбора геометрических параметров, массоинерционных, мощностных и скоростных характеристик.



Первый советский гусеничный трактор  
«Большевик» (1924 г.)



«Комунар» - прототип немецкий трактор  
«Ганомог Z-50»  
(1932 г.)



«С-60» - прототип американский трактор «Катерпиллер»  
(1932 г.)



«СХТЗ-НАТИ» (1937 г.)



«КД-35» - «Кировец-35» (1944 г.)



«Т-38» (1947-1950 гг.)



«ДТ-54» (1949 г.)



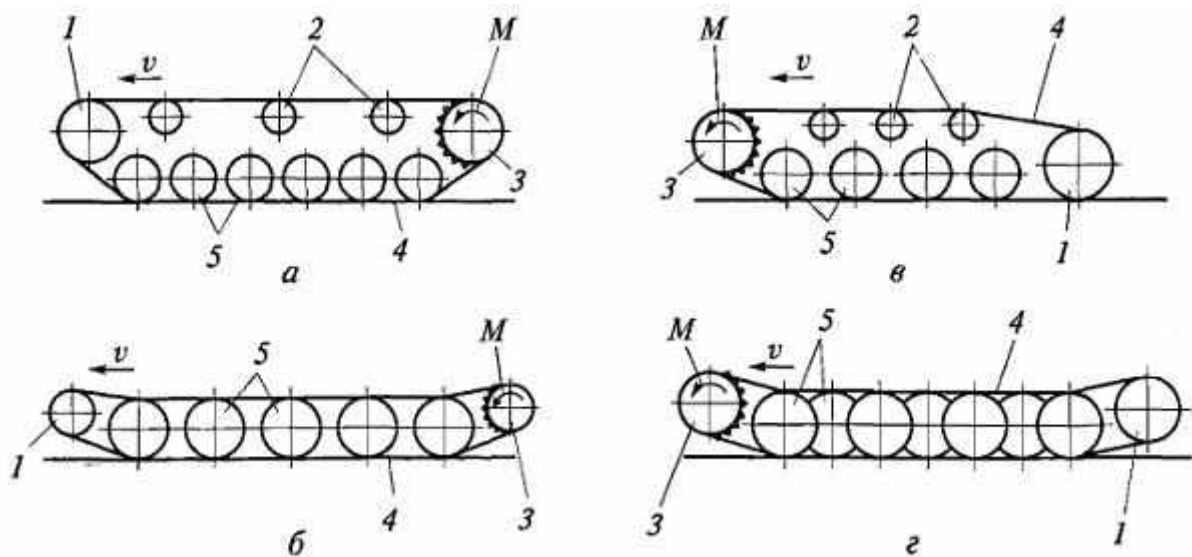
«ДТ-75» (1963 г.)

Рис. 84. Советские гусеничные тракторы XX в.



**Статистические модели гусеничных машин.** Проведенный анализ конструкций машин оснащенных гусеничными движителями, и информационных данных [41-52] позволил обобщить их конструкционные (массогабаритные) параметры и эксплуатационные (мощностные и скоростные) характеристики. К особенностям роторно-винтовых (червячных) движителей (архимедова винта) относится то, что они могут развивать значительную силу тяги при низких удельных нагрузках на опорное основание.

Движитель гусеничных машин (рис. 85) состоит: из гусеничных цепей 4 или лент, ведущих 3 и направляющих 1 колес, опорных 5 и поддерживающих 2 катков.



**Рис. 85. Схемы гусеничных движителей с кормовым (а, б) и носовым (в, г) расположением ведущего колеса:**

1 - направляющее колесо; 2 - поддерживающие катки; 3 - ведущее колесо;  
4 - гусеничная цепь; 5 - опорные катки;  $v$  - скорость машины;  $M$  - вращающий момент

Вес транспортно-технологической машины, оснащенные гусеничным движителем, передаются через подвеску на опорные катки и гусеницы, а через них - на опорную поверхность. Под действием вращающего момента  $M$  ведущие колеса перематывают гусеничные цепи, которые растилаются по опорной поверхности и являются как бы рельсовым путем, по которому на опорных катках перемещается несущая система машины. По мере перекачивания опорных катков задние звенья (траки) гусеничной цепи переходят на верхнюю ветвь гусеницы, а затем снова вступают в контакт с поверхностью опорного основания под передней частью машины.

На основании анализа и обработки параметров основных характеристик существующих транспортно-технологических машин (ТТМ), оснащенных гусеничными движителями были получены зависимости, представленные на рис. 86 – рис. 90, по которым можно сделать выводы о влиянии грузоподъемности на мощность двигателя, массогабаритные размеры и скорость движения ТТМ на гусеничных движителях. Статистические данные отдельно рассматривались для гусеничных вездеходных и специальных машин. Классические гусеничные трактора в данную статистическую модель не включены.

В статье [2] были получены зависимости и сделаны выводы о влиянии грузоподъемности на мощность двигателя и скорость движения сочлененных гусеничных машин (СГМ). Не смотря на разнообразие конструкций СГМ, их технических решений и компоновок возможны классификационные обобщения. Основываясь на проведенных исследованиях, была предложена классификация машин данного типа. Было выделено три группы: 1- СГМ с ПСУ



между секциями, 2 – СГМ с одной рамой, в основном для перевозки длинномерных грузов, 3 – СГМ специального назначения (выполняют широкий спектр технологических и специальных операций).

На основании анализа и обработки параметров основных характеристик существующих транспортно-технологических машин (ТТМ) и подходов из работ [1-3] были получены основные соотношения базовых мощностных, массогабаритных характеристик, а также давления на грунт в зависимости от полной массы СГМ. Эти зависимости представлены на рис. 90 – рис. 93.

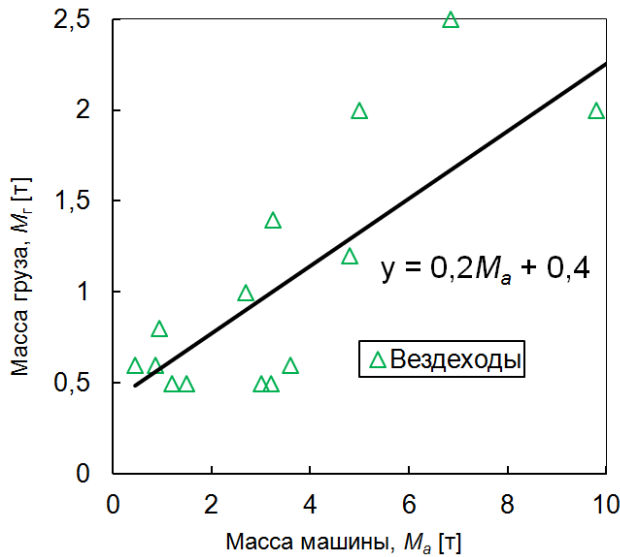


Рис. 86. Грузоподъёмность-масса машины

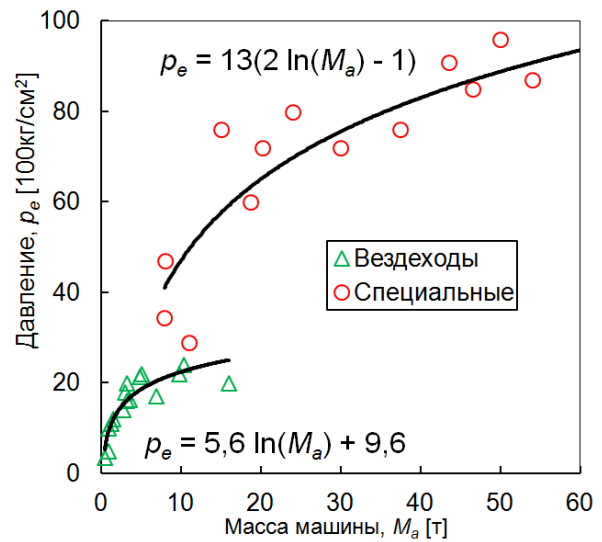


Рис. 87. Давление на полотно пути – масса машины

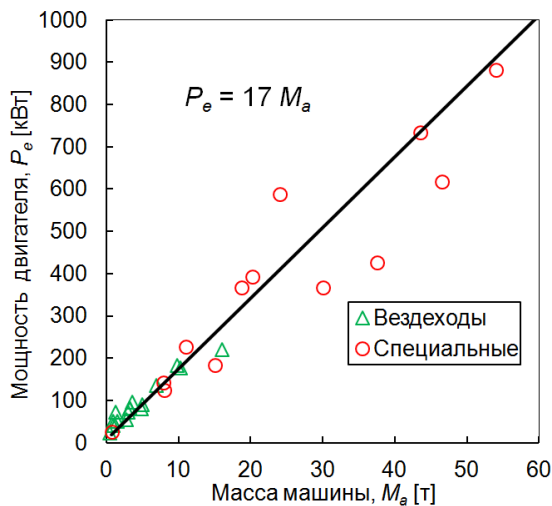


Рис. 88. Мощность двигателя – масса машины

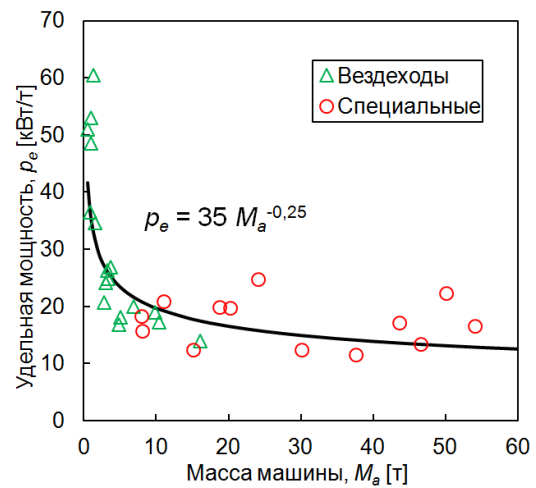


Рис. 89. Удельная мощность-масса машины

Используя представленные данные и зависимости, можно выбрать начальные параметры СГМ. Дальнейшее уточнение выбранных параметров и характеристик возможно произвести только после тягово-скоростного расчета, компоновочных и инженерно-проектных работ, проведенных для конкретного объекта проектирования, обеспечивающего нужный уровень подвижности [5, 6].

Таким образом, используя представленные данные и зависимости, можно выбрать начальные параметры машин, оснащенных гусеничными двигателями. Дальнейшее уточне-

ние выбранных параметров и характеристик возможно произвести только после тягово-скоростного расчета, компоновочных и инженерно-проектных работ, проведенных для конкретного объекта проектирования.

Результаты анализа массогабаритных, мощностных и скоростных характеристик машин на ГД были использованы при создании автономного робототехнического мобильного комплекса (АМРК) для мониторинга прибрежной зоны и прогнозирования морских прибрежных катастроф, выбиралась компоновочная схема, предполагающая использование модульно-гусеничного движителя.

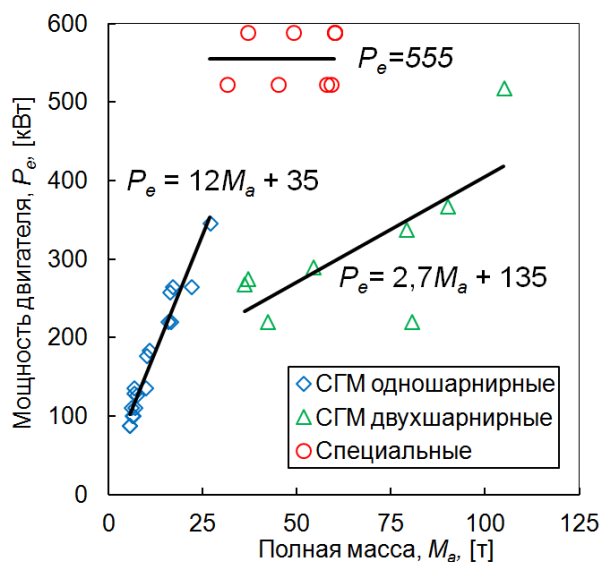


Рис. 90. Зависимость мощности двигателя от полной массы СГМ

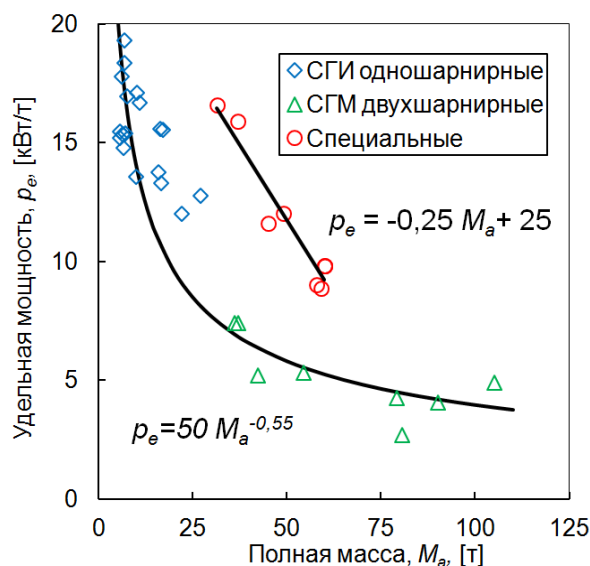


Рис. 91. Зависимость удельной мощности двигателя от полной массы СГМ

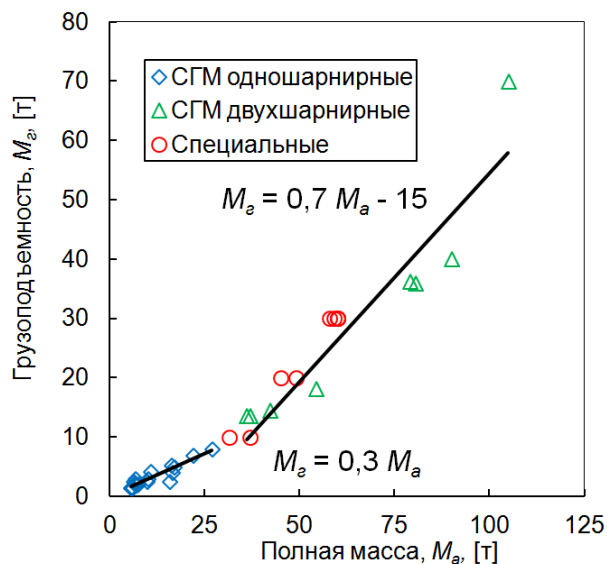


Рис. 92. Зависимость грузоподъемности от полной массы СГМ

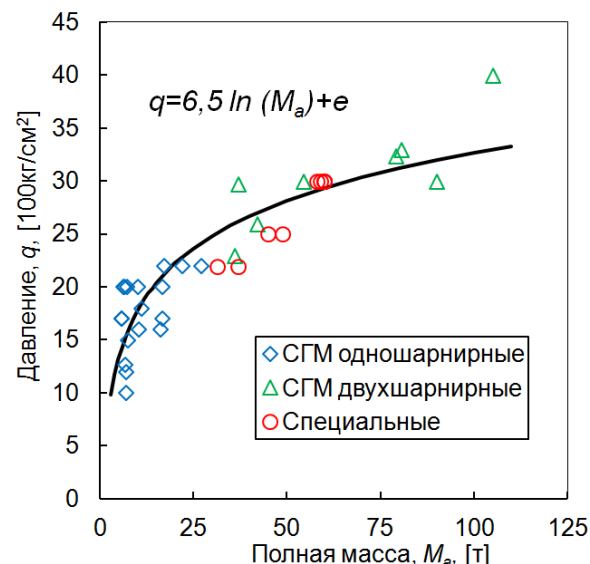


Рис. 93. Зависимость давления на грунт от полной массы СГМ

Кроме массогабаритных и мощностных характеристик, в ходе исследований были получены статистические модели для определения скоростных показателей гусеничных машин, которые представлены на рис. 94 и рис. 95.

Итогом выполненного анализа предполагается, что после выбора исходных параметров возможно будет провести математическое моделирование движения транспортно-технологических машин, оснащенных гусеничными движителями в условиях пересеченной местности с учетом разработанных моделей местности и полотна пути, представленных в работах [5, 6, 17-35]. Это может послужить основой для расчета оценки подвижности и производительности ТТМ на ГД по методикам, представленным в работах [9, 28, 36-40].

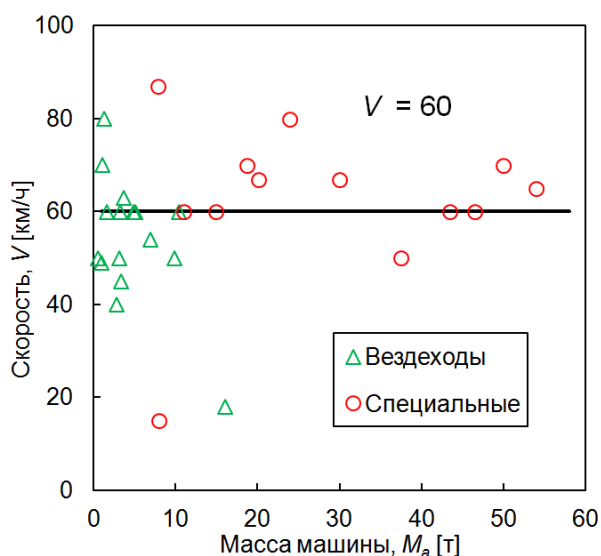


Рис. 94. Зависимость скорость движения от масса гусеничной машины

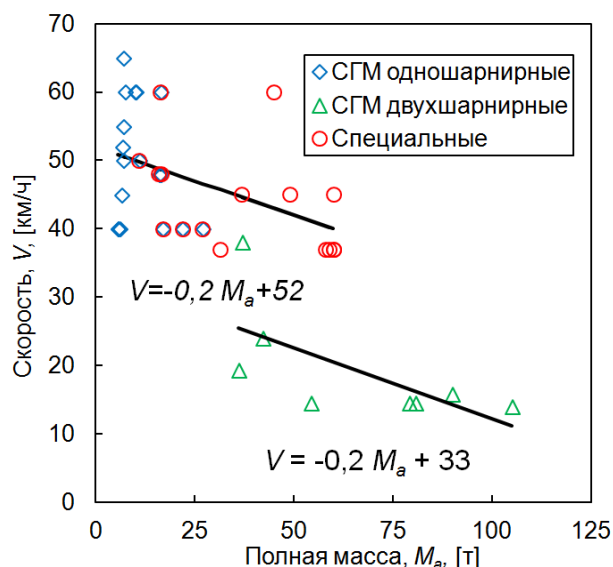


Рис. 95. Зависимость скорость движения массы от сочлененной гусеничной машины

**Заключение.** Идея создания гусеничного движителя возникла в XIX в. К началу XX в. концепция применения гусеничного движителя на машинах была полностью определена. В первой половине XX в., т.е. к началу Второй мировой войны, была всецело разработана надежная конструкция гусеничного движителя. Определено несовершенство полугусеничных машин и предложена концепция модульно-гусеничного движителя, как альтернатива колесному. В послевоенный период (50...70-е годы XX в.) модульно-гусеничная концепция движителя машин была преобразована в сочлененные машины и только к 80...90-м годам XX в. – начале XXI в. модульно-гусеничные движители стали вновь рассматриваться как самостоятельные опорно-тяговые элементы транспортно-технологических машин. К концу XX в. новую техническую идеологию получила и концепция полугусеничных движителей как система комбинированного лыжно-гусеничного опорно-тягового механизма для снегоходов.

Таким образом, на сегодняшний день в теоретическом и практическом планах гусеничные машины полностью сформированы как подмножество транспортно-технологических средств [41-52], обладающих устойчивой подвижностью и способных эффективно выполнять поставленные оперативно-функциональные задачи в различных условиях эксплуатации.

Предложенная статистическая модель выбора геометрических параметров, массоинерционных, мощностных и скоростных характеристик гусеничных машин может быть применена при создании новых и модернизации существующих ТТМ.

*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. **Береснев, П.О.** Статистическая модель выбора геометрических параметров, массогабаритных, мощностных и скоростных характеристик многоосных колесных транспортно-технологических машин / П.О. Береснев [и др.] // Труды НГТУ – Н. Новгород, 2015. №4(111). С. 136–150.
2. **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. Алексева. 2015. №2(109). С. 170–176.
3. **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. Алексева. 2015. №3(110).
4. **Деревянченко, А.А.** Волжский самородок: Страницы жизни Ф.А. Блинова / А.А. Деревянченко, А.Г.Чулков. – Саратов: Приволжское книжное издательство, 1990.
5. **Беляков, В.В.** Концепция подвижности наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексева. 2013. № 3 (100). С. 145–174.
6. **Беляков, В.В.** Подвижность наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексева. 2013. № 4. С. 72–77.
7. **Туманов, Д.** Предшественники танков. URL: <http://library.ukrcol.com/tank/02.html> Дата доступа 21.02 2016.
8. **Тюрин, Л.** И не лебедь и не гусь. URL: <http://forum.uazbuka.ru/showthread.php?t=86875> Дата доступа 15.05 2014.
9. 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. – 960 с.
10. Передвижение по грунтам луны и планет / под ред. А.Л. Кемурджиана – М.: Машиностроение, 1986. – 272 с.
11. Планетоходы / под ред А.Л. Кемурджиана. – М.: Машиностроение, 1982. – 319 с.
12. Планетоходы / под ред А.Л. Кемурджиана. – 2-е изд., переработанное и доп. – М.: Машиностроение, 1993. – 400 с.
13. Динамика планетохода / под ред. Б.Н. Петрова и А.Л. Кемурджиана. – М.: Наука, 1979. – 152 с.
14. Уроки танкостроения. URL: [http://www.spec-tehnica.ru/articles/articles\\_462.html](http://www.spec-tehnica.ru/articles/articles_462.html) Дата доступа 23.05 2016.
15. **Киселев, Е.** Первые танки: путь в тупик. URL: [http://nvo.ng.ru/history/2006-06-09/7\\_tank.html](http://nvo.ng.ru/history/2006-06-09/7_tank.html) Дата доступа 23.05 2016.
16. **Кихтенко, А.В.** Русский тип танка. URL: <http://www.waronline.org/write/his-magesty-tank/chapter5.html> Дата доступа 23.05 2016.
17. **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.
18. **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.
19. **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.
20. **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.
21. **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.
22. **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.
23. **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. Алексеева. 2014. № 1 (102). С. 136–141.
24. **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.
  25. **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.
  26. **Козлов, В.С.** Шагающие аппараты. развитие теории взаимодействия движителя с грунтом / В.С. Козлов, В.В. Беляков. – Нижний Новгород, 1999. – 140 с.
  27. Полотно пути транспортно-технологических машин (справочные материалы к теории «машина – местность») / В.В. Беляков [и др.]; под общ. ред. В.В. Белякова и А.А. Куркина. – Нижний Новгород, 2014. – 447 с.
  28. **Беляков, В.В.** Взаимодействие со снежным покровом эластичных движителей специальных транспортных машин: дисс. ... д-ра техн. наук / Беляков В.В. Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. Нижний Новгород, 1999. – 485 с.
  29. **Барахтанов, Л. В.** Проходимость автомобиля / Л. В. Барахтанов, В. В. Беляков, В. В. Кравец; НГТУ. – Н. Новгород, 1996. – 200 с.
  30. **Беккер, М.Г.** Введение в теорию систем местность-машина / М.Г. Беккер. – М.: Машиностроение, 1973. – 520 с.
  31. **Кошарный, Н.Ф.** Техничко-эксплуатационные свойства автомобилей высокой проходимости / Н.Ф. Кошарный. – Киев.: Высш. шк., 1981. – 208 с.
  32. **Забавников, Н.А.** Основы теории транспортных гусеничных машин / Н.А. Забавников. – М.: Машиностроение, 1975. – 448 с.
  33. **Беляков, В.В.** Методика расчета и анализ путей повышения проходимости многоосных колесных машин по снегу: автореферат дисс. ... канд. техн. наук / Беляков В.В. – М., 1992. – 16 с.
  34. **Куркин, А.А.** Новые тенденции в обследовании цунами /А.А. Куркин [и др.] // Экологические системы и приборы. 2014. № 12. С. 40–55.
  35. **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. Алексеева. 2014. № 4 (106). С. 331–335.
  36. **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.
  37. **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. 170–276.
  38. **Макаров, В.С.** Методика расчета и оценка проходимости колесных машин при криволинейном движении по снегу: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03 / Макаров В.С. – Н. Новгород, 2009. – 161 с.
  39. **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 / Гончаров К.О. – Н. Новгород, 2010. – 259 с.
  40. **Зезюлин Д. В.** Разработка методики выбора конструкционных параметров движителей, обеспечивающих эффективность движения колесных машин по снегу: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03 / Зезюлин Д. В. – Н. Новгород, 2013. – 218 с.
  41. **Анилович, В.Я.** Конструирование и расчет сельскохозяйственных тракторов: справочное пособие / В.Я. Анилович, Ю.Т. Водолажченко. – 2-е изд., переработ. и доп. – М.: Машиностроение, 1976. – 456 с.
  42. **Барский, И.Б.** Конструирование и расчет тракторов: учебник для вузов / И.Б. Барский». – 3-е изд., переработ. и доп. – М.: Машиностроение, 1980. – 335 с.
  43. **Платонов, В.Ф.** Гусеничные и колёсные тягово-транспортные машины / В.Ф. Платонов, Г.Р. Леиашвили. – М.: Машиностроение, 1986. – 296 с.
  44. **Гуськов, В.В.** Оптимальные параметры сельскохозяйственных тракторов / В.В. Гуськов. – М.: Машиностроение, 1966. – 195 с.

45. **Гинзбург, Ю.В.** Промышленные тракторы / Ю.В. Гинзбург, А.И. Швед, А.П. Парфенов. – М.: Машиностроение, 1986. – 296 с.
46. **Ксенович, И.П.** Ходовая система-почва-урожай / И.П. Ксенович, В.А. Скотников, М.И. Ляско. – М.: Агропромиздат, 1985. – 304 с.
47. **Барский, И.Б.** Динамика трактора / И.Б. Барский, В.Я. Анилович, Г.М. Кутьков. – М.: Машиностроение, 1973. – 280 с.
48. Тракторы. Проектирование, конструирование и расчёт / под ред. И.П. Ксеновича. – М.: Машиностроение, 1991. – 544 с.
49. Фирма Valtra Vamet и её новые тракторы: Отчет/ НАТИ; А.П.Парфенов. – М., 1999. – 143 с.
50. Тракторы фирмы New Holland с автоматическим включением привода переднего моста: Отчет/ НАТИ; А.П.Парфенов. – М., 1999. – 96 с.
51. Будущее трансмиссий сельскохозяйственных тракторов за бесступенчатыми передачами: Отчет / НАТИ; М.Я. Мининзон. – М., 1999. – 136 с.
52. **Забавников, Н.А.** Основы теории транспортных гусеничных машин / Н.А. Забавников. – М.: Машиностроение, 1968.

*Дата поступления  
в редакцию 25.02.2016*

**P.O. Beresnev, V.I. Filatov, A.A. Eremin, A.M. Belyaev, A.V. Papunin,  
V.S. Makarov, D.V. Zeziulin, V.E. Kolotilin, V.V. Belyakov, A.A. Kurkin,**

**STATISTICAL MODEL OF CHOICE THE GEOMETRICAL PARAMETERS,  
MASS OF INERTIA, CAPACITY AND VELOCITY CHARACTERISTICS  
OF TRACK TRANSPORT TECHNOLOGICAL MACHINES**

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

The article discusses the dependence and draws conclusions about the impact of carrying capacity at the engine power and the movement velocity of track transport technological machines, which affects them agility, performance and efficiency. The statistical model of rational choice of the type tracked vehicle, control systems of maneuverability, ensuring the total power requirement, carrying capacity and maximum of movement velocity are present. The presented results have been obtained in Nizhny Novgorod state technical university n.a. R. 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:* caterpillar mover, tracked vehicle, tracked tractor, tracked skidder, articulated tracked vehicle, power and weight of track transport technological machines.



УДК 629.113

О.В. Воронков, В.И. Песков

**СХЕМАТИЗАЦИЯ НАГРУЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ТРЕХСЛОЙНОЙ ПАНЕЛИ ОСНОВАНИЯ НЕСУЩЕГО КУЗОВА АВТОБУСА**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Предлагаются расчетные схемы, которые можно использовать при схематизации нагруженного состояния трехслойной панели основания кузова типа «монокок» перспективного автобуса. Приводится обоснование вводимых упрощений, рассчитываются величины основных нагрузок, выводятся зависимости для определения силовых факторов, действующих в сечениях панели. Указанные теоретические положения разрабатываются в рамках технического метода проектирования и расчета автобусных кузовов типа «монокок».

*Ключевые слова:* автобус, кузов-монокок, трехслойная панель, нагрузка, прочность.

Одним из новых направлений в современном автобусостроении является разработка автобусов с несущими кузовами типа «монокок», которые при обеспечении необходимой прочности и жесткости конструкции позволяют существенно снизить её собственную массу по сравнению с обычными аналогами. Пример несущего автобусного кузова типа «монокок», разработанного авторами статьи, приведен на рис. 1.



**Рис. 1. Прототип кузова-монокока с основанием и крышей в виде трехслойных панелей:**  
а – внешний вид; б – вид из передней части салона

Теоретическое изучение механики прочностной работы и анализ напряженно-деформированного состояния трехслойной панели основания несущего кузова автобуса подразумевают схематизацию действующих на неё нагрузок. С этой целью производится разработка упрощенных расчетных схем, пригодных для эффективного теоретического анализа, которые в дальнейшем будут использоваться в техническом методе проектирования и расчета прочности подобных автобусных кузовов. Указанный вопрос является на данный момент актуальным, так как перспективное направление проектирования автобусных кузовов типа «монокок» мало изучено.

В работе [1] было показано, что трехслойная панель основания автобусного кузова типа «монокок» с удовлетворительной достоверностью может считаться находящейся в условиях так называемого цилиндрического изгиба [2] на пролете между боковинами. Указанная особенность позволяет для рассмотрения нагруженного состояния такой панели использовать условно плоскую расчетную схему, соответствующую сечению кузова плоскостью, расположенной перпендикулярно продольной оси автобуса (рис. 2). В таком случае взаимодей-

стве панели основания с боковиной в месте их соединения можно представить в виде совокупности из трех интегральных погонных силовых факторов: продольной силы  $N_z$ , поперечной силы  $Q_y$  и изгибающего момента  $M_x$ . Переходя от сечения кузова к расчетной схеме панели основания (рис. 2, нижняя часть),  $N_z$  и  $Q_y$  можно рассматривать как неизвестные реакции граничных связей, а изгибающий момент представить в виде доли  $k_p$  от максимального изгибающего момента  $M$ , действующего на панель. Это позволяет рассматривать нагруженное состояние панели основания изолированно от соседних конструктивных элементов. Величине  $k_p$  в [1] было дано название «коэффициент разгрузки», её значение зависит в основном от конструктивной схемы кузова, т.е. от предназначения автобуса (городской, туристический и т.п.) и класса автобуса по R-107 [3]. Ориентировочное значение данного коэффициента для автобуса II класса с четырьмя рядами сидений без багажных отделений под пассажирским отсеком составляет  $\sim 0,1$  [1].

Влиянием продольной силы реакции боковины  $N_z$  на изгибную деформацию панели основания пренебрегаем в силу её малости.

На рис. 4 показаны два основных варианта нагруженного состояния панели основания:

*a* – в части пассажирского отсека, где установлены сиденья, в данном случае в четыре ряда;

*b* – в районе накопительной площадки у дверного проема. Для аэродромного автобуса вариант (*b*) соответствует всей площади пола пассажирского отсека.

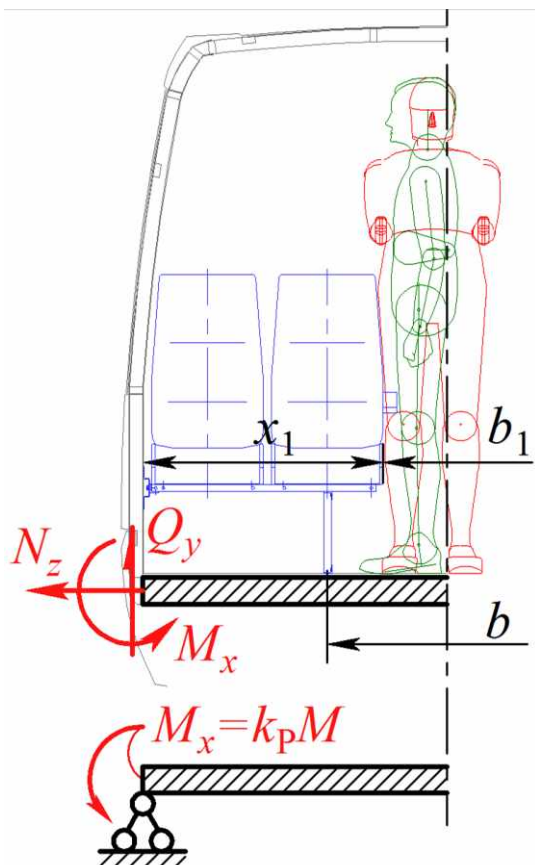


Рис. 2. Схематизация граничных условий для панели основания

На рис. 2 и рис. 4 использованы следующие обозначения (из нераскрытых ранее по тексту):  $Q$  – максимальное значение поперечной погонной силы;  $R$  – погонная поперечная реакция опоры;  $f$  – погонная нагрузка со стороны кронштейнов сидений;  $q$  – распределенная нагрузка от стоящих пассажиров;  $L$  – пролет между боковинами;  $b$  – расстояние между кронштейнами сидений;  $b_1$  – наибольшая ширина прохода, на которой могут стоять пассажиры, обычно соответствует расстоянию между бортами сидений;  $x$  – расстояние от боковины до кронштейна сидений;  $x_1$  – ширина блока сидений.

Пассажиры могут стоять лицом к борту или по направлению движения (рис. 2), или под некоторым углом к нему, распределять свой вес равномерно на обе ноги или большую часть веса на одну из ног. Такая хаотичность распределения реальных весовых усилий оправдывает их схематизацию в виде равномерно распределенной нагрузки. Определение ширины  $b_1$  по бортам сидений также представляется достаточно правомерным, так как подлокотники некоторых сидений могут быть подняты или вовсе отсутствовать. С учетом перечисленных возможных положений стоящих пассажиров реальная ширина распределения весовой нагрузки также

представляется достаточно правомерным, так как подлокотники некоторых сидений могут быть подняты или вовсе отсутствовать. С учетом перечисленных возможных положений стоящих пассажиров реальная ширина распределения весовой нагрузки также

будет колебаться около величины  $b_1$ , а её усредненное значение будет с достаточной для проектировочного расчета точностью соответствовать  $b_1$ .

Величины нагрузок  $f$  и  $q$  можно определить, опираясь на предписания R-107 [3], в соответствии с которыми масса одного пассажира  $M_{\Pi}$  и площадь пола  $S_{\Pi}$  для стояния одного пассажира составляют 68 кг и 0,125 м<sup>2</sup> соответственно для автобусов классов I и A, 71 кг и 0,15 м<sup>2</sup> соответственно – для автобусов классов II, III и B. Тогда можно записать:

$$q = \frac{g \cdot M_{\Pi}}{S_{\Pi}} \cdot \frac{b_1}{b} \text{ – вариант (a), рис. 4, a; } \quad q = \frac{g \cdot M_{\Pi}}{S_{\Pi}} \text{ – вариант (б), рис. 4, б, } \quad (1)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения.

В случае если кронштейн сиденья не смещен относительно его края на значительное расстояние (рис. 4, a), то зависимости для вариантов (a) и (б) совпадают. В случае если такое смещение имеет место (рис. 2), то для сохранения единой расчетной схемы варианта (a) реальная нагрузка условно распределяется на ширине  $b$  вместо  $b_1$ , а её величина модифицируется для сохранения неизменной величины равнодействующей.

Описание усилий на панель пола от кронштейнов сидений в виде условно равномерно распределенного погонного усилия  $f$  представляется правомерным при наличии в конструкции панели сплошного продольного силового элемента для крепления сидений, который воспринимает и распределяет сосредоточенные усилия со стороны кронштейнов. Считаем, что весь вес сидящих пассажиров, включая ручную кладь, передается на несущую конструкцию кузова через основания сидений, т.е. усилия опирания ногами сидящих пассажиров в пол с позиций общего изгиба панели основания считаем незначительными, что упрощает расчетную схему и идет в увеличение запаса прочности. Однако при расчетах панели основания следует учитывать, что локальные нагрузки на её верхнюю обшивку распространяются также и на зону установки сидений.

Для вычисления величины  $f$  воспользуемся расчетной схемой, приведенной на рис. 3, на котором обозначено:  $R_c$  – реакция, приложенная к основанию сиденья со стороны боковины;  $G_{\Pi}$  – вес пассажира вместе с сиденьем и приходящейся на него долей основания сиденья. Для упрощения считаем, что вес основания блока сидений распределяется между пассажирами равномерно, и сами сиденья располагаются равномерно на расстоянии  $x_1$ , тогда:

$$G_{\Pi} = g \cdot (M_{\Pi} + M_c + M_o / 2), \quad (2)$$

где  $M_c$  – масса сиденья;

$M_o$  – масса основания блока из двух сидений.

Записываем уравнение равенства нулю моментов действующих сил относительно точки крепления основания сидений к боковине (относительно места приложения реакции  $R_c$ ):

$$f \cdot x \cdot \text{Ш}_c = G_{\Pi} \cdot x_1 \cdot (1/4 + 3/4) \Rightarrow f = \frac{G_{\Pi}}{\text{Ш}_c} \cdot \frac{x_1}{x} = \frac{G_{\Pi}}{\text{Ш}_c} \cdot \frac{L - b_1}{L - b}, \quad (3)$$

где  $\text{Ш}_c$  – шаг установки сидений.

Из рис. 2 и рис. 4 можно определить, что  $x = (L - b) / 2$ ;  $x_1 = (L - b_1) / 2$ .

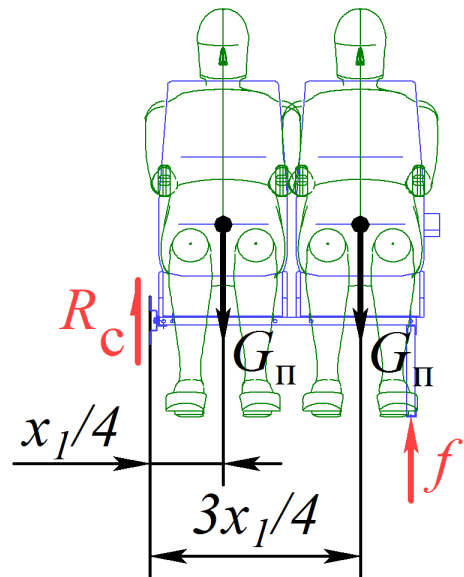
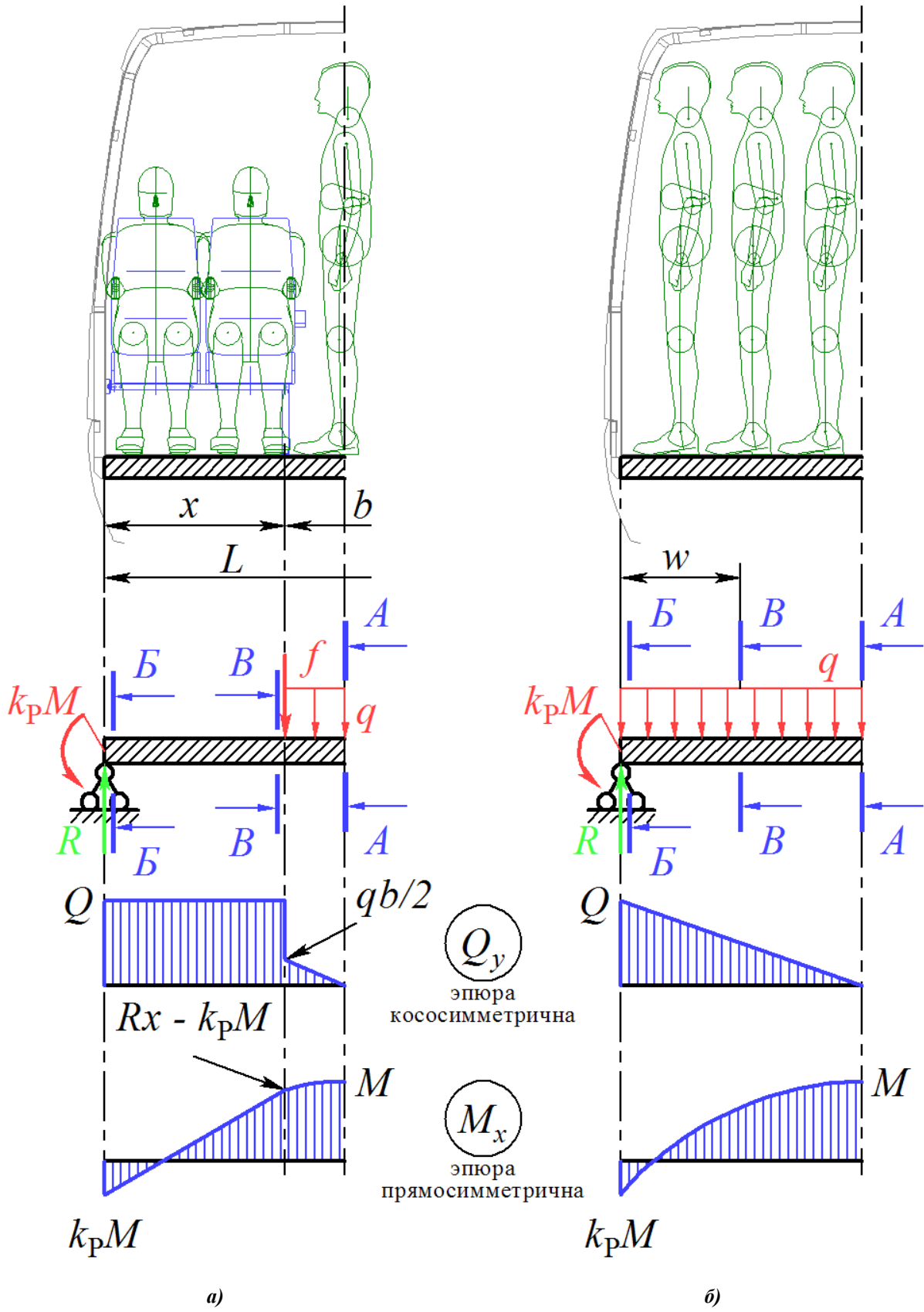


Рис. 3. К вычислению реакции  $f$



**Рис. 4. Нагруженное состояние панели основания:**

$a$  – место установки сидений;  $b$  – накопительная площадка для пассажиров

Примерные величины нагрузок  $f$  и  $q$  для реальных автобусов разных классов рассчитаны в табл. 1 в предположении, что  $x \approx x_1$ . В табл. 1 для класса I вариант (а) подразумевает четырехрядную установку сидений; вариант (б) – двухрядную (по одному ряду сидений вдоль каждого борта). Для классов II и III рассматривается четырехрядная установка сидений.

Таблица 1

Примерные величины  $f$  и  $q$

Класс автобуса	$M_{\Pi}$	$S_{\Pi}$	$M_C$	$M_O$	$G_{\Pi}$	$\Pi_C$	$L$	$b$	$f$	$q$
	кг	м <sup>2</sup>	кг	кг	Н	мм	мм	мм	Н/м	кПа
I,а	68	0,125	5	4	736	720	2300	500	1022	5,34
I,б				3	365		1890	900	507	
II	71	0,150	12	6	844	740	2285	480	1141	4,64
III	71	0,150	13	6	853	750	2285	480	1137	4,64

Перейдем к определению силовых факторов, действующих на панель основания. Текущую координату  $z$  будем отсчитывать от левого края панели (рис. 4) по направлению к правому краю. С учетом симметричности рассматриваемых расчетных схем можно записать следующие выражения.

**Расчетная схема рис. 4,а:**

$$R = f + q \cdot b / 2 = Q, \tag{4}$$

$$Q_y = R = f + q \cdot b / 2, 0 \leq z < x, \tag{5}$$

$$Q_y = -R, (L - x) < z \leq L, \tag{6}$$

$$Q_y = R - f - q \cdot z_1 = q \cdot (b / 2 - z_1), z_1 = z - x, 0 < z_1 < b, x < z < (L - x), \tag{7}$$

$$M = (R \cdot L / 2 - f \cdot b / 2 - q \cdot b^2 / 8) / (1 + k_p) = (f \cdot x + q \cdot L \cdot b / 4 - q \cdot b^2 / 8) \cdot k_M, \tag{8}$$

где  $k_M = 1 / (1 + k_p)$  [1],  $(1 - k_M \cdot k_p) = k_M$ ,

$$M_x = R \cdot z - k_p \cdot M = (f + q \cdot b / 2) \cdot z - (f \cdot x + q \cdot L \cdot b / 4 - q \cdot b^2 / 8) \cdot k_M \cdot k_p, 0 \leq z < x, \tag{9}$$

$$M_x = R \cdot z_2 - k_p \cdot M, z_2 = L - z, 0 \leq z_2 < x, \tag{10}$$

$$\begin{aligned} M_x &= R \cdot x + (R - f) \cdot z_1 - q \cdot z_1^2 / 2 - k_p \cdot M = \\ &= f \cdot x \cdot k_M + q \cdot b \cdot (x \cdot k_M - b / 4 \cdot k_M \cdot k_p) / 2 + q \cdot b \cdot z_1 / 2 - q \cdot z_1^2 / 2, \\ z_1 &= z - x, 0 < z_1 < b, x < z < (L - x). \end{aligned} \tag{11}$$

**Расчетная схема рис. 4,б:**

$$R = q \cdot L / 2 = Q. \tag{12}$$

$$Q_y = R - q \cdot z = q \cdot (L / 2 - z), 0 \leq z \leq L. \tag{13}$$

$$M = k_M \cdot q \cdot L^2 / 8. \tag{14}$$

$$M_x = R \cdot z - q \cdot z^2 / 2 - k_p \cdot M = q \cdot (L \cdot z - z^2) / 2 - k_p \cdot k_M \cdot q \cdot L^2 / 8, 0 \leq z \leq L. \tag{15}$$

Рассмотренные варианты расчетных схем будут иметь по три расчетных (наиболее опасных с точки зрения прочности) сечения (рис. 4): в сечении А-А действует наибольший погонный изгибающий момент; в сечениях Б-Б и В-В – погонное поперечное усилие совместно с изгибающим моментом. Для расчетной схемы (рис. 4, а) положение сечения В-В определено, соответствует расстоянию  $x$  от края панели. Для расчетной схемы (рис. 4, б) се-

чение В-В не всегда является опасным, его положение характеризуется размером  $w$ , определение которого остается за рамками данной статьи.

#### Библиографический список

1. **Воронков, О.В.** Совершенствование весовых, жесткостных и прочностных показателей автобусных кузовов путем использования свойств конструкций типа «монокок»: дисс. ... канд. техн. наук / Воронков О.В. – Н. Новгород, 2014.
2. **Тимошенко, С.П.** Пластинки и оболочки / С.П. Тимошенко. – М.: Гостехиздат, 1959. – 625 с.
3. **Правила №107.** Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения транспортных средств категорий М2 и М3 в отношении их общей конструкции. Пересмотр 1. Добавление 106 / ЕЭК ООН – Женева, 2004.

*Дата поступления  
в редакцию 15.02. 2016*

**O.V. Voronkov, V.I. Peskov**

#### SCHEMATIZATION OF BUS FLOOR SANDWICH-PANEL LOADED CONDITION

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

Analytical models for loaded conditions of floor sandwich-panel of future-oriented bus with monocoque body are proposed in the article. Justification of used simplifications is provided, values of significant loads are calculated and formulas for evaluation of internal forces in the sandwich-panel are listed. The proposed theoretical statements are developed in scope of engineering method for development and strength estimate of monocoque bus bodies.

*Key words:* bus, monocoque body, sandwich-panel, loaded condition, strength.



УДК 629.113, 630.377.44

В. Е. Клубничкин<sup>1</sup>, Е. Е. Клубничкин<sup>1</sup>, В.С. Макаров<sup>2</sup>,  
Д.В. Зезюлин<sup>2</sup>, А.В. Редкозубов<sup>2</sup>, В.В. Беляков<sup>2</sup>

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ГУСЕНИЧНЫХ МАШИН ПО ЛЕСНЫМ ДОРОГАМ

Московский государственный университет леса,<sup>1</sup>  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,<sup>2</sup>

Рассматривается актуальность исследования гусеничных машин при помощи современных средств компьютерного моделирования, позволяющих проводить анализ кинематики и динамики движения. Представлен порядок моделирования гусеничного движителя и машины в целом. Показаны принципы формирования модели полотна пути, а именно кривизны пути, уклонов макропрофиля, микропрофиль, распределение дискретных препятствий, изменение сопротивления движению. Приведены наглядные примеры виртуального эксперимента по движению гусеничной машины в разных условиях.

*Ключевые слова:* гусеничная машина, гусеничный движитель, моделирование, ходовая система

Лес относится к одному из первых, известных человечеству источников древесины топлива, дичи и других продуктов. Древесина и по сей день остается актуальным и не дорогим, не только строительным материалом, но и экологичным возобновляемым источником энергии.

Для лесных машин получили распространение колесные и гусеничные. Несмотря на то, что в последнее время имеется рост числа колесных машин (у них выше за счет более высоких транспортных скоростей), актуальность применения гусеничных машин остается неизменной (более чем 60% территории лесного фонда России почвогрунты слабые, что существенно ограничивает возможность применения машин на колесной базе) [1].

Движитель гусеничной машины состоит из гусеничных лент, включающих в себя большое количество траков шарнирно соединенных друг с другом, опорных и поддерживающих катков, механизмов натяжения, ведущих звезд и является многозвенным сложным механизмом [2, 3]. Моделирование таких систем можно производить аналитически. Но также существуют компьютерные программы, позволяющие производить моделирование кинематики и динамики движения гусеничных машин. Программами, способными реализовать задачи такого рода, являются MSC ADAMS View, ADAMS Tracked Vehicle (ATV) Toolkit и UM Tracked Vehicles (Универсальный механизм) и т.д. [4,5].

Рассмотрим моделирование движения лесозаготовительной гусеничной машины (ГЛЗМ) [6], исследования кинематики, динамики движителя и оценки нагруженности элементов трансмиссии ГЛЗМ при криволинейном и преодолении единичных препятствий со случайным распределением.

Примеры моделирования элементов ходовой системы гусеничной машины в программе UM Tracked Vehicles показано далее. Создание включает в себя выбор структурной схемы гусеничного движителя, здание подвески, добавление ведущего колеса, добавление направляющего колеса, создание модели гусеничной ленты, добавление упругих элементов.

На рис. 1 показана структурная схема гусеничного движителя, а на рис. 2 – общий вид полученной модели с указанием структурных звеньев. Более подробно схема моделирования представлена в работе [6].

Геометрия общего вида остова (корпуса) ЛЗГМ может быть импортирована из программы трехмерного моделирования формы.

Далее задается модель грунта, который будет использоваться при проведении экспе-

риментальных исследований ГЛЗМ. Модель грунта может быть выбрана из базы данных моделей грунтов или задаваться, используя данные о сдвиговых и компрессионных характеристиках. В основе модели взаимодействия катка с гусеничной лентой лежит предположение о пропорциональности силы площади жесткого внедрения. Моделируется взаимодействие катков с гребнями траков. Следующий шаг – это построение модели взаимодействия ведущих звездочек ГЛЗМ с траками гусеничных лент.

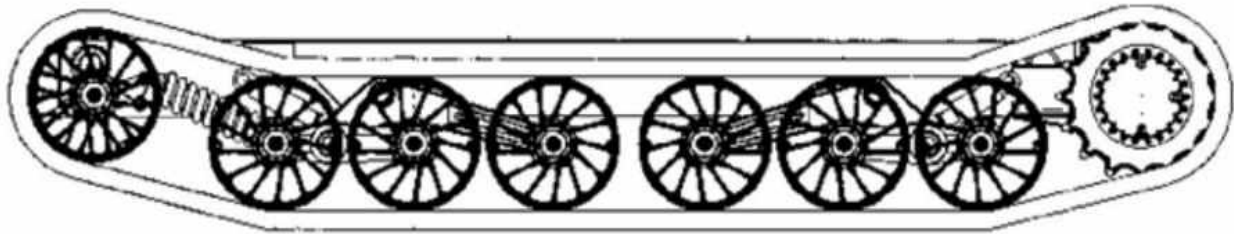


Рис. 1. Структурная схема гусеничного движителя

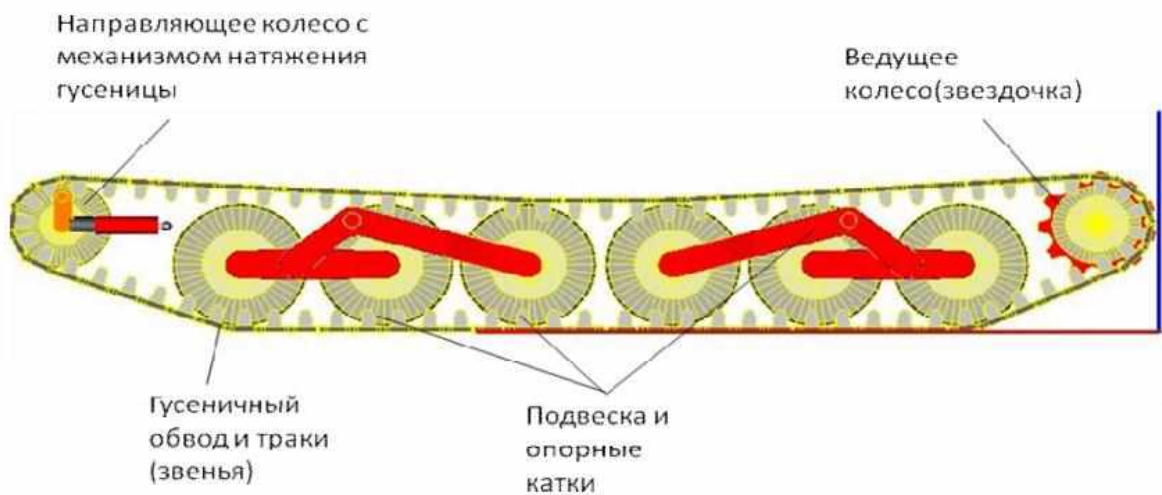


Рис. 2. Общий вид модели гусеничного движителя с указанием структурных звеньев

Распределение вероятностей кривизны пути с достаточной для практических исследований точностью описывается нормальным законом распределения.

Распределение уклонов макропрофиля носит сложный характер, который можно описать многопараметрической зависимостью, включающей части как минимум двух составляющих, имеющих нормальное распределение [7, 8].

Зависимость для расчета распределения будет выглядеть следующим образом:

$$\rho(\alpha_i) = k_1 \frac{\Delta\alpha}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\alpha_i)^2}{2\sigma_1^2}} + k_2 \frac{\Delta\alpha}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\alpha_i)^2}{2\sigma_2^2}},$$

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ ,  $k_1$  и  $k_2$  – параметры распределения;  $(k_1 + k_2) = 1$ ,  $\alpha_{i(j+1)} = \alpha_{ij} + \Delta\alpha$ ,  $\Delta\alpha = 0,5^\circ$ ,  $\alpha_i = 0,5(\alpha_{ij} + \alpha_{i(j+1)})$ .

Общепринятыми методами представления неровностей дорожной поверхности как у нас в стране, так и за рубежом являются аппроксимации спектральной плотности микропрофиля дорожного полотна. Функция спектральной плотности характеризует плотность распределения дисперсии процесса по частотам. Она представляет наибольший интерес при анализе случайных процессов, так как содержит одновременно информацию об их частотном и амплитудном составе. Данное распределение носит показательный характер.

Профиль дорог характеризуется спектральной плотностью вида:

$$\Phi(\Omega) = \Phi(\Omega_0) \left(\frac{\Omega}{\Omega_0}\right)^{-\omega} \text{ или } \Phi(n) = \Phi(n_0) \left(\frac{n}{n_0}\right)^{-\omega},$$

где  $\Omega = \frac{2\pi}{L}$  [рад/м] – волновая (дорожная) частота;  $L$  – длина волны;  $\Phi(\Omega_0)$  – спектральная плотность при  $\Omega_0=1$  рад/м;  $\omega$  – волнистость (волнообразность),  $\omega=2$ ; размерность  $[\Phi(\Omega)] = \text{м}^2/(\text{рад/м})$ ;  $n = \frac{\Omega}{2\pi}$  – пространственная частота;  $n_0=0,1$  цикл/м. [8].

Моделировать микропрофиль можно в программном комплексе MATLAB/Simulink. На рис. 3 приведена блок-схема модели, позволяющая получать случайные координаты. Блок Band-Limited White Noise (генератор белого шума) служит для создания шумового сигнала с заданной мощностью, равномерно распределенной по частоте. Генератор характеризуется мощностью шума «Noise Power», эталонным временем «Sample time» и числом «Seed», служащим для инициализации генератора случайных чисел. Генератор фактически является квантователем непрерывного сигнала, представляющего белый шум.

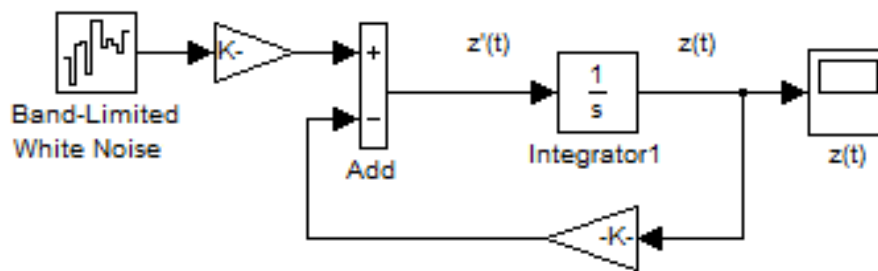


Рис. 3. Блок-схема Simulink-модели

Пример смоделированного микропрофиля показан на рис. 4.

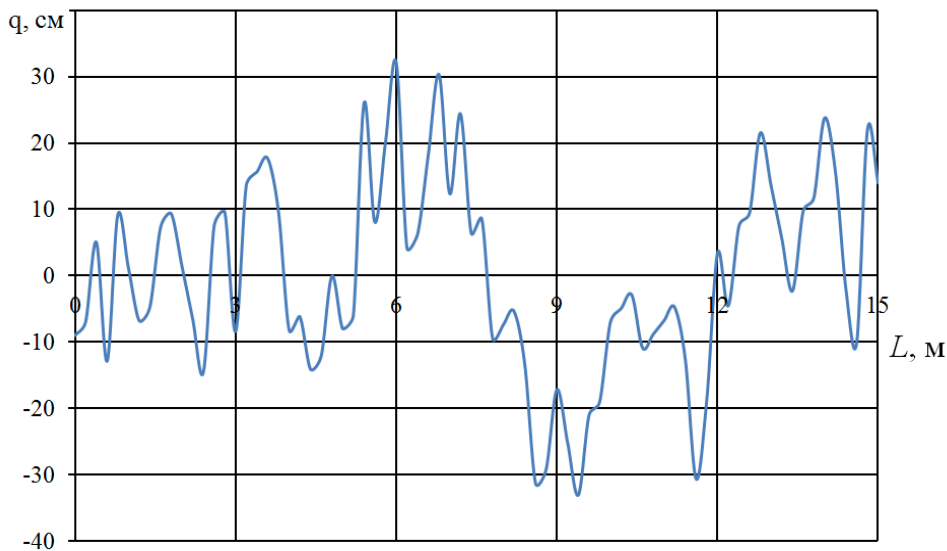


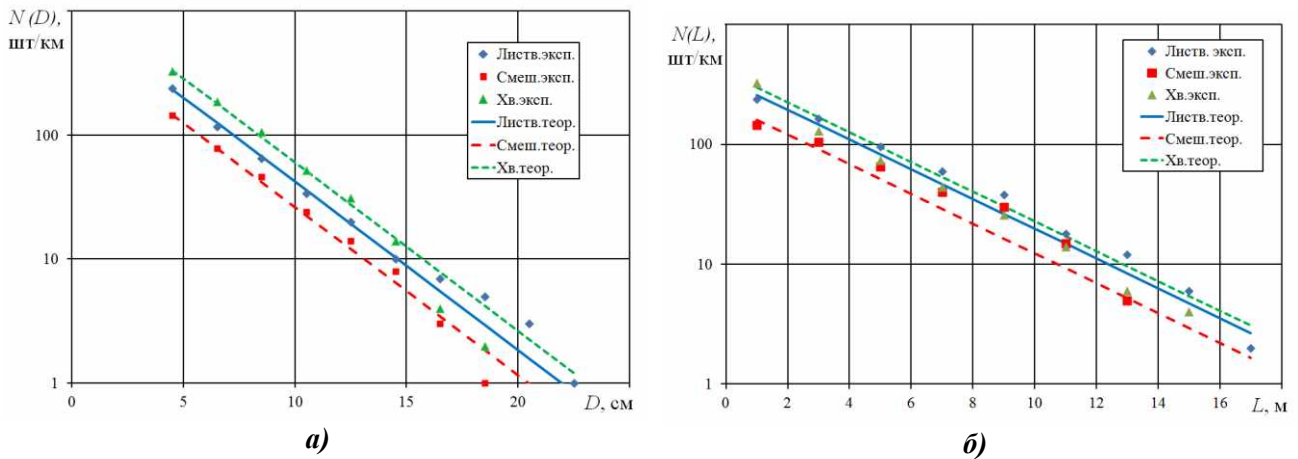
Рис. 4. Блок-схема Simulink-модели

Также на лесных дорогах имеют место дискретные препятствия, такие как многочисленные ветки, упавшие деревья и корневища, причем число таких препятствий со временем увеличивается.

Зависимость числа неровностей (веток, деревьев и корневищ) от их диаметра, а также размеров между ними выражается по:

$$N(x) = \begin{cases} A \frac{1}{\lambda} e^{-\frac{x}{\lambda}}, & \text{при } x \geq 0, \\ 0, & \text{при } x < 0, \end{cases}$$

где  $A = a \Delta x$ ,  $\lambda, A, a > 0$  – параметры данного распределения;  $\Delta x$  – шаг дискретизации диаметров или размеров между ними;  $x = D$  – диаметр неровности,  $\Delta x = \Delta D$  – шаг дискретизации диаметров;  $N(x) = N(D)$  – число неровностей больше  $D$  при заданных  $D$  и  $\Delta D$ ,  $\lambda = \lambda_D, A = A_D, a = a_D$ . Примеры графиков показаны на рис. 5 [9-11].



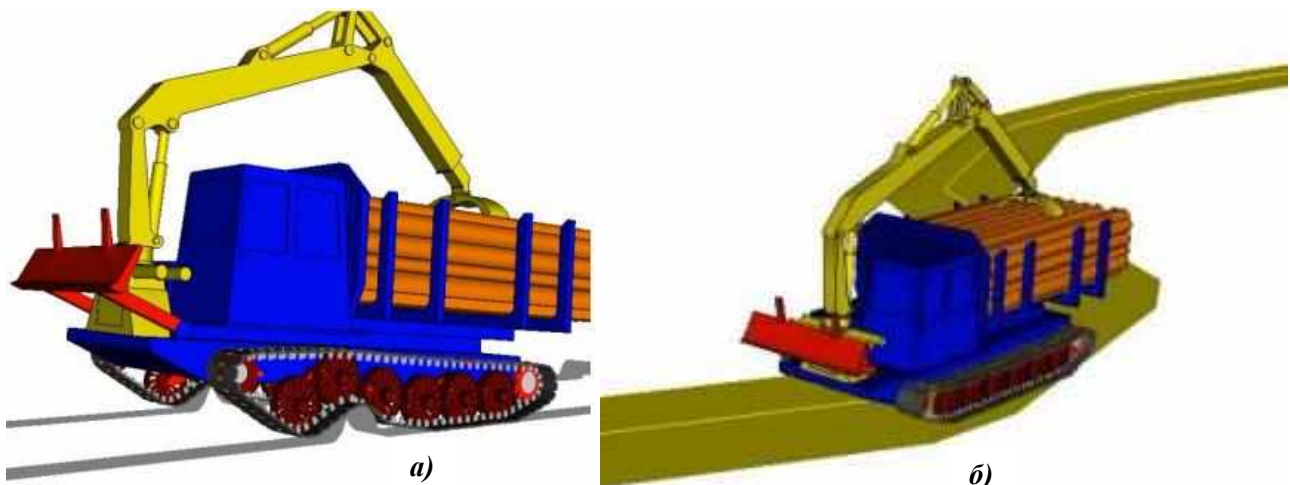
**Рис. 5. Моделирование неровностей лесных дорог:**

*a* – число неровностями больше  $D$  на 1 км пути в зависимости от их диаметров;

*б* – суммарное число расстояний между неровностями больше  $L$  на 1 км пути в зависимости от расстояний между ними

Коэффициент сопротивления прямолинейному движению является определенно положительной случайной величиной [12-14]. Для оценки его плотности вероятностей можно использовать распределение Релея.

Таким образом, смоделировав гусеничный обвод, задав внешний вид и подставив все необходимые условия для моделирования ЛЗГМ, получается виртуальная модель, позволяющая проводить исследования кинематики, динамики движителя и оценки нагруженности элементов трансмиссии. Пример движения гусеничной машины показан на рис. 6.



**Рис. 6. Примеры виртуального эксперимента по движению через дискретные препятствия (а) и криволинейному движению (б)**

Таким образом, зная статистические характеристики грунтовых дорог, по которым эксплуатируются ЛЗГМ, а именно макро (уклоны) и микропрофиль, распределение дискрет-

ных препятствий и поворотов, опорных и сдвиговых характеристик можно достаточно правдоподобно смоделировать полотно пути. Используя пакеты прикладных программ, например UM Tracked Vehicles, можно смоделировать гусеничную машину и оценить необходимые характеристики. Проведение таких испытаний целесообразнее с экономической точки зрения, так как проведение таких виртуальных испытаний дешевле и можно отработать целую гамму конструкций, оценить их подвижность [15-17] и выбрать более эффективные.

### Библиографический список

1. **Григорьев, И.** Достоинства и недостатки колесной и гусеничной баз лесопромышленных тракторов / И. Григорьев, А. Никифорова, В. Лисов // ЛесПромИнформ 2014. №4 (102). С. 82–87.
2. **Клубничкин, Е. Е.** Ходовые системы гусеничных лесозаготовительных машин: учебно-методическое пособие / Е. Е. Клубничкин, В. А. Макуев, В. Е. Клубничкин. – М.: Изд-во Моск. гос. ун-та леса, 2010. – 110 с.
3. **Wong, J. Y.** Terramechanics and Off -Road Vehicle Engineering / J. Y. Wong, 2nd Edition. – 2009. – 488 p.
4. **Погорелов, Д. Ю.** Компьютерное моделирование динамики технических систем с использованием программного комплекса «Универсальный механизм» // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2005. № 4. С. 27–34.
5. **Клубничкин, Е. Е.** Динамическое моделирование движения гусеничной лесозаготовительной машины с использованием прикладных пакетов компьютерных программ / Е. Е. Клубничкин [и др.] // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2012. № 8. С. 41–47.
6. **Клубничкин, В.Е.** Исследование кинематики и динамики движителя гусеничной лесозаготовительной машины / В.Е. Клубничкин, Е.Е. Клубничкин, Л.Д. Бухтояров // Лесотехнический журнал. 2014. Т. 4. № 4 (16). С. 179–190.
7. **Огороднов, С. М.** Разработка расчетно-экспериментальной методики оценки расхода топлива при движении автомобиля по заданному маршруту / С.М. Огороднов [и др.] // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 4. С. 224.
8. Полотно пути транспортно-технологических машин (справочные материалы к теории «машина-местность»): учебник / под ред. В.В. Белякова, А.А. Куркина; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2014. – 447 с.
9. **Редкозубов, А.В.** математическая модель поверхности движения лесных дорог / А.В. Редкозубов, Д.В. Зезюлин, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2014. № 4 (106). С. 348–352.
10. **Макаров, В.С.** Математическая модель поверхности дорожно-грунтовых оснований, насыщенных характерными повторяющимися дискретными препятствиями / В.С. Макаров [и др.] // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 5. С. 119.
11. **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.
12. **Баженов, Е.Е.** Разработка научных методов прогнозирования эксплуатационных свойств сочлененных наземных транспортно-технологических машин: дисс. ... д-ра техн. наук /Баженов, Е.Е. – Екатеринбург, 2011.
13. **Куляшов, А.П.** Экологичность движителей транспортно-технологических машин / А.П. Куляшов, Е.В. Колотилин. – М.: Машиностроение, 1993. – 203 с.
14. 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.
15. **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.
16. **Беляков, В.В.** Подвижность наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 4. С. 72–77.

Дата поступления  
в редакцию 15.01.2016

V.E. Klubnichkin <sup>1</sup>, E.E. Klubnichkin <sup>1</sup>, V.S. Makarov <sup>2</sup>  
D.V. Zeziulin <sup>2</sup>, A.V. Redkozubov <sup>2</sup>, V.V. Belyakov <sup>2</sup>

## MODELING MOVEMENT OF TRACKED VEHICLES ON FOREST ROADS

Moscow state forest university, <sup>1</sup>  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev<sup>2</sup>

**Purpose:** Showing an opportunity of research of tracked vehicles with the help of modern means of computer simulation, making possible conducting analysis of kinematics and dynamics of motion.

**Design/methodology/approach:** The order of modeling track mover and the vehicle in general is presented. There are shown the following principles of formation of the model of roads: path curvature, slopes of topography, microprofile, distribution of discrete obstacles, changes of the movement resistance.

**Findings:** Illustrative examples of the virtual experiment of motion of the tracked vehicle in different conditions are given.

**Research limitations/implications:** This study is the basis for further investigation of motion of tracked vehicles on forest roads.

**Originality/value:** The proposed model allows using modern software packages for modeling tracked vehicles in conjunction with the developed model of ground surfaces.

*Key words:* tracked vehicle, caterpillar mover, modeling, chassis system



УДК 676.056.71:62-26

Б.Ф. Балеев

## ИССЛЕДОВАНИЯ КАЛАНДРОВЫХ БАТАРЕЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены вынужденные колебания валов каландровых батарей при нагрузках импульсного характера. Импульсные силы возникают от впадин на бумажном полотне, образуемых верхним валом батареи, который движется в автоколебательном режиме, получая энергию от привода батареи через обратную связь при движении вала вниз под действием силы тяжести. Впадины, проходящие последовательно между каждой парой валов, вызывают вынужденные колебания системы, которые являются причиной неравномерного износа поверхностей валов, наблюдаемых в виде тёмных и светлых полос по всей длине, и влияющих на интенсивность колебаний. Выполнена теоретическая оценка интенсивности неравномерного износа по относительным скоростям валов и величинам давлений в захватах. Относительные скорости поверхностей валов определены на натуральных машинах. На экспериментальной установке, моделирующей условия в захватах, определены перемещения пары сталь-бумага при разных соотношениях нормальных и тангенциальных сил. Принятая модель износа согласуется с износом на валах по частоте их замены.

*Ключевые слова:* вынужденные колебания, автоколебания, импульсные силы.

Каландровая батарея бумагоделательной машины представляет собой систему валов, расположенных в вертикальной плоскости. Между валами пропускается бумажное полотно так, что оно движется сверху вниз, огибая все валы, кроме верхнего. Давление между валами нарастает, достигая максимума в нижнем захвате. Захватом называют зону контакта между двумя соседними валами. Таким образом, бумажному полотну придают определённую плотность, гладкость, толщину и прочность. Скорость полотна около 10 м/с, ширина 9 м, массы валов до 50 т (нижний) и до 12 т (верхние).

Как было установлено, каландровая батарея входит в режим автоколебаний, что приводит к дефектам бумажного полотна – переменной толщине с периодическими впадинами глубиной от 7 до 20% толщины бумажного полотна, что наблюдается в виде равномерно расположенных полос по всей его ширине. Эти дефекты приводят к повышенной вибрации разрезных станков и печатных машин, ухудшают качество печати и являются частыми причинами обрывов бумаги в батарее и при печати.

Поверхности валов при вибрации батареи получают неравномерный износ и наблюдаются в виде чередующихся тёмных и светлых полос постоянной ширины и шага. Высота неровностей возрастает со временем, достигая 7,5 мкм. Интенсивность увеличения высоты со временем растёт, что соответствует одновременному росту глубины впадин на бумажном полотне. Возникает необходимость периодического шлифования валов, приводящая к уменьшению поверхностного твёрдого слоя отбелённого чугуна и увеличению скорости неравномерного износа, что в свою очередь ведет к более частым перешлифовкам. Неравномерный износ исследован теоретически и экспериментально на натуральных машинах и экспериментальной установке, воспроизводящей условия в разных захватах. Сила трения в захватах много меньше силы трения скольжения, однако перемещения поверхностей происходят при любом соотношении нормальных и тангенциальных сил. Это явление было обнаружено профессором политехнического института А.В. Верховским и называлось «явлением предварительного смещения при трогании несмазанных поверхностей с места». Были обнаружены две компоненты смещения – упругая и остаточная деформации при нагрузке – разгрузке, возникающие при любом соотношении нормальных и тангенциальных сил, меньших предельного значения, определяемого скольжением. Аналогичный эффект был обнаружен и на экспериментальной установке для пары сталь – бумага. Кроме того, был обнаружен новый эффект: при периодических нагрузках – разгрузках одной и той же тангенциальной силой при постоянной нормальной силе возникают одинаковые петли гистерезиса, но с каждым

циклом перемещаются в направлении тангенциальной силы. В захвате батареи действует постоянная тангенциальная сила, поэтому смещение поверхностей равно сумме упругой и остаточной деформаций. Вследствие указанного эффекта скорости поверхностей смежных валов будут разными, но это не скольжение в принятом смысле, а смещения при неполной силе трения.

Резкое возрастание амплитуд колебаний проявилось в связи с увеличением скорости и ширины бумагоделательных машин. Исследованиями установлено, что в каландровой батарее возникают автоколебания, вызванные особыми условиями её верхнего вала, который имеет свободу перемещения вверх. Экспериментальные исследования показали, что малую часть периода вал движется с ускорением около  $7g$ , а большую часть периода – с ускорением свободного падения –  $g$ , т.е. нагрузка носит импульсный характер. Упругие свойства бумаги незначительны, поэтому вся энергия верхнего вала в фазе падения переходит в неупругую деформацию бумаги, образуя впадину по всей ширине полотна. Затем вал движется вверх по боковой поверхности впадины за счёт горизонтального движения бумажного полотна, использующего энергию привода батареи. Вертикальное движение вала принимает автоколебательный характер, так как образуемая валом впадина обеспечивает его движение вверх, а движение вниз происходит под действием силы тяжести. В системе имеются все элементы, необходимые для поддержания автоколебаний: колебательная система, в которой упругий элемент отсутствует, а его роль выполняет сила тяжести, возвращающая вал в положение равновесия; источник энергии – привод батареи; обратная связь, обеспечиваемая движением вала вниз, когда он образует впадину на бумажном листе, являющуюся источником для движения вверх.

Свободные колебания системы были рассмотрены ранее. Для анализа вынужденных колебаний воспользуемся методом приведения. При известных формах главных колебаний системы, определение вынужденных колебаний выполняется способом разложения по собственным формам колебаний. При этом каждое из главных колебаний можно рассматривать как колебание, обладающее лишь одной степенью свободы, поэтому к нему могут быть применены все выводы динамического расчёта такой системы.

Перемещения системы вполне определяются перемещением какой-либо одной её точки. Приведённые к точке масса  $M$  и сила  $Q$  определяются следующими выражениями:

$$M = m_1 x_1 + m_2 x_2 + \dots + m_i x_i ;$$

$$Q = Q_1 x_1 + Q_2 x_2 + \dots + Q_i x_i ,$$

где  $m_i$  – массы системы;  $x_i$  – перемещения масс, определяющие форму рассматриваемого главного колебания;  $Q_i$  – силы, действующие на массы.

Известно, что всякую нагрузку, действующую в течение времени  $T$ , можно разложить в ряд Фурье, т.е. представить в виде суммы нагрузок, изменяющихся по синусоидальному закону.

Если в начальный момент времени значения заданной нагрузки равны нулю, то общий член разложения имеет вид:

$$F(\xi) = Q_k \sin \frac{k\pi\xi}{T} ,$$

где  $Q_k$  – наибольшая ордината нагрузки в члене разложения с  $k$  полуволнами;  $T$  – продолжительность действия нагрузки.

При известном законе изменения нагрузки перемещение системы в любой момент времени  $t$  определяется из выражения:

$$y = \int_0^t F(\xi) \sin p(t - \xi) d\xi / pM ,$$

где  $p = \pi/\tau$ ;  $\tau$  – полупериод свободных колебаний системы.

При  $t < T$

$$y_k = Q_k \int_0^t \sin \frac{\pi k \xi}{T} \sin p(t - \xi) d\xi / pM = \\ = Q_k \tau^2 T^2 \left[ \sin \frac{k\pi t}{T} - \frac{k\tau}{T} \sin \frac{\pi t}{\tau} \right] / \pi^2 M (T^2 - k^2 \tau^2).$$

При  $t > T$

$$y_k = Q_k / \int_0^T \sin \frac{\pi k \xi}{T} \sin p(t - \xi) d\xi / pM = \\ = Q_k \tau^3 k T^2 \left\{ (-1)^k \sin \frac{\pi T}{\tau} \cos \frac{\pi t}{\tau} + \left[ 1 - (-1)^k \cos \frac{\pi T}{\tau} \right] \sin \frac{\pi t}{\tau} \right\} / \pi^2 M (k^2 \tau^2 - T^2).$$

Замечая, что  $Q_k \tau^2 T^2 / \pi^2 M = Q_k / C = y_{ст}$ , и обозначив  $\tau/T = \alpha$ , при  $t < T$ , получим:

$$y_k = y_{ст} \left[ k\alpha \sin \frac{\pi t}{\tau} - \sin k\alpha \frac{\pi}{\tau} \right] / k^2 \alpha^2 - 1.$$

При  $t > T$  будем иметь:

$$y_k = y_{ст} \left[ \sin \frac{\pi t}{\tau} - (-1)^k \sin \frac{\pi}{\tau} (t - T) \right] / k^2 \alpha^2 - 1.$$

Максимальное перемещение при  $t > T$  определяется из предыдущего выражения, если

$$dy/dt = 0.$$

При  $k = 1$  получим:  $y_{\max} = y_{ст} 2\alpha \cos \frac{\pi}{2\alpha} / \alpha^2 - 1.$

#### Д о п у щ е н и я

1. Форма впадины на бумажном листе принята в виде полуволны синусоиды.
2. Нагрузка, возникающая в захвате, также имеет синусоидальный характер, так как она определяется ускорением при движении вала по поверхности впадины.
3. Глубина впадины изменяется так же, как толщина листа по мере каландрирования, а форма остаётся синусоидальной.
4. Бумага считается полностью неупругой средой.
5. Рассматривается движение недеформируемого цилиндра по недеформируемой поверхности, имеющей впадины синусоидальной формы, расположенные с некоторым интервалом.
6. Затуханием пренебрегаем.

Из принятой модели возбуждения колебаний в каландровой батарее очевидно, что нагрузка имеет импульсный характер.

Перемещение массы после действия каждого импульса может быть определено (для  $t > T$ ) из следующих выражений:

$$y_1 = Q_k \int_0^T \sin \frac{\pi k \xi}{T} \sin p(t - \xi) d\xi / pM; \\ y_2 = Q_k \int_0^T \sin \frac{\pi k \xi}{T} \sin p(t - \xi) d\xi / pM + Q_k \int_{t_0}^{t_0+T} \sin \frac{\pi k \xi}{T} \sin p(t - \xi) d\xi / pM = \\ = y_1 + Q_k \int_{t_0}^{t_0+T} \sin \frac{\pi k \xi}{T} \sin p(t - \xi) d\xi / pM ; \\ y_n + + Q_k \int_{(n-1)t_0}^{(n-1)t_0+T} \sin \frac{\pi k \xi}{T} \sin p(t - \xi) d\xi / pM + y_{n-1},$$

где  $t_0$  – интервалы времени, через которые нагрузка действует на массу.

Интегрируя последнее выражение, получим перемещение массы после  $n$ -го импульса (при  $k = 1$ ):

$$y_n = y_{n-1} + 2y_{ст} \cos \frac{\pi}{2\alpha} (\sin \beta \cos \gamma - \alpha \cos \beta \sin \gamma) / (1 - \alpha^2),$$

где  $\beta = \pi (n - 1) t_0 / T$ ;  $\gamma = \frac{1}{T} \pi [t - (n - 1)t_0] + T/2$ .

Из экспериментальных данных известно, что колебания валов в каландровой батарее происходят по второй форме колебаний системы. Согласно изложенному, выполним приведение системы для второй формы колебаний к точке, соответствующей пятой массе, так как шестая масса находится в особых условиях – происходит отрыв вала от бумажного листа при колебаниях.

При движении впадины на бумаге через  $i, i+1$  захват величину силы  $Q_{i,i+1}$  определим из выражения:

$$Q_{i,i+1} = m_{i+1} d^2 y_{i+1} / dt^2 + C_{i+1, i+2} y_{i+1} / \Delta,$$

где  $\Delta = m_{i+1} / 2m_i$ .

При вычислениях оказалось, что членом  $C_{i+1, i+2} y_{i+1} / \Delta$  можно пренебречь, так как он на порядок меньше члена  $m_{i+1} d^2 y_{i+1} / dt^2$ .

Следует иметь в виду, что одновременно на массы  $m_{i-1}$  и  $m_{i+2}$  будут действовать силы, определяемые перемещением масс  $m_i$  и  $m_{i+1}$  и жесткостями  $C_{i,i-1}$  и  $C_{i+1,i+2}$ . Эти силы также можно не учитывать ввиду их относительной малости.

Согласно экспериментальным данным, глубина впадины на листе, полученная в верхнем захвате, уменьшается по мере каландрирования в такой же степени, как изменяется толщина листа, поэтому получим следующие значения глубины впадин в каждом захвате (мм):

$$y_{56} = 0,015; \quad y_{45} = 0,012; \quad y_{34} = 0,009; \quad y_{23} = 0,006; \quad y_{12} = 0,003,$$

При этом получены максимальные значения сил в захватах (Н):

$$Q_{56} = 15,5 \cdot 10^5; \quad Q_{45} = 12,4 \cdot 10^5; \quad Q_{34} = 9,3 \cdot 10^5; \quad Q_{23} = 6,3 \cdot 10^5; \quad Q_{12} = 8,5 \cdot 10^5.$$

Вычисления показали, что при определении амплитуды колебаний пятой массы при частоте импульсов 80 Гц и частоте собственных колебаний 70 Гц её максимальное значение достигается после пятого импульса (0,034 мм). Это хорошо согласуется с экспериментальным значением 0,04 мм, но характер колебаний не соответствует зарегистрированному на натурной машине.

Таким образом, система колеблется в режиме резонанса при затухании, близком к критическому, так как почти вся энергия движущихся масс периодически переходит в неупругую деформацию бумаги и также периодически восполняется от привода батареи по ранее рассмотренной схеме.

Поэтому становится очевидным, что амплитуду колебаний следует определять по максимальному перемещению после действия одиночного импульса, так как перемещения от предыдущих импульсов близки к нулю.

Если в каждый захват впадины приходят одновременно, то получим следующие значения амплитуд (мм):

$$A_6 = 0,06; \quad A_5 = 0,044; \quad A_4 = 0,022; \quad A_3 = 0,0012; \quad A_2 = 0,016; \quad A_1 = 0,028.$$

В случае разных фаз необходимо использовать известный метод наложения.

#### **Влияние жесткости валов**

Влияние жесткости валов на амплитуды их колебаний показаны в относительных единицах, где за единицу принята жесткость нижнего вала батареи. Для наглядности вместо жесткостей приведены относительные диаметры валов.

Таблица 1

## Амплитуды и фазы колебаний при относительных диаметрах валов

Относительные диаметры	Амплитуды и фазы колебаний, мм					
	A <sub>6</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>1</sub>
0,29	- 0,016	- 0,054	- 0,035	- 0,014	+0,007	+0,022
0,43	- 0,017	- 0,055	- 0,036	- 0,013	+0,008	+0,023
0,57	- 0,020	- 0,056	- 0,037	- 0,013	+0,009	+0,024
0,71	- 0,028	- 0,061	- 0,038	- 0,012	+0,012	+0,029
0,86	- 0,054	- 0,078	- 0,044	- 0,007	+0,024	+0,044
1,0	- 0,486	- 0,035	- 0,014	+0,063	+0,214	+0,287
1,14	+0,085	+0,013	- 0,013	- 0,030	- 0,040	- 0,038
1,29	+0,045	- 0,014	- 0,022	- 0,024	- 0,021	- 0,014
1,43	+0,034	- 0,021	- 0,024	- 0,022	- 0,016	- 0,008
1,57	+0,029	- 0,024	- 0,025	- 0,021	- 0,014	- 0,005

*Экспериментальные исследования*

Проводился анализ воздушного шума каландровых батарей с помощью шумомера и анализатора спектра. Анализ шума на разных машинах, но с приблизительно одинаковыми параметрами, показал полную идентичность спектров частот. Кроме того, выяснено, что без бумаги в батарее её частотный спектр существенно отличается – исчезают, имеющие высокий уровень, колебания на частоте около 100 Гц.

Результаты, полученные при записи с микрофона, подтвердились измерениями с помощью датчиков разного типа, которые вводились в непосредственный контакт с поверхностями валов. Для определения амплитуд колебаний вращающихся валов сконструирован специальный датчик, установленный в массивный корпус, подвешенный на мягкой пружине так, что частота его собственных колебаний была на порядок ниже измеряемых частот. Использование одновременно шести датчиков позволило определить амплитуды, частоты и фазы колебаний как по длине каждого вала, так и на разных валах. Это позволило определить формы колебаний каждого вала и формы колебаний каландровой батареи как связанной системы валов. Колебания всех неподвижных элементов проводились с помощью стандартной виброизмерительной аппаратуры после градуировки на вибростенде.

Для оценки неравномерного износа использовалось открытие А.В. Верховского – «явление предварительных смещений», которое заключается в том, что относительный сдвиг двух твёрдых тел происходит при любой тангенциальной силе, меньшей силы трения. Величина полного смещения пропорциональна величине тангенциальной силы и состоит из упругого и остаточного смещений. На специально сконструированной установке определялись эти смещения для пары сталь – бумага при различных нормальных и тангенциальных нагрузках, соответствующих условиям в разных захватах каландровой батареи. Относительный износ оценивался по произведению скорости скольжения и амплитуды переменного давления в захвате, отнесённых к их сумме во всех захватах батареи.

**Выводы**

- 1, Установлен механизм возбуждения колебаний в каландровой батарее. Источником возмущения является верхний вал батареи, находящийся в условиях автоколебаний.
2. Проанализированы колебания при разных условиях закрепления концов валов – шарнирные опоры и свободные концы. Условия закрепления концов валов практически не влияют на амплитуды изгибных колебаний.
3. Определены частоты и формы свободных колебаний каландровой батареи.
4. Рассчитаны амплитуды колебаний системы при возмущениях импульсного характера, создаваемых впадинами на бумажном полотне, проходящими через захваты батареи.
5. Оценено влияние жесткости валов на амплитуды их вынужденных колебаний.
6. Экспериментально обнаружено, что все валы батареи колеблются по второму тону в вертикальной плоскости.
7. Без бумаги в батарее периодические колебания отсутствуют.
8. Амплитуды колебаний в вертикальной плоскости на порядок выше, чем в горизонтальной.
9. Амплитуда колебаний зависит от места, занимаемого валом в батарее.
10. Кроме изгибных колебаний, имеют место колебания валов как твёрдых тел.
11. Теоретическая оценка неравномерного износа поверхностей валов батареи вследствие вибрации хорошо согласуется с практической частотой смены изношенных валов.

#### Библиографический список

1. Ден Гартог, Дж.П. Механические колебания / Дж.П. Ден Гартог. – М.: Физматгиз, 1960.
2. Диментберг, Ф.М. Изгибные колебания вращающихся валов / Ф.М. Диментберг. – М.: АН СССР, 1959.

*Дата поступления  
в редакцию 25.01.2016*

**V.F. Baleyev**

#### RESEARCH OF CALENDER ROLL SETS

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

**Purpose:** Theoretical and experimental research of sheet battery as the oscillating system. Determination of source of excitation of oscillations. Evaluation of uneven wear of the surfaces of system rolls at a variable pressure and the relative velocities of neighboring (adjacent) shafts.

**Method:** The creation of a theoretical model of the system rolls as an oscillating system. Determination of vibration parameters from a pulse loads. Theoretical estimate of uneven wear. The theoretical conclusions are confirmed by experimental values.

**Research/implications:** The parameters of oscillation are confirmed by experimental values on theoretical model. Calender roll sets are self-oscillating system that converts the energy from the drive. The reduction of the amplitudes of the oscillations of the shafts and intensity of uneven wear of their surfaces achieve by weakening the feedback.

**Value:** Researcher has committed the theoretical estimate calender roll sets as oscillation system. The theoretical values of the relative uneven wear consistent with experimental values.

*Key words:* forced oscillations, self-sustained oscillations, pulse loads.



УДК 621.91.01

И.Н. Фролова, В.А. Сулин

## ОЦЕНКА ПОЛНОТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИНСТРУМЕНТА И СТАНКА НА ОСНОВЕ СОПОСТАВЛЕНИЯ ИХ ФОРМООБРАЗУЮЩИХ ДВИЖЕНИЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева

Рассмотрены возможные формообразующие движения станка и инструмента. Сформулировано правило сопоставления движений инструмента и станка. Показана возможность оценки полноты использования технологических возможностей инструмента и станка.

*Ключевые слова:* станок, инструмент, формообразующие возможные движения, технологические возможности инструмента и станка.

### Введение

Известно, что основным фактором успеха в современном промышленном производстве является полнота использования возможностей станка и инструмента. В современном мире для обеспечения конкурентоспособности предприятия оно должно постоянно совершенствоваться и модернизироваться. Это вызывает постоянную необходимость в изменении документации и отладке процесса производства. В свою очередь, для быстрого и успешного ведения производственной деятельности предприятию необходима современная развитая система соотношения возможностей станка и инструмента. Особенно это касается мелкосерийного и многономенклатурного производства, когда сроки технологической подготовки производства ограничены.

Одной из наиболее сложных сфер деятельности на предприятии является технологическая подготовка производства. В частности, подбор режущего инструмента, исходя из полноты использования его возможностей на том или ином станке. Инженер-технолог должен перебрать ряд особенностей средств технологического оснащения и только после этого подобрать наиболее оптимальные из них для обработки конкретной поверхности на детали.

Для решения этих проблем необходимо разработать систему по оценке полноты использования технологических возможностей станка и инструмента. Данная система будет основываться на сопоставлении движений инструмента и станка, что покажет, в какой степени режущий инструмент может использоваться на том или ином станке.

### *Возможные движения инструмента*

Сам инструмент может осуществлять свою основную функцию формообразования, заложенную в его конструкции, если он участвует в движениях, передаваемых ему станком. Эти движения будем называть возможные движения.

При описании возможные движения режущего инструмента делятся на две группы:

- линейные перемещения по осям (подачи);
- вращения вокруг осей (главное движение резания).

Для описания возможных движений заполняется шестимерный вектор. Первая ячейка соответствует возможному движению инструмента вдоль оси  $X$  его глобальной системы координат (ГСК) [1], вторая вдоль оси  $Y$  его ГСК, третья вдоль оси  $Z$  его ГСК. Четвертая ячейка соответствует возможному движению инструмента вокруг оси  $X$  его ГСК, пятая вокруг оси  $Y$  его ГСК, шестая вокруг оси  $Z$  его ГСК.

При заполнении вектора используются символы 0 и 1. Символ 1 указывает на наличие возможных движений в соответствующей ячейке, 0-на отсутствие возможного движения. Так

же указывается направление вращения инструмента. Для инструментов с вращением по часовой стрелке перед символом 1 указывается символ (-).

Для наглядности расписывается шестимерный вектор возможных движений, которые совершает концевая фреза (рис. 1):

$$V_1 = (1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ -1)$$

В векторе  $V_1$  на месте четвертой и пятой ячеек находятся символы 0, указывающие на отсутствие у концевой фрезы вращений вокруг осей  $X_{\text{фрезы(ГСК)}}$  и  $Y_{\text{фрезы(ГСК)}}$ , а символ -1 в шестой ячейке указывает на вращение фрезы по часовой стрелке вокруг оси  $Z_{\text{фрезы(ГСК)}}$ .

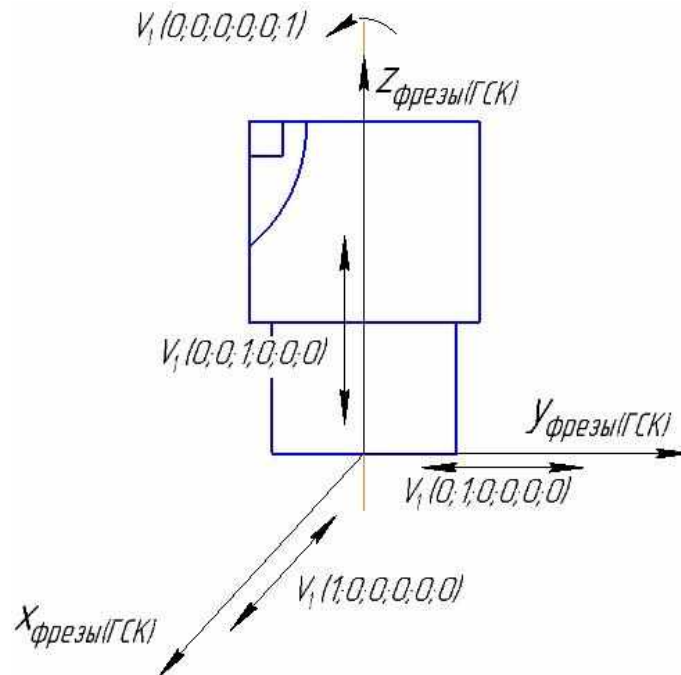


Рис. 1. Возможные движения концевой фрезы

### **Возможные движения металлорежущего станка**

При описании движения станка делятся на две группы:

- линейные перемещения по осям (подачи);
- вращения вокруг осей (главное движение резания).

Записывается компоновочная формула станка [2]. Все, что находится до символа 0, относится к движениям, которые совершает заготовка. Все, что находится после символа 0, относится к движениям, которые совершает инструмент. Каждое посадочное место под инструмент в компоновочной формуле указывается отдельно и нумеруется.

Для описания движений станка заполняются шестимерные вектора, в которые заносятся движения заготовки и движения посадочных мест под инструмент. Количество векторов зависит от количества посадочных мест. Первый вектор отводится для описания движений заготовки, остальные для движений инструментов. Первая ячейка соответствует перемещению заготовки или инструмента вдоль оси  $X$  ГСК станка, вторая вдоль оси  $Y$  ГСК станка, третья вдоль оси  $Z$  ГСК станка. Четвертая ячейка соответствует вращению заготовки или инструмента вокруг оси  $X$  ГСК станка, пятая вокруг оси  $Y$  ГСК станка, шестая вокруг оси  $Z$  ГСК станка.

Заполнение векторов осуществляется аналогично заполнению вектора возможных движений инструмента.

Для наглядности расписываются вектора движений, которые совершает вертикально-фрезерный станок (рис. 2).

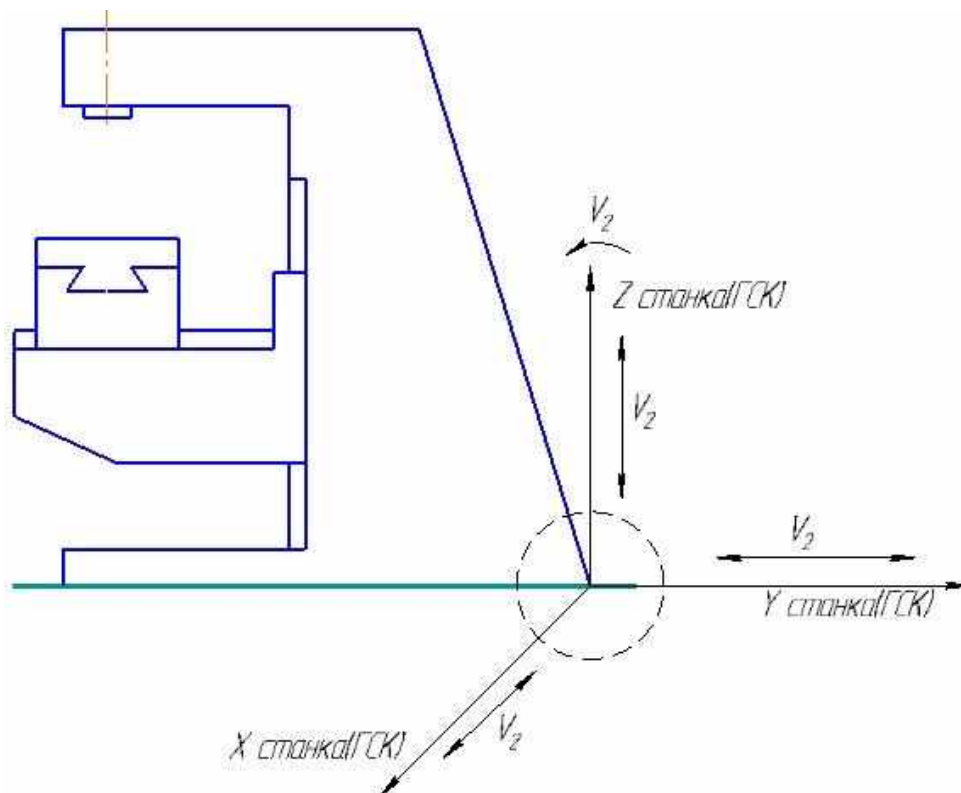


Рис. 2. Движения вертикально-фрезерного станка

Записывается компоновочная формула станка: XYZOCv

$V_{21} = (1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0)$  - движения заготовки;

$V_{22} = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -1)$  - движение инструмента.

В этой матрице на первых трех ячейках верхней строки стоят символы 1, указывающие на перемещение стола по осям  $X_{станка(ГСК)}$ ,  $Y_{станка(ГСК)}$ ,  $Z_{станка(ГСК)}$ . В последней ячейке нижней строки стоит символ -1, указывающий на вращение шпинделя по часовой стрелке вокруг оси  $Z_{станка(ГСК)}$ .

### Сборка инструмента и станка

В прямой задаче сборки средств технологического оснащения (СТО) инструмент устанавливается в посадочное место. Для этого совмещается ГСК инструмента с собственной системой координат (ССК) станка. Математически это описывается перемножением соответствующих матриц.

Для наглядности произведем сборку концевой фрезы и вертикально-фрезерного станка (рис. 3.)

Матрица ГСК любого несомого объекта всегда имеет вид единичной матрицы:

$$N_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Матрица ССК шпинделя с координатами центра  $x_{шпинделя(ССК)}$ ;  $Y_{шпинделя(ССК)}$ ;  $Z_{шпинделя(ССК)}$

$$N_2 = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & x_{\text{шпинделя(ССК)}} \\ 0 & 1 & 0 & y_{\text{шпинделя(ССК)}} \\ 0 & 0 & -1 & z_{\text{шпинделя(ССК)}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Матрица перехода от ГСК фрезы к ССК шпинделя

$$N_3 = N_1 \cdot N_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & x_{\text{шпинделя(ССК)}} \\ 0 & 1 & 0 & y_{\text{шпинделя(ССК)}} \\ 0 & 0 & -1 & z_{\text{шпинделя(ССК)}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & x_{\text{перехода}} \\ 0 & 1 & 0 & y_{\text{перехода}} \\ 0 & 0 & -1 & z_{\text{перехода}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

которая определяет статическое расположение фрезы в посадочном месте шпинделя, а также определяет повороты и перемещения (кинематика) фрезы для соединения с посадочным местом на шпинделе.

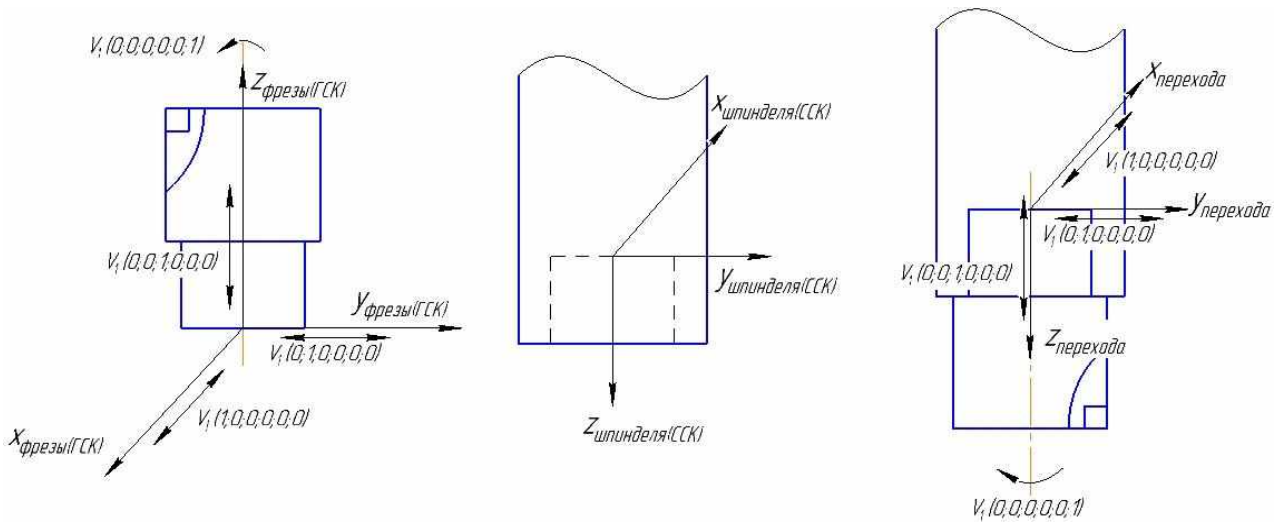


Рис. 3. Сборка фрезы и шпинделя

Переход от матрицы  $N_3$  к вектору  $V_1$

В матрице  $N_3 = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & x_{\text{перехода}} \\ 0 & 1 & 0 & y_{\text{перехода}} \\ 0 & 0 & -1 & z_{\text{перехода}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ , координаты  $x_{\text{перехода}}, y_{\text{перехода}}, z_{\text{перехода}}$  – это коор-

динаты сборки фрезы и шпинделя, которые отсчитываются относительно ГСК станка (рис. 4).

При сборке произошел поворот фрезы относительно оси  $Y_{\text{фрезы(ГСК)}}$ , значит оси  $X_{\text{фрезы(ГСК)}}$  и  $Z_{\text{фрезы(ГСК)}}$  поменяли направление. Следовательно, перед возможными движениями с индексами  $x$  и  $z$  в векторе  $V_1$  нужно поставить символ -. Так как в последней ячейке уже стоит символ -, указывающий на положительное вращение шпинделя, то вместо него ставится символ =:

$$V_1 = (-1 \ 1 \ -1 \ 0 \ 0 \ =1).$$

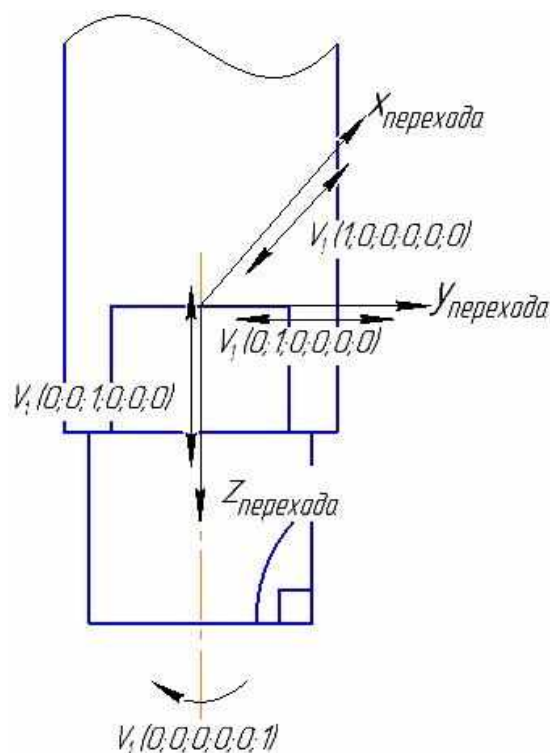


Рис. 4. Концевая фреза и ее возможные движения

**Сопоставление движений инструмента и станка**

Полное соответствие движений инструмента и станка будет, если каждая ячейка возможных движений инструмента совпадет с ячейками векторов движений станка.

Совпадение символов направления вращения: если совпадение вращений происходит по вектору, который отвечает за движение инструмента в станке, то символы «-», отвечающие за направление вращения, должны совпадать. Если совпадение движений происходит по вектору, относящемуся к заготовке, то символы, отвечающие за направление вращения, должны быть противоположенными:

$$V_1 = (1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ -1);$$

$$V_{2_1} = (1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0);$$

$$V_{2_2} = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -1).$$

**Выводы**

Видно, что все ячейка вектора  $V_1$  соответствуют ячейкам векторов  $V_{2_1}$  и  $V_{2_2}$ . Отсюда следует, что все возможные движения инструмента совпадают с движениями станка. Можно сделать вывод, что концевая фреза будет работать на вертикально-фрезерном станке с полным использованием собственных технологических возможностей и полным использованием технологических возможностей станка.

**Библиографический список**

1. **Фролова, И.Н.** Выбор глобальной системы координат для элементов средств технологического оснащения / И.Н. Фролова, Т.С. Люлина, И.С. Ларионов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2014. №1 (103). С. 98–103.

2. **Решетов, Д.Н.** Точность металлорежущих станков / Д.Н. Решетов, В.Т. Портман. – М.: Машиностроение, 1986. – 336 с.

*Дата поступления  
в редакцию 25.01.2016*

**I. N. Frolova, V. A. Sulin**

**EVALUATION OF COMPLETENESS OF USE OF TECHNOLOGICAL POSSIBILITIES  
OF MACHINE TOOL AND BY COMPARING THEIR MOVEMENTS**

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

**Purpose:** Considered morphogenetic movements of the machine and tool.

**Design/methodology/approach:** Formulated the matching rule of the movements of the tool and the machine.

**Findings:** The possibility of estimating the completeness of the technological capabilities of the tool and the machine.

**Originality/value:** Evaluation of completeness of use of the technological capabilities of the tool and machine tool.

*Key words:* machine, tool, formative potential of the movement, the technological capabilities of the tool and the machine.



УДК 621.7.014.8

А.М. Шнейберг, А.Е. Малов

**ПРЕССОВАНИЕ СТРУЖКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМБИНИРОВАННОГО НАГРУЖЕНИЯ: СЖАТИЯ СО СДВИГОМ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Проведено экспериментальное исследование компактования стружки способом – прессование плюс кручение. Дано сопоставление плотности и твердости по объему брикетов, полученных указанным способом и обычным прессованием.

*Ключевые слова:* деформация сжатия с кручением, стружка, плотность, твердость.

Вопросы утилизации металлических отходов в настоящее время достаточно актуальны. Обычно отходы заготовительного производства и стружка подвергаются брикетированию и вторичному переплавлению.

Менее энергоемким является процесс утилизации стружки с использованием метода, аналогичного методу порошковой металлургии: компактирование (прессование) с последующим спеканием; при этом получается готовый или почти готовый продукт.

Прочность и ударные характеристики такого изделия находятся в прямой зависимости от плотности (или обратной характеристики – пористости), которая формируется в основном на стадии прессования. На величину плотности влияет ряд основных факторов:

- вид прессования (одно- или двухстороннее, использование активных сил трения и т.д.);
- осевая сила;
- температура и скорость процесса прессования;
- силы трения между элементами стружки и между стружкой и инструментом;
- начальное состояние материала, его пластические и прочностные свойства;
- форма и размер частиц стружки и состояние ее поверхности и др.

Для получения больших степеней сжатия порошковых материалов, а для пластичных металлов – степени деформации  $\epsilon$ , используются различные методы: прокатки, прессования, прессования (сжатия) с кручением инструмента по принципу наковальни Бриджмена. Последний метод наиболее эффективен, так как дополнительный сдвиг при осевом сжатии может увеличить величину  $\epsilon$  на порядок, например, по сравнению с обычной осадкой [1-4]. Кроме того, интенсивная сдвиговая деформация, обусловленная кручением, приводит к разрушению окисной пленки на поверхности стружки, увеличивает площадь физически чистой (ювенильной) поверхности на ступеньках скольжения, что при наличии компонент сжатия приводит к соединению отдельных фрагментов по типу холодной сварки.

Целью работы являлась экспериментальная проверка эффективности прессования с кручением (ПК) по сравнению с простым прессованием (П) хрупкой силуминовой и пластичной медной стружки.

Определялись параметры: 1) плотность полученных брикетов после компактирования; 2) твердость по контактной торцовой поверхности и в диаметральном сечении брикета.

Прессование производилось на установке с независимыми осевым движением и круговым вращением инструмента [2]. Схема прессования односторонняя (рис.1).

Штамп имел ступенчатую втулку  $\varnothing 27,2$  и матрицу  $\varnothing 25$  мм. Максимальная «насыпанная высота»  $h_n = 35$  мм. Торцовые поверхности матрицы и пуансона имели шероховатость  $\sim R_a = 6,3$  мкм. Вращалась матрица, скорость вращения один оборот за 37 с. Производилась запись диаграммы сжатия  $P - h_n$  (сила – ход пресса). Засыпаемая стружка сначала сжима-

лась силой, равной заданному фиксированному значению  $P_k$ . После прекращения осевого движения пуансона включалось вращение, и начинался процесс ПК.

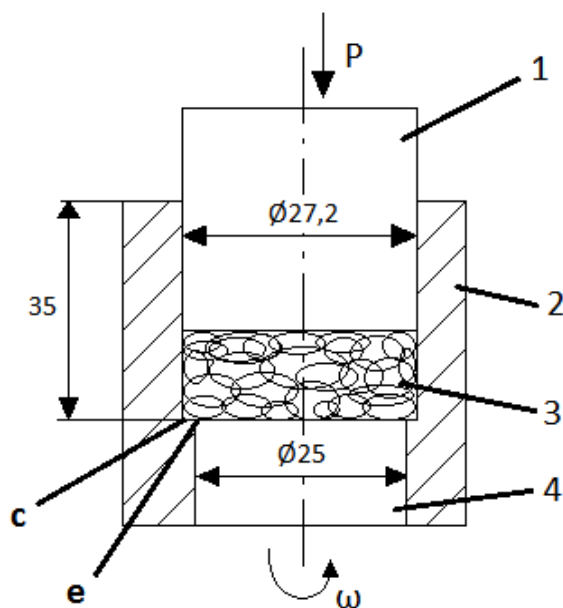


Рис. 1. Схема инструмента для одностороннего прессования с кручением:

1 – пуансон; 2 – втулка; 3 – стружка; 4 – матрица

При этом осевая сила сначала уменьшалась, а затем снова доводилась до значения  $P_k$  при вращающемся инструменте. Происходило дополнительное перемещение инструмента  $\Delta h$ , которое фиксировалось на диаграмме (рис. 2). Процесс ПК прекращался, когда прекращалось дополнительное осевое перемещение инструмента. Время от начала процесса ПК и до его стабилизации составляло 40...70 с. Использовалась стружка, получающаяся после точения на токарном станке силуминовой отливки и медного прутка. Она была разной по размеру, имела вид пластин толщиной 0,2...0,3 мм и длиной 1...10 мм. Медная сильноупрочненная стружка отжигалась при  $650^{\circ}\text{C} \sim 1,5$  ч. Твердость медного прутка после такого отжига составляла  $\text{HV}_0$  579. Она бралась за исходную для стружки. После механической очистки от окалины, промывки водой и сушки на поверхности стружки оставались все же заметные следы окислов.

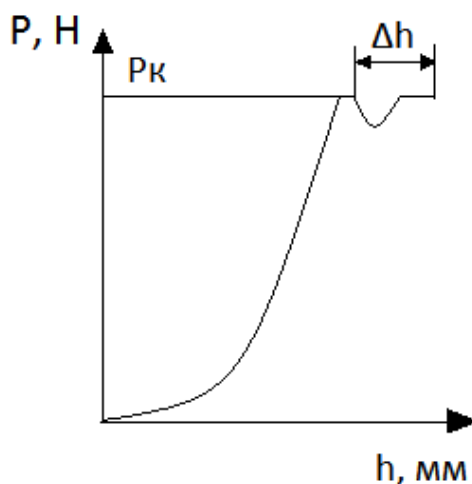


Рис. 2. Индикаторная диаграмма процесса ПК

Силуминовая стружка хрупкая и более мелкая, чем медная, отжигу не подвергалась. Исходная твердость  $HV_0$  960.

Измеренная плотность материала исходных образцов составляла: для силумина  $\gamma = 2,965 \text{ г/см}^3$ , для меди  $\gamma = 8,88 \text{ г/см}^3$ . Максимальная насыпная масса стружки выбиралась так, чтобы насыпная высота не превышала высоту втулки. Для каждого металла брались четыре партии по насыпной массе. Для силуминовой стружки насыпная масса партий составляла  $M = 5; 7,5; 10$  и  $15,5 \text{ г}$ .

Для медной стружки насыпная масса бралась большей с учетом отношения  $d_{\text{в}}/\gamma_{\text{алюм}}$ , и составляла: 16,5; 24,7; 33 и 51,1 г. При этом насыпная высота для каждой партии того и другого металла была приблизительно равной.

Фиксированная сила сжатия  $P_k$  (два значения) выбиралась, исходя из механических свойств компактируемого металла

$$P_k = S\sigma_z, \quad (1)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения контейнера, равная  $581 \text{ мм}^2$ ;  $\sigma_z$  – нормальное напряжение.

Для силумина, хрупкого сплава, с характеристиками:

$$\sigma_B \cong 200 \text{ МПа}; \quad \sigma_T \cong 160 \text{ МПа}; \quad \delta = 2\%$$

выбирались два напряжения:

$$\sigma_z = 0,86\sigma_B \quad \text{и} \quad \sigma_z = 1,5\sigma_B.$$

Для пластичной и сильноупрочняемой меди с характеристиками:

$\sigma_B \cong 230 \text{ МПа}$ ;  $\sigma_T \cong 70 \text{ МПа}$ ;  $\delta = 50...60\%$  и напряжением течения при степени деформации  $= \ln \frac{h_0}{h} = 0,4$  равно  $\sigma_e = 400 \text{ МПа}$ , выбирались напряжения  $\sigma_z = 0,86\sigma_{e=0,4} = 1,5\sigma_B$  и  $\sigma_z = 1,5\sigma_{e=0,4} = 2,6\sigma_B$ . Такие напряжения  $\sigma_z$  соответствовали осевой силе сжатия для силумина:  $P_k = 100 \text{ кН}$  и  $175 \text{ кН}$ , для меди:  $P_k = 200 \text{ кН}$  и  $350 \text{ кН}$ .

Во всех случаях, даже при  $\sigma_z = 0,86\sigma_B$  (для силумина), величина  $\sigma_z$  превышала  $\sigma_T$ , т.е. во всех случаях предполагалось наличие пластической деформации в стружке.

Эффективность от кручения оценивалась показателем

$$n_{\text{эфф}} = \frac{\Delta h}{h_1} = \frac{\Delta h}{h_2 + \Delta h} 100\%, \quad (2)$$

где  $h_1$  и  $h_2$  – высота брикета до кручения (П) и после ПК.

Высота  $h_2$  измерялась на образце,  $\Delta h$  – из диаграммы  $P - h_n$  с учетом масштаба 1:50.

Относительная плотность после ПК оценивалась по формуле

$$\gamma''_{\text{отн}} = \frac{\gamma''}{\gamma}, \quad (3)$$

где  $\gamma''$ ,  $\gamma$  – средняя плотность брикета после ПК и исходного материала.

Относительная плотность брикета при прессовании по схеме П (без вращения) могла легко быть вычислена из формулы

$$\gamma'_{\text{отн}} = \gamma''_{\text{отн}} (1 - n_{\text{эфф}}). \quad (4)$$

Определялась твердость по Виккерсу некоторых брикетов после операции ПК и после простого прессования. Нагрузка на твердомер составляла 50Н, время выдержки 20 с. Твер-

дость измерялась на обеих торцовых поверхностях по диаметральной линии, а также в диаметральной сечении по высоте на разных расстояниях от осевой линии.

При вращении имело место проскальзывание, которое чаще всего происходило по нижнему торцу на линии «брикет-матрица» (рис. 1). Эта поверхность имела вид сплошного блестящего круга в отличие от матовой верхней, где проскальзывание отсутствовало или было слабым. Кроме того, на поверхности, не подвергнутой проскальзыванию, наблюдались границы стружек и тем заметнее, чем меньше усилие  $P$  и больше высота брикета.

За пределами круга проскальзывания  $\geq \varnothing 25$  мм (на участке  $ce$  – рис. 1) плотность брикета была низкая, и имело место некоторое (учитываемое) осыпание стружки.

Этот фактор, а также неоднородная структура насыпной массы и неравномерность заправки по объему приводили к достаточно заметному разбросу результатов измерения плотности и твердости особенно низких брикетов.

Высота брикетов  $h_2$  для некоторых значений  $M$  и  $P$  дана в таблице.

Таблица

Насыпная масса стружки $M$ , г	Сила прессования $P$ , кН	Высота брикета $h_2$ , мм
Силумин		
5	100	3,6
	175	3,3
15,5	100	12,5
	175	10,84
Медь		
16,5	200	3,22
	350	3,08
51,1	200	10,31
	350	9,86

Из приведенных далее графиков зависимости показателя эффективности кручения  $n_{эфф}$  и относительной плотности  $\gamma_{отн}''$  от насыпной массы  $M$  (рис. 3, 4) следует:

- 1) для обоих металлов значения  $n_{эфф}$  тем выше, чем меньше насыпная масса. Это объясняется тем, что доля объема стружки для низких брикетов, подвергаясь действию сдвига, выше;
- 2) значения  $n_{эфф}$  тем выше, чем меньше сила  $P$ ;
- 3) эффект от кручения  $n_{эфф}$  при одинаковых значениях  $\sigma_z$ , равных  $1,5\sigma_B$  (ср. кривые 1 на рис. 3, а и 2 на рис. 4, а) для медной стружки более сильный;
- 4) относительная плотность  $\gamma_{отн}''$  для того и другого металла тем выше, чем больше  $P$ , а при равных значениях  $\sigma_z$ , равных  $1,5\sigma_B$  (кривые 1 на рис. 4, б и 2 на рис. 3, б) плотность выше у меди по сравнению с силумином ( $\sim 95\%$  у меди против  $90\%$  у силумина);
- 5) плотность  $\gamma_{отн}''$  тем выше, чем меньше  $M$ , что особенно заметно у хрупкой силуминовой стружки при  $P = 100$  кН (рис. 4, б, кривая 2). Для медной стружки зависимость  $\gamma_{отн}''(M)$  выражена слабо (рис. 3, б, кривые 1 и 2);
- 6) плотность медной стружки  $\gamma_{отн}''$  близка к  $100\%$  особенно при малых значениях  $M$  и больших  $P$  (кривая 1 на рис. 3, б). Такая плотность ( $\geq 98\%$ ) по классификации, применительной к порошковым материалам, соответствует высшей группе [4].

Следует отметить, что плотность брикета, который прессовался при включенном вращении инструмента с самого начала прессования, была значительно ниже, а реверсирование при вращении также не дало эффекта. Плотность брикета при обычном прессовании  $\gamma_{отн}'$ , определенная по формуле (3), почти-что всегда тем выше, чем меньше  $M$ , чего и следовало ожидать, принимая во внимание действие сил трения на стенках инструмента.

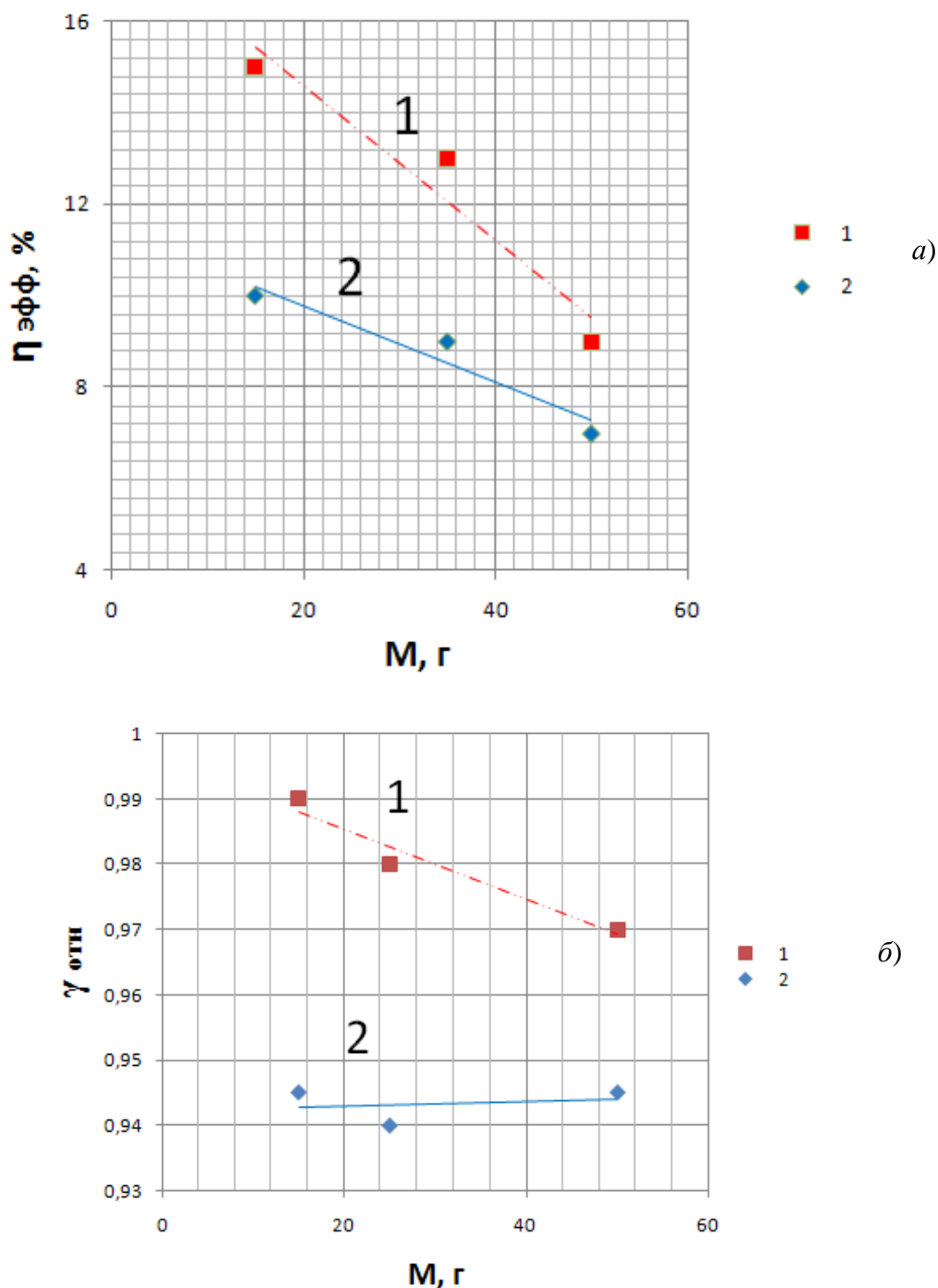
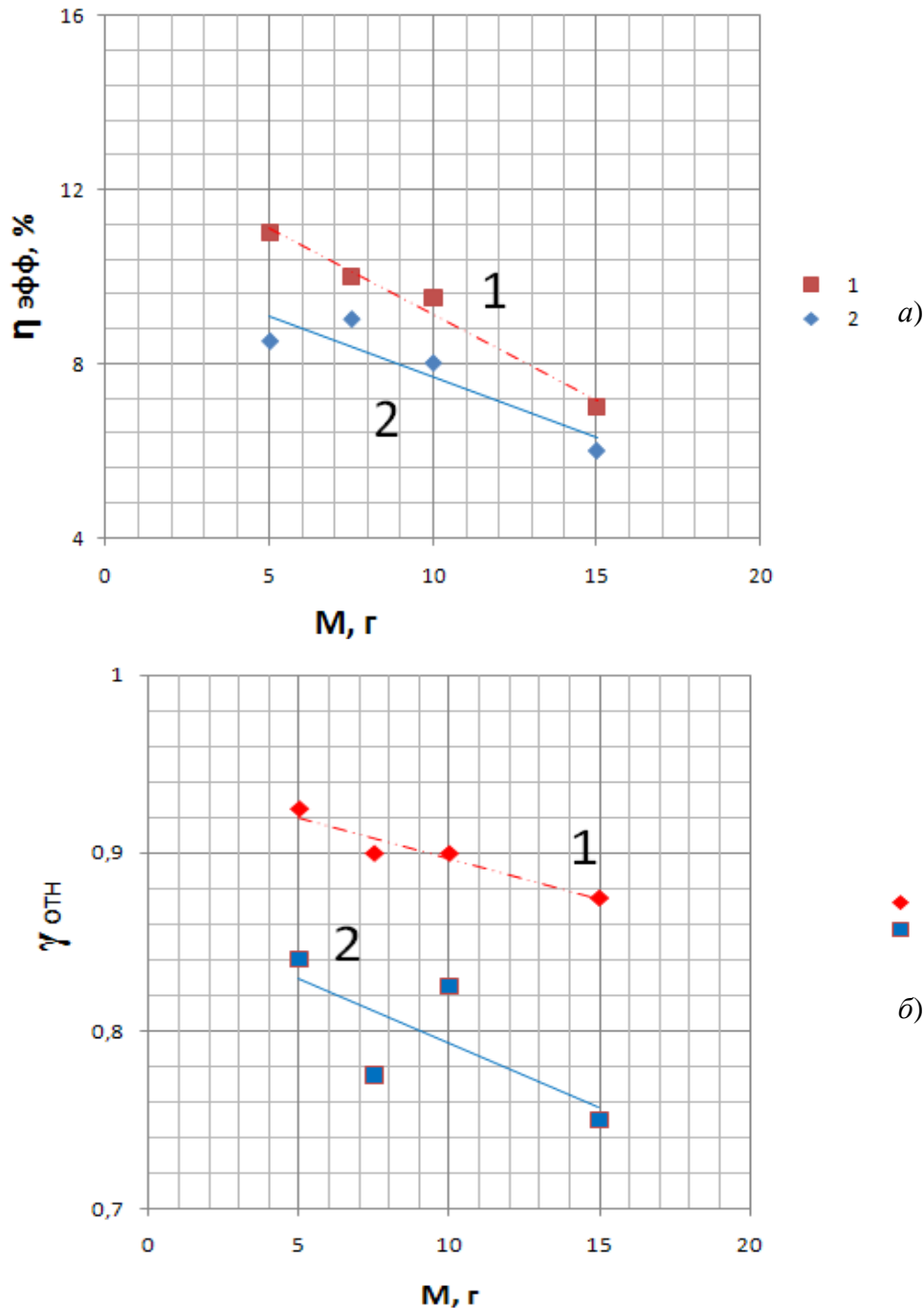


Рис. 3. Зависимость  $\eta_{эфф} \%$  (а) и  $\gamma_{отн}$  (б) от насыпной массы  $M$  медной стружки для разных значений  $P$ , кН:

1 – 200 ( $\sigma_z = 1,5\sigma_B$ ); 2 – 350 ( $\sigma_z = 2,6\sigma_B$ )

Твердость  $HV(r)$ , где  $r$  – радиус у медных брикетов, была выше на той поверхности, по которой происходило проскальзывание ( $HV_1$ ), по сравнению с той, где оно отсутствовало ( $HV_2$ ). Особенно сильно это заметно на высоких брикетах ( $h = 9,8$  мм;  $P = 350$  кН) – рис. 5, кривые 1 и 2. Отношение  $\frac{HV_1}{HV_2}$  на участке  $r = 12$  мм составляет 1,6, а на оси – 1,2. На низком медном брикете ( $h = 3,08$  мм,  $P = 350$  кН) твердость распределена более равномерно (график не приведен) и аналогичное соотношение составляет 1,05 и 1,1.



**Рис. 4. Зависимость  $n_{эфф}$  % (а) и  $\gamma_{отн}$  (б) от насыпной массы  $M$  силуминовой стружки для разных значений  $P$ , кН:**

1 – 100 ( $\sigma_z = 0,86 \sigma_B$ ); 2 – 175 ( $\sigma_z = 1,5\sigma_B$ )

Средняя твердость на торцах высокого образца из кривой  $HV(r)$  составляет 1580 МПа. Средняя твердость по торцам низкого образца выше и составляет 1880 МПа. Так как твердость зависит от упрочнения материала стружки и ее уплотнения, то приведенную ранее зависимость можно объяснить тем, что сдвиговая деформация и уплотнение на низком брикете (соотношение  $h/d= 0,13$ ) охватывают по сравнению с брикетом высоким ( $h/d = 0,41$ ) весь или почти весь объем. Об этом же свидетельствует и зависимость  $HV(h)$  – рис. 6, а именно, твердость в средней по высоте части высокого медного брикета значительно ниже, чем на торцовых поверхностях, а средняя твердость в диаметральном сечении составляет  $\sim 1200$  МПа.



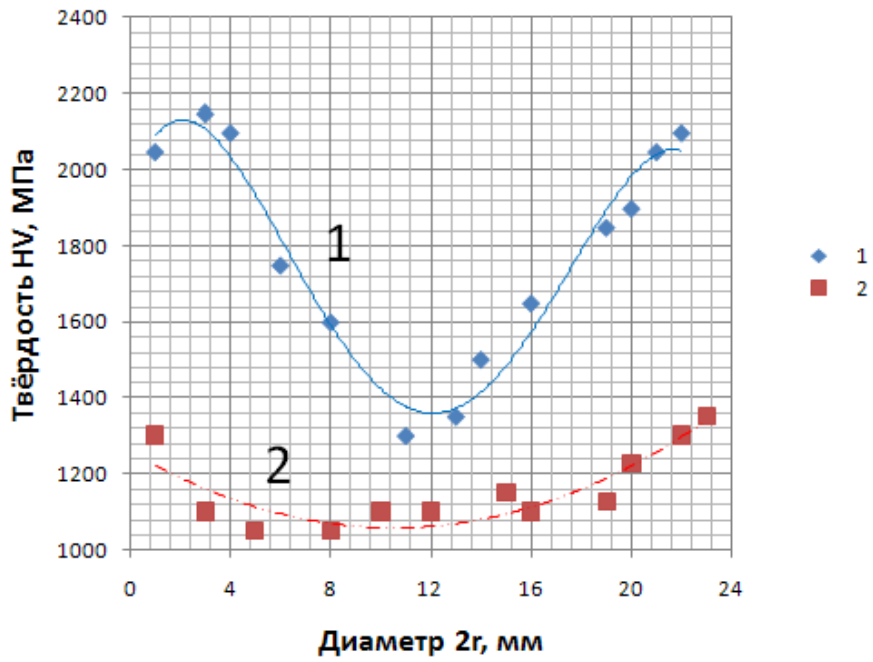


Рис. 5. Зависимость HV от радиуса  $r$  медного брикета при  $P = 350$  кН и  $M = 51,1$  г на торцовых поверхностях:

1 – нижней (с проскальзыванием); 2 – верхней (без проскальзывания)

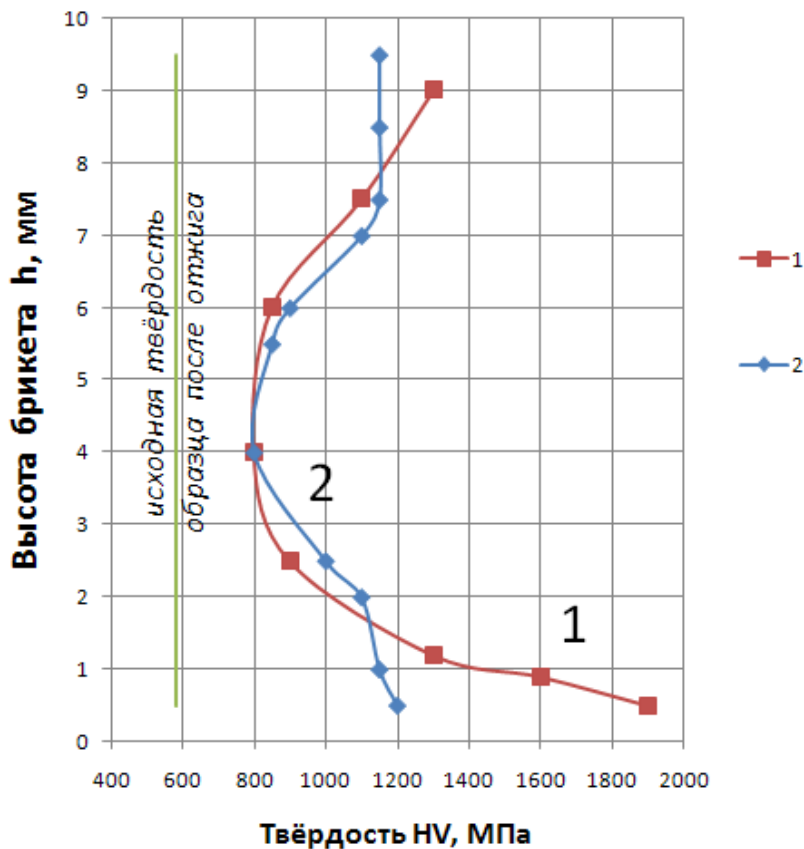


Рис. 6. Зависимость HV от высоты  $h$  медного брикета при  $P = 350$  кН и  $M = 51,1$  г на разном расстоянии от оси:

1 –  $r = 10$  мм; 2 –  $r = 0$

Твердость, как это следует из зависимости  $HV(r)$  на периферии, как следовало ожидать, выше из-за интенсивной сдвиговой деформации, обусловленной кручением, в 1,6...1,7 раз, чем на осевой линии, где скорость сдвига от кручения = 0.

В сравнении с исходной твердостью, твердость высокого медного брикета на периферии возросла в 3,8 раз, на оси в  $\sim 2,2$  раза на торце, где имело место проскальзывание и в 2,3 и 1,9 раз – на торце без проскальзывания.

Исходя из прямопропорциональной зависимости

$$\frac{HV_0}{HV} \approx \frac{\sigma_0}{\sigma}, \quad (5)$$

где  $\sigma_0 = \sigma_T$ .  $\sigma$  – напряжение течения на кривой упрочнения, можно приближенно оценить степень деформации отожженной медной стружки, используя зависимости  $\sigma(\epsilon)$  [5]. Из них следует, что величина  $\epsilon$  на периферийном участке  $\sim 0,4...0,5$ , на осевой линии  $\sim 0,1...0,15$ . Таким образом, сдвиговая пластическая деформация эффективно повышает не только плотность, но и упрочняет дисперсный материал.

Твердость торцевой поверхности медного брикета ( $\mu = 51,1$  г,  $P = 350$  кН) после обычного прессования слабо изменяется в зависимости от радиуса и в среднем составляет HV910. Это несколько выше исходной. Но значительно ниже средней твердости брикета, полученного методом ПК. Таким образом, дополнительный сдвиг увеличивает более чем в 1,7 раз среднюю твердость брикета из пластичной стружки.

Заметим, что плотность и твердость – две разные и независимые друг от друга характеристики: плотность обусловлена уменьшением процентной доли пор, а твердость – наклепом. При компактировании оба процесса идут совместно.

Зависимость  $HV(r)$  силуминового брикета (высота 10,84 мм,  $P = 17,5$  т) после ПК отличается несколько от медного значительно большим разбросом точек – рис. 7.

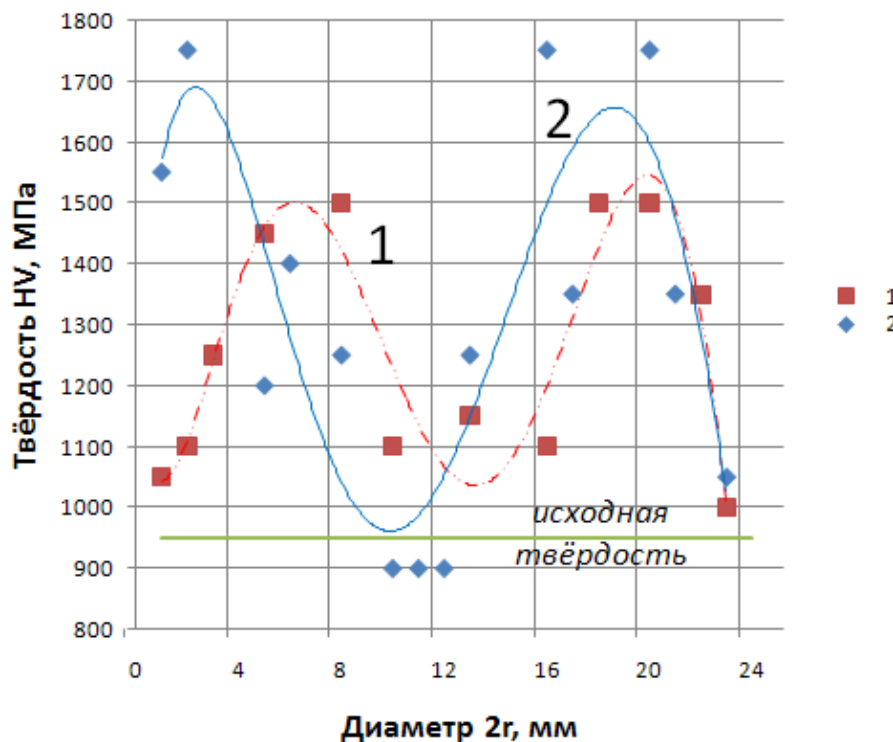


Рис. 7. Зависимость  $HV$  от радиуса  $r$  силуминового брикета при  $P = 175$  кН и  $M = 15,5$  г на торцевых поверхностях:  
1 – нижней (с проскальзыванием); 2 – верхней (без проскальзывания)

Для обеих торцовых поверхностей прослеживаются пики на расстоянии от оси, равные примерно  $\frac{1}{2} r \dots \frac{2}{3} r$ . Сопоставление с исходной твердостью составляет  $\frac{1650}{960} = 1,7$  раз – вдвое меньше, чем для меди. А определить степень деформации силуминовой стружки не представляется возможным из-за отсутствия в справочной литературе зависимостей  $\sigma(\epsilon)$  для этого хрупкого литейного сплава.

«Двугорбая» зависимость  $HV(r)$  для силуминовой стружки коррелирует с величиной степени пластической деформации при комбинированной осадке [1], а также при обратном выдавливании с вращением сплава АМц [6], где максимальный сдвиг имел место на  $\frac{1}{2} r$ . Заметим, что и для меди на графике  $HV(r)$  наблюдается «выполаживание» кривой  $HV(r)$  на периферийном участке. Это различие между видом графиков  $HV(r)$  у силумина и меди обусловлено их различной упрочняемостью и разными коэффициентами трения: у силумина величина  $\mu$  на 25...30% выше, чем у меди [7], а большой разброс твердости у силуминовой стружки на торце с проскальзыванием можно объяснить тем, что поверхность имела чешуйчатый вид, т.е. имела следы разрушения.

Следует отметить, что средняя твердость на торце силуминового брикета после обычного прессования, так же, как и у медного брикета, слабовыраженная в отношении  $HV(r)$ , составила HV805. Это значение даже ниже значения исходной твердости, что свидетельствует не только об отсутствии упрочнения, но и о рыхлости брикета. Сравнивая эту величину с твердостью силуминового брикета после ПК (HV1650), можно сделать вывод, что даже хрупкий сыпучий материал с использованием указанного метода способен деформироваться и упрочняться. Это объясняется влиянием «мягкой» схемы напряженного состояния: всестороннее сжатие + сдвиг.

### Выводы

1. Исследовано влияние осевого кручения инструмента на прессование медной и силуминовой стружки при разных значениях осевой силы и массы навески.
2. При включении вращения происходит дополнительное осевое перемещение инструмента, что приводит к увеличению плотности прессуемого материала.
3. Эффект от кручения (показатель  $n_{эфф}$ ) для пластичного материала составляет от 10 до 15%, а для хрупкого – 6...9%, и тем сильнее, чем меньше отношение  $h/d$  и осевая сила.
4. Средняя твердость брикетов, особенно медных, полученных методом ПК, значительно выше, чем при обычном прессовании, и неоднородна по объему. Наибольшее ее значение имеет место на периферийном участке, где сдвиг максимален, а также на той торцовой поверхности, где преобладает проскальзывание.
5. Метод ПК позволяет не только эффективно уплотнять брикет из хрупкой силуминовой стружки, но и упрочнять его, благодаря мягкой схеме напряженного состояния.

### Библиографический список

1. Штамповка с кручением: монография / В.Н. Субич [и др.]. – М.: МГИУ. 2008. – 389 с.
2. Шнейберг, А.М. Анализ силового режима и методов оценки накопленной деформации при комбинированном нагружении / А.М. Шнейберг [и др.]. // Тяжелое машиностроение. 2006. № 3. С. 8–11.
3. Утяшев, Ф.З. Связь между деформированным и структурным состоянием металла при интенсивной пластической деформации // КШП и ОМД. 2011. № 5. С. 33–36.
4. Технология конструкционных материалов: учебник / под ред. А.М. Дальского. – М.: Машиностроение, 2003. – 513 с.
5. Полухин, П.М., Гун, Г.Я., Галкин, А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. Справочник. – М.: Металлургия, 1976, 488 с.

6. Шнейберг, А.М. Приближенная оценка и экспериментальная проверка силовых затрат и сдвиговых деформаций при комбинированном обратном выдавливании стаканов / А.М. Шнейберг, Ф.П. Михаленко, О.С.Кошелев // КШП и ОМД. 2002. № 5. С. 3–12.
7. Контактное трение в процессе обработки металлов давлением / А.Н. Леванов [и др.]. – М.: Металлургия, 1976. – 416 с.

*Дата поступления  
в редакцию 25.01.2015*

**A.M. Schneiberg, A.E. Malov**

**PRESSING OF THE CHIPS WITH USING COMBINED LOADING:  
COMPRESSION WITH TORSION**

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

**Purpose:** To study the possibility of obtaining a high briquettes density of brittle and ductile chips by the new process providing a intensive deformations.

**Approach:** Performed an experimental study of the process of compacting chips using a combined method of pressing with torsion.

**Findings:** There are carried out evaluation of the effectiveness of the new process compared of conventional compressing on the data obtained by measuring the density and hardness of copper and aluminum alloys chip-brick.

**Research implications:** The present study showed that the new method of compacting provide not only the density to levels close to the density of monolithic material, but also significantly strengthen the material.

**Value:** Recommend to use this method for compacting loose materials and in particular for the recycling of metal chips.

*Key words:* compression with torsion, chips, density, hardness.

УДК 621.43

А.В. Сеземин<sup>4</sup>, Л.А. Захаров<sup>1</sup>, А.В. Дегтярев<sup>3</sup>, И.Л. Захаров<sup>1</sup>, А.Н. Тарасов<sup>2</sup>

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОМЕНТА ВПРЫСКА ТОПЛИВА И НАКЛОНА ТОПЛИВНЫХ СТРУЙ НА ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ СЕРИЙНОГО СУДОВОГО ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,<sup>1</sup>  
 ООО «Объединенный инженерный центр» ОАО ГАЗ,<sup>2</sup>  
 ОАО «ЦКБ по СПК им. Р. Е. Алексеева»,<sup>3</sup>  
 ОАО «РУМО»<sup>4</sup>

Рассмотрены требования и способы снижения выбросов оксидов азота с отработавшими газами судовых дизельных двигателей. Разработаны физическая, геометрическая и математическая модели для определения угла наклона топливных струй при изменении момента и продолжительности впрыска топлива. Проведены теоретические исследования в программном комплексе Дизель-ПК и натурные испытания на двигателе 8ЧН 22/28 производства ОАО «РУМО».

*Ключевые слова:* дизельный двигатель, оксиды азота, момент впрыска топлива, наклон топливных струй.

Дизельные двигатели нашли самое широкое применение на судах морского и речного флота в качестве главных и вспомогательных энергетических установок. Состав отработавших газов (ОГ) дизельных двигателей подобен составу выхлопных газов других типов двигателей, работающих на углеводородном топливе. Основными токсичными компонентами ОГ дизельных двигателей вне зависимости от типа, класса, размерности и конструктивных особенностей являются: сажа, оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ) и оксиды серы ( $\text{SO}_x$ ).

В настоящее время вводятся более жесткие ограничения на выбросы  $\text{NO}_x$  и  $\text{SO}_x$  с ОГ, при этом большинство серийных судовых дизельных двигателей не отвечают новым требованиям. Уменьшить выбросы  $\text{SO}_x$  возможно только путем использования малосернистого топлива или очисткой ОГ, в то время как снижение выбросов  $\text{NO}_x$  возможно путем *оптимизации рабочих процессов* [3, 4, 6, 7].

Международным стандартом, ограничивающим выбросы токсичных веществ с ОГ судовых дизельных двигателей, является Приложение VI к конвенции MARPOL 73/78 Международной Морской Организации (ИМО), которое устанавливает предельно допустимые значения выбросов  $\text{NO}_x$  с ОГ, приведенные в табл. 1 [3, 7, 8].

Таблица 1

Предельно допустимые значения выбросов  $\text{NO}_x$  с ОГ по ИМО

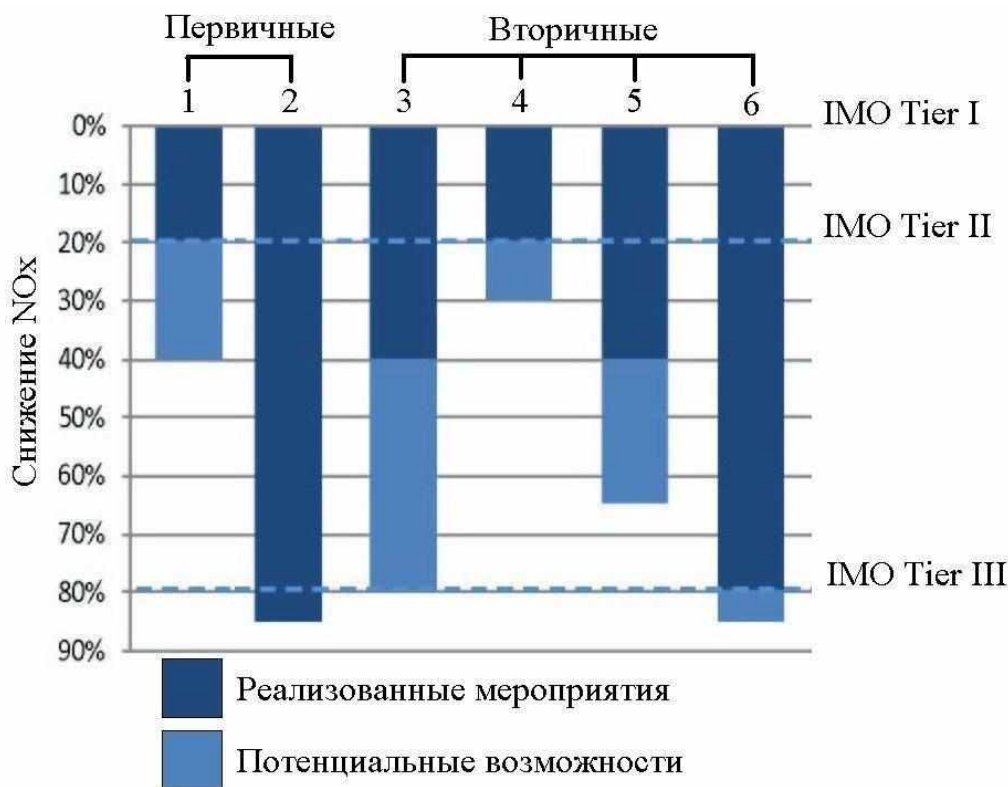
Период действия	Выбросы $\text{NO}_x$ , г/(кВт·ч) при номинальной частоте вращения коленчатого вала $n$ , мин <sup>-1</sup>			Испытательная процедура
	$n < 130$	$130 \leq n \leq 2000$	$n > 2000$	
ИМО Tier I (01.01.2000...01.01.2011)	17,0	$45 \cdot n^{-0,2}$	9,84	четырёхступенчатые циклы E2, E3 (ISO 8178/4) цикл D2
ИМО Tier II * (01.01.2011...01.01.2016)	14,36	$44 \cdot n^{-0,23}$	7,66	
ИМО Tier III (в зонах ECA ** после 01.01.2016)	3,4	$9 \cdot n^{-0,2}$	1,97	

\* Требования ИМО Tier II остаются в силе после 2016 г. для плавания в открытом море.

\*\* ECA – Зона контролируемых выбросов (Emission Control Areas).

Для морских судов, заложенных после 1 января 2011 г., требования IMO Tier II по выбросам  $\text{NO}_x$  с ОГ стали обязательными для флотов всего мира. Требования IMO Tier III для судов, заложенных после 1 января 2016 г., предусматривают дифференциацию в зависимости от района плавания. Для плавания в открытом море требования IMO Tier II остаются в силе и после 2016 г., тогда как в зонах контролируемых выбросов обязательными станут требования IMO Tier III. Следует отметить, что в зоне Балтийского моря введение требований IMO Tier III отложено на пять лет и перенесено на 1 января 2021 г. [3].

Разработанные ведущими дизель-строительными предприятиями способы снижения выбросов  $\text{NO}_x$  с ОГ условно можно разделить на первичные и вторичные мероприятия. Первичные мероприятия связаны с организацией процессов смесеобразования и сгорания, совершенствованием систем турбонадува и впрыска топлива, а также использованием альтернативных топлив, таких как природный газ. К вторичным мероприятиям относятся: рециркуляция ОГ, использование водотопливной эмульсии, увлажнение наддувочного воздуха, каталитическая очистка ОГ и др. Эффективность различных способов снижения выбросов  $\text{NO}_x$  с ОГ, по данным фирмы MAN Diesel (Германия), показана на рис. 1 [7].



**Рис. 1. Эффективность способов снижения выбросов  $\text{NO}_x$  с ОГ:**

- 1 – оптимизация рабочих процессов; 2 – применение природного газа;  
3 – рециркуляция ОГ; 4 – использование водотопливной эмульсии;  
5 – увлажнение наддувочного воздуха; 6 – каталитическая очистка ОГ

Применение вторичных способов уменьшения выбросов  $\text{NO}_x$  с ОГ требует дополнительных капиталовложений и увеличивает металлоемкость энергетической установки, при этом возрастает удельный эффективный расход топлива дизельного двигателя за счет снижения максимальной температуры цикла и увеличения сопротивления выпускной системы [1, 4].

Опыт мирового двигателестроения показывает, что снижения выбросов  $\text{NO}_x$  с ОГ до требований IMO Tier II удастся достигнуть за счет приближения угла опережения впрыска топлива (УОВТ) к верхней мертвой точке (ВМТ), но при увеличении удельного эффективного расхода топлива [4, 6, 7]. Такой путь находится в противоречии с не менее актуальной проблемой борьбы за повышение топливной экономичности двигателей внутреннего сгора-

ния, острота которой постоянно возрастает в связи с угрозой истощения углеводородных топлив.

Таким образом, для уменьшения выбросов  $\text{NO}_x$  с ОГ дизельного двигателя необходимо исследовать влияние УОВТ на экономические и экологические показатели при сохранении энергетических показателей и определить направления для повышения топливной экономичности.

В качестве объекта исследования выбран серийный судовый дизельный двигатель 8ЧН 22/28 мощностью 1052 кВт при частоте вращения коленчатого вала  $1000 \text{ мин}^{-1}$  производства ОАО «РУМО» (г. Н.Новгород).

Моделирование рабочих процессов дизельного двигателя 8ЧН 22/28 выполнено в программном комплексе Дизель-РК (МГТУ им. Н.Э. Баумана) [2]. Настройка математической модели проводилась по экспериментальным данным, полученным на сертифицированном испытательном стенде ОАО «РУМО» (рис. 2), оборудованном по ГОСТ Р 53639-2009. Измерение содержания оксидов азота в ОГ выполнялось при помощи газоаналитической системы ГАСЕТ-01. Для исследования рабочих процессов выбран режим номинальной мощности в связи с тем, что судовые дизельные двигатели большую часть времени эксплуатируются на режимах, близких к номинальной мощности [4, 5].

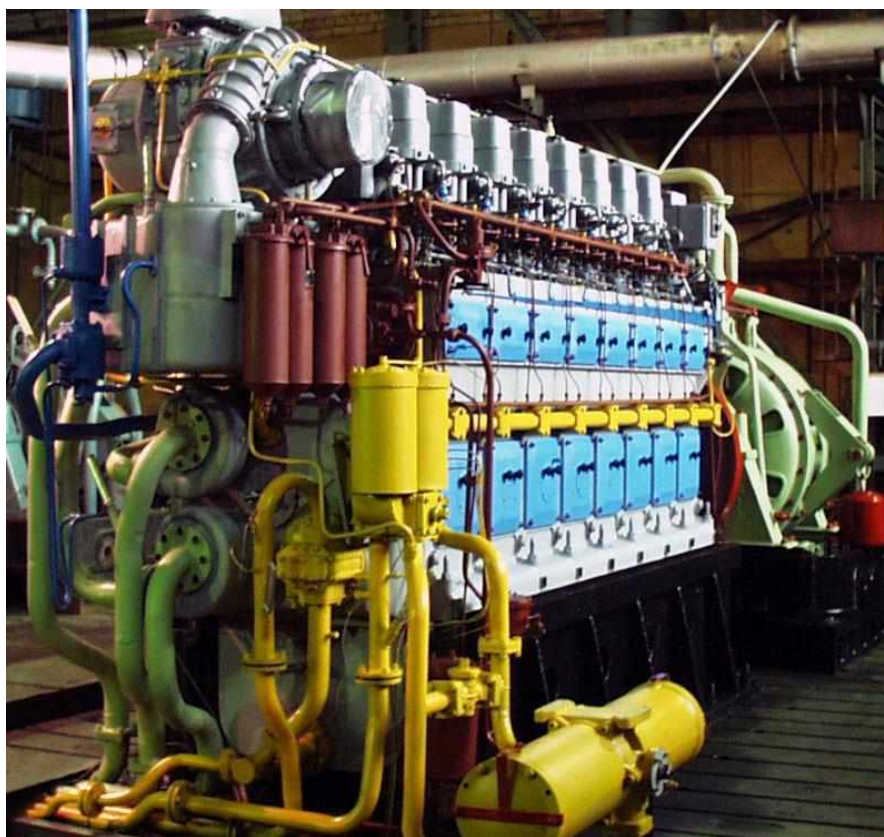


Рис. 2. Испытательный стенд дизельного двигателя 8ЧН 22/28

Исследование рабочих процессов дизельного двигателя 8ЧН 22/28 по УОВТ (рис. 3) на режиме номинальной мощности при сохранении энергетических показателей показало, что уменьшение УОВТ с  $18^\circ$  до  $12^\circ \text{ПКВ}$  до ВМТ позволяет получить:

- уменьшение содержания оксидов азота в ОГ на 28% ( $3,4 \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$ ) за счет снижения максимальной температуры цикла на 5% ( $89^\circ\text{C}$ );
- уменьшение максимальной скорости нарастания давления на 24% за счет сокращения периода задержки воспламенения на 18% и увеличения продолжительности сгорания на 8%;



- уменьшение максимального давления сгорания на 12,5% за счет снижения максимальной скорости нарастания давления на 24%;
- увеличение эффективного расхода топлива на 2% (5 г/(кВт·ч)) за счет снижения максимальной температуры цикла на 5% и увеличения доли топлива, попадающего на зеркало цилиндра в три раза.

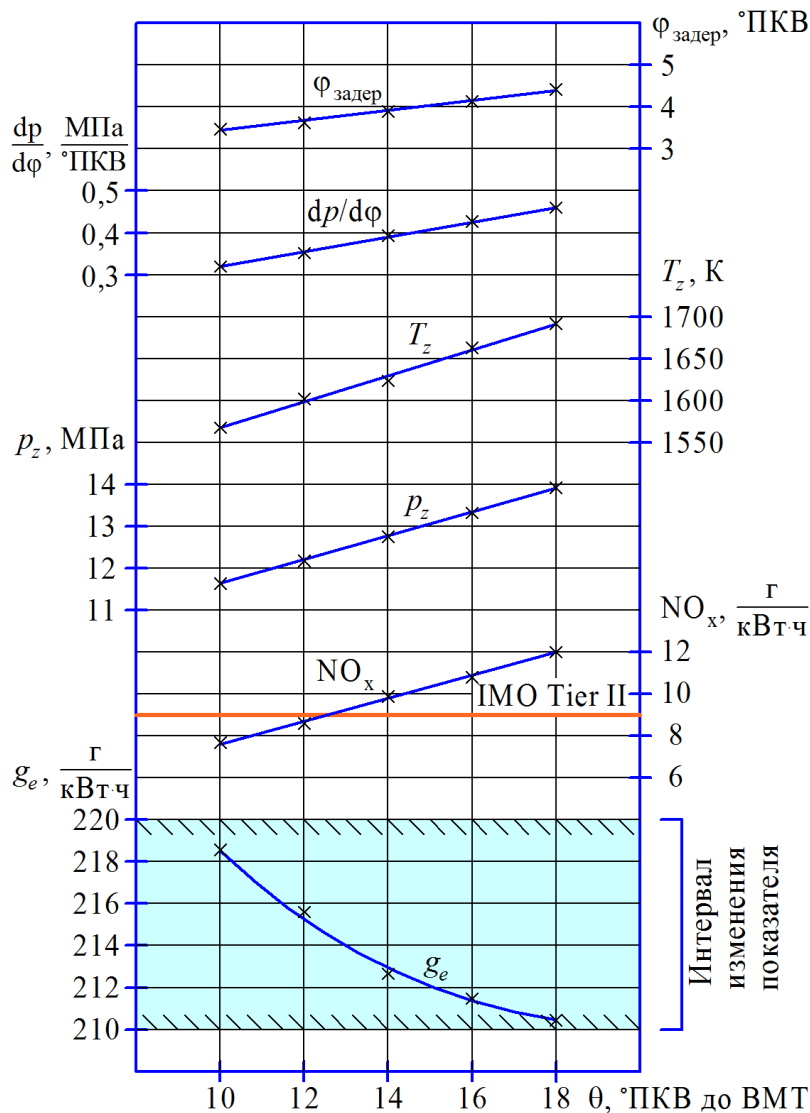
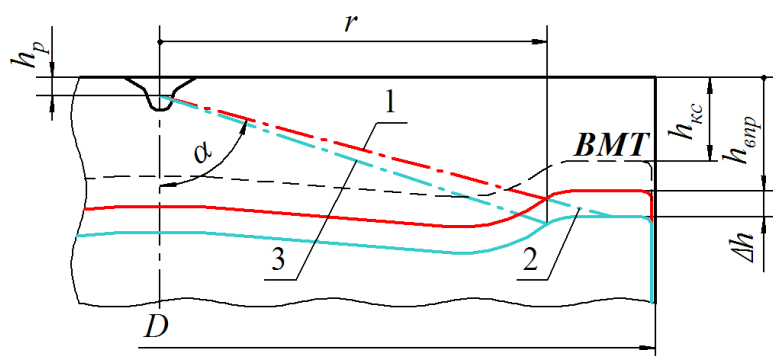


Рис. 3. Результаты моделирования рабочих процессов дизельного двигателя 8ЧН 22/28 по УОВТ

Анализ результатов моделирования показывает, что повышение топливной экономичности возможно за счет уменьшения доли топлива, попадающего на зеркало цилиндра с наименее благоприятными условиями испарения. Для этого необходимо направить топливную струю таким образом, чтобы она соприкасалась с поверхностью камеры сгорания в наиболее нагретой части головки поршня и в момент окончания впрыска топлива не попадала на зеркало цилиндра.

Определение угла наклона топливных струй при изменении УОВТ выполнено с учетом перемещения поршня в цилиндре двигателя. При базовом значении УОВТ топливная струя распространяется по оси 1 (рис. 4) и соприкасается с головкой поршня после ВМТ, когда поршень находится в положении  $h_{\text{впр}}$ . При приближении УОВТ к ВМТ и сохранении продолжительности впрыска топлива поршень переместится на величину  $\Delta h$  и топливная струя продолжит распространяться по оси 2 и в момент окончания впрыска топлива выйдет за пределы зоны  $r$  с повышенной температурой и наилучшими условиями испарения. Поэто-

му для улучшения экономических показателей угол наклона топливных струй необходимо изменить и направить по оси 3 в зону с наилучшими условиями испарения.



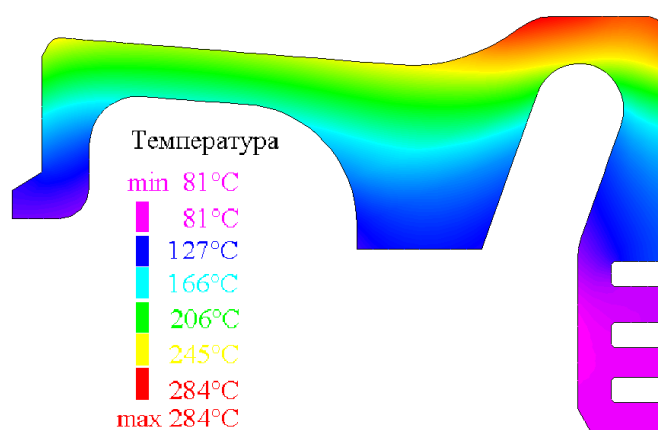
**Рис. 4. Геометрическая модель для определения угла наклона топливных струй:**

- 1 – ось распространения топливной струи при базовом значении УОВТ;
- 2 – ось распространения топливной струи при изменении УОВТ;
- 3 – ось распространения топливной струи, направленной в горячую зону

Учитывая общепринятые тригонометрические тождества и кинематическое выражение для определения перемещения поршня в цилиндре двигателя по углу поворота коленчатого вала (ПКВ) для аксиального кривошипно-шатунного механизма, получена математическая зависимость для определения угла наклона топливных струй (УНТС) с учетом изменения значений угла опережения и продолжительности впрыска топлива:

$$\alpha = \arctg \frac{r}{h_{кc} - h_p + R \left[ (1 - \cos(\varphi_{впр} - \theta)) + \frac{\lambda}{4} (1 - \cos 2(\varphi_{впр} - \theta)) \right]}$$

где  $r$  – зона соприкосновения топливной струи, мм;  $h_{кc}$  – высота камеры сгорания при нахождении поршня в ВМТ, мм;  $h_p$  – ордината выступа соплового отверстия распылителя, мм;  $\lambda = R/L_{ш}$  – постоянная механизма;  $R$  – радиус кривошипа коленчатого вала, мм;  $L_{ш}$  – кинематическая длина шатуна, мм;  $\varphi_{впр}$  – продолжительность впрыска топлива, °ПКВ;  $\theta$  – угол опережения впрыска топлива, °ПКВ до ВМТ.



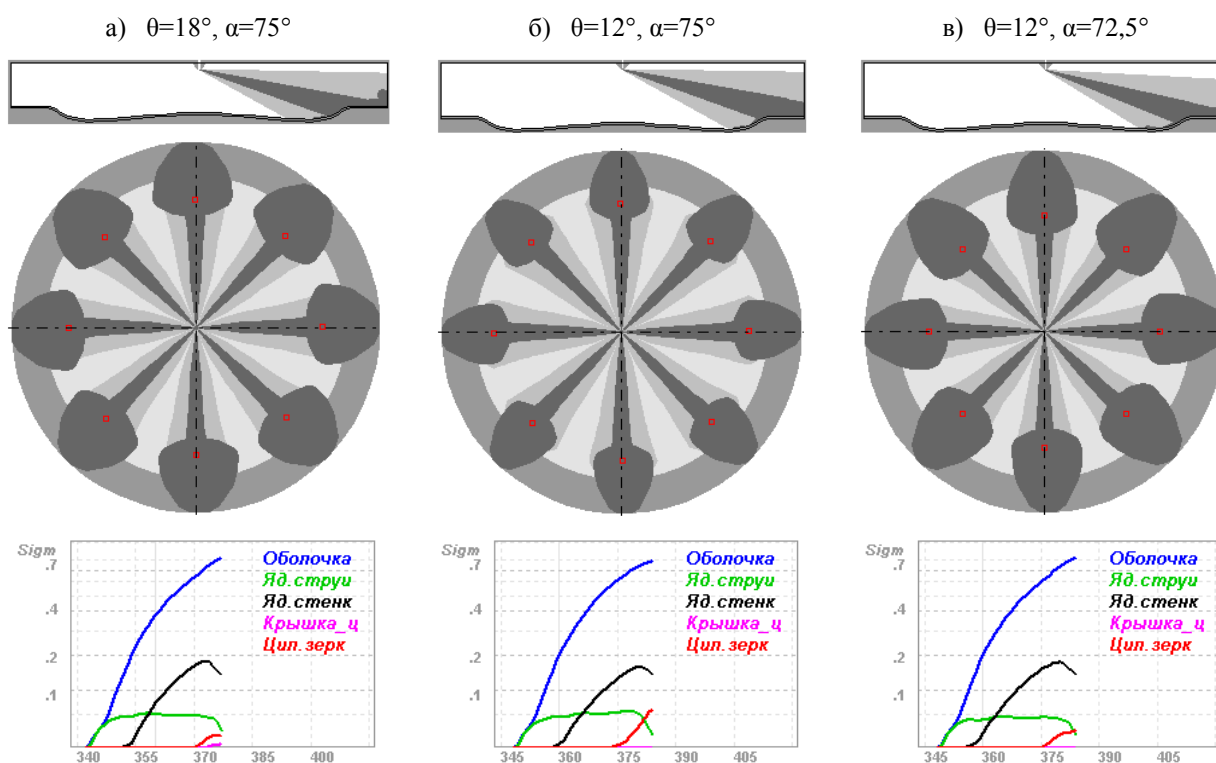
**Рис. 5. Распределение температур по головке поршня двигателя ЧН 22/28**

Значение зоны соприкосновения топливной струи  $r$  определяется расчетом распределения температур на головке поршня. Для определения наиболее нагретой части головки поршня двигателя 8ЧН 22/28 в программном комплексе ИСПА (Алексфот, г. Москва) смоделировано методом конечных элементов его тепловое состояние на режиме номинальной мощности (рис. 5).

Анализ рис. 5 показывает, что при базовом значении УОВТ ( $18^\circ$ ПКВ до ВМТ) и угле наклона топливных струй  $75^\circ$  соприкосновение топливной струи происходит в наиболее нагретой части головки поршня двигателя ЧН 22/28. При этом топливная струя в момент окончания впрыска топлива не выходит за пределы головки поршня и доля топлива, попадающего на зеркало цилиндра, минимальна.

Следовательно, для серийного судового дизельного двигателя при уменьшении УОВТ с  $18^\circ$  до  $12^\circ$ ПКВ до ВМТ при определении нового значения угла наклона топливных струй необходимо, чтобы топливная струя была направлена в ту же зону. В результате для УОВТ= $12^\circ$ ПКВ до ВМТ по полученной математической зависимости определено новое значение угла наклона топливных струй  $72,5^\circ$ .

На рис. 6 показано положение топливных струй для различных УОВТ и УНТС в момент окончания впрыска топлива.



**Рис. 6. Результаты исследования процессов смесеобразования при различных УОВТ ( $\theta$ ) и УНТС ( $\alpha$ )**

Результаты исследования рабочих процессов по УОВТ и УНТС показывают, что:

- базовый вариант характеризуется удовлетворительными условиями испарения и увеличенными выбросами  $\text{NO}_x$  с ОГ;
- при уменьшении УОВТ и сохранении базового УНТС происходит увеличение доли топлива, попадающего на зеркало цилиндра, и уменьшение доли топлива в разреженной оболочке струи, что приводит к ухудшению условий испарения и сгорания топлива;
- при уменьшении УОВТ и УНТС условия испарения и сгорания топлива улучшаются в связи с возрастанием доли топлива в разреженной оболочке и уменьшением на зеркале цилиндра, в результате чего повышаются экономические показатели двигателя.

Уменьшение УНТС в интервале с  $72,5^\circ$  до  $67,5^\circ$  (и далее вплоть до 0) приводит к тому, что топливная струя быстрее достигает головки поршня и пристеночный поток начинает преимущественно распространяться в радиальном направлении, в результате чего уменьшается доля топлива в разреженной оболочке струи и происходит резкое увеличение доли топлива на зеркале цилиндра и заброс его на поверхность крышки цилиндра. Это приводит к ухудшению экономических показателей двигателя, резко возрастает дымность ОГ и количе-

ство несгоревших углеводородов, при этом выбросы  $\text{NO}_x$  с ОГ снижаются из-за уменьшения максимальной температуры цикла.

Для подтверждения результатов моделирования и проверки правильности выбранного УНТС изготовлены распылители с углом наклона топливных струй  $72,5^\circ$  и проведены экспериментальные исследования на двигателе 8ЧН 22/28. Результаты сравнительных экспериментальных исследований представлены в табл. 2 и на рис. 7.

Таблица 2

Результаты экспериментальных исследований рабочих процессов двигателя 8ЧН 22/28

Показатели рабочих процессов	Базовый	Оптимизир.
Эффективная мощность, кВт	1052	1052
Среднее эффективное давление, МПа	1,48	1,48
Эффективный КПД	0,401	0,396
Удельный эффективный расход топлива, г/(кВт·ч)	210	213
Максимальное давление сгорания, МПа	13,9	12,1
Максимальная скорость нарастания давления (расчетная), МПа/°ПКВ	0,46	0,35
Максимальная температура (расчетная), К	1691	1608
УОВТ, °ПКВ до ВМТ	18	12
УНТС, ° относительно оси распылителя	75	72,5
Выбросы $\text{NO}_x$ , г/(кВт·ч)	12	8,5
Уровень шума, дБА	98	92



Рис. 7. Состояние деталей цилиндропоршневой группы двигателя 8ЧН 22/28 с базовым (а) и оптимизированным (б) рабочими процессами

Результаты экспериментальных исследований подтвердили правильность выбранных инженерных решений, а по состоянию цилиндропоршневой группы с четко выраженными границами распространения факелов и отложениями нагара можно судить об улучшении качества протекания рабочих процессов дизельного двигателя.

### Выводы

1. Снижение выбросов  $\text{NO}_x$  с ОГ до требований IMO Tier II при сохранении энергетических и экономических показателей серийных судовых дизельных двигателей возможно путем *оптимизации рабочих процессов* за счет уменьшения угла опережения впрыска топлива и изменения угла наклона топливных струй.

2. Уменьшение скорости нарастания давления и максимального давления сгорания позволяет дополнительно, к уменьшению выбросов  $\text{NO}_x$  снизить уровень шума и продлить

срок службы дизельного двигателя за счет уменьшения динамических нагрузок, возникающих в деталях кривошипно-шатунного механизма.

3. Предлагаемые инженерные решения не требуют больших капиталовложений и являются приемлемыми для морских судов, находящихся в открытом море или в зоне Балтийского моря.

4. Снижение выбросов  $\text{NO}_x$  с ОГ до требований IMO Tier III экономически целесообразно в результате каталитической очистки ОГ. Использование каталитической очистки ОГ необходимо только в зоне контролируемых выбросов (Emission Control Areas), так как для работы катализатора требуются специальные дорогостоящие реагенты, а дополнительное сопротивление выхлопу двигателя, создаваемое катализатором, увеличивает расход топлива.

Данная работа проводилась в Нижегородском государственном техническом университете им. Р. Е. Алексева при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта: RFMEFI57714X0105).

#### Библиографический список

1. **Захаров, Л.А.** Повышение топливной экономичности дизельного двигателя за счет снижения механических потерь / Л.А. Захаров, И.Л. Захаров, А.В. Сеземин // Журнал ААИ. 2011. №3(68). С. 41–43.
2. **Кулешов, А.С.** Программа расчета и оптимизация двигателей внутреннего сгорания Дизель-РК. Описание математических моделей, решение оптимизационных задач / А.С. Кулешов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 123 с.
3. **Новиков, Л.А.** Ограничение выбросов  $\text{NO}_x$  на уровне IMO Tier-3 для судовых дизелей отложено до 2021 года // Двигателестроение. 2013. №2(252). С. 26–32.
4. **Сеземин, А.В.** Уменьшение выбросов оксидов азота серийного судового двигателя путем организации рабочих процессов: дисс. ... канд. техн. наук.: 05.04.02: защищена 25.09.2014: утв. 18.02.2015 / Сеземин Алексей Валерьевич. – Н.Новгород, 2014. – 149 с.
5. **Толшин, В.И.** Режимы работы и токсичные выбросы отработавших газов судовых дизелей / В.И. Толшин, В.В. Якунчиков. – М.: Изд-во МГАВТ, 1999. – 192 с.
6. **Ludu, A.** Emission compliance strategy for multiapplication medium speed engines / A. Ludu, T. Bouche, G. Lustgarten // CIMAC Congress 2007, Vienna. – Paper № 258. – 13 p.
7. Sailing towards IMO Tier III – Exhaust Aftertreatment versus Engine-Internal Technologies for Medium Speed Diesel Engines / G. Tinschmann [et al.] // CIMAC Congress 2010, Bergen. – Paper № 274. – 14 p.
8. **Захаров, Л.А.** Методика обеспечения экологической безопасности поршневого двигателя внутреннего сгорания с воспламенением от сжатия завода ОАО «РУМО» 8ЧН 22/28 / Л.А. Захаров [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексева. – Н. Новгород, 2014. № 2 (104). С. 140–147.

Дата поступления  
в редакцию 26.01.2016

**A.V. Sezemin<sup>4</sup>, L.A. Zakharov<sup>1</sup>, A.V. Degtyarev<sup>3</sup>, I.L. Zakharov<sup>1</sup>, A.N. Tarasov<sup>2</sup>**

#### THE RESEARCH OF FUEL INJECTION TIMING AND ANGLE OF FUEL SPRAY IMPACTING TO ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL PARAMETERS OF THE PRODUCED MARINE DIESEL ENGINES

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev,<sup>1</sup>  
LLC «Joint Engineering Centre» JSC GAZ,<sup>2</sup>  
ALEXEEV'S CENTRAL HYDROFOIL DESIGN BUREAU,<sup>3</sup>  
JSC «RUMO»<sup>4</sup>

The article describes the requirements and ways to reduce emissions of nitrogen oxides from the exhaust gases of marine diesel engines. We developed physical, geometrical and mathematical models to determine the angle of fuel spray when changing timing and duration of the fuel injection. We conducted theoretical research in the software DIESEL-RK and full-scale tests on the engine 8CHN 22/28 production of JSC «RUMO».

*Key words:* diesel engine, nitrogen oxides, fuel injection timing, angle of fuel spray.

УДК 621.18

А.В. Локтев, А.В. Малахов, И.С. Мишин

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА  
НА КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЯХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
ОАО «Гипрогазцентр», г. Нижний Новгород

Приведены результаты исследований повышения эффективности аппаратов воздушного охлаждения транспортируемого природного газа типа АВГ-85МГ. Предложенный способ заключается в турбулентности потока за счёт накатки кольцевых канавок на наружной поверхности теплообменных труб. Проведённые исследования позволяют оптимизировать геометрические размеры накатки с точки зрения повышения теплообмена.

*Ключевые слова:* газопровод, компрессорные станции, теплообмен, интенсификация.

Применение общепромышленного оборудования для строительства магистральных газопроводов требует тщательного анализа условий его эксплуатации и в некоторых случаях адаптации к этим особенностям.

Снижение удельных затрат на транспортировку газа – одна из основных задач при проектировании компрессорных станций магистральных газопроводов. Это достигается за счёт утилизации теплоты уходящих газов от газовых турбин газоперекачивающих агрегатов (ГПА), применения ГПА и вспомогательного оборудования с высокими показателями эффективности.

Вместе с тем, не всё оборудование, предлагаемое промышленностью, отвечает современным требованиям. Рассмотрим это на примере агрегатов воздушного охлаждения (АВО), применяемых на компрессорных станциях магистральных газопроводов для снижения температуры транспортируемого газа.

В состав каждой компрессорной станции магистральных газопроводов входят: установки очистки газа; компримирования газа и охлаждения компримированного газа. Установка охлаждения компримированного газа состоит из нескольких аппаратов охлаждения. Они занимают достаточно много места на площадке компрессорного цеха и имеют высокую стоимость, поэтому весьма актуален вопрос о снижении массогабаритных показателей таких аппаратов.

При заданных значениях расходов теплоносителей и гидравлических сопротивлений можно уменьшить габариты и массу аппаратов за счёт увеличения коэффициентов теплопередачи или более плотной компоновки (уменьшения диаметров труб, расстояния между трубами). Уменьшения диаметров труб и расстояния между трубами ограничивается технологическими требованиями, поэтому практически возможности этого пути исчерпаны. Остается один путь уменьшения габаритных размеров и массы аппаратов – интенсификация теплообмена.

Известны различные методы интенсификации теплообмена. Среди них центральное место занимают различные способы закрутки потока в трубах с помощью различного рода винтовых вставок (закрученные ленты, шнеки) на всей длине трубы или на её части, тангенциального подвода теплоносителя в трубу, лопаточных завихрителей, расположенных на входе или периодически.

Наиболее реальным и доступным, требующим невысокой стоимости дополнительных работ является интенсификация теплообмена искусственной турбулизацией потока. Эффективность интенсификации определяется числом Рейнольдса ( $Re = \omega l / \nu$ ) и возрастает с его ростом.

Для трубчатых теплообменных аппаратов в результате исследований предложен сле-

дующий метод интенсификации теплообмена. На наружную поверхность теплообменной трубы накаткой наносятся периодически расположенные кольцевые канавки. При этом на внутренней поверхности труб образуются кольцевые диафрагмы с плавной конфигурацией. Образующиеся диафрагмы турбулизируют поток в пристенном слое (пограничный ламинарный слой) и обеспечивают интенсификацию теплообмена внутри труб. При этом не увеличивается наружный диаметр, что позволяет использовать эти трубы в тесных пучках и не менять существующую технологию сборки трубчатых теплообменных аппаратов.

За аналог для проведения исследований взят аппарат охлаждения газа АВГ – 85 МГ с длиной труб 8 м (рис. 1.)

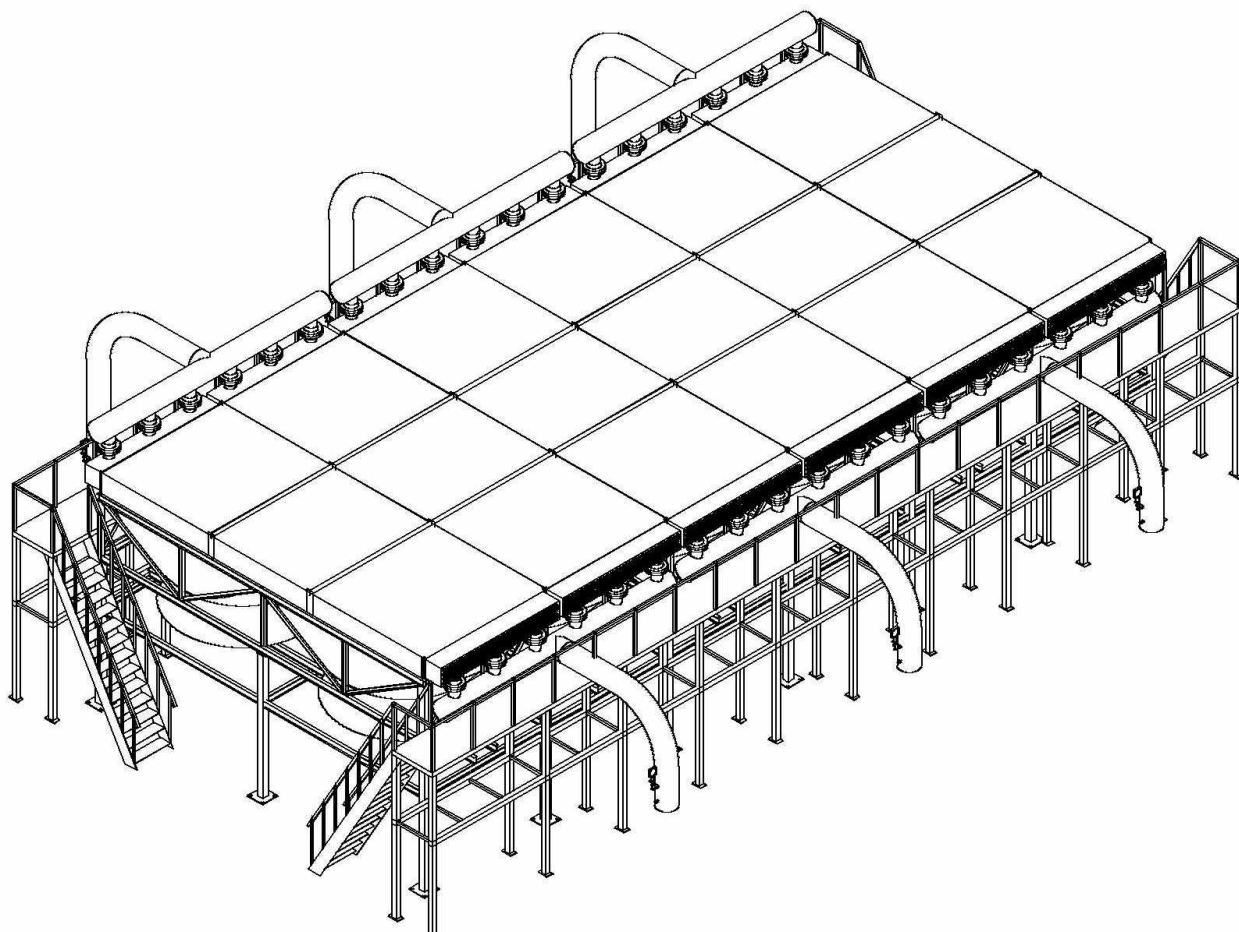


Рис. 1. Аппарат охлаждения газа АВГ – 85 МГ

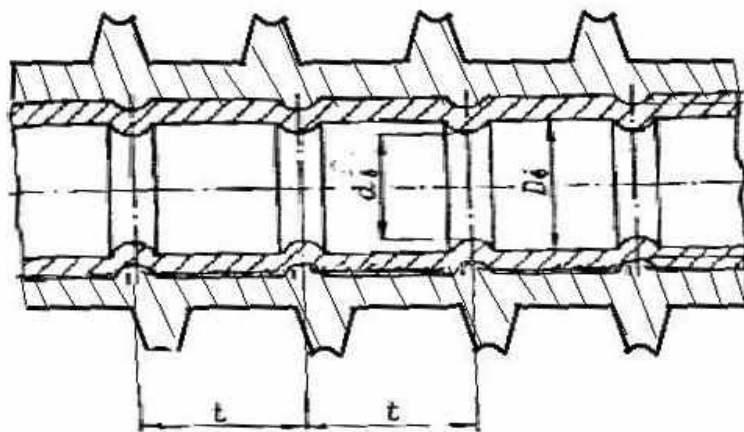


Рис. 2. Накатная биметаллическая труба



Расчет позволил выявить следующее. Применяя накатные биметаллические трубы (рис. 2) в теплообменной секции параметрами турбулизаторов:  $t$  – шаг между накатками;  $d_g$  – внутренний диаметр трубы в районе турбулизатора;  $D_g$  – внутренний диаметр трубы;  $d_g/D_g = 0,97$ ;  $t/D_g = 10$ , можно получить соотношение чисел Нуссельта (Nu):

$$Nu_{\text{турб}}/Nu_{\text{гл}} = (2 + (\frac{\lg Re_1 - 4,6}{7,45} (1,14 - 0,28 - \sqrt{1 - \frac{d_g}{D_g}}))),$$

$$Nu_{\text{турб}}/Nu_{\text{гл}} = (2 + (\lg Re_1 - 4,6)/7,45) ((1,14 - 0,28 \sqrt{1 - d_g/D_g})/1,14) e^{[1 - d_g/D_g / (t/D_g)^{0,58}]},$$

$$Nu_{\text{турб}}/Nu_{\text{гл}} = (2 + (\lg 471321 - 4,6)/7,45) ((1,14 - 0,28 \sqrt{1 - 0,97})/1,14) e^{[1 - 0,97/10^{0,58}]};$$

$$Nu_{\text{турб}}/Nu_{\text{гл}} = 2,07;$$

Nu – характеризует подобие интенсивности теплообмена на границе раздела двух сред;

Nu<sub>турб</sub> – число Нуссельта для труб с турбулизаторами;

Nu<sub>гл</sub> – число Нуссельта для труб с гладкой внутренней поверхностью;

$$Nu_{\text{турб}} = 2,07 \cdot 797 = 1649;$$

Re<sub>1</sub> – число Рейнольдса для природного газа при заданных условиях.

Коэффициент теплоотдачи газа  $\alpha_1$ :

$$\alpha_1 = Nu_{\text{турб}} (\lambda_1/d_0) = 1649 \cdot 0,034 / 0,021 = 1430 \text{ Вт/м}^2 \text{ К};$$

$\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности для природного газа при заданных условиях;

$d_0 = D_g$  – внутренний диаметр трубы.

Коэффициент теплопередачи ребристой трубы, отнесенный к полной наружной площади поверхности теплообмена  $k$ :

$$k = ((\phi d_0/d_1) (1/\alpha_1 + h_n/\lambda_{ст}) + 1/\alpha_2)^{-1} = ((20 \cdot 0,021/0,025) (1/1430 + 0,02/50) + 1/30,9)^{-1} = 62,79 \text{ Вт/м}^2 \text{ К};$$

$\phi$  – коэффициент оребрения внешней трубы;

$\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи воздуха при заданных условиях;

$h_n$  – толщина стенки несущей трубы;

$d_1$  – диаметр.

Среднелогарифмический температурный напор:

$$\Delta t_{\text{л}} = ((t_1' - t_2'') - (t_1'' - t_2')) / (\ln(t_1' - t_2'') / (t_1'' - t_2')) = ((41,8 - 33,8) - (28 - 23,3)) / (\ln(41,8 - 33,8) / (28 - 23,3)) = 6,21 \text{ }^\circ\text{C},$$

$t_1'$  – температура газа на входе в аппарат;

$t_1''$  – температура газа на выходе из аппарата;

$t_2'$  – температура воздуха на входе в аппарат;

$t_2''$  – температура воздуха на выходе из аппарата.

Определяем безразмерные температурные коэффициенты:

$$p = (t_2'' - t_2') / (t_1' - t_2') = (33,8 - 23,3) / (41,8 - 23,3) = 0,567,$$

$$R = (t_1' - t_1'') / (t_2'' - t_2') = (41,8 - 28) / (33,8 - 23,3) = 1,31.$$

По рис. 3 находим значение поправочного коэффициента для однократного перекрестного тока:  $\epsilon \Delta t, n=1 = 0,7$ .

Поправочный коэффициент к температурному напору  $\epsilon \Delta t = 0,7$ .

Средний температурный напор:  $\Delta t_{\text{ср}} = \Delta t_{\text{л}} \epsilon \Delta t = 6,21 \cdot 0,7 = 4,34 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Расчетная площадь поверхности теплообменной секции:

$$F_{\text{рс}} = Q_c / (2 k \Delta t_{\text{ср}}) = 1139 \cdot 1000 / (2 \cdot 62,79 \cdot 4,34) = 2087,7 \text{ м}^2.$$

Определяем невязку:

$F_c = 3893,8 \text{ м}^2$  – площадь секции аппарата АВГ-85МГ с длиной труб 8 м;

$$\delta F = |(F_c - F_{\text{рс}}) 100 / F_c| = |(3893,8 - 2087,7) 100 / 3893,8| = 46,4 \text{ } \%$$

Как видно из невязки, мы сократили площадь поверхности теплообмена секции почти в два раза при использовании секции стандартной ширины в 3 м и при тех же значениях поперечного и продольного шага.

Определяем стоимость рассчитанного АВО. Стоимость одного аппарата АВГ-85-МГ (аналог): С1 = 9 739 000 руб. Так как при изготовлении используются те же самые операции,

то теоритически определяем коэффициент пересчета  $k$ :  $k = (F \text{ поверх. нового АВО} / F \text{ поверх. АВГ-85-МГ}) = 2087,7/3893,8 = 0,54$ .

Определяем теоретическую стоимость спроектированного АВО. Стоимость одного аппарата АВО =  $C_2 = C_1 k = 9739000 \cdot 0,54 = 64926667$  руб.

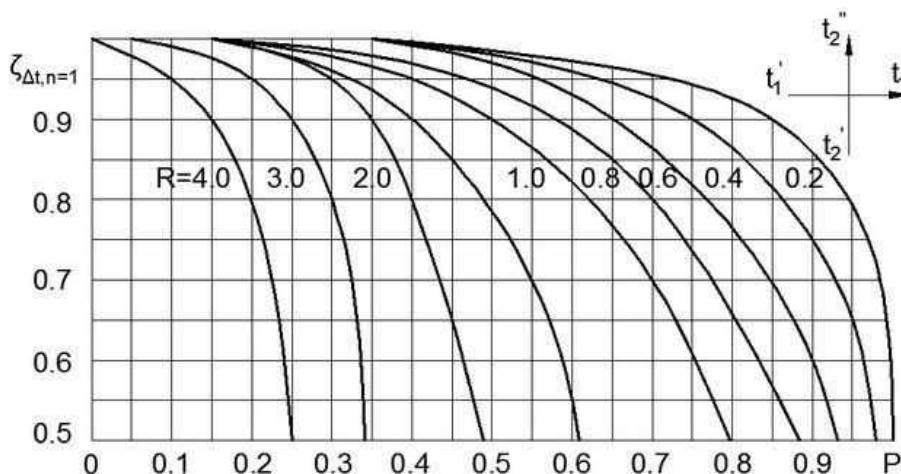


Рис. 3. График поправочного коэффициента  $\epsilon_{\Delta t, n=1}$  для однократного перекрестного тока с не перемешивающимися теплоносителями в межтрубном и трубном пространствах

На практике стоимость этих аппаратов меньше только на 25-30%, так как в теоретическом расчете не учтена операция накатки внутренних ребер (турбулизаторов).

В результате спроектировали аппарат охлаждения газа с меньшими массо-габаритными показателями, меньшей металлоёмкостью, с наилучшими параметрами теплообмена и меньшей стоимостью, что обеспечит более низкую удельную стоимость транспорта газа.

Дата поступления  
в редакцию 25.01.2016

A.V. Loktev, A.V. Malahov, I.S. Mishin

### IMPROVING THE EFFICIENCY OF GAS COOLING AT COMPRESSOR STATIONS OF MAIN GAS PIPELINES

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev  
JSC «Giprogazcentr», Nizhny Novgorod

**Purpose:** Enhancement of heat transfer in gas Air heat exchanger station kompremirovaaniya natural gas.

**Design/methodology/approach:** Theoretically investigated the processes controlling the supply of gas to the burner connected in parallel, working in pairs.

**Findings:** An algorithm for modulating fuel gas for the selection of actuators and control system development.

**Research limitations/implications:** The developed approaches are suitable for automation of such boilers equipped with a group of burners.

**Originality/value:** In the study used the known laws of hydrodynamics technical, but for this circuit are shown for the first time.

*Key words:* Gas pipeline, compressor stations, heat, intensification.

УДК 629.12.001

М.Э. Францев

## ПРОЕКТНЫЕ ОБОСНОВАНИЯ СОЗДАНИЯ НАДСТРОЙКИ ИЗ КОМПОЗИТОВ ДЛЯ ПАССАЖИРСКОГО СУДНА НА ПОДВОДНЫХ КРЫЛЬЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПОСОБА ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

ЗАО «Нептун-Судомонтаж», г. Долгопрудный Московской обл.

Проектирование надстройки из полимерных композиционных материалов для пассажирского судна на подводных крыльях (далее СПК) неразрывно связано с проектированием самого судна. Надстройка входит в подсистему «Корпус» в качестве подсистемы. Оптимизация конструкции надстройки СПК из композитов напрямую связана с оптимизацией всего судна. Критерием экономической эффективности СПК является условие минимизации расхода топлива на перемещение 1 т дедвейта (полезной нагрузки) на 1 км пути. Минимизация водоизмещения порожнем пассажирского СПК обеспечивается за счет о минимизации массы корпуса (в состав которого входит и надстройка) при прочих равных других статьях весовой нагрузки при необходимости обеспечения характеристик его прочности. Совокупность проектных обоснований при создании надстройки СПК из композитов использует методы параметрического проектирования на базе типового ряда, включающего проекты построенных СПК, использующих близкие гидродинамические модели. Все расчеты были выполнены методами регрессионного анализа. Статья содержит алгоритмы проектирования.

*Ключевые слова:* проектные обоснования, пассажирское судно на подводных крыльях, надстройка из композитов, параметрическое проектирование, регрессионный анализ, алгоритмы проектирования.

Статья подготовлена по результатам выполнения прикладных научных исследований, проводимых Московским государственным техническим университетом им. Н.Э. Баумана по государственному контракту 14.577.21.0103 от 16.09.2014 года 2014 г. с Минобрнауки России в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы». Автор руководит указанной работой. В статье рассматриваются проектные обоснования создания надстройки из композитов для СПК на примере модернизации проекта 17091 «Полесье» (рис. 1).



Рис. 1. Пассажирское СПК пр. 17091 «Полесье» (слева) и проект СПК «Валдай-45Р»

Для расширения возможностей создания отечественных пассажирских СПК, имеющих надстройки, изготовленные из композитов, в настоящее время необходимо решить ряд проблем как в области совершенствования проектных характеристик судов этого типа и их оптимизации, так и улучшения структуры всего процесса проектирования. Необходима разработка способов проектного обоснования надстроек пассажирских СПК, учитывающих различные аспекты их последующей эксплуатации и обеспечивающих конкурентоспособность судов данного типа.

Критерии эффективности скоростного пассажирского судна связаны с эксплуатационной моделью его применения. Основой критерия выбора служат экономические показатели, определяющие доходную и расходную части эксплуатационных характеристик. Известно, что доход от эксплуатации скоростного судна в большой степени зависит от его вместимости, полезной нагрузки и мощности. Доход от эксплуатации судна может быть представлен как

$$D = f(W, DW) + \varphi(N). \quad (1)$$

Как правило, величина дохода в условиях рыночной конкуренции ограничена сверху, поэтому повышение эффективности эксплуатации скоростного судна, в первую очередь, связано со снижением расходов на его эксплуатацию. Экономические параметры, определяющие расходы на эксплуатацию, могут рассматриваться в виде общей суммы затрат на эксплуатацию и установленных законом отчислений, оплачиваемых судовладельцем:

- расходы на топливо;
- расходы на экипаж;
- налоги и сборы, зависящие от характеристик (вместимость, мощность, длина) судна;
- отчисления, зависящие от строительной стоимости судна.

Основные статьи расходов на эксплуатацию судна зависят от его главных размерений и мощности. Расходные составляющие эксплуатации судна могут быть представлены как:

$$P = \sum_{i=1}^m p_i f(\delta, L, B, T, H) + p_j N \rightarrow \min. \quad (2)$$

Строительная стоимость судна, также определяется его главными размерениями и мощностью:

$$C = \sum_{i=1}^n q_i f(\delta, L, B, T, H) + q_j N \rightarrow \min. \quad (3)$$

Критерии, определяющие эффективность скоростных судов, в которых используются их интегрированные расходные характеристики, включающие удельный расход топлива главных двигателей, их мощность, полную массу, скорость, а также характеристики их полезной нагрузки, приведены в работе [1]. Эти критерии могут быть в полной мере применены к пассажирским СПК. Условие оптимизации скоростного пассажирского судна сводится к минимизации его расходных характеристик при заданных ограничениях. Принципы повышения характеристик эффективности скоростного пассажирского судна за счет повышения его полезной нагрузки, реализуемые на этапе проектирования, в полной мере могут быть применены к пассажирскому СПК и изложены в работах [1, 2].

Для обеспечения необходимых характеристик экономичности пассажирское СПК должно иметь наибольшее соотношение между его полезной нагрузкой и полной массой:

$$\eta = \frac{DW}{D} \rightarrow \max. \quad (4)$$

Дедвейт пассажирского СПК может быть представлен как разность между полной массой судна и его водоизмещением порожнем (собственным весом судна):

$$\eta = \frac{D - D_{\text{пор}}}{D} \rightarrow \max, \quad (5)$$

$$\eta = 1 - \frac{D_{\text{пор}}}{D} \rightarrow \max, \quad (6)$$

$$\frac{D_{\text{пор}}}{D} \rightarrow \min. \quad (7)$$

На условие минимизации критерия в виде суммарного расхода топлива пассажирского СПК налагается ряд ограничений, связанных с условиями его эксплуатации и его эксплуатационными качествами [1].

Основными составляющими водоизмещения порожнем для пассажирского СПК будут:

$$D_{пор} = P_{корп} + P_{об} + P_{эу} + P_{КУ} + P_{ДРК} + P_{эл.об} + \sum_{j=1}^m P_j, \quad (8)$$

где  $P_{корп}$  - масса корпуса;  $P_{об}$  - масса;  $P_{эу}$  - масса энергетической установки;  $P_{КУ}$  - масса крыльевого устройства;  $P_{ДРК}$  - масса движительно-рулевого комплекса;  $P_{эл.об}$  - масса электрооборудования;  $\sum P_j$  - сумма масс всех остальных статей водоизмещения порожнем, как правило, не превышающая 3-5% от общей суммы.

Основными составляющими дедвейта для пассажирского СПК будет масса экипажа и пассажиров, а также запас топлива, который в большой степени, определяет потребительские качества судна такого типа. Тогда

$$DW = P_{пасс} + P_{топл} + \sum_{g=1}^k P_g, \quad (9)$$

где  $P_{пасс}$  - масса пассажиров и экипажа;  $P_{топл}$  - масса топлива;  $\sum P_g$  - масса остальных статей дедвейта, как правило, не превышающая 3-5% от общей суммы [3, 6].

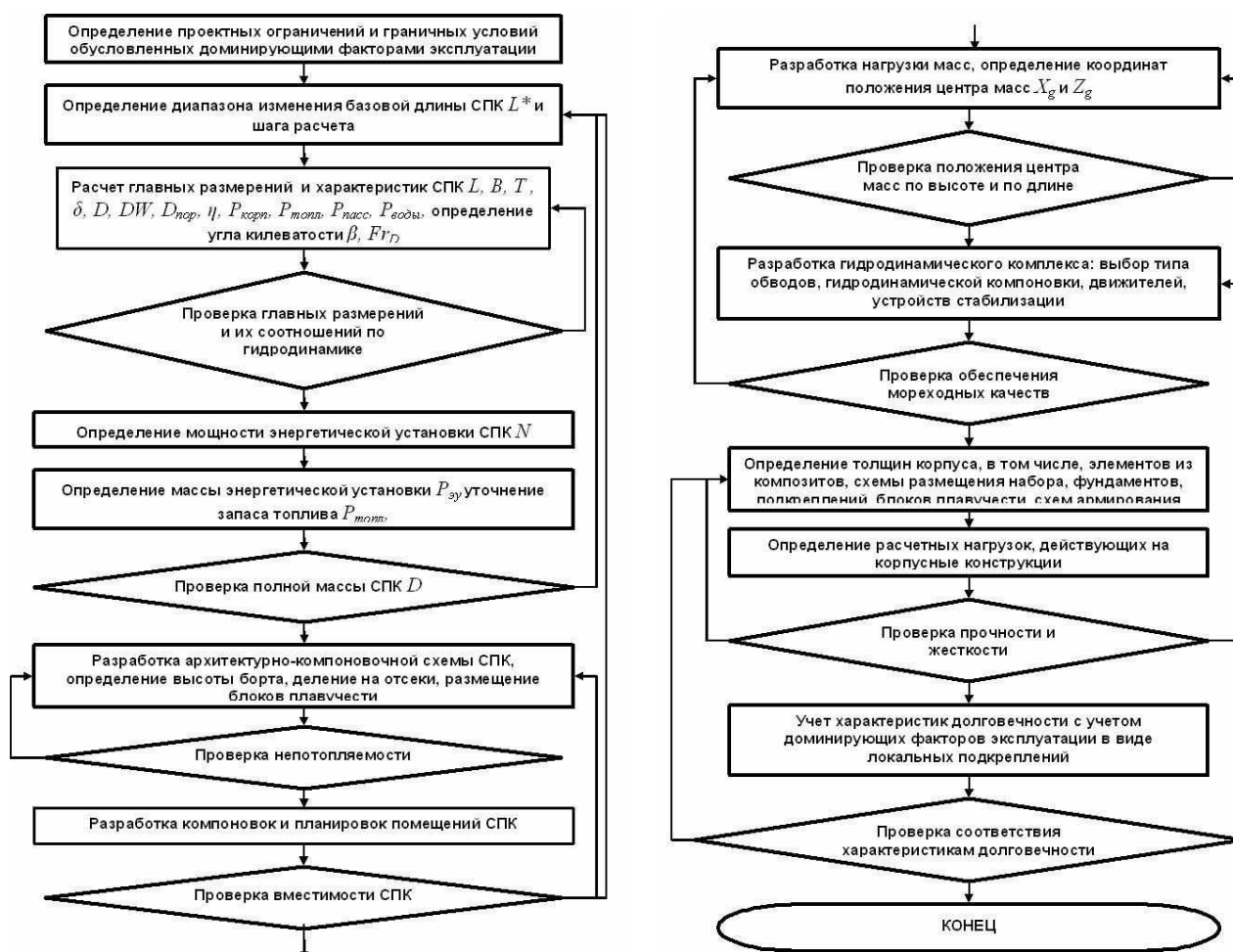


Рис. 2. Алгоритм рационального проектирования судна на подводных крыльях с надстройкой из композитов

Известно, что пассажирское СПК, как и любое другое судно, является системой, состоящей из подсистем. На первом уровне декомпозиции СПК рассматривается как совокупность подсистем, выделяемых по функциональному признаку, например «Корпус», «Гидродинамический комплекс» и др. Подсистема «Корпус СПК» является доминирующей по отношению ко

всем остальным подсистемам судна. Свойства подсистемы «Корпус СПК» определяются на этапе декомпозиции судна. При этом необходимо отметить, что поскольку подсистема «Корпус СПК» является, как было сказано ранее, в составе системы «Судно на подводных крыльях» доминирующей, ее свойствами в наибольшей степени определяются качества судна.

При этом надстройка из композитов входит в подсистему «Корпус СПК» в качестве подсистемы второго уровня и в этом качестве должна рассматриваться в процессе оптимизации. Поэтому для детализации свойств надстройки должна проводиться декомпозиция подсистемы «Корпус СПК» на отдельные подсистемы, одной из которых является подсистема «Надстройка». При этом на этапе декомпозиции определяются граничные условия подсистемы «Надстройка», а также связи, которыми эта подсистема взаимодействует с подсистемой «Корпус СПК». Таким образом, оптимизация конструкции надстройки из композитов напрямую связана с оптимизацией пассажирского СПК [2].

При анализе уравнений (5-9) при фиксированных размерах пассажирского СПК ( $L, B, H = \text{const}$ ) определяется условие минимального водоизмещения порожнем (собственного веса судна), которое обеспечивается за счет минимизации массы корпуса и надстройки пассажирского СПК при равенстве других статей нагрузки масс. На это условие налагается условие необходимости обеспечения характеристик прочности и долговечности корпуса и надстройки:

$$P_k \rightarrow \min. \quad (10)$$

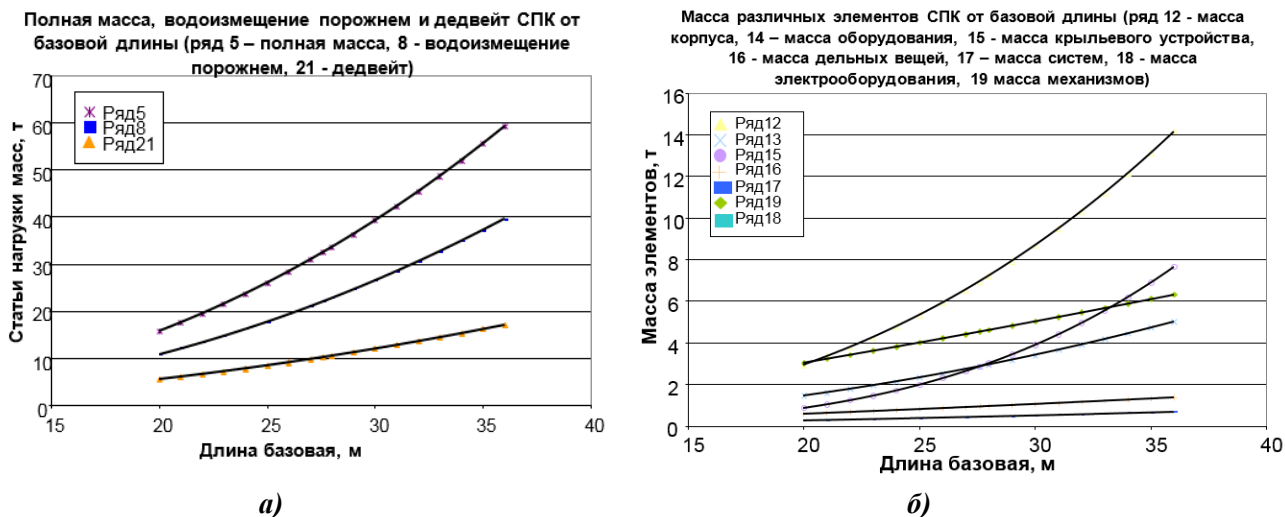


Рис. 3. Полная масса, водоизмещение порожнем, дедвейт и масса основных статей нагрузки раздела «Водоизмещение порожнем» для типоразмерного ряда СПК по интервалу базовой длины

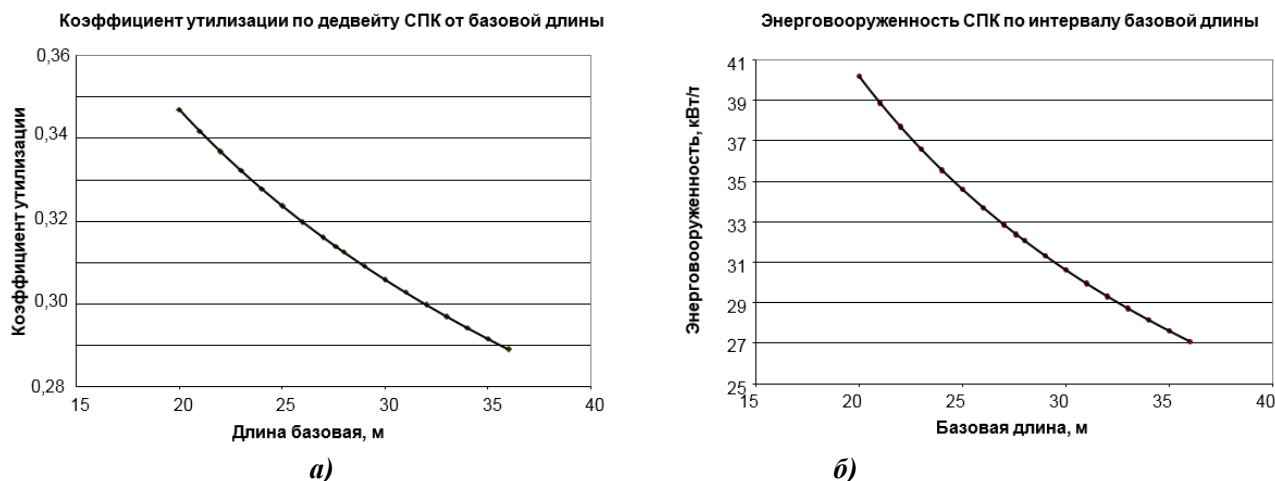


Рис. 4. Коэффициент утилизации по дедвейту (полезной нагрузке) (а) и энерговооруженность для типоразмерного ряда СПК по интервалу базовой длины (б)

Принципы повышения полезной нагрузки скоростного пассажирского судна за счет применения в его конструкции крупных элементов из композитов, реализуемые на этапе проектирования изложены в работе [2].

Определение основных проектных характеристик пассажирского СПК производится методом структурно-параметрического проектирования с использованием типоразмерных рядов. Принципы параметрического проектирования скоростных судов изложены в работе [5].

Проектирование надстройки из полимерных композитов для пассажирского СПК как элемента судна неразрывно связано с проектированием самого судна. При этом оптимизация пассажирского СПК производится по критериям экономической эффективности.

Физической моделью способа структурно-параметрического проектирования пассажирского СПК является подобие аэродинамических и гидродинамических процессов на расчетных режимах движения в рамках единой компоновки всего судна. Для СПК это, в первую очередь, подобие гидродинамических комплексов и схем аэродинамического обтекания надстроек. Подобие обусловлено относительно небольшим различием геометрических размеров наибольшего и наименьшего судов ряда [5]. Алгоритм рационального проектирования пассажирского СПК с надстройкой из композитов представлен на рис. 2.

Непосредственному структурно-параметрическому синтезу характеристик проектируемого судна предшествует разработка базы данных и построение типоразмерного ряда пассажирских СПК. В качестве информационной основы базы данных выбран «Справочник по серийным транспортным судам» [4], содержащий достаточно подробную информацию обо всех отечественных пассажирских СПК. При этом проектные характеристики построенных судов анализируются различными способами, в том числе, методами регрессионного анализа.

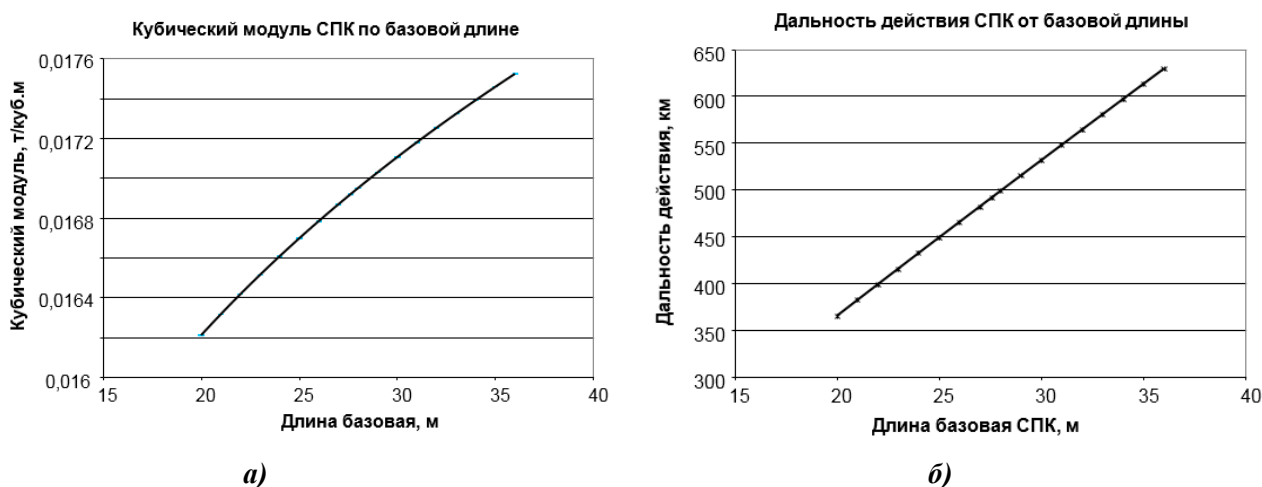


Рис. 5. Кубический модуль (а) и дальность действия судна (б) для типоразмерного ряда СПК по интервалу базовой длины

Параметрическим рядом СПК является упорядоченная совокупность числовых значений их проектных характеристик. В параметрическом ряду СПК, наряду с размерами судов, характеристиками их массы и мощности, важную роль играют отдельные элементы нагрузки масс, расходные характеристики судовой энергетической установки, особенности их крыльевых устройств, движительных комплексов и пр.

На этапе определения эксплуатационных качеств проектируемого пассажирского СПК, приводящего к принятию основных проектных решений по определению его главных размерений и других проектных характеристик, производится проектный анализ этих характеристик с использованием их типоразмерного ряда. Группировка пассажирских СПК в параметрическом ряду производилась по двум ключевым признакам, а именно: применению авиационной компоновки судна и применению малопогруженных подводных крыльев по



схеме «самолет». Рассматриваемые в качестве судов-претендентов пассажирские СПК имеют весьма специфическую архитектурно-компоновочную схему, объединяющую форму и конструкцию корпуса, в которой интегрированы конструкции надстройки, конструкции подводных крыльев, элементы движительно-рулевого комплекса и т.п. Таким образом, сформирован одномерный типоразмерный параметрический ряд пассажирских СПК, разработанных в различные годы ЦКБ по СПК им. Р.Е. Алексеева [3, 4].

С математической точки зрения определение главных размерений и проектных характеристик пассажирского СПК сводится к составлению и решению системы проектных уравнений, связывающих искомые величины с требованиями к проекту. Сбалансированность проектных характеристик для пассажирского СПК определяется системой проектных уравнений: плавучести, нагрузки масс и мощности – ходкости. При этом для каждого из проектных вариантов она представляется в виде:

$$\begin{aligned}
 D &= f_5(L^*) = \gamma \delta L B T = \gamma f_1(L^*) f_2(L^*) f_3(L^*) f_4(L^*), \\
 D &= D_{\text{нор}} + DW = f_6(L^*) + f_7(L^*) = \\
 &= \sum_{i=1}^k P_i + \sum_{j=1}^l P_j = \sum_{i=1}^k f_i(L^*) + \sum_{j=1}^l f_j(L^*), \\
 N &= \frac{D^n V^m}{C_{mn}} = \frac{f_5(L^*)^n v^m}{\varphi(D, Fr_v)},
 \end{aligned} \tag{11}$$

где  $f_1(L^*)$ ,  $f_2(L^*)$ ,  $f_3(L^*)$ ,  $f_4(L^*)$  - значения главных размерений соответственно;  $f_5(L^*)$  - значения полной массы;  $f_6(L^*)$  - значения водоизмещения порожнем;  $f_7(L^*)$  - значения дедвейта;  $f_i(L^*)$  - значения статей нагрузки масс по разделу «Водоизмещение порожнем»;  $f_j(L^*)$  - значения статей нагрузки масс по разделу «Дедвейт», представленных в виде функций на интервале базовой длины;  $\varphi(D, Fr_v)$  - значения коэффициента, связывающего величины полной массы, мощности и скорости для анализируемых значений полной массы и скоростного интервала.

При проектном обосновании пассажирского СПК выполняется определение главных размерений  $L$ ,  $B$ ,  $H$  (корпуса),  $T$  (без крыльев),  $\delta$ , а также других размеров судна: ширины корпуса  $B^*$ , соотношений  $L/B$ ,  $B/T$ ,  $H/T$ , характеристик полной массы  $D$  и таких ее составляющих, как водоизмещение порожнем  $D_{\text{нор}}$  и дедвейт  $DW$ ; значения массы топлива  $P_{\text{топл}}$ ; массы экипажа  $P_{\text{эк}}$ ; массы пассажиров  $P_{\text{пасс}}$ ; коэффициента утилизации по дедвейту  $\eta$ ; кубического модуля массы корпуса  $q_{\text{корп}}$  и энерговооруженности  $N/D$  по интервалу базовой длины  $L^*$  с использованием результатов расчета проектных характеристик судов типоразмерного ряда методами регрессионного анализа (рис. 3). При этом выполняется сопоставление и осуществляется выбор вариантов по экономическому критерию.

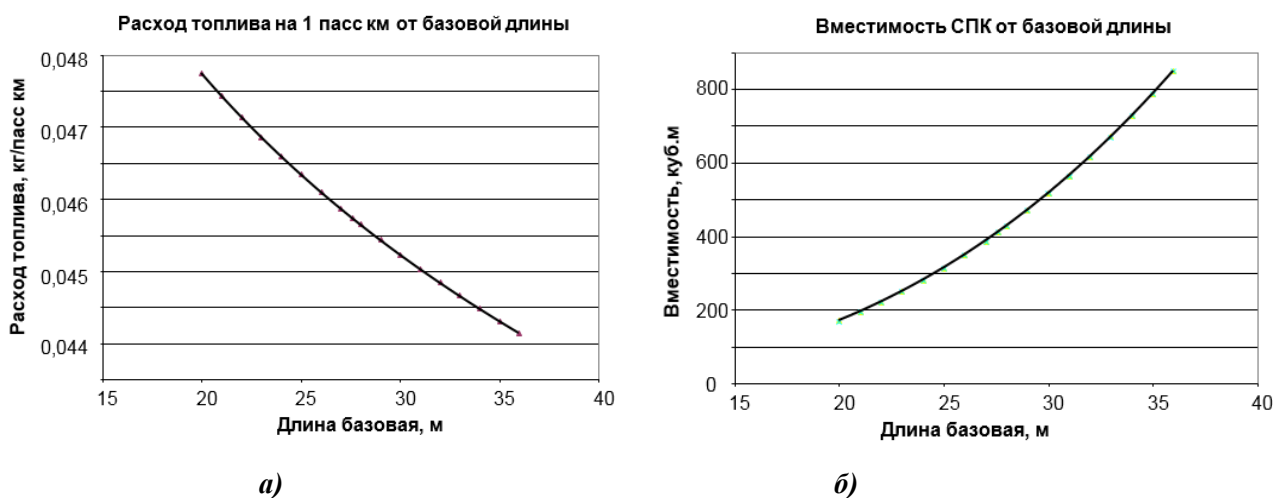
Использование параметрических методов существенно снижает трудоемкость обоснования выбора проектных характеристик пассажирского СПК и обеспечивает вариативность проектирования, что позволяет эффективно оптимизировать характеристики пассажирского СПК применительно к имеющимся экономическим ограничениям. Необходимо отметить, что использованный способ структурно-параметрического проектирования пассажирского СПК с надстройкой из композитов позволяет получить существенный выигрыш в затратах на поисковые исследования начального этапа проектирования. Результаты, полученные с помощью данного способа, достаточно эффективны и просты в дальнейшем применении [5].

Для обеспечения необходимой точности расчета величины отдельных статей нагрузки масс, включая водоизмещение порожнем и дедвейт пассажирских СПК, определяются двумя способами:

- расчетом методами регрессионного анализа величин отдельных статей нагрузки, а

также полной массы, водоизмещения порожнем и дедвейта по всему типоразмерному ряду;

- суммированием статей нагрузки, входящих в полную массу, водоизмещение порожнем и дедвейт по типоразмерному ряду.



**Рис. 6.** Изменение расхода топлива на 1 пассажиро-километр (а) и вместимости типоразмерного ряда СПК по интервалу базовой длины (б)

Величины, полученные обоими расчетными способами, на всем размерном интервале достаточно близки, и расхождение между ними не превышает 3 %.

Экономические характеристики пассажирского СПК непосредственным образом связаны с его скоростными качествами, а также характеристиками его энергетической установки – мощностью, удельным расходом топлива и рядом других. Поэтому одной из важнейших характеристик СПК является мощность главных двигателей его судовой энергетической установки и связанное с ней обоснование выбора главных двигателей.

Для определения мощности главных двигателей необходимо методами регрессионного анализа проанализировать энерговооруженность судов типоразмерного ряда по базовой длине (см. рис. 4). В дальнейшем перемножением полной массы  $D$  и энерговооруженности судна  $N/D$ , относящегося к одному и тому же значению базовой длины, может быть получено искомое значение мощности главных двигателей  $N$ , позволяющее определить массу СЭУ пассажирского СПК.

Основной статьей нагрузки в разделе «Водоизмещение порожнем» для любого судна, включая пассажирское СПК, является масса его корпуса. Для корректного определения массы этой статьи нагрузки необходимо использовать ее привязку к различным геометрическим характеристикам судна.

На рис. 5 приведено изменение кубического модуля СПК для судов типоразмерного ряда по интервалу базовой длины. Рост величины модуля обусловлен опережающим ростом нагрузок от общего изгиба при увеличении геометрических размеров корпуса пассажирского СПК. Правильное значение массы корпуса определяет получение сбалансированных значений подавляющего числа проектных эксплуатационных характеристик пассажирского СПК и позволяет выполнять качественный проектный анализ.

Для корректного решения уравнения мощности – ходкости необходимо применить синтетический метод. Этот метод заключается в совместном анализе характеристик энерговооруженности судна, его скоростных характеристик, определяемых особенностями гидродинамического комплекса, а также характеристик имеющихся на рынке двигателей [6]. При этом целесообразно придерживаться эксплуатационного скоростного диапазона судов, входящих в типоразмерный ряд, для обеспечения условий отсутствия развитой кавитации на подводных крыльях, их стойках и лопастях гребных винтов. После определения диапазона

скоростей проектируемого СПК в первом приближении и проверке его по критериям, приведенным в соответствующих методиках [3, 6], может быть определена дальность действия СПК методами регрессионного анализа. Изменение дальности действия СПК типоразмерного ряда при фиксированной скорости по интервалу базовой длины приведено на рис. 5.

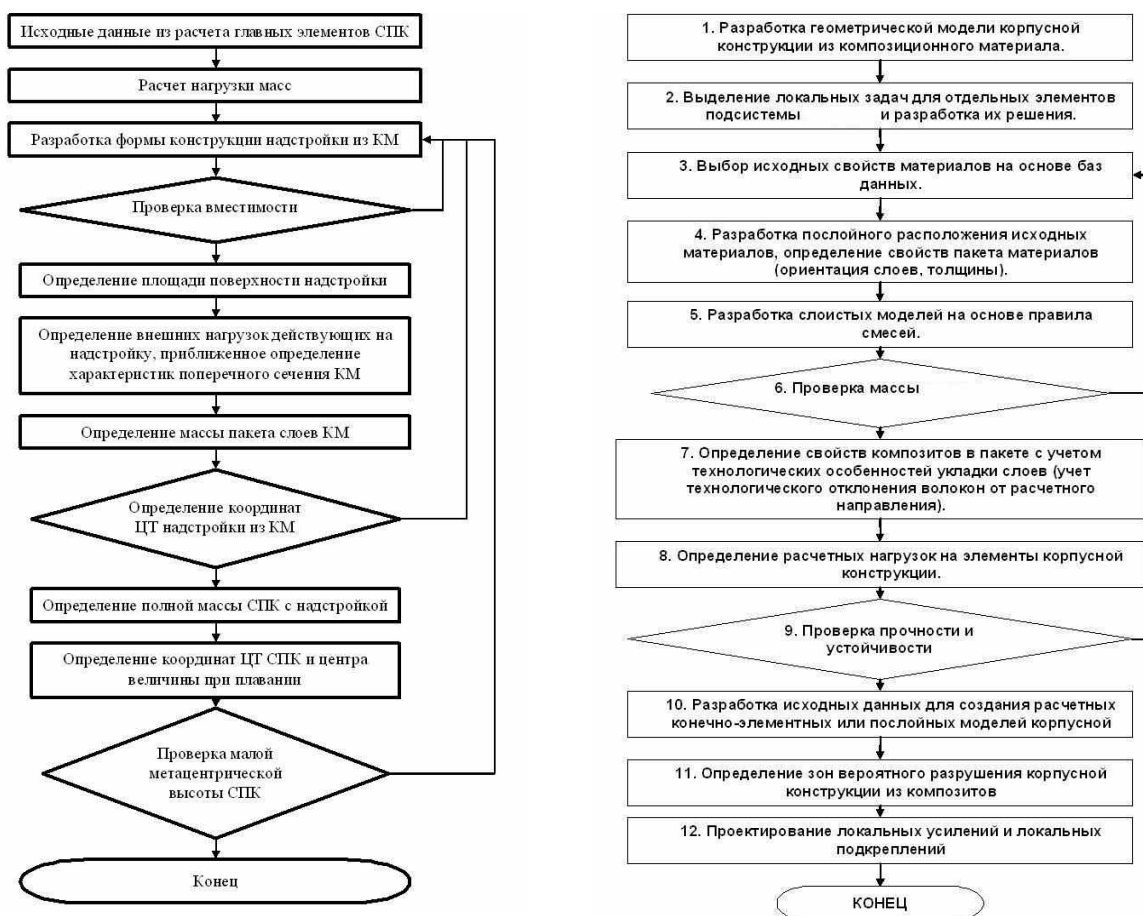


Рис. 7. Алгоритм декомпозиции подсистемы «Корпус СПК» (слева) и алгоритм проектирования подсистемы второго уровня «Надстройка СПК из композитов» (справа)

Использование в расчетах оптимизации проектных характеристик пассажирских СПК интегральных показателей, включающих различные эксплуатационные качества судна, в том числе, его расходные характеристики, а также вместимость (рис. 6), позволяет еще на стадии определения главных размерений и других базовых характеристик судна прогнозировать его предполагаемые экономические свойства.

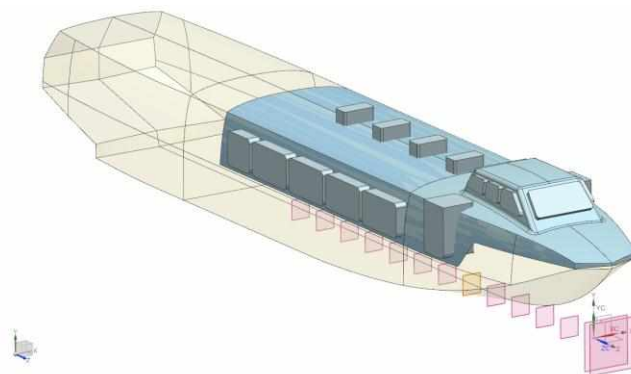


Рис. 8. Промежуточный результат декомпозиции теоретического контура надстройки После определения главных размерений и других проектных характеристик судна

следующим этапом является декомпозиция подсистемы «Корпус СПК» на подсистемы второго уровня «Собственно корпус СПК» и «Надстройка СПК из композитов». Алгоритм декомпозиции приведен на рис. 7 слева. Декомпозиция включает определение основных характеристик собственно корпуса и надстройки пассажирского СПК, включая их массу по отдельности, а также положения центра тяжести (ЦТ) судна и отдельных элементов его корпуса. Следует отметить, что к положению ЦТ судна в конструкции СПК предъявляются достаточно жесткие требования [3, 6]. Особенности декомпозиции подсистемы «Корпус» скоростного судна и выделения из нее подсистемы «Надстройка из композитов», реализуемые на этапе проектирования, которые в полной мере могут быть применены к пассажирскому СПК, изложены в работе [2]. Особенности определения строительной стоимости скоростного судна, имеющего в конструкции крупные элементы из композитов, реализуемые на этапе проектирования, которые в полной мере могут быть применены к пассажирскому СПК, изложены в работе [1].

Проектированию надстройки из композитов для пассажирского СПК должна предшествовать разработка чертежей общего расположения судна, в процессе которой производится уточнение размеров его корпуса. При этом корректируются проектные характеристики СПК с использованием данных типоразмерного ряда.

В результате выполненного проектного анализа с учетом ограничений определены проектные характеристики проектируемого пассажирского СПК, близкие СПК проектов 17091 «Полесье» и «Валдай-45Р» (рис. 1, справа). В связи с минимумом информации по СПК «Валдай-45Р» в качестве судна-прототипа выбрано пассажирское СПК проекта 17091 «Полесье».

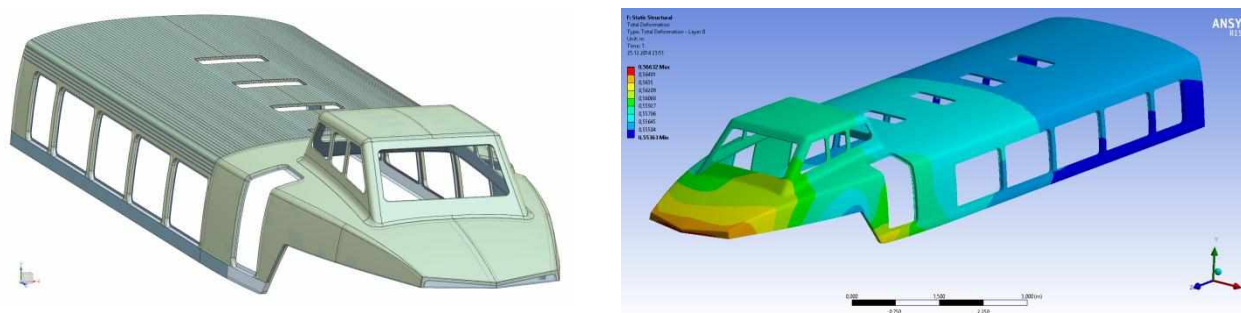


Рис. 9. Внешний вид и прогибы надстройки СПК из композитов

Следующим этапом является разработка теоретического чертежа корпуса и надстройки СПК. При этом назначение судна, его мореходные качества и район эксплуатации в большой степени определяют архитектурно – компоновочную схему судна и схему его крыльевого устройства, придавая больший или меньший динамизм его облику [3, 6]. При разработке формы надстройки из композитов пассажирского СПК необходимо рассматривать форму его надводной части вплоть до ватерлинии. Это требуется для определения аэро- и гидродинамического обтекания корпуса судна. Важно учитывать, что форма подводной части корпуса и прилегающей к ней части надводного борта пассажирского СПК определяется его функциональным назначением, особенностями движения, в первую очередь, особенностями крыльевого устройства, а также необходимостью обеспечения судну определенных мореходных качеств. Гидростатические и гидродинамические закономерности определяют форму указанных элементов корпуса в несопоставимо большей степени, чем эстетические соображения. Кроме того, необходимо определить участки корпуса СПК (включая элементы надстройки), которые в процессе эксплуатации могут подвергаться ударам волны, в том числе, при зарывании корпуса [3, 6, 7]. Промежуточный результат декомпозиции теоретического контура надстройки приведен на рис. 8.

Особенности процесса создания надстройки СПК из композитов заключаются в том, что конструкция, композит и технология его изготовления разрабатываются одновременно. При этом также используются вариативные методы. Необходимо выполнять проверку массы надстройки, а также прочности и устойчивости ее отдельных элементов приближенными методами для получения укрупненных проектных характеристик до разработки конечно-элементных моделей. Алгоритм выполнения проектных обоснований при проектировании подсистемы второго уровня «Надстройка СПК из композитов» приведен на рис. 7 справа.

Разработка компьютерной модели надстройки из полимерных композитов пассажирского СПК проводилась в два этапа. Геометрия разрабатывалась в среде разработки – трехмерном модуле Siemens NX Modelling (рис. 9, слева). Далее полученная компьютерная модель передавалась в программы конечно-элементного анализа в качестве исходной геометрии. Кроме того, на ее основе разработаны схемы: армирования надстройки; расположения каркаса среднего слоя; локальных подкреплений надстройки. Весь рабочий проект создавался в среде моделирования Ansys Workbench (рис. 9, справа).

Определение внешних нагрузок, действующих на корпус пассажирского СПК, выполнялось в соответствии с известными методиками [3, 6] для расчетных случаев, предусмотренных Разд. 5 Ч. I «Корпус» ПСВП Правил РРР. В рамках прочностного анализа конструкции был выполнен расчеты прочности и устойчивости методом конечных элементов. Результаты выполненных расчетов на прочность модели показывают, что конструкция надстройки из композитов пассажирского СПК удовлетворяет условиям прочности и жесткости.

Московским государственным техническим университетом им. Н.Э. Баумана получен патент на полезную модель № 148323 от 08.05.2014 года «Пассажирское судно на подводных крыльях, имеющее надстройку из композиционных материалов».

Выполненные расчеты показывают, что модернизация проекта судна на подводных крыльях 17091 «Полесье» надстройкой из полимерных композитов в соответствии с изложенными принципами, его пассажировместимость может быть увеличена с 51 чел. до 60 чел. При этом модернизированный проект превосходит по характеристикам экономичности на 33% проект СПК «Валдай-45Р», имеющий пассажировместимость 45 чел. (при той же мощности главного двигателя). Это преимущество обеспечено применением для надстройки пассажирского СПК инновационного решения – конструкции из полимерных композитов.

#### Библиографический список

1. **Францев, М.Э.** Проектное обоснование обеспечения характеристик экономичности и конкурентоспособности скоростного пассажирского судна // Сб. тр. конференции 9-е Прохоровские чтения. – Нижний Новгород. 2013. С. 94–98.
2. **Францев, М.Э.** Проектное обоснование повышения полезной нагрузки амфибийного судна на воздушной подушке за счет применения в его конструкции композиционных материалов // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. 2015. № 1. С. 197–202.
3. **Иконников, В.В.** Особенности проектирования и конструкция судов на подводных крыльях / В.В. Иконников, А.И. Маскалик. – Л.: Судостроение, 1987. – 319 с.
4. Справочник по серийным транспортным судам. – М.: Транспорт, 1972–1994. Т1-10.
5. **Францев, М.Э.** Использование параметрических методов на ранних этапах разработки проекта судна из композитных материалов // Судостроение. 2014. № 3. С. 10–15.
6. Справочник по проектированию судов с динамическими принципами поддержания / Б.А. Колызаев [и др.]. – Л.: Судостроение, 1980. – 170 с.

**M. E. Frantsev**

**PROJECT JUSTIFICATION OF THE CREATION OF THE COMPOSITE  
SUPERSTRUCTURE FOR PASSENGER HYDROFOIL VESSELS USING  
THE PARAMETRIC DESIGN**

Neptun-Sudomontazh, Dolgoprudniy, Moscow rgn.

The design of the superstructure made of polymer composite materials for passenger hydrofoils, is a part of the design of vessel. The superstructure enters to subsystem "hull" as a subsystem. Design optimization of superstructure from composites is directly related to the optimization of the entire vessel. The criterion of economic efficiency of the hydrofoil craft is the condition to minimize fuel consumption on the movement of 1 dwt (payload) at 1 km. Minimization of empty displacement of the passenger hydrofoil craft is provided by ensuring minimization of the mass of the body (which includes and superstructure) ceteris paribus other articles weighing load characteristics of the need to ensure its durability. The set design studies to create of the superstructure from composites for passenger hydrofoil crafts using methods are based on parametric design model series, including projects built passenger hydrofoil crafts using similar hydrodynamic models. All calculations were made by method of regression analysis. This article contains algorithms design.

*Key words:* project rationale, passenger hydrofoil craft, superstructure from composites, regression analysis, parametric design, algorithms design.

УДК 621.744.079:546.26-162

Т.Р. Гильманшина, В.Н. Баранов, С.И. Лыткина, С.А. Худоногов

**РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ ПРОТИВОПРИГАРНЫХ ПОКРЫТИЙ  
НА ОСНОВЕ ГРАФИТОВ, АКТИВИРОВАННЫХ  
С ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ**

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Исследованы свойства противопригарных покрытий на основе скрытокристаллического графита, активированных с поверхностно-активными веществами. Для исследований выбран графит Ногинского месторождения Красноярского края. В качестве ПАВ были использованы: карбоксиметилцеллюлоза, вода, лигносульфонат технический, синтетическое моющее средство, жидкое стекло и этилсиликат. Полученные результаты показали значительные преимущества противопригарных красок на основе графита, активированного с поверхностно-активными веществами, в состав которых входят сильфо-группы.

*Ключевые слова:* графит, механоактивация, поверхностно-активные вещества, карбоксиметилцеллюлоза, вода, лигносульфонат технический, синтетическое моющее средство, жидкое стекло и этилсиликат, противопригарные краски.

Повышение эффективности производства отливок за счет приближения их размеров к размерам готового изделия является актуальной задачей на всех этапах развития литейного производства. Решение этой задачи зависит в значительной степени от качества исходных формовочных материалов, используемых для приготовления смесей и покрытий [1–4].

Низкий коэффициент теплового расширения, несмачиваемость металлами и шлаками, высокая прочность при высоких температурах, а также ряд других свойств делают природные и искусственные графиты незаменимым вспомогательным материалом в литейном производстве. Наибольшее предпочтение при этом отдается скрытокристаллическому графиту, месторождения которого сосредоточены в Красноярском крае. Это связано с тем, что скрытокристаллические обладают большей дисперсностью. Однако низкое качество красноярского графита не дает возможности получать из него тигли, смазки, модификаторы, карбюризаторы, графитовые формы и другие изделия для литейного производства.

На кафедре «Литейное производство» под руководством д-ра техн. наук, профессора Маминой Л.И. были разработаны методы, повышающие качество скрытокристаллического графита месторождений Красноярского края [5, 6].

Цель данной работы – исследовать свойства противопригарных покрытий, основой которых служат скрытокристаллические графиты, активированные поверхностно-активными веществами.

Для исследований был выбран графит Ногинского месторождения. Основным минералом в этих рудах является графит, второстепенными – нерудные минералы, сульфиды и углистое вещество. Графит этих месторождений относится к высокозольному скрытокристаллического типа [7]. Нерудные минералы представлены кварцем, полевым шпатом, кальцитом, хлоритом [7, 8]. Растворимая в серной кислоте форма железа для Ногинского месторождения достигает 4,8 %. Содержание примесей может достигать 60 %, однако в среднем для обоих месторождений составляет 7–25 %.

В качестве ПАВ были выбраны следующие: карбоксиметилцеллюлоза (К-1), лигносульфонат технический (Л-1), синтетическое моющее средство (С-1), жидкое стекло (Ж-1), этилсиликат (Э-1). Активация графита осуществлялась в планетарно-центробежной мельнице АГО-2.

Средний размер частиц, общая поверхность и фракционный состав определяли методом светолазерного рассева в Новосибирском институте химии твердого тела на PRO-7000.



Коэффициент шероховатости поверхности, учитывающий угловатость и микропористость частиц, рассчитывался как отношение общей поверхности, полученной в результате исследований, к расчетной поверхности.

Для оценки коэффициента формы частиц графитов была принята пятибалльная шкала, в которой максимальный балл соответствовал сферической форме частиц, а минимальный – осколочной.

Форму и микрорельеф частиц определяли на электронном микроскопе просвечивающего типа УЭВМ-100К и растровом электронном микроскопе JEOL JSM-7001F. Аморфизацию решетки и дефектность структуры оценивали косвенно по интенсивности и ширине характерных пиков на рентгенограммах, снятых на дифрактометре ДРОН-3. Для изучения элементного и фазового состава использовали рентгеновский дифрактометр XRD-7000.

Параметры Ногинского графита, активированного с ПАВ, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры Ногинского графита, активированного с ПАВ

Свойства	ГЛС-3(Н)	ПАВ					
		К-1	Л-1	С-1	Вода	Ж-1	Э-1
Распределение частиц, % по фракциям, мкм:							
< 1	39,00	59,3	53,7	52,80	45,7	43,9	41,3
1–50	58,40	40,7	48,3	47,20	54,3	56,1	57,5
> 50	2,60	0	0	0,00	0	0	1,2
Средний размер частиц, мкм	12,00	6,0	7,2	7,30	9,5	10,2	11,2
Общая поверхность, $\times 10^3$ , $\text{см}^2/\text{см}^3$	13,20	20,3	18,4	18,30	15,0	14,5	13,8
Коэффициент формы	1,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,5
Коэффициент угловатости	2,65	2,04	2,40	2,22	2,40	2,46	1,03
Интенсивность пика, мм	41,00	36,00	34,00	35,00	34,00	36,00	35
Ширина пика, мм	123,00	127,00	129,00	120,00	129,00	140,00	136
Содержание углерода, %	81,34	81,69	81,27	81,69	81,27	80,93	0,99
Зольность, %	18,66	18,31	18,73	18,31	18,73	19,07	0,95

Наибольшую дисперсность ГЛС-3 достигает при активации с К-1 и Л-1: средний размер частиц снижается до 6–7 мкм при увеличении общей поверхности 18 500–20 400  $\text{см}^2/\text{см}^3$ . Содержание частиц размером 1–10 мкм, являющихся наиболее активной частью графита, составляет 54–59 %, коэффициент шероховатости поверхности и коэффициент формы – по 2 балла.

Средний размер частиц графита, активированного с неорганическими связующими Ж-1 и Э-1, составляет 10–11 мкм при общей поверхности 13 800–14 500  $\text{см}^2/\text{см}^3$ , содержание частиц размером 1–10 мкм составляет 54–59 %. Коэффициент шероховатости поверхности составляет 2,5–2,6 баллов, коэффициент формы – 2–2,5 балла.

К-1 и Л-1 являются отходами деревоперерабатывающей промышленности. Л-1 – типичный олигомер, т.е. полимерная коллоидная система, структурное звено которой содержит сульфогруппу и гидроксильную группу. К-1 – высокомолекулярное вещество, также содержащее сульфогруппы.

Вероятно, сульфогруппы и гидроксильные группы, присутствующие в этих веществах, в процессе активации адсорбируются на поверхности частиц графита и ослабляют связи между его частицами, что и приводит к повышению интенсивности измельчения. Это предположение подтверждает и тот факт, что дисперсность графита, активируемого с С-1, в составе которого присутствуют алкилсульфаты, алкилсульфонаты и алкилоламыды, незначительно отличается от дисперсности, достигаемой при активации графита с ЛСТ.

Средний размер частиц графита, активированного с водой, составляет 9,5 мкм при общей поверхности 15 000  $\text{см}^2/\text{см}^3$ . Особенностью графита, активированного с водой, является то, что в процессе активации часть порошка прилипает к шарам и стенкам цилиндров,

что также уменьшает интенсивность измельчения. Также можно предполагать, что механические свойства влажного графита связаны с образованием коагуляционных структур из частиц графита, соединенных между собой тонкой прослойкой воды. Наименьшая эффективность измельчения, вероятно, будет соответствовать наибольшей прочности коагуляционной структуры порошка. Наименьшая эффективность измельчения соответствует оболочке воды в несколько насыщенных мономолекулярных слоев. При дальнейшем увеличении толщины прослоев воды между частичками происходит ослабление коагуляционной структуры, что и приводит к повышению интенсивности измельчения. Одновременно оболочки воды могут предохранять частицы графита от агрегации. Эти предположения находятся в полном соответствии с теорией коагуляционного структурообразования, согласно которой прочность таких структур определяется ван-дер-ваальсовыми силами, эффективность действия которых распространяется на несколько молекулярных радиусов.

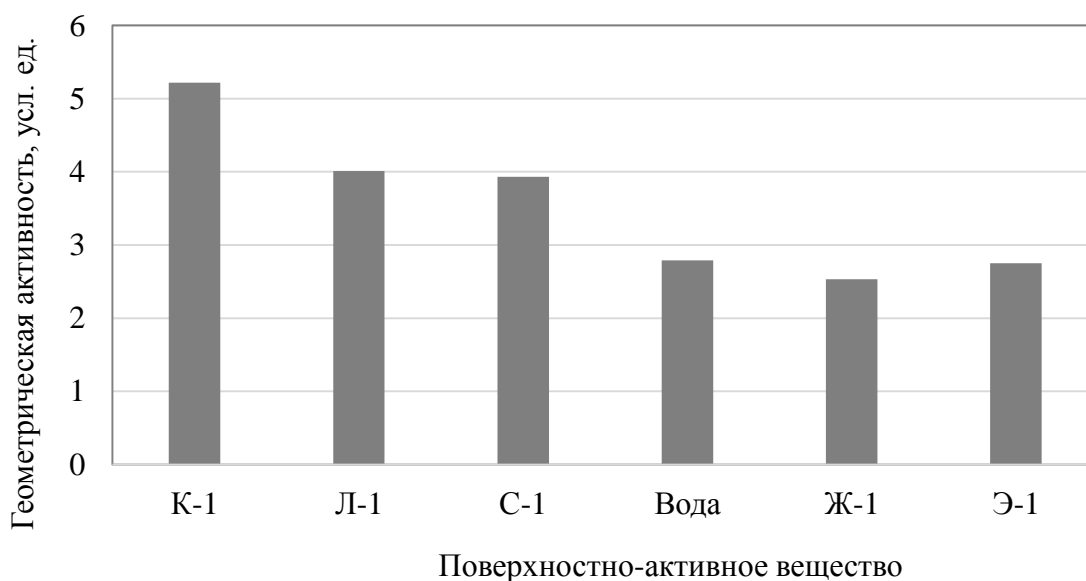


Рис. 1. Геометрическая активность графитов, активированных с ПАВ

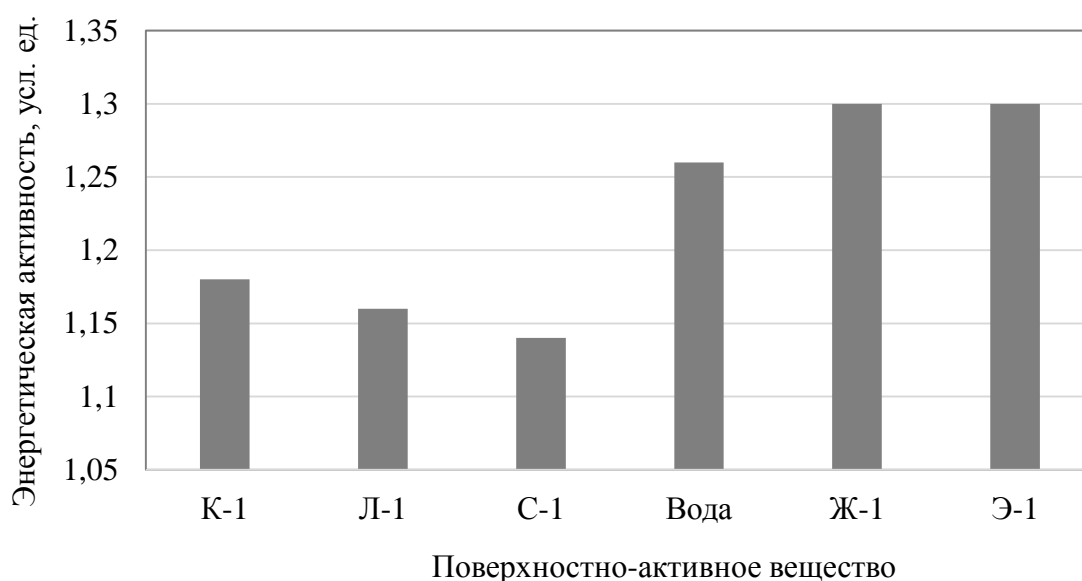
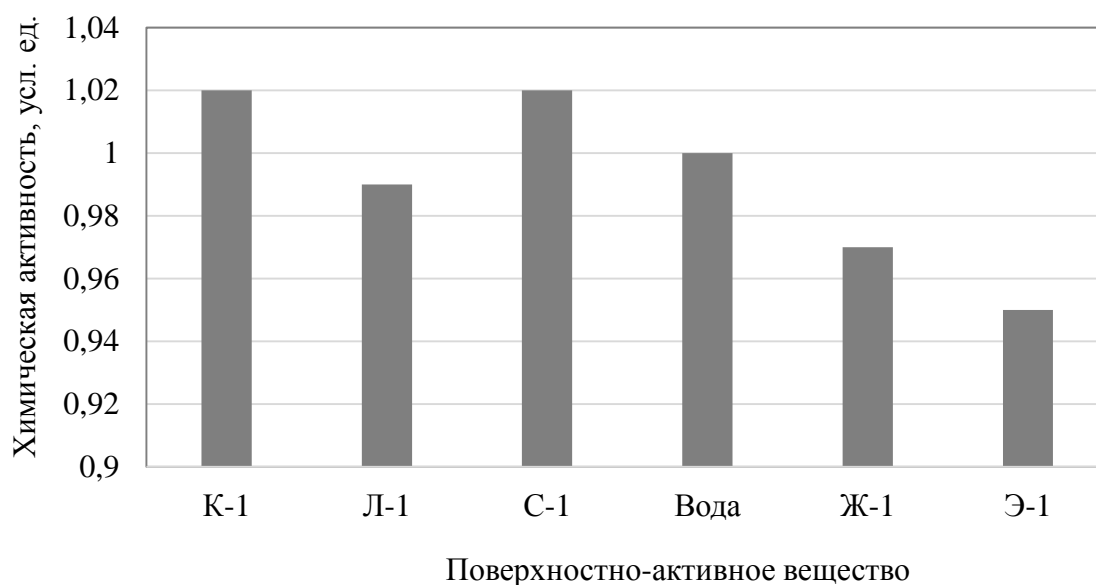
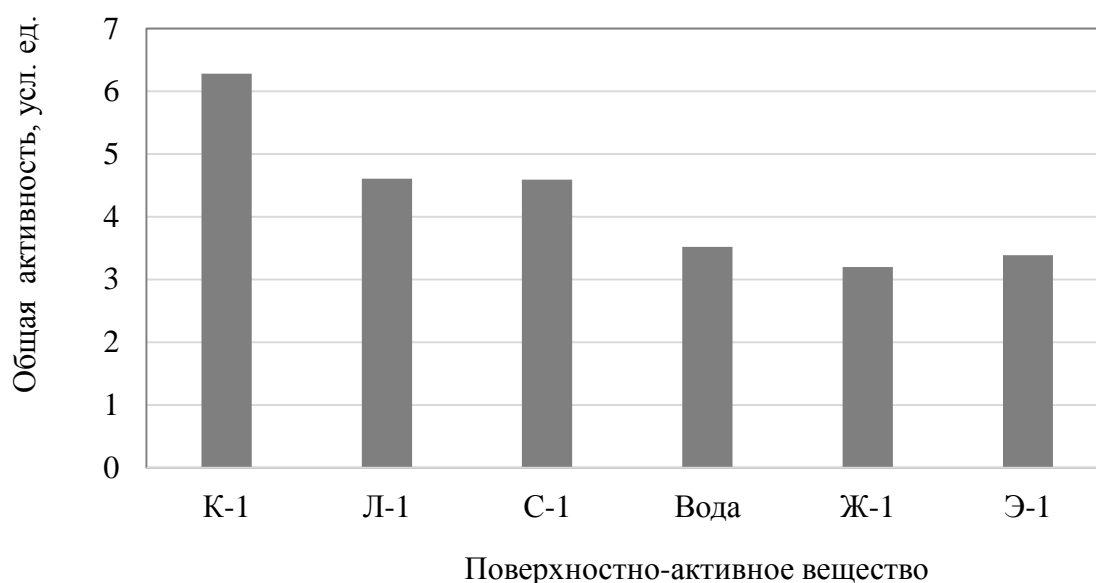


Рис. 2. Энергетическая активность графитов, активированных с ПАВ



**Рис. 3. Энергетическая активность графитов, активированных с ПАВ**



**Рис. 4. Энергетическая активность графитов, активированных с ПАВ**

В отличие от К-1, Л-1, С-1 и воды средний размер частиц графита, активированного с Ж-1 и Э-1, составляет 10-11 мкм, что можно объяснить отсутствием в их составе сульфогрупп и гидроксильных групп. Неорганическое связующее Ж-1 представляет собой соединение кварца с солями щелочных металлов. Связующее Э-1 – кремнийорганическое связующее, молекулы которого состоят из чередующихся атомов кислорода и кремния, обрамленных органическими радикалами: метильными ( $-\text{CH}_3$ ), этильными ( $-\text{C}_2\text{H}_5$ ), фенольными ( $-\text{C}_6\text{H}_5$ ) и др.

Таким образом, наиболее оптимальными ПАВ можно считать вещества, содержащие в своем составе гидроксильные группы и сульфогруппы.

Расчет активности графита оценивали по методике, описанной в работе [9]. Результаты расчетов приведены на рис. 1–4.

Из представленных данных видно, что в процессе механоактивации наиболее существенно увеличивается геометрическая активность, изменяемая в результате трансформации геометрических параметров.

Энергетическая активность графитов, активированных с Ж-1 и Э-1, имеет максимальные значения. Объясняется это тем, что сульфогруппы, сорбируясь на поверхности графитов, препятствуют процессу аморфизации. Химический состав графитов в процессе активации существенно не изменяется, поэтому химическая активности находится в пределах от 0,95 до 1,02, т.е. практически не изменяется.

Химический и дисперсный составы, а также кристаллохимическое строение графитов определяют технологические свойства этих красок. В табл. 2 приведены результаты испытаний активированных с ПАВ графитов на свойства водной графито-бентонитовой краски ГБ-3. Свойства покрытия определяли по ГОСТ 10772–78.

Таблица 2

**Свойства водной графито-бентонитовой краски на основе скрытокристаллического графита, активированного с ПАВ (плотность 1,42 г/см<sup>3</sup>)**

Свойства	без до- бавки	ПАВ					
		К-1	Л-1	С-1	вода	Ж-1	Э-1
Вязкость, с	7	54	52	52	62	56	68
Приведенная прочность, кг/мм	2	22,27	25,1	4	8,98	4,7	5
Седиментационная устойчи- вость через 3 ч, %	83	100	100	98	100	99	99
Толщина покровного слоя, мм	0,75	0,2	0,3	0,45	0,45	0,4	0,4
Толщина проникающего слоя, мм	0,1	0,7	0,65	0,45	0,5	0,5	0,5

### Заключение

Анализ полученных данных показал, что противопригарные краски, выполненные на основе графита, активированного К-1 и Л-1, обладают наибольшей приведенной прочностью, что обеспечивается за счет улучшения их геометрических параметров графита.

В результате образования коагуляционных структур между частицами графита и воды противопригарное покрытие, выполненное на основе графита, активированного с водой, обладает достаточно высокой приведенной прочностью и седиментационной устойчивостью. Покрытие имеет достаточно высокую термостойкость (50 %), однако после прокаливания на поверхности образцов образовались поры, что свидетельствует об удалении воды. Это не позволяет рекомендовать данное покрытие, так как пары могут привести к образованию газовой пористости на поверхности отливок. Указанный недостаток, но в меньшей степени, характерен для покрытий, выполненных на основе графита, активированного с Л-1 и С-1.

Покрытия, выполненные на основе графитов, активированных с жидким стеклом и этилсиликатом, не обладают удовлетворительными свойствами из-за низкой дисперсности.

Таким образом, проведенные испытания показали, что использование в составе покрытий графитов, активированных с ПАВ, позволяет повысить свойства противопригарных покрытий.

### Библиографический список

1. **Крюкова, И.С.** Экологические аспекты применения отходов гальванического производства в качестве наполнителя противопригарного покрытия / И.С. Крюкова, С.В. Беляев, И.О. Леушин // Черные металлы. 2008. № 8. С. 9–11.
2. **Илларионов, И.Е.** Некоторые вопросы и особенности применения металлофосфатных смесей для получения отливок из черных металлов и сплавов / И.Е. Илларионов [и др.] // Труды Ни-

- жегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева № 4(97). С. 262–265.
3. **Кукуй, Д.М.** Теория и технология литейного производства: формовочные материалы и смеси. Искусственная сушка горных пород / Д.М. Кукуй, Н.В. Адриянов. – Мн.: БНГУ, 2005. – 361 с.
  4. Формовочные материалы и технология литейной формы: справочник / С. С. Жуковский [и др.]; под ред. С. С. Жуковского. – М.: Машиностроение, 1993. – 432 с.
  5. **Мамина, Л.И.** Перспективные способы обогащения графита / Л.И. Мамина, Г.А. Королева, Т.Р. Гильманшина // Литейное производство. 2003. № 2. С. 16–18.
  6. **Гильманшина, Т.Р.** Разработка способов повышения качества литейного графита отдельными и комплексными методами активации: автореф. дисс. ... канд. техн. наук // Т.Р. Гильманшина. Южно-Уральский государственный университет. – Красноярск, 2004.
  7. **Мельников, И. И.** Состояние и перспектива развития сырьевой базы графита СССР / И. И. Мельников, В. С. Веселовский. – М.: ВНИИМС, 1967. Вып. 9.
  8. **Кавицкий, М.А.** Ногинское месторождение графита / М.А. Кавицкий, А.В. Поспелов. – Красноярск, 1977. – 50 с.
  9. **Гильманшина, Т.Р.** Разработка методики оценки свойств противопопригарных покрытий по активности огнеупорного наполнителя / Т.Р. Гильманшина [и др.] // Труды XII съезда литейщиков России / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2015. С. 379–382.

*Дата поступления  
в редакцию 15.01.2016*

**T. R. Gilmanshina, V. N. Baranov, S. I. Lytkina, S. A. Khudonogov**

## **DEVELOPMENT OF COMPOSITION NONSTICK COATINGS BASED ON GRAPHITE, ACTIVATED WITH SURFACTANTS**

Siberian federal university, Krasnoyarsk

The properties of nonstick coatings based cryptocrystalline graphite, activated with surfactants. For studies selected Noginsk graphite deposits in Krasnoyarsk Territory. The surfactants were used as carboxymethylcellulose, water, technical lignosulfonate, synthetic detergent, liquid glass and ethyl silicate. The results showed significant advantages antiburining inks based on graphite, activated with surfactants, which include silfogruppy.

*Key words:* Graphite, mechanical activation, surfactants, carboxymethylcellulose, water lignosulfonate, technical, synthetic detergent, liquid glass and ethyl silicate, antiscorching paint.

УДК 621.745.58:621.791.72.

С.Н. Жеребцов<sup>1</sup>, Е.А. Чернышов<sup>2</sup>**ОСОБЕННОСТИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ФЛЮСОВ,  
ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ТЕХНОЛОГИЯХ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА**Омский государственный педагогический университет,<sup>1</sup>  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева<sup>2</sup>

Обобщены результаты экспериментальных исследований и теоретические данные по физико-химическим свойствам и функциям флюсов, применяемых для ведения устойчивых процессов переплава, литья, сварки в различных металлургических технологиях электрошлакового переплава. Рассмотрены энергетические связи катионов с анионами в шлаковых системах различных марок флюсов и их физические свойства. Предложены формулы расчета плотности и основности шлаковых расплавов в зависимости от химического состава флюсов. Исследованы физические плотности, приведены результаты прямых замеров температуры плавления различных флюсов и металлов, сплавов при электрошлаковом переплаве.

*Ключевые слова:* электрошлаковый переплав, флюсы, химический состав, физические свойства, плотность, температура, жидкий шлак, металл.

Проблема получения качественного металла, с заданными физико-механическими свойствами и служебными характеристиками по-прежнему является одной из главных задач в современном мировом металлургическом, литейном производстве, от которой напрямую зависит прогресс во многих отраслях народного хозяйства.

Существует ряд технологических процессов получения качественного литого металла – вакуумно-индукционный переплав, вакуумно-дуговой переплав, электронно-лучевой переплав, имеющие свои достоинства и недостатки и определенные технические ограничения. Они не решают проблему в целом.

Потребление флюсов (шлаков) на основе  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{SiO}$ ,  $\text{NaF}$  и т.д. в металлургическом производстве быстро растет. Это обусловлено созданием и внедрением в производство новых методов выплавки качественных сталей и сплавов, к которым предъявляют особые требования физико-химических свойств металлургических флюсов [4, 6].

Шлак является неотъемлемой составляющей каждого процесса (ЭШТ) электрошлаковых технологий, т.е. переплава, литья и т.д. Эффективность, производительность процессов зависит от его свойств, определяющих, главным образом, химическим составом применяемых ингредиентов флюсов.

В результате исследования физико-химических и электрохимических свойств оксидно-фторидных расплавов  $\text{CaF}_2 - \text{Me}_a\text{O}_b$  (Me - Ca, Mg, Al, B, Si, Ti, V, Nb и т.д.) можно сделать некоторые выводы. Характер политейм удельной электропроводности двойных и тройных систем флюсов указывает преимущественно на их ионную проводимость. Замена ионов  $\text{F}^-$  на ионы  $\text{O}^{2-}$  сопровождается уменьшением электропроводности.

Теоретические оценки эквивалентной электропроводности в предложении чисто ионной проводимости показывают, что расхождение с экспериментом обусловлено либо процессами ассоциации в расплавах, содержащих  $\text{B}_2\text{O}_3$  и  $\text{SiO}_2$ , либо электронной составляющей проводимости оксидов *d*-элементов ( $\text{V}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  и т.д.).

Эксперименты по изучению испарения компонентов из расплавов показали, что количество возгонов при введении в  $\text{CaF}_2 - \text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$ ,  $\text{TiO}_2$  и т.п., увеличивается, что коррелирует с расчетами свободной энергии Гиббса для реакций образования фторидов этих элементов и с температурой их кипения.

При электрохимических исследованиях оксидно-фторидных расплавов в качестве «электрода сравнения» был выбран кислородный электрод. Термодинамические расчеты стандартных электродных потенциалов дают следующие ряды напряжений относительно нулевого кислородного потенциала при 1800 К°:

Оксиды - Ca, Al, Li, Ti, B, Si, Mn, Nb, Cr, Fe, W, Ni, O

Фториды - Ca, Li, Mg, B, Al, Si, Ti, Mn, Cr, Nb, Fe, Ni, W, F

После анализа процессов электролиза различных флюсов при электрошлаковом переплаве и проведения исследовательских работ, получены экспериментальные данные, на основе которых разработаны рекомендации о возможности использования электрохимического модифицирования и легирования переплавляемого металла элементами, восстанавливаемыми из шлака. Разработаны специальные составы модифицирующих флюсов, содержащие различные легирующие добавки для переплава углеродистых конструкционных, высококачественных легированных сталей и жаропрочных сплавов, а также сплавов с особыми физическими свойствами.

Есть несколько общих функций, которые шлак выполняет в электрошлаковых процессах. Это, прежде всего, энергопреобразующая функция. Шлак является участком электрической цепи с высоким сопротивлением, на котором происходит преобразование электрической энергии в тепловую. Кроме того, он выполняет теплопередающую функцию, от которой зависит энергетическая эффективность процесса. Эта эффективность тем выше, чем полнее и интенсивнее шлак передает теплоту металлу.

Шлаковая ванна – источник тепла при ЭШП. При прохождении электрического тока через шлаковую ванну (электропроводный шлаковый расплав) в ней выделяется тепло, достаточное для осуществления ЭШП. Количество его определяется по формуле  $Q = 0,24I^2R_m t$ , кал/с, где  $I$  – сила тока;  $R_m$  – сопротивление шлаковой ванны;  $t$  – время процесса.

Удельный расход электроэнергии зависит от величины электрического сопротивления шлака: чем выше второе, тем меньше первый. Высокое сопротивление шлаковой ванны способствует повышению скорости переплава электродов и увеличению производительности процесса. Однако не все выделяющееся в шлаковой ванне тепло расходуется на расплавление электрода, поддержание в жидком состоянии шлаковой и металлической ванн. Часть тепла (около 30-40 %) отводится водой (охладителем), охлаждающей кристаллизатор, и около 10-20 % излучается зеркалом шлаковой ванны, и только около 30-50 % затрачивается на расплавление расходуемого электрода.

Характер распространения тепла в процессе ЭШП зависит от различных электрических и технологических факторов: от типа электрической схемы процесса переплава; принятого электрического режима; количества и химического состава флюса; соотношения размеров электрода и плавильной ёмкости, литейной формы; свойств переплавляемого металла и др. Поэтому реальные энергозатраты при ЭШП существенно выше (1250-1800 кВт.ч на 1 т отливки), чем теоретически требуемые для расплавления 1 т стали (примерно 400-600 кВт.ч). Получается, что только на расплавление самих расходуемых электродов тратится около 40-55 % подводимой активной мощности. Такая, на первый взгляд, неэффективная трата электроэнергии в сфере производства окупается надежной и долговременной работой изделий, полученных с использованием технологии ЭШП, в сфере промышленного применения.

Еще одной важной функцией флюса является рафинирующая способность шлаков в процессе ЭШП. Расплавленный флюс должен обладать максимальным межфазным натяжением на границе с жидким металлом и минимальным - с неметаллическими включениями. Реакционная способность флюса должна обеспечивать удаление вредных примесей, и в то же время не вызывать взаимодействия его компонентов с легирующими компонентами переплавляемого электрода.



Флюс должен содержать минимально возможное количество нестойких соединений для обеспечения постоянства химического состава металла (слитка, сварного шва и т.п.) по ходу всего процесса. Кроме того, он должен обеспечивать легкое возбуждение электрической дуги и высокую стабильность электрошлакового процесса. Шлак имеет температуру плавления ниже и плотность меньше, чем у свариваемого, наплавляемого, переплавляемого или рафинируемого металла.

Важна и защитная функция флюса - шлак должен изолировать металл от вредного воздействия окружающей атмосферы (среды). Применение флюса должно быть экономически целесообразно и не оказывать вредного влияния на здоровье человека.

Наряду с общими требованиями, предъявляемыми к флюсам ЭШТ, существует и ряд индивидуальных, характерных для каждого из процессов.

Специфичны для электрошлаковой сварки (ЭШС) следующие требования: расплавленный флюс должен обеспечивать достаточное проплавление кромок основного металла и удовлетворительное формирование поверхности сварного шва, без образования подрезов и наплывов; он не должен вытекать между кромками изделия и формирующими шов устройствами и не отжимать ползуны от свариваемых заготовок, его задача способствовать предотвращению образования пор и горячих трещин, а шлаковая корка должна легко удаляться с поверхности шва. Последнее требование важно и для процесса электрошлаковой наплавки (ЭШН), при которой в связи с низкой скоростью охлаждения существует опасность образования окисленного слоя не границе затвердевшего металла со шлаком, препятствующему удалению шлаковой корки с наплавленного металла.

При ЭШП резко возрастает длительность процесса, а следовательно, к флюсам предъявляются более жесткие требования по стабильности химического состава, достаточной рафинировочной емкости, физическим свойствам.

К флюсам для электрошлакового кокильного литья (ЭКЛ) и центробежного электрошлакового литья (ЦЭШЛ) дополнительно предъявляется требование по максимальной индифферентности по отношению к материалу футеровки тигля.

В случаях электрошлаковой разливки (ЭШР) длительность заполнения кристаллизатора (изложницы) невелика, поэтому скорость образования гарнисажа должна быть высокой. Кроме того, к гарнисажу предъявляется требование прочности, так как длительный период выдерживает значительное ферростатическое давление жидкого металла. Во всех процессах, предусматривающих использование расходующих электродов, повышается требование к рафинирующей (десульфуризирующей) способности флюсов.

Шлаковые системы представляют собой солевые, оксидные или оксидно-солевые расплавы, и эффективность процессов ЭШТ будут определяться числом и соотношением компонентов флюса, варьируя которыми, можно изменять температуру его плавления, электрическую проводимость, вязкость, поверхностное натяжение и другие свойства.

Требование гомогенности шлаковой ванны при рабочих температурах процессов делает необходимым использование флюса с температурой плавления ниже температуры ликвидуса металла или сплава. Причем для ЭШС и ЭШН применяются флюсы, у которых эта разница температур достигает 280-460 °С, для ЭШП в стационарный кристаллизатор — 200-350 °С, в подвижный — до 400 °С. В случае ЭШР температура затвердевания флюса должна быть близка к температуре кристаллизации стали.

Эти различные для каждого из процессов требования диктуются тем, что при ЭШС более тугоплавкий флюс может вызвать отжимание ползунов. При ЭШР конечным продуктом является жидкий металл, и снижение температуры плавления шлака позволяет избежать его перегрев, но существует опасность образования заливин при низкой температуре плавления флюса.

При ЭШП различные механические свойства флюсов делают невозможным их применение одновременно при проведении процесса в стационарном и подвижном кристаллизаторах. При переплаве в стационарный кристаллизатор необходима стабильность толщины гар-

нисажного слоя по всей высоте слитка, а при переплаве в подвижный кристаллизатор - еще и устойчивость гарнисажа против растягивающих усилий.

Приведем примеры необходимых температур плавления флюсов: для ЭШР меди и бронз температура плавления 920-1050 °С (температура выпуска металла 1150-1240 °С; латуни - 950-1100 °С ; алюминия - не более 800 °С, чугуна - 1350-1480 °С; стали - 1640-1870°С). При переплаве металлов, входящих в основу химического состава всех сталей и сплавов, применяются соотношения температур плавления, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Температура плавления флюсов и металлов, °С

	Cu	Mn	Ni	Fe	Ti	Zr	Cr
Металл	1084	1244	1455	1539	1665	1852	1903
Флюс	980	1150	1350	1420	1340	1630	1800

Такие соотношения обусловлены тем, что использование легкоплавкого флюса может явиться причиной его испарения. Применение более тугоплавких флюсов увеличивает объем и глубину металлической ванны, что незамедлительно сказывается на кристаллической структуре слитка. Самую низкую температуру плавления имеют солевые флюсы, самую высокую - оксидные. Промежуточное положение между ними занимают оксидно-солевые флюсы. Температуры плавления ряда однокомпонентных флюсов, используемые в металлургическом производстве, даны в табл. 2 [7, 8].

Таблица 2

Температура плавления флюсов, применяемых в производстве ЭШР, °С

CaF <sub>2</sub>	CaCl	CaO	NaF	NaCl	Na <sub>3</sub> AlF <sub>6</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgF <sub>2</sub>	MgCl <sub>2</sub>
1400	772	2580	992	801	1035	2050	1263	707
BaF <sub>2</sub>	BaCl <sub>2</sub>	BaO	LiF	LaF <sub>3</sub>	La <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CeO <sub>2</sub>	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
1280	960	1920	890	1430	2320	2700	2415	1610
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	MnO	LiCl	CsF	LiF	MgO	TiO <sub>2</sub>
680	290	2700	1842	614	692	870	2800	1870

Таблица 3

Температуры в °С плавления расходуемых электродов и флюсов в плавильной ёмкости при ЭШР, °С

Марка расходуемого электрода	Ст20	Ст. 09Г2С, 17Г1С	10Г2ФБЮ	15Х5М	Х18Н10Т	Х17Н13М3Т
Жидкий металл	1650/1740	1670/1720	1690/1740	1710/1860	1650/1770	1660/1800
Жидкий флюс	1790/1960	1810/1980	1850/2030	1940/2240	1890/2150	1950/2140
Марка расходуемого электрода	Х23Н18	ЭП202	ЖС6-У	ЖС3-ДК	ЖС6-К	Чугун Сч20
Жидкий металл	1680/1760	1610/1780	1520/1650/1800	1510/1640/1780	1540/1640/1800	1340/1480
Жидкий флюс	1960/2120	1780/2050	1780/1920/2170	1760/1930/2140	1790/1910/2160	1580/1710

На основе разработанной физической модели взаимодействия жидкого флюса и металла в процессе электрошлакового переплава проведены научно-исследовательские работы на

базе ЗАО «Омский завод специальных изделий», ОАО « Омский научно-исследовательский институт технологии машиностроения» по определению оптимальных химических составов флюсов и температур переплава расходоуемых электродов. Данные исследования проводились на протяжении ряда лет и получены практические результаты, которые используются на металлургическом производстве для получения качественных изделий из сталей и сплавов.

В табл. 3 приведены рекомендуемые температуры ( $^{\circ}\text{C}$ ) как расплавленного флюса, так и жидкого металла. Замеры температур проводили прямым методом- опусканием термомпары в жидкий металл и шлак на протяжении всего процесса электрошлакового переплава (табл. 3).

Плотность жидкого шлака также является его определяющим физическим свойством, влияющим на параметры ведения процесса ЭШЛ ( электрошлакового литья) [1, 7] Наименьшую плотность имеют солевые флюсы. Например, у флюса АНФ-1П при  $1450^{\circ}\text{C}$  плотность составляет  $2,52 \text{ г/см}^3$  и снижается при вводе других солей (например, плотность  $\text{NaF} - 1,95 \text{ г/см}^3$ ;  $\text{NaCl} - 1,55 \text{ г/см}^3$ ;  $\text{Na}_3\text{AlF}_6 - 2,09 \text{ г/см}^3$ ).

Добавка 50 %  $\text{MgF}_2$  уже при  $1150^{\circ}\text{C}$  приводит к понижению плотности шлака до  $2,5 \text{ г/см}^3$ . В окисно-солевых флюсах ввод оксидов повышает плотность, что объясняется повышением плотности упаковки частиц в расплаве. Так, при добавлении  $\text{CaO}$  происходит замена анионов  $\text{F}^-$  ( $r_{\text{F}^-}=0,33 \text{ нм}$ ) на  $\text{O}^{2-}$  ( $r_{\text{O}^{2-}}=0,132 \text{ нм}$ ), хотя их радиусы близки, но различны заряды, а это сказывается на энергии их связей с катионами  $\text{Ca}^{2+}$ . Плотность флюса АНФ-7 при  $1450^{\circ}\text{C}$  составляет  $2,63 \text{ г/см}^3$ .

Еще в большей степени повышает плотность шлаковых расплавов ввод глинозема  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Энергия связи катионов  $\text{Al}^{3+}$  с анионами  $\text{O}^{2-}$  больше, чем  $\text{Ca}^{2+}$  с  $\text{F}^-$  в силу различия эффективных ионных радиусов ( $r_{\text{Al}^{3+}}=0,057 \text{ нм}$ ;  $r_{\text{Ca}^{2+}}=0,106 \text{ нм}$ ) и зарядов. Плотность флюса АНФ-6 при  $1450^{\circ}\text{C}$  составляет  $2,88 \text{ г/см}^3$ .

Рост плотности наблюдается и при одновременном вводе в расплав  $\text{CaO}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Так, плотность флюса АНФ-8 при  $1450^{\circ}\text{C}$  составляет  $2,90 \text{ г/см}^3$ . Вероятно, это объясняется образованием комплексов  $\text{Al}_x\text{O}_y^{z-}$ . Также влияет и ввод  $\text{MgO}$ . Катионы  $\text{Mg}^{2+}$  ( $r_{\text{Mg}^{2+}}= 0,078 \text{ нм}$ ), хотя и имеют одинаковый заряд с  $\text{Ca}^{2+}$ , но благодаря меньшему радиусу достигается повышенная плотность упаковки частиц в расплаве из-за появления новых связей  $\text{Mg}^{2+} - \text{O}^{2-}$ .

Наибольшую плотность имеют расплавы оксидных шлаков, плотность которых растёт с вводом  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  и падает с вводом  $\text{SiO}_2$ , приводящим к образованию анионных комплексов  $\text{SiO}_4^{4-}$ , ослабляющих межйонные связи.

Наибольшее влияние на плотность расплавов на основе  $\text{CaF}_2$  оказывают добавки  $\text{ZrO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , затем  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ .

Зачастую плотность применяемых при процессах ЭШТ шлаковых систем в диапазоне рабочих температур не превышает  $3,0 \text{ г/см}^3$ , что существенно не влияет на разделение шлаковой и металлической фаз. С ростом температуры плотность шлаковых расплавов понижается.

Предложена формула (1) расчета [1, 2, 3, 5] плотности шлаковых расплавов при температуре  $1400^{\circ}\text{C}$  в зависимости от их химического состава:

$$\frac{1}{\gamma} = 0,416\text{SiO}_2 + 0,303\text{CaO} + 0,372\text{MgO} + 0,328\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,389\text{CaF}_2 . \quad (1)$$

О прочности связи различных катионов с анионами в шлаковых расплавах судят, сопоставляя значения как ионных радиусов, так и ионных потенциалов. Наиболее высокое значение отношения заряда иона к его радиусу имеют ионы  $\text{Si}^{4+}$ ,  $\text{Ti}^{4+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Zr}^{4+}$ , которые характеризуются большими зарядами и малыми ионными радиусами. Связь этих катионов с анионом кислорода  $\text{O}^{2-}$  должна быть гораздо прочнее связи других катионов. Комплексные анионы при большом радиусе имеют заметно меньший заряд и соответственно более низкие значения отношения заряда к радиусу, чем катионы металлов, кроме катионов  $\text{K}^+$  и  $\text{Na}^+$ , что является показателем слабой связи сложных анионов с катионами.

В расплавленных шлаках катионы и анионы с сильными силовыми полями притягиваются друг к другу с большей силой, а слабые ионы вытесняются и адсорбируются на поверхности расплава, понижая его поверхностное натяжение. Это ионы типа  $Me_xO_2^{z-}$  ( $SiO_4^{4-}$ ;  $Si_2O_7^{6-}$ ;  $Si_3O_9^{6-}$ ;  $MnO_4^{4-}$ ;  $FeO_3^{3-}$ ;  $TiO_3^{2-}$ ;  $CrO_3^{3-}$ ;  $ZrO_3^{2-}$  и др.). Наиболее поверхностно-активным веществом является NaF, с повышением его концентрации, например в системе  $CaF_2 - NaF$ , поверхностное натяжение расплава резко снижается.  $SiO_2$  и  $TiO_2$  также являются поверхностно-активными веществами, хотя и более слабыми.  $ZrO_2$  практически не влияет на поверхностное натяжение, а с повышением концентрации MgO в системе  $Ca_2-Mg$  и  $Al_2O_3$  в системе  $CaF_2-Al_2O_3$  поверхностное напряжение возрастает.[3] CaO оказывает на расплав  $CaF_2-CaO$  меньшее влияние, чем предыдущие два оксида. В этом случае слабые ионы  $Ca^{2+}$  и  $F^-$  заменяются более сильными, и их концентрация в поверхностном слое растет, способствуя повышению связи поверхностных ионов с основной массой расплава. [2]

Плавленый шпат (флюорит)  $CaF_2$  в настоящее время применяется для автоматической сварки, а также для электрошлакового переплава и наплавки высоколегированных нержавеющей хромоникелевых аустенитных сталей и сплавов, титана и других активных металлов. Флюорит  $CaF_2$  представляет собой минерал класса галоидных соединений. Флюорит содержит 51,33 % Ca и 48,67 % F, а также примеси в ничтожном количестве (хлор, газы, редкоземельные элементы, уран, марганец и др.). Плотность плавленого шпата в твердом состоянии составляет примерно 3,18 г/см<sup>3</sup>, температура плавления 1365 °С. Плотность жидкого флюорита при температуре 1400 °С равна 2,40 г/см<sup>3</sup>. Структура кристаллической решетки — кубическая: ионы  $Ca^{2+}$  располагаются по вершинам и в центре граней большого куба, а ионы  $F^-$  - в центре восьми малых кубов, из которых как бы состоит большой куб. Каждый ион  $Ca^{2+}$  окружен восемью ионами  $F^-$ , а каждый ион  $F^-$  — четырьмя ионами  $Ca^{2+}$ . Структура подобно рода носит название флюоритовой.

Шлаки на основе  $CaF_2$  имеют невысокие значения поверхностного натяжения, а повышение межфазного натяжения на границе шлак-металл, благодаря вводу добавок  $Al_2O_3$ , CaO и MgO предопределило применение шлаковых систем на их основе. Это флюсы, нашедшие широкое применение в промышленности: АНФ-6, АНФ-8, АН-291, АН-295 и др. Фтористые шлаки обладают и повышенной адгезией к неметаллическим включениям - оксидам и нитридам.

Вязкость и электрическая проводимость являются наиболее важными технологическими свойствами флюсов. Они определяют интенсивность прохождения физико-химических процессов и технико-экономические показатели ЭШТ. В области рабочих температур вязкость косвенно характеризует рафинировочную способность шлака и его электрическую проводимость, а при температурах кристаллизации металла - характеризует его формирующую способность. Технологические и электрические параметры могут быть предварительно рассчитаны по результатам замеров электрической проводимости шлака.

Из флюсов для ЭШП интерес вызывают флюсы АНФ-28, АНФ-29 и АНФ-32. Вязкость флюсов при охлаждении повышается медленно из-за склонности к образованию кристаллических стеклообразных структур по причине относительно высокого содержания  $SiO_2$ . Среди них флюс АНФ-28 имеет наименьшую температуру плавления (1170 °С) и большой температурный интервал затвердевания. Кроме того, ниже температуры выпадения эвтектики флюсы АНФ-28 и АНФ-29 обладают заметной текучестью, а при достаточно высокой скорости охлаждения (30 – 40 С/мин) эти флюсы еще достаточно текучи (около 1,0 Пас) и при температуре 1100 °С.

Из сварочных флюсов [5,8] наибольший интервал затвердевания имеет флюс АН-8, наименьший - АНФ-1П, который является и наиболее тугоплавким. Флюсы АН-22, АН-348А, ФЦ-7 занимают промежуточное положение.

Вязкость флюсов для термообработки при рабочих температурах 860 - 1150 °С (для АН-ШТ1) и 780 - 880 °С (для АН-ШТ2) не превышает 0,8 Пас.

Из сварочных флюсов наименьшая электрическая проводимость у флюса ФЦ-7, наибольшая - у АН-25. Среди флюсов для переплава наибольшей электрической проводимостью обладают флюсы АНФ-1П и АНФ-7, наименьшей - бесфторидный АН-29. Флюс АНФ-6 занимает промежуточное положение. У флюсов АНФ-28, АНФ-29 и АНФ-82 наблюдается резкое увеличение электрической проводимости при температурах 1720 - 1840 °С.

Устойчивость процессов ЭШТ, хотя и возрастает с повышением электрической проводимости шлаковых расплавов, но в то же время требует ввода более значительной электрической мощности для выделения достаточного количества теплоты в шлаковой ванне.

Все флюсы разделяются на кислые, в которых преобладают такие оксиды, как  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ; основные с преобладающим количеством  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{FeO}$  и нейтральные. Амфотерные оксиды, такие как  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , в кислых шлаках ведут себя как основные, а в основных, как кислые. Хлористые и фтористые соединения - нейтральны.

Для определения основности шлака [2, 3, 5], изучаемого и применяемого в производстве, можно использовать выражение (формула)

$$B = \frac{\text{CaO} + \text{MgO} + B \text{aO} + \text{SrO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaF}_2 + 1/2 \cdot (\text{MnO} + \text{FeO})}{\text{SiO}_2 + 1/2 \cdot (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{ZrO}_2)}, \quad (2)$$

где  $B$  – степень основности флюса;  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaF}_2$  и др. – содержание химических соединений во флюсе, %.

При  $B > 1$  флюс считается основным; при  $B < 1$  – кислым; при  $B \approx 1$  – нейтральным.

Классификация шлаков по степени кислотности или основности является условной. Для сварки и наплавки применяемые флюсы и шлаки имеют кислотность  $K = 1,2-1,5$ . При большей величине  $K$  шлаки для сварки не пригодны, так как повышение кислотности за счет повышения содержания  $\text{SiO}_2$  ухудшает стабильность дугового процесса, шлаки становятся слишком вязкие, вследствие чего химическая активность падает, что приводит к образованию пор и шлаковых включений в металле шва.

Таким образом, для электрошлакового переплава сталей наиболее приемлемыми являются флюсы на основе фторсодержащих соединений  $\text{CaF}_2$  с введением в них  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  и т.д., что обеспечивает при ЭШП необходимую производительность и получение высококачественного литого электрошлакового металла [4,6].

#### Библиографический список

1. **Степанов, В.В.** Плотность расплавленных флюсов для электрошлакового переплава и подогрева / В.В. Степанов, Б.Е. Лопаев // Автоматическая сварка, 1967. № 2. С. 39–41.
2. **Якобашвили, С.Б.** Поверхностное и межфазное натяжение бинарных расплавов на основе  $\text{CaF}_2$  / С.Б. Якобашвили, И.И. Фруммин // Автоматическая сварка. 1962. № 10. С. 41–45.
3. **Якобашвили, С.Б.** Поверхностные свойства сварочных флюсов и шлаков / С.Б. Якобашвили. – Киев: Техніка, 1970. – 208 с.
4. **Лютый, И.В.** Электрошлаковая выплавка и рафинирование металлов / И.В. Лютый, Ю.В. Латаш. – Киев: Наук. Думка, 1982. – 188 с.
5. **Подгаецкий, В.В.** Сварочные флюсы / В.В. Подгаецкий, И.И. Люборец. – Киев: Техніка, 1984. – 167 с.
6. **Латаш, Ю.В.** Очищение металла от неметаллических включений при электрошлаковом переплаве / Ю.В. Латаш [и др.] // Автоматическая сварка. Киев: АН СССР. 1960. № 9. С.17–23.
7. **Никитин, Б.М.** О фазовом составе фторсодержащих шлаков электрошлакового переплава / Б.М. Никитин, Т.И. Литвинова, Т.Ф. Решенко // Изв. АН СССР. Металлы. 1966. №6. С. 58–64.
8. **Жмойдин, Г.И.** Плавкость фторсодержащих шлаков // Изв. АН СССР. Металлы. 1969. №6. С. 9–16.

Дата поступления  
в редакцию 01.02.2016

**S.N. Zharebtsov<sup>1</sup>, E.A. Chernishov<sup>2</sup>**

**FEATURES PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES FLUX USED  
IN THE TECHNOLOGY OF ELECTROSLAG REMELTING**

Omsk state pedagogical university,<sup>1</sup>  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev<sup>2</sup>

The experimental studies and theoretical data on the physico-chemical properties and functions of fluxes used for conducting sustainable processes remelting, casting, welding in various metallurgical technologies ESR. Discussed energy ties cations and anions in the slag systems of different brands fluxes and their physical properties. The formulas for calculating the density and the basicity of slag melts, depending on the chemical composition of the flux. The physical density, the results of direct measurements of the melting point of the various fluxes and metal alloys at electroslag remelting.

*Key words:* electroslag remelting, fluxes, chemical composition, physical properties, density, temperature, liquid slag and metal.

## НАШИ АВТОРЫ

### ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

**Басова Лариса Николаевна** – ст. преподаватель НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
436-98-74

**Галкин Владимир Михайлович** – д-р физ.-мат. наук, профессор НГТУ им. Р.Е.Алексеева; [vm@nntu.nnov.ru](mailto:vm@nntu.nnov.ru)

**Ерофеева Лариса Николаевна** – канд. физ.-мат. наук, доцент НГТУ им. Р.Е.Алексеева;  
[vm@nntu.nnov.ru](mailto:vm@nntu.nnov.ru)

**Китаева Елена Кирилловна** – ст. преподаватель НГТУ им. Р.Е.Алексеева;  
[vm@nntu.nnov.ru](mailto:vm@nntu.nnov.ru)

**Корелин Олег Николаевич** – канд. техн. наук, доцент, НГТУ им. Р. Е. Алексеева;  
[o\\_korelin@mail.ru](mailto:o_korelin@mail.ru)

**Леонова Елена Юрьевна** - ст. преподаватель, НГТУ им. Р. Е. Алексеева;  
436-63-93

**Лещева Светлана Викторовна** – канд. физ.-мат. наук, доцент НГТУ им. Р.Е.Алексеева, [vm@nntu.nnov.ru](mailto:vm@nntu.nnov.ru)

**Миронов Андрей Валентинович** - МБОУ ДОД Детский юношеский центр «Ровесник», директор;  
+7 (83173) 62560

**Никулин Евгений Александрович** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; [nea@mail.nnov.ru](mailto:nea@mail.nnov.ru)

**Палицына Светлана Сергеевна** – студент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
[palitsyna.svetlana@gmail.com](mailto:palitsyna.svetlana@gmail.com)

**Степанов Игорь Александрович** - Институт фундаментальных наук и инновационных технологий, Лиепайский университет (Riga, Latvia), исследователь;  
[istepanov2001@mail.ru](mailto:istepanov2001@mail.ru)

**Терентьева Ирина Николаевна** – канд. филос. наук, доцент Дзержинского филиала НГТУ им. Р.Е.Алексеева  
[trenklen@nntu.nnov.ru](mailto:trenklen@nntu.nnov.ru)

**Танонов Павел Павлович** – магистрант, НГТУ им. Р. Е. Алексеева;  
[tanonov@mail.ru](mailto:tanonov@mail.ru)

**Тимофеева Ольга Павловна** - канд. техн. наук, доцент: НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
[optimofeeva@mail.ru](mailto:optimofeeva@mail.ru)

### ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

**Аношкин Юрий Иванович** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
[react@nntu.nnov.ru](mailto:react@nntu.nnov.ru)

**Александрова Татьяна Андреевна** – студент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
[tanusick@yandex.ru](mailto:tanusick@yandex.ru)

**Арсенов Павел Владимирович** – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
[pavlycii@gmail.ru](mailto:pavlycii@gmail.ru)

**Бирюков Владимир Валерьевич** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
[birukovvv@mail.ru](mailto:birukovvv@mail.ru)

**Варенцов Андрей Владиславович** – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
[vav88@mail.ru](mailto:vav88@mail.ru)

**Грачев Владимир Александрович** - ассистент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
[physics@nntu.nnov.ru](mailto:physics@nntu.nnov.ru)

**Доронков Денис Владимирович** – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
[nevid000@mail.ru](mailto:nevid000@mail.ru)

**Куревин Атон Олегович** – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
[react@nntu.nnov.ru](mailto:react@nntu.nnov.ru)

**Комаров Алексей Владимирович** - магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
[komarovalexej@yandex.ru](mailto:komarovalexej@yandex.ru)

**Коновалов Кирилл Станиславович** – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
[kskonovalov100@gmail.com](mailto:kskonovalov100@gmail.com)

**Кожевникова Татьяна Вадимовна** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
[physics@nntu.nnov.ru](mailto:physics@nntu.nnov.ru)

**Кудряшов Дмитрий Андреевич** – инженер-конструктор 3-й категории отдела силового электрооборудования и преобразовательной техники АО «ОКБМ Африкантов»  
[inkol@okbm.nnov.ru](mailto:inkol@okbm.nnov.ru)



**Легчанов Максим Александрович** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; legchanov@mail.ru

**Липужин Иван Алексеевич** – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева, ведущий инженер; lipuzhin.ivan@yandex.ru

**Полозкова Екатерина Николаевна** – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; polozkova-ekaterina@yandex.ru

**Рошин Евгений Васильевич** – ведущий инженер-конструктор отдела силового электрооборудования и преобразовательной техники АО «ОКБМ Африкантов»; inkol@okbm.nnov.ru

**Серебряков Артем Владимирович** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева, serebryakov@ardman.ru

**Стеклов Алексей Сергеевич** – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева, fae\_nir@nntu.nnov.ru

**Соснина Елена Николаевна** – д-р техн. наук, доцент, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева; sosnyna@yandex.ru

**Титов Владимир Георгиевич** – профессор, д-р техн. наук, заслуженный деятель науки РФ НГТУ им. Р.Е. Алексеева; fae\_nir@nntu.nnov.ru

**Фараонов Владиир Александрович** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; 436-80-23

**Хробостов Александр Евгеньевич** – канд. техн. наук, доцент, директор ИЯЭ и ТФ НГТУ им. Р.Е. Алексеева; khrobostov@nntu.nnov.ru

**Шалухо Андрей Владимирович** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; shaloho.andrey@mail.ru

#### **МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО**

**Баранов Владимир Николаевич** – канд. техн. наук, доцент ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»; gtr1977@mail.ru

**Балеев Борис Федорович** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; baleev@nn.ru

**Беляев Александр Михайлович** – ст. преподаватель НГТУ им. Р.Е. Алексеева, инженер ООО «Автол»; myhome2010@mail.ru

**Беляков Владимир Викторович** – почетный работник науки и техники РФ, д-р техн. наук, профессор, начальник Управления научно-исследовательских и инновационных работ НГТУ им. Р.Е. Алексеева; nauka@nntu.nnov.ru

**Береснев Павел Олегович** – студент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; Nord13@mail.ru

**Воронков Олег Викторович** – канд. техн. наук, научн. сотрудник ООО «СИНЦ»; olegvoronkov@inbox.ru

**Гильманшина Татьяна Ренатовна** – канд. техн. наук, доцент ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»; gtr1977@mail.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

**Еремин Алексей Александрович** – инженер лаборатории «Моделирования природных и техногенных катастроф» НГТУ им. Р.Е. Алексеева; alexejswt@gmail.com

**Жеребцов Сергей Николаевич** – канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВПО «Омский государственный педагогический университет»; vm@nntu.nnov.ru

**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

**Зезюлин Денис Владимирович** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; balakhnaman@gmail.com

**Колотилин Владимир Евгеньевич** – почетный работник науки и техники РФ, канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; transfer@nntu.nnov.ru

**Куркин Андрей Александрович** – д-р физ.-мат. наук, профессор, глав. науч. сотрудник управления научных исследований и инновационных разработок, зав. кафедрой «Прикладная математика», науч. руководитель лаборатории «Моделирования природных и техногенных катастроф» НГТУ им. Р.Е.Алексеева;  
aakurkin@gmail.com

**Клубничкин Владислав Евгеньевич** – канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет леса» (г. Мытищи);  
vklubnichkin@mgul.ac.ru.

**Клубничкин Евгений Евгеньевич** – канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет леса» (г. Мытищи);  
klubnichkin@mgul.ac.ru

**Локтев Александр Васильевич** – канд. техн. наук, доцент, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
prof.loktev@yandex.ru

**Лыткина Светлана Игоревна** – канд. техн. наук, доцент ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»;  
svetka-lisa@mail.ru.

**Макаров Владимир Сергеевич** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е.Алексеева;  
makvl2010@gmail.com  
makvl2010@gmail.com

**Малов Александр Евгеньевич** – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева  
tkm@nntu.nnov.ru

**Малахов Алексей Валентинович** – канд. техн. наук, доцент, НГТУ им. Р.А. Алексеева;  
alex19590612@yandex.ru

**Мишин Иван Валентинович** – инженер 3-й категории ОАО «Гипрогазцентр»;  
ivansermishin@mail.ru

**Песков Вячеслав Иванович** – канд. техн. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
vp.peskov@mail.ru

**Папунин Алексей Валерьевич** – ассистент НГТУ им. Р.Е. Алексеева, вед. специалист Управления делами ООО «Управляющая компания «группа ГАЗ»;  
lexalenia@rambler.ru

**Редкозубов Антон Владимирович** – аспирант НГТУ им. Р.Е.Алексеева;  
anto-x@ya.ru

**Сеземин Алексей Валерьевич** – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
sezemin@gmail.com

**Сулин Вячеслав Александрович** – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
Mihsemen16@mail.ru

**Тарасов Алексей Николаевич** – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева, ведущий инженер-конструктор ООО ОИЦ;  
tarasov\_alexey@list.ru

**Филатов Валерий Игоревич** – студент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
filatov.v.ngtu@ya.ru

**Францев Михаил Эрнстович** – канд. техн. наук, директор АО «Нептун-Судомонтаж», ст. эксперт Московского филиала Российского Речного Регистра, член Научно-технического Совета РРР;  
gerard629@yandex.ru

**Фролова Ирина Николаевна** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
fririnik@mail.ru

**Шнейберг Алексей Михайлович** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
tkm@nntu.nnov.ru

**Худоногов Сергей Александрович** – ст. преподаватель ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»;  
doktor63@yandex.ru

**Чернышов Евгений Александрович** – д-р техн. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
vm@nntu.nnov.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 НГТУ**  
**им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА**

**№ 1 (112)**

Редакторы: **Е.В. Комарова, Т.В. Третьякова**  
Технический редактор **Т.П. Новикова**

*Редакция:*

603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.  
rsl@nntu.nnov.ru

Подписано в печать 24.03.2016. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага офсетная.

Печать трафаретная. Усл. печ. л. 30,25. Тираж 300 экз. Заказ 167.

---

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**