

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*

**№ 4 (115)**

**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. №4(115).  
– 197. 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 Джемдет***

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*

**№ 4 (115)**

**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*

PhD, Doctor of mathematical sciences, professor  
McMaster University (Ontario, Canada)

*Laszlo Palkovics*

The Széchenyi István University (Győr, Hungary)

*Peter Varlaki*

The Széchenyi István University (Győr, Hungary)

*Vijay Kumar Chakka*

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>Грошева Е.А., Гусев И.В., Дмитриев В.Н., Ильичев К.В., Куликов С.В., Манцеров С.А., Панов А.Ю.</b> Разработка информационных систем предприятия, соответствующим федеральным стандартам обеспечения безопасности информации.....	9
<b>Борисов Г.В., Галкина Е.Д., Ерофеева Л.Н., Лещева С.В.</b> Об одной характеристике транспортного потока.....	17
<b>Лабаев А.М., Охотников И.Д., Хранилов В.П.</b> Мониторинг и управление вычислительными ресурсами учебного оборудования ИВЦ НГТУ в условиях внедрения CALS-технологий.....	21
<b>Степаненко М.А., Фунтиков Е.А.</b> Оцифровка и анализ акустических сигналов на платформе Android.....	31
<b>Кисиленко К.И., Прядилов А.В, Тимофеев Е.П.</b> Термоэлектрические датчики измерения СВЧ мощности.....	37
<b>Кисиленко К.И., Малахов В.А., Узлов В.А., Щербаков В.В.</b> Моделирование и расчет антенны касегрена на 290 ГГц.....	46
<b>Гойхман М.Б., Громов А.В., Ковалев Н.Ф., Палицин А.В.</b> Измерение энергии электронов замагниченного релятивистского пучка по циклотронному поглощению пробной электромагнитной волны.....	53
<b>Гребенщиков В.И., Чивенков А.И.</b> Разработка автоматизированных систем сбора и передачи информации.....	59
<b>ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ.....</b>	<b>65</b>
<b>Мешков А.Н., Хорьков С.В., Яшина А.Н.</b> Нелинейный отклик проводящей среды как функция неоднородностей ее микроструктуры.....	65
<b>Тихомиров В.А., Охотников М.Н., Плехов А.С., Блохин А.Н.</b> Автоматизация управления электромеханическими преобразователями нагрузочного стенда.....	71
<b>Рогожин В.В., Ананьева Е.Ю., Кузякин Н.О., Гунько Ю.Л., Козина О.Л., Михаленко М.Г.</b> Использование разбавленных цитратных электролитов для осаждения покрытия никель-бор в качестве коррозионностойкого каркаса волоконного оксидно-никелевого электрода химических источников тока.....	80
<b>Серебряков А.В.</b> К вопросу диагностики технического состояния альтернативных источников энергии.....	85
<b>Дмитриев С.М., Добров А.А., Легчанов М.А., Хробостов А.Е.</b> Верификация CFD-программы логос на базе экспериментальных исследований нгту по изучению локального массообмена потока теплоносителя в ТВС.....	91
<b>Безносков А.В., Черныш А.С., Метринский Р.А., Котоврасов М.Ю.</b> Исследование характеристик теплообмена в теплообменных системах с давлением, близким к атмосферному, применительно к контурам, охлаждаемым свинцом.....	100

---

<b>МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО .....</b>	<b>107</b>
<b>Зуев В.А., Грамузов Е.М.</b> Новые подходы к моделированию ледовой среды при модельных испытаниях судов.....	107
<b>Крюков О.В.</b> Энергетическая оптимизация транспортных потоков газа с помощью электроприводных агрегатов.....	115
<b>Смоленский С.Ю., Якимов Р. И.</b> Исследование выносливости соединений, полученных сваркой трением из прецизионных сплавов.....	121
<b>Беляков В.В., Беляев А.М., Береснев П.О., Бушуева М.Е., Зезюлин Д.В., Колотилин В.Е., Клубничкин Е.Е., Клубничкин В.Е., Кострова З.А., Макаров В.С., Михеев А.В., Порубов Д.М., Филатов В.И.</b> Критерии оценки качества транспортно-технологических машин.....	128
<b>Клубничкин В. Е., Клубничкин Е. Е., Макаров В.С., Зезюлин Д.В., Беляков В.В.</b> О проходимости лесозаготовительных машин на гусеничном ходу и агрегатных машин на их базе.....	169
<b>Клубничкин Е. Е., Клубничкин В. Е., Макаров В.С., Зезюлин Д.В., Беляков В.В.</b> Оценочный показатель проходимости лесозаготовительных машин.....	176
<b>Леушин И.О., Чистяков Д.Г., Нищёнков А.В.</b> Анализ технологии производства стеклоформующей оснастки на отечественных предприятиях.....	184

## CONTENTS

<b>INFORMATICS AND MANAGEMENT IN TECHNICAL AND SOCIAL SYSTEMS....</b>	<b>9</b>
<b>Grosheva E.A., Gusev I.V., Dmitriev V.N., Ilichev K.V., Kulikov S.V., Mancerov S.A., Panov A.Y.</b> Development of enterprise information systems, corresponding federal information security standards.....	9
<b>Borisov G.V., Galkina E.D., Erofeeva L.N., Leshcheva S.V.</b> On one characteristic of a transport stream.....	17
<b>Labaev A.M., Okhotnikov Iv.D., Khranilov V.P.</b> Monitoring and control computing resources training equipment itc ngtu under implementation cals-technologies.....	21
<b>Stepanenko M.A., Funtikov E.A.</b> Digitizing and analysis of acoustic signals on android platform.....	31
<b>Kisilenko K.I., Pryadilov A.V., Timofeev E.P.</b> Thermoelectric sensors for measuring the microwave power.....	37
<b>Kisilenko K.I., Malakhov V.A., Uzlov V.A., Sherbakov V.V.</b> Modeling and measurement cassegrain antenna at 290 GHZ.....	46
<b>Goykhman M.B., Gromov A.V., Kovalev N.F., Palitsin A.V.</b> The measurement of energy of magnetized relativistic electron beam by cyclotron absorption of a probe electromagnetic wave.....	53
<b>Grebenshchikov V.I., Chivenkov A.I.</b> Development of systems automated information collection and transmission.....	59
<b>ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES.....</b>	<b>65</b>
<b>Meshkov A.N., Khorkov S.V., Yashina A.N.</b> Nonlinear response of a conducting medium as a function of the heterogeneity of its microstructure.....	65
<b>Tikhomirov V.A., Ohotnikov M.N., Plekhov A.S., Blokhin A.N.</b> Automation of management electromechanical transducer load stand.....	71
<b>Rogozhin V.V., Ananieva E.J., Kuzyakin N.O., Gunko J.L., Kozina O.L., Mikhailenko M.G.</b> Using dilute citrate electrolyte for the deposition of nickel-boron corrosion-resistant structure as fibers oxide nickel electrode chemical current sources.....	80
<b>Serebryakov A.V.</b> To the question of diagnostics of technical condition of alternative sources of energy.....	85
<b>Dmitriev S.M., Dobrov A.A., Legchanov M.A., Khrobostov A.E.</b> Verification of cfd-program logos based on nnstu experiments for the study of coolant mass transfer in fuel assembly.....	91
<b>Beznosov A.V., Chernysh A.S., Metrinsky R.A., Kotovrasov M.Y.</b> Investigation of heat transfer characteristics in the heat exchanger with pressure close to atmospheric pressure, in relation to the circuit, cooled lead.....	100
<b>MECHANICAL AND TRANSPORT: THEORY, TECHNOLOGY, PRODUCTION.....</b>	<b>107</b>
<b>Zuev V. A., Gramzow E.M.</b> New approaches to modeling of ice environment during the tests of ship models.....	107
<b>Kryukov O.V.</b> Power optimization of transport streams of gas by means of electric driving units.....	115
<b>Smolensky S. Yu., Yakimov R. I.</b> Research of endurance of joints obtained by friction welding of precision alloys.....	121

<b>Belyakov V.V., Belyaev A.M., Beresnev P.O., Bushueva M.E., Zezyulin D.V., Kolotilin V.E., Klubnichkin V.E., Klubnichkin E.E., Kostrova Z.A., Makarov V.S., Miheev A.V., Porubov D.M., Filatov V.I.</b> Assessment criteria quality of transport and technological machines.....	128
<b>Klubnichkin E.E., Klubnichkin V.E., Makarov V.S., Zeziulin D.V., Belyakov V.V.</b> About trafficability of tracked timber harvesting machines and aggregation machines based on them.....	169
<b>Klubnichkin E.E., Klubnichkin V.E., Makarov V.S., Zeziulin D.V., Belyakov V.V.</b> Evaluation indicator of trafficability of timber harvesting machines.....	176
<b>Leushin I.O., Chistyakov D.G., Nischenkov A.V.</b> The analysis of the production technology of glass-press-molding equipment at the domestic enterprises.....	184

# ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

УДК 004.65

Е.А. Грошева<sup>2</sup>, И.В. Гусев<sup>3</sup>, В.Н. Дмитриев<sup>2</sup>, К.В. Ильичев<sup>1</sup>, С.В. Куликов<sup>2</sup>,  
С.А. Манцеров<sup>1</sup>, А.Ю. Панов<sup>1</sup>

## РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ПРЕДПРИЯТИЯ, СООТВЕТСТВУЮЩИХ ФЕДЕРАЛЬНЫМ СТАНДАРТАМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ИНФОРМАЦИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова<sup>2</sup>,  
Российский федеральный ядерный центр Всероссийский  
научно-исследовательский институт экспериментальной физики<sup>3</sup>

Рассматривается задача создания корпоративного портала предприятия, соответствующего федеральным стандартам обеспечения безопасности информации. Приводятся результаты анализа использования серверных операционных систем и офисного программного обеспечения в федеральных государственных информационных системах, а также результаты разработки автоматизированной информационной системы - рабочего программного обеспечения «Корпоративный портал». Предоставляется описание составляющих модулей и разработанного рабочего интерфейса информационного портала.

*Ключевые слова:* безопасность информации, информационная система предприятия, операционные системы, сертифицированное программное обеспечение, сертификация.

Жизнь современного предприятия невозможно представить без локальной вычислительной сети (ЛВС), позволяющей осуществлять взаимодействия сотрудников, обмениваться корпоративной почтой и пользоваться хранящейся на сервере информацией. В зависимости от специфики производственной деятельности доступ к такой информации может быть свободным или ограниченным, причем последнее - необходимость ограничения доступа к какой-то части информации - присутствует всегда.

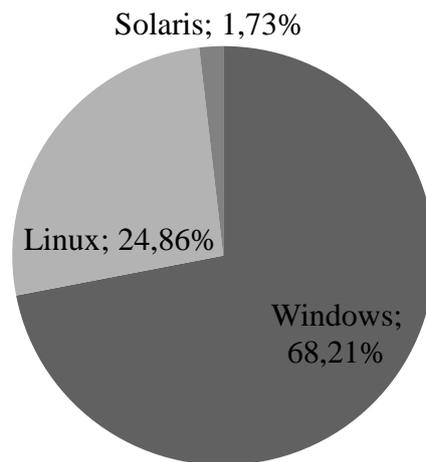
Учитывая совокупность задач, возлагаемых на ЛВС предприятия, зачастую возникает необходимость упорядочить и структурировать работу сети, и самое очевидное решение этой проблемы - создание сайта с соответствующими разделами (новости, справочники, статьи, базы данных и т.п.). Задача сама по себе несложная, учитывая, что существует масса конструкторов сайтов, позволяющих даже не очень квалифицированному программисту создать сайт с минимально достаточным функционалом.

Однако программный код такого сайта, как правило, не исследуется на возможные уязвимости, особенно если ЛВС предприятия не имеет выхода в глобальную сеть. Априори предполагается, что враг снаружи, сотрудники лояльны и вероятность хакерских атак внутри сети низкая. Между тем, даже потенциальная возможность неких деструктивных действий может представлять серьезную угрозу для деятельности предприятия.

В Реестре федеральных государственных информационных систем, размещенном на сайте Роскомнадзора по состоянию на май 2016 г. числится 339 информационных систем, причем это системы государственных структур, таких как МВД, МИД, ФМБА, ФК России,

ГАС "Выборы", АИС "Юстиция" и др. [1]. Все они являются по сути порталами, имеющими выход в глобальную сеть и, соответственно, разработанными с учетом, в том числе, и требований безопасности информации.

Попробуем проанализировать, хотя бы в общих чертах, из чего складывается безопасность информации, обрабатываемой в некоей информационной системе. Очевидно, как минимум два фактора серьезно влияют на этот аспект - операционная система (ОС), а также рабочее программное обеспечение (РПО), эту информацию обрабатывающее. Основываясь на данных, приведенных в Реестре ФГИС, распределение серверных операционных систем, используемых этими системами, мы получили следующее распределение, представленное на рис. 1.



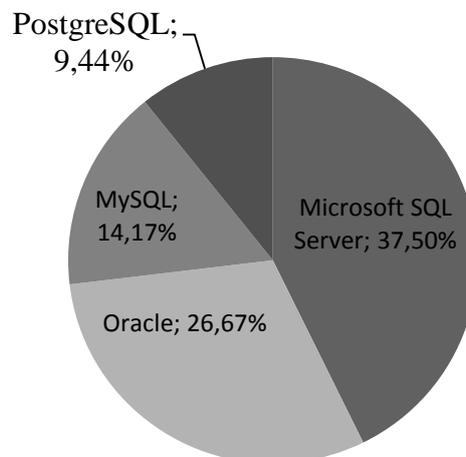
**Рис. 1. Процентное соотношение используемых серверных ОС**

Использование остальных ОС (FreeBSD, IBM-AIX, Unix, HP-UX, Novell NetWare, MCBS и Циркон) ничтожно мало.

При этом распределение по клиентским ОС, %:

- Windows - 70,41;
- Linux - 12,96%;
- MacOS - 10,37%.

Распределение функционирующих систем управления базами данных (СУБД) представлено на рис. 2.



**Рис. 2. Процентное соотношение используемых СУБД**

Процентное соотношение использования офисного ПО представлено двумя платформами и соответственно составляет:

- Microsoft Office - 94,01%;
- Open\Libre Office - 5,99%.

Приведенная статистика показывает, что в подавляющем большинстве случаев даже в федеральных государственных информационных системах используются ОС семейства Windows. Говорить об их защищенности (за исключением отдельных релизов, имеющих соответствующие сертификаты) не приходится. Это проприетарное ПО с недоступным для анализа кодом[2].

Операционные системы на базе Linux можно разделить на два класса:

- ОС на базе ядра RedHat;
- ОС на базе ядра Debian.

Первый является коммерческим дистрибутивом (юрисдикция США), второй - некоммерческий дистрибутив внегосударственной юрисдикции.

На базе RedHat разработаны такие отечественные операционные системы, как ОС МСВС, ОС "Альт Линукс", ОС "Роса", ОС "Заря". Последние три ОС базируются на средствах защиты информации - SELinux, разработка Агентства национальной безопасности США.

На базе Debian есть единственная отечественная ОС - AstraLinux, разработки компании РусБИТех. Средства защиты информации, применяемые в ней (и в ОС МСВС) - отечественной разработки.

Вопросы необходимости импортозамещения в случае выбора ОС и рабочего программного обеспечения, используемого как в ФГИС, так и в порталах и сайтах менее крупных предприятий, учреждений и госструктур - это в первую очередь вопросы именно информационной безопасности этих систем. Но если с операционными системами, сертифицированными по требованиям безопасности информации, хоть какой-то выбор есть, то с РПО ситуация, как правило, сложнее. Проходить процедуру сертификации во ФСТЭК готовы далеко не все разработчики, так как она требует существенных временных и финансовых издержек и существенно осложняет процесс разработки. Учитывая, что к вопросам создания корпоративных порталов зачастую подходят из остаточных принципов, закладывать в этот процесс процедуру сертификации такого РПО готовы и не все заказчики.

Было разработано рабочее программное обеспечение РПО "Корпоративный портал" (Веб-портал предприятия), которое в мае 2016 г. получило сертификат соответствия требованиям безопасности информации ФСТЭК России. Данное РПО функционирует в среде операционной системы "AstraLinuxSpecialEdition" версии 1.3, является программным средством общего назначения со встроенными средствами защиты от несанкционированного доступа к информации и соответствует требованиям руководящего документа "Защита от несанкционированного доступа к информации. Часть 1. Программное обеспечение средств защиты информации. Классификация по уровню контроля отсутствия недекларированных возможностей" (Гостехкомиссия России, 1999) - по уровню 2 контроля [2].

Данное РПО предназначено для организации совместной работы сотрудников предприятия и решает следующие задачи:

- создание логики «Одного окна». Портал позволяет собрать в одном месте все ключевые и часто используемые сотрудниками ресурсы и приложения. Достаточно открыть страницу в браузере – и все важные документы, необходимые контакты, назначенные задачи и последние новости окажутся перед глазами;
- внутренние коммуникации. Корпоративный портал дает широкие возможности для увеличения эффективности внутренних коммуникаций за счет встроенного модуля обмена мгновенными сообщениями;

- управление документами. Функционал корпоративного портала позволяет минимизировать ручные операции и максимально перейти на электронную форму документооборота за счет единого хранилища документов с поддержкой системы контроля версий;
- интеграция. Портал может быть интегрирован с рядом внутренних и внешних систем организации (например, почтовый клиент), что позволит эффективнее использовать все перечисленные системы;
- безопасность. Внутренний портал обеспечивает надежное хранение информации благодаря строгому, но гибкому разграничению прав доступа и ролей пользователей.

Функционал корпоративного портала позволяет оптимизировать работу всех жизненно важных областей работы организации.

В состав программы входят следующие модули:

- главной страницы;
- календаря;
- адресной книги;
- сообщений;
- корпоративного поиска;
- документов;
- новостей;
- управления проектами;
- базы знаний;
- совместного обучения.

Количество и содержание модулей зависит от настроек системы и определяется правами пользователя. Так, модуль «Администрирование» присутствует только у администраторов системы.

Также интерфейс системы зависит от прав пользователя, с которыми он вошел в систему. Так, при правах, отличных от НС (несекретно), интерфейс по созданию новостей/страниц базы знаний будет недоступен.

Слева на главной странице находится навигационная панель с ссылками на доступные пользователю модули и пиктограммы уведомлений о новых событиях. Центральный блок содержит ссылки и описания на последние новости, задания и события. Изображение главной страницы РПО "Корпоративный портал" приведено на рис. 3.

Модуль календаря позволяет пользователю создавать и получать уведомления о событиях, таких как личные напоминания, запланированные совещания по какому-либо проекту. Модуль Календарь предоставляет следующие возможности:

- планирование личных событий;
- отображение дней рождений сотрудников;
- планирование рабочих встреч и событий;
- оповещение других участников о событиях/встречах.

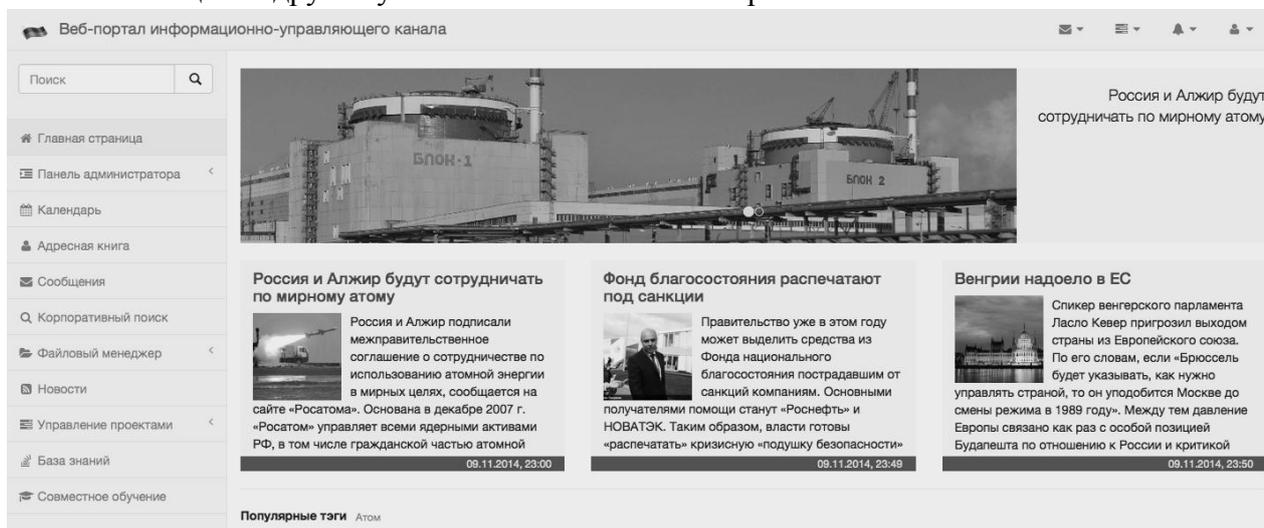


Рис. 3. Главная страница РПО "Корпоративный портал"

На главной странице модуля календарь пользователь может выбрать для отображения следующие фильтры:

- личные;
- дни рождения;
- рабочие.

Изображение страницы модуля календаря приведено на рис. 2.

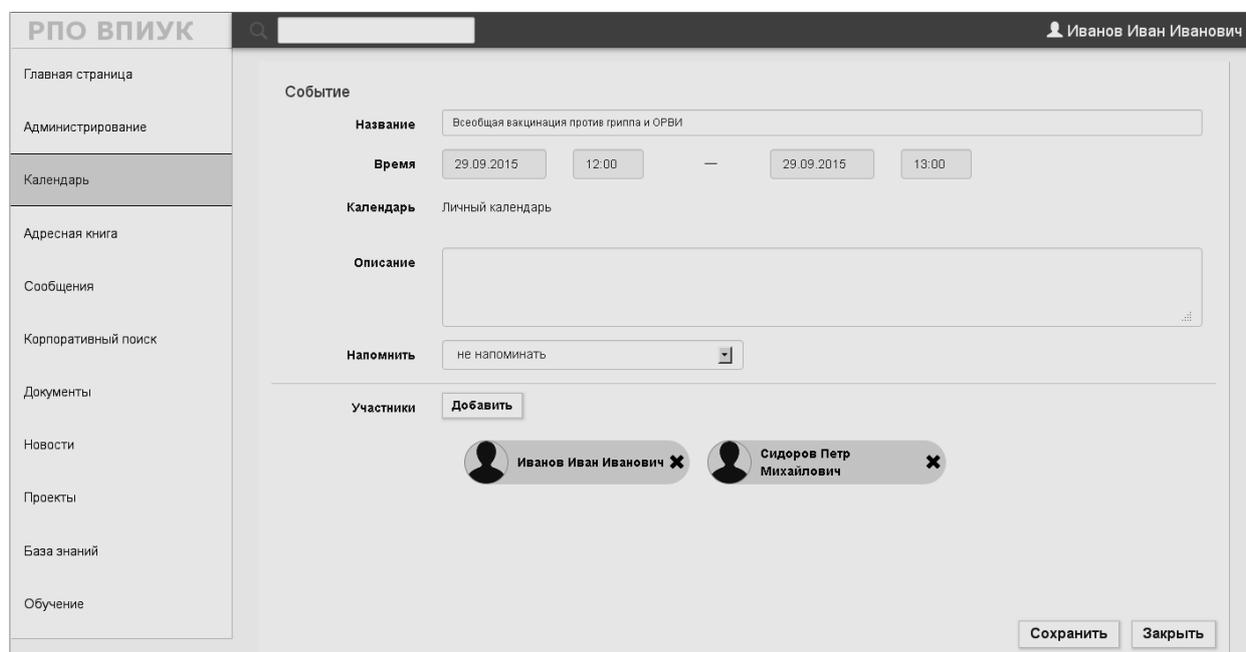


Рис. 4. Страница модуля календаря РПО "Корпоративный портал"

Записи личного календаря доступны только владельцу календаря по умолчанию. Данный тип создан для личных отметок, событий, напоминаний пользователя. Можно также добавить участников к событию. Тогда это событие будет видно всем участникам.

Записи дней рождений доступны всем пользователям ВПИУК и обновляются автоматически. Записи рабочего календаря содержат события/встречи, отражающие процесс выполнения проектов. Данные записи состоят из встреч/событий проектов, в которых пользователь является руководителем или исполнителем. Руководители проектов могут вносить коррективы в календарные записи или создавать дополнительные. После этого данные рабочего календаря всех участников проектов автоматически обновляются.

Модуль календарь имеет следующие виды отображения информации:

- день;
- месяц;
- год.

Модуль адресной книги построен на основе справочника сотрудников предприятия, сгруппированных по подразделениям. Содержит так же функцию поиска по заданным критериям. Также данный модуль предоставляет возможность просмотра контактов. При этом профиль сотрудника может содержать следующие поля:

- фамилия;
- имя;
- отчество;
- дата рождения;
- предприятие, подразделение;
- должность;

- рабочий телефон;
- мобильный телефон;
- адрес электронной почты.

Изображение страницы модуля адресной книги приведено на рис. 5.

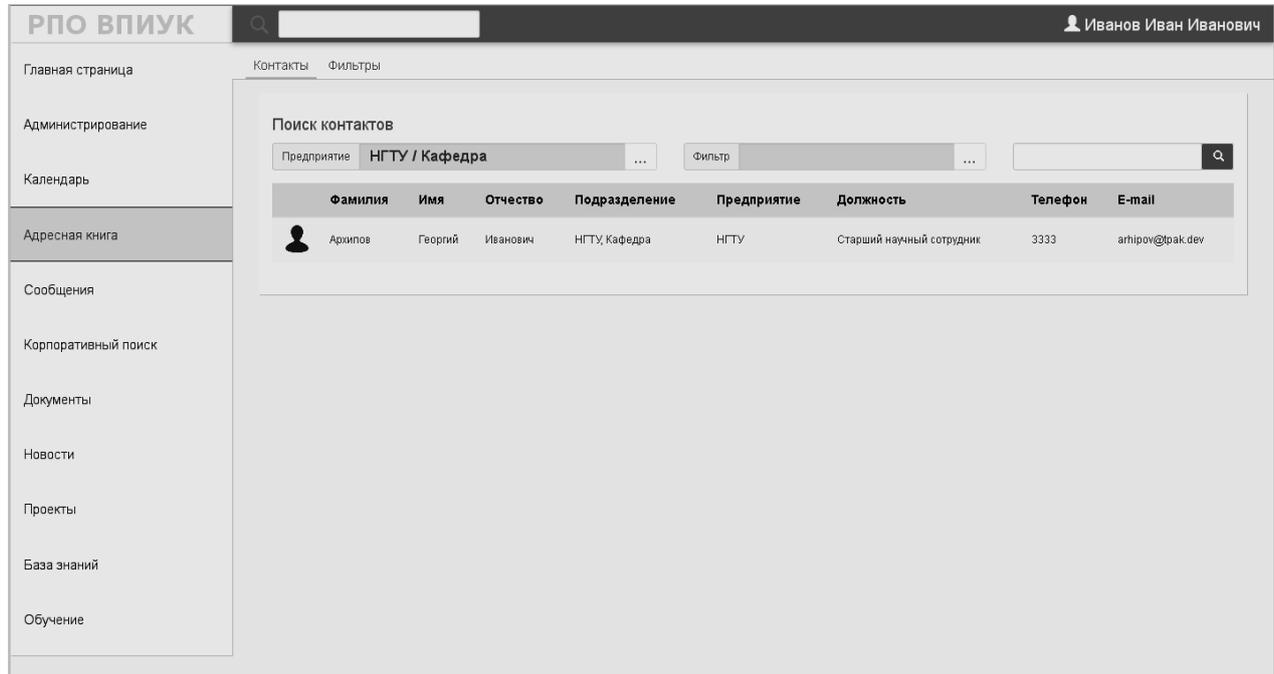


Рис. 5. Страница модуля адресной книги РПО "Корпоративный портал"

Модуль сообщений служит для обмена моментальными сообщениями между сотрудниками. При получении нового сообщения приходит соответствующее уведомление. Есть возможность настройки списка контактов.

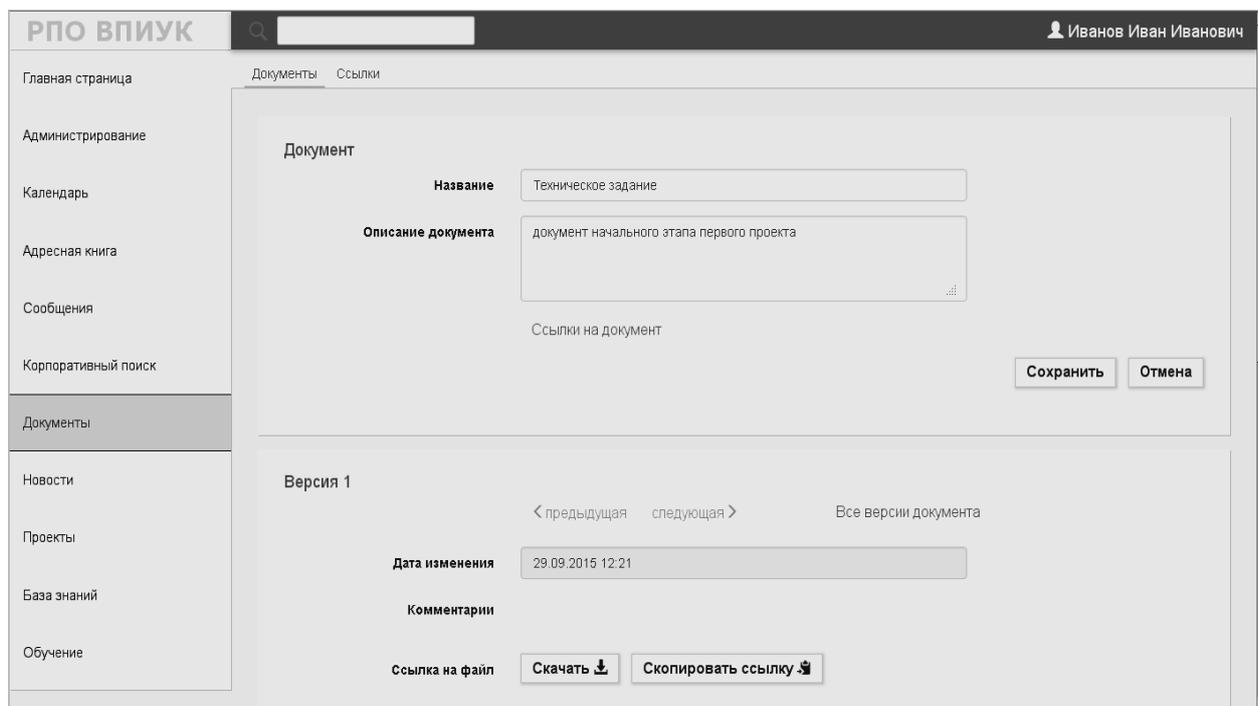


Рис. 6. Страница модуля документов РПО "Корпоративный портал"

Модуль документов построен на основе двух структур: структуры описывающей документ и его версии и структуры, описывающей права доступа пользователей по отношению к документу. Данный модуль обеспечивает создание и доступ к документам пользователя. В качестве документа может выступать файл любого типа. Каждое изменение документа приводит к увеличению версии документа (файла).

Изображение страницы модуля документов приведено на рис. 6.

Модуль новостей построен на основе списка новостных статей. Новостная лента может отображаться в режиме потока новостей, новостей по соответствующим тега, а также в режиме Архив. Пользователь может создавать собственный пост, перейдя по ссылке «Добавить новость». В данном модуле также предусмотрен поиск.

Модуль базы знаний содержит справочные материалы и нормативные документы. В нем предусмотрены каталоги, включающие в себя информационные статьи. Существует возможность добавлять каталоги и статьи.

Модуль корпоративного поиска РПО ВПИУК позволяет осуществлять поиск информации по базам данных по заданным критериям, заданным в специальной поисковой строке. Результатом поиска является список контактов/документов, содержащий их названия и краткие аннотации, а также ссылки на страницы с полным описанием контакта/документа.

Модуль управления проектами позволяет пользователям совместно работать над документами, осуществлять планирование рабочих процессов, отслеживать ход работы над проектами.

Изображение страницы модуля управления проектами приведено на рис. 7.

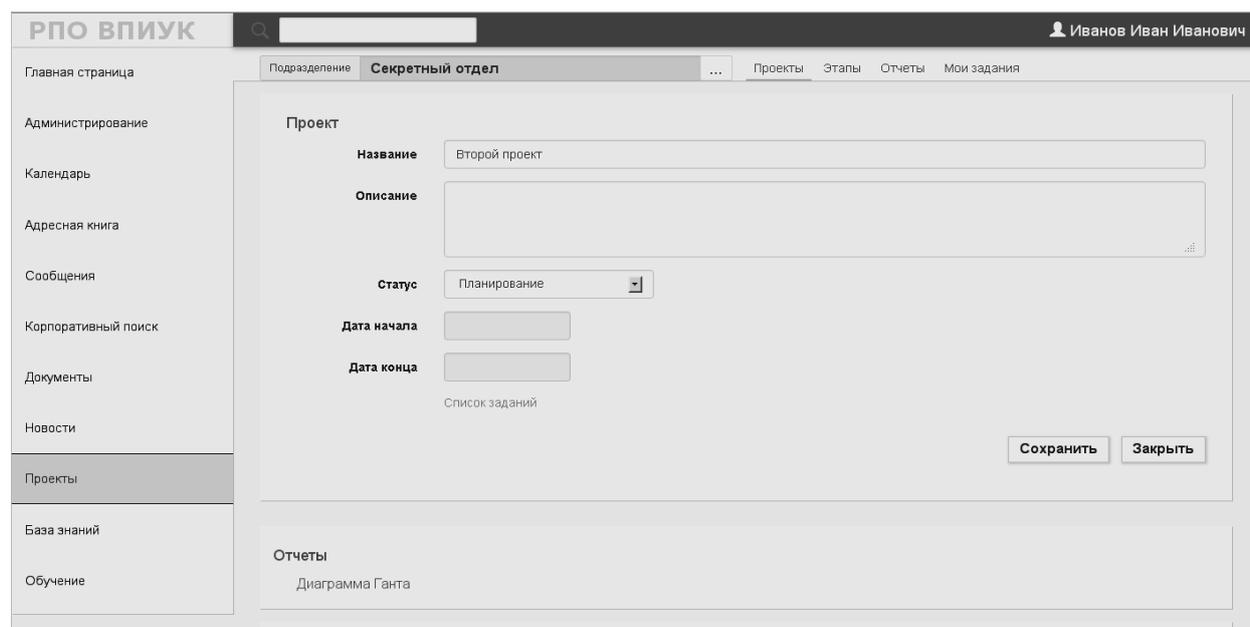


Рис. 7. Страница модуля управления проектами РПО "Корпоративный портал"

Модуль администрирования является базовым для настройки и администрирования данной информационной системы. В нем определяются права доступа пользователей и уровни конфиденциальности документов. В данном модуле возможны настройка приоритетов каждого сотрудника, редактирование профилей пользователей, выставление соответствующих прав доступа к различным модулям и каналам связи.

### Выводы

В настоящее время пренебрегать безопасностью информации, проходящей через программные платформы, неразумно. Бесспорно, полной безопасности в информационных системах достичь невозможно, однако применяя, а также рационально используя различные программные платформы, соответствующие сертификатам информационной безопасности можно существенно снизить вероятность реализации угрозы.

По результатам анализа серверных ОС, клиентских программных платформ, а также СУБД была проведена сегментация поля использования данных информационных продуктов, а также оценена их степень безопасности и защиты информационных данных.

Было разработано рабочее программное обеспечение РПО "Корпоративный портал", а также были проведены комплексные полигонные испытания данной информационной системы. В результате проведенной сертификации Федеральной службой по техническому и экспортному контролю было установлено полное соответствие РПО "Корпоративный портал", мерам информационной безопасности, предъявляемым к автоматизированным информационным системам класса 1Б.

#### Библиографический список

1. Официальный сайт Федеральной службы по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций [электронный ресурс]. - Режим доступа к ресурсу: <http://www.rkn.gov.ru/>.
2. Савельев, А.И. Лицензирование программного обеспечения в России: законодательство и практика / А. И. Савельев. – М.: Инфотропик Медиа, 2012. – 432 с. – ISBN 978-5-9998-0132-6.
3. Официальный сайт Федеральной службы по техническому и экспортному контролю [электронный ресурс]. - Режим доступа к ресурсу: <http://fstec.ru/>.
4. Манцеров, С.А. Мониторинг состояния объектов на основе методов функциональной систематики // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева "Современные проблемы механики и автоматизации в машиностроении и на транспорте", Н.Новгород, 2008. Т. 67.
5. Манцеров, С.А. Создание баз данных объектов машиностроения на основе формул функциональной систематики Вестник ВГТУ. 2007. Т. 3. №11.
6. Манцеров, С.А. Развитие систем единой функциональной систематики для хранения данных о техническом состоянии объекта / С.А. Манцеров, А.Ю. Панов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – Н. Новгород, 2013. – № 6 (ч. 1).

*Дата поступления*

*в редакцию 27.09.2016*

**E.A. Grosheva<sup>2</sup>, I. V. Gusev<sup>3</sup>, V.N. Dmitriev<sup>2</sup>, K.V. Ilchev<sup>1</sup>, S.V. Kulikov<sup>2</sup>,  
S.A. Mancеров<sup>1</sup>, A.Y. Panov<sup>1</sup>**

#### **DEVELOPMENT OF ENTERPRISE INFORMATION SYSTEMS, CORRESPONDING FEDERAL INFORMATION SECURITY STANDARDS**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeyev<sup>1</sup>,  
Scientific research institute of measuring systems n. a. Y.E. Sedakov<sup>2</sup>,  
Russian federal nuclear center All-Russian research institute of experimental Physics<sup>3</sup>

**Purpose:** Creation of a corporate enterprise portal, corresponding federal information security standards.

**Design/methodology/approach:** A theoretical framework is proposed based on methodology certification information systems and database management systems.

**Findings:** The results can be applied to the design and certification software platforms with a high level of protection of information.

**Research limitations/implications:** The present study provides the results of the analysis of the use of server operating systems and office software in the federal government information systems.

**Originality/value:** Viewed functionality, as well as the area to be solved by this developed an information platform, its objectives and specific certification, a detailed description of the structural components of the platform modules, as well as information portal designed operator interface can be used in the construction of complex enterprise information systems.

*Key words:* Information security, enterprise information system, operating systems, certified software, certification.

УДК 510

Г.В. Борисов, Е.Д. Галкина, Л.Н. Ерофеева, С.В. Лещева

## ОБ ОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Описываются некоторые способы восстановления функции распределения случайной величины по экспериментальным данным. Расчеты иллюстрируются на данных грузоперевозок, полученных по движению автомобилей на трассе от Санкт-Петербурга до Екатеринбурга и Челябинска.

**Ключевые слова:** грузоперевозки, экспоненциальное распределение, нормальное распределение, критерий  $\chi^2$ .

При планировании и организации грузоперевозок учитываются характеристики транспортных потоков, в частности, важной характеристикой последних является распределение скоростей транспортных средств на магистралях движения.

В этой статье обрабатываются экспериментальные данные, полученные по движению автомобилей на трассе от Санкт-Петербурга до Екатеринбурга и Челябинска. Данные по значениям скоростей движения для математического анализа были извлечены из прикладного программного комплекса «АвтоГРАФ», использующего средства спутниковой навигации GPS («ГЛОНАСС»). Анализ проведен на примере пятиосных автопоездов в составе седельных тягачей Ivesco EuroStar Cursor 430 и тентовых полуприцепов Krone SDP27, выполняющих междугородные перевозки. Общий объем данных значений скоростей соответствует периоду эксплуатации АТС в течение 1,5 лет (с 6.01.14 по 14.07.15).

Замечено, что характер движения резко различается в зависимости от того изучается ли движение внутри (достаточно крупного) города или это движение между городами.

Первичная обработка экспериментальных данных дана ниже в виде гистограммы на рис. 1 и рис. 2.

В них по горизонтали откладывается величина скорости автосредства. Числа вверху прямоугольников означают количество автолюбителей, скорости которых заключены в интервалах (10;20), (20; 30) и т.д. Скорости даны в км/час.

Данные рис. 1 относятся к движению внутри города, а для рис. 2 – движение за городом. Была поставлена следующая задача: предположим, что скорость есть случайная величина, предполагаемая даже непрерывной, и требуется получить информацию о ее законе распределения. Более того, нужно дать аппроксимацию функции распределения и ее плотности.

Предварительно сделаем несколько замечаний о методах решения подобных задач. Процедура поиска решения обычно разбивается на два этапа. На первом этапе подбирается вид математической зависимости, которая по неясно формулируемым соображениям «согласуется» с экспериментальными данными. Общих рецептов подбора не существует, хотя почти все законы физики были сформулированы с помощью удачно подобранных математических зависимостей. В простейших случаях это были линейные квадратичные и другие простые функции. Однако пример Планка с его формулой излучения абсолютно черного тела (собственно он пару дифференциальных уравнений сделал частными случаями одного более общего уравнения) показывает, что проведение первого этапа может быть очень трудной задачей.

Следующим требованиям подчиняется каждый исследователь: математическая зависимость не должна быть очень сложной и не должна содержать много параметров, подлежащих дальнейшему определению.

На втором этапе, т.е. при уже подобранной зависимости, решается вопрос об определении входящих в нее параметров. Обычно это производится приравниванием «теоретиче-

ских» моментов (математического ожидания, дисперсии и т.д.) экспериментальным с последующим решением соответствующих уравнений. Возможна необходимость рассмотрения моментов дробного порядка (см. [1], [2]) Другой вариант – минимизирование некоторой меры расхождения *теоретических* и экспериментальных данных. В заключительной части к делу привлекаются критерии согласия, как это происходит в известной  $\chi^2$  – процедуре.

После этих замечаний вернемся к рис. 1 и рис. 2.

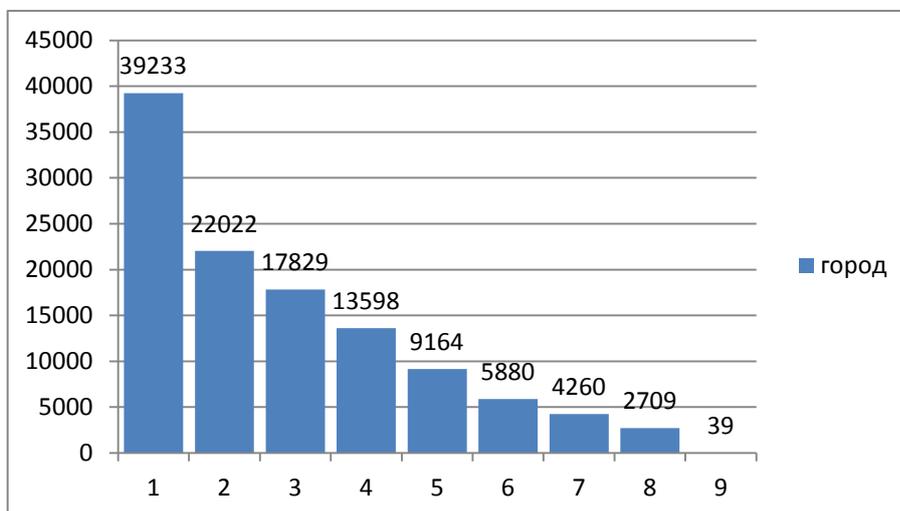


Рис. 1

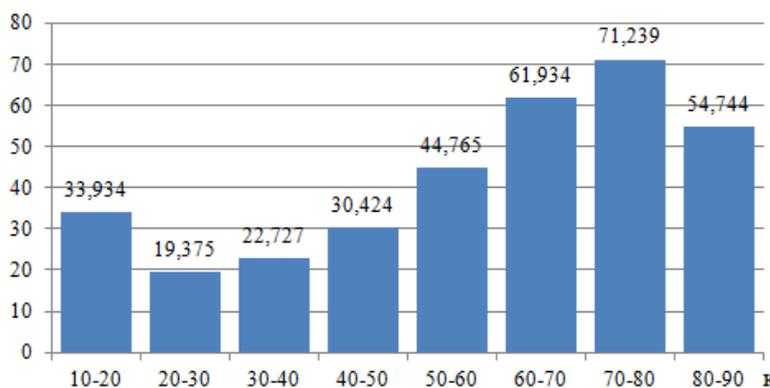


Рис. 2

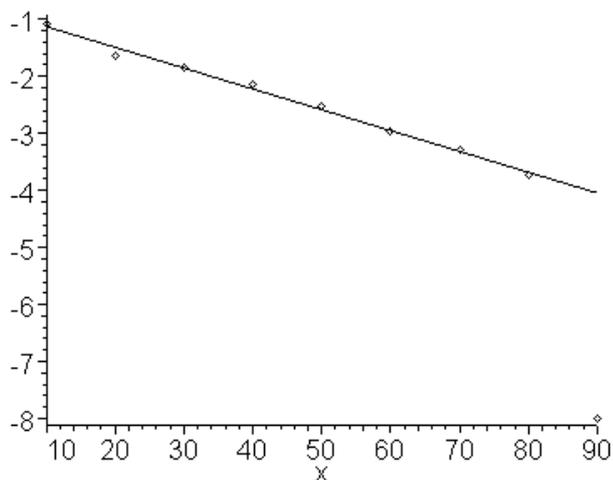


Рис. 3

Зрительное восприятие рис. 1 наводит на мысль об экспоненциальном распределении с плотностью  $f(x) = e^{-\lambda x}$ . Вероятность попадания случайной величины в интервал  $(a, b)$  дается формулой  $p(a < v < b) = e^{-\lambda a} - e^{-\lambda b}$ .

В логарифмическом масштабе частоты из рис. 1 изображены точками на рис. 3.

Из него видно, что соответствующие точки очень тесно располагаются относительно прямой  $y = -0,036484x - 0,765197$ , найденной по методу наименьших квадратов.

Стоит обратить внимание на последнюю экспериментальную точку  $(90, -7,986810)$ , которая «выпадает» из графика. Это можно объяснить тем, что обычно крайние точки являются на практике ненадежными. Сопоставление экспериментальных частот и теоретических приведено далее. Вычисление теоретических частот производилось при  $\lambda = 0,036484$  (коэффициент при  $x$  в уравнении прямой).

$p^*$	0,341945	0,191939	0,155394	0,118517	0,075871	0,051249	0,037129	0,023611	0,00034
$p$	0,323021	0,224276	0,155717	0,108115	0,075065	0,052118	0,036186	0,025124	0,017444

Просмотр рис. 2 приводит к заключению, что простой зависимости подобрать не удастся, поэтому принято следующее решение. Изучение средних скоростей движения в пригородных участках маршрута оставлено для последующих работ и в данном случае проводится не будет. Все значения скоростей на расстоянии до 25 км от черты города включены в массив данных скоростей городского движения, т.е. исключены из массива загородного движения. Соответственно, новая гистограмма загородного движения имеет вид рис. 4.

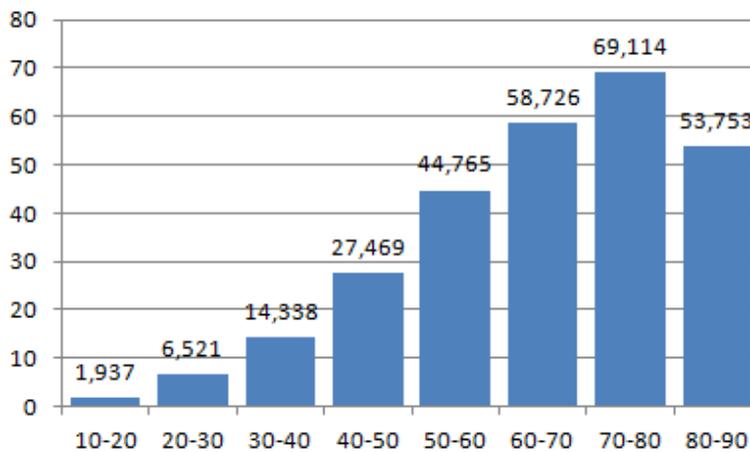


Рис. 4

Гистограмма на рис. 4 имеет большое сходство с нормальным законом распределения,

поэтому мы описываем его «усеченной» плотностью  $f(x) = c \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}$ . Константа  $c$

подбирается из условия  $\int_{10}^{90} f(x) dx = 1$ .

Проведенные расчеты, согласно  $\chi^2$ -процедуре и минимизации величины  $n \sum \frac{(p_i^* - p_i)^2}{p_i}$  дали результаты, представленные в табл. 1 для  $a = 75$ ,  $\sigma = 23$ .

Таблица 1

$v$	10–20	20–30	30–40	40–50	50–60	60–70	70–80	80–90
$P$	0,080375	0,091985	0,102721	0,111931	0,119010	0,123471	0,123995	0,123471

Следует отметить, что стандартное использование критерия согласия  $\chi^2$  не дает удовлетворительных результатов:  $\chi^2$  получается очень большим. Это объясняется тем, что в действительности закон распределения более сложен и авторами найдено «главное» приближение к нему.

#### Библиографический список

1. **Галкина, Е.Д.** Некоторые оценки параметров распределения Коши /Е.Д. Галкина, С.В. Лещева, Н.С.Лукичев, В.Е.Рыков // Труды НГТУ. – 2015. – №3(110). – С. 322–326.
2. **Борисов, Г.В.** Аналитический подход к нормированию расхода автомобильных топлив / Г.В. Борисов, Н.А. Кузьмин, Л.Н.Ерофеева // Интеллект, инновации, инвестиции. Оренбургский государственный институт менеджмента. 2015. <http://www.ogim.ru/science/npi/pi/>
3. **Гмурман, В.Е.** Руководство к решению задач по теории вероятности и математической статистики / В.Е. Гмурман. – М.: Высш. шк., 2007. – 479 с.

Дата поступления  
в редакцию 30.09.2016

**G.V. Borisov, E.D.Galkina, L.N. Erofeeva, S.V. Leshcheva**

#### ON ONE CHARACTERISTIC OF A TRANSPORT STREAM

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

**Purpose:** Some non-standard methods of the statistics calculations are given.

**Design:** The speed distribution of traffic as illustration is considered.

**Findings:** Distribution laws in the previous problem are finded.

**Research:** The article will be of interest to specialists in the traffic problems.

**Originality:** The problem is considered for the first time.

*Key words:* trucking, exponential distribution, normal distribution,  $\chi^2$  – criterion.

УДК 681.3

А.М. Лабаев, И.Д. Охотников, В.П. Хранилов

## МОНИТОРИНГ И УПРАВЛЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМИ РЕСУРСАМИ УЧЕБНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ИВЦ НГТУ В УСЛОВИЯХ ВНЕДРЕНИЯ CALS-ТЕХНОЛОГИЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

**Цель:** Разработка модели управления вычислительными ресурсами в условиях внедрения CALS-технологий для организации сопровождения учебного процесса в вузе.

**Методология / подход:** Применение модели вычислительных ресурсов и алгоритмов их мониторинга предоставляет возможность прогноза эффективности вычислительных средств поддержки учебного процесса и оптимизации их экономических показателей.

**Результаты:** Построена модель интерактивного управления информационными ресурсами в задачах разработки и внедрения средств CALS -технологий для организации сопровождения учебного процесса в вузе. Приведены диаграммы, иллюстрирующие предложенные модели и алгоритмы интерактивного управления вычислительными ресурсами.

**Применение:** Для эффективного управления вычислительными ресурсами, модернизации и перераспределения средств технического и программного обеспечения информационных технологий, предназначенных для поддержки учебного процесса в техническом вузе.

**Оригинальность / значение:** Данные проведенного мониторинга позволяют принимать обоснованные расчетом организационные решения, связанные с управлением вычислительными ресурсами, то есть модернизацией и перераспределением средств технического и программного обеспечения информационных технологий, предназначенных для поддержки учебного процесса в техническом вузе.

*Ключевые слова:* CALS-технологии, модель вычислительных ресурсов, пространство параметров, пространство состояний, рейтинг, оценка и прогноз вычислительных ресурсов.

### Введение

Современные информационные технологии, реализуемые в учебном процессе вуза, предъявляют особые требования к оснащенности кафедр и факультетов средствами вычислительной техники и специализированным периферийным оборудованием. Вычислительные ресурсы технического обеспечения информационных технологий определяют образовательный потенциал учебного заведения в области подготовки специалистов перспективных инновационных направлений.

В настоящее время многие российские вузы в связи с ограниченностью финансовых ресурсов находятся перед проблемой выбора первоочередности объектов инвестирования во внутрихозяйственной деятельности. Опыт зарубежных и ведущих отечественных вузов предполагает в первую очередь организацию непрерывной информационной поддержки жизненного цикла учебного процесса – CALS- или ИПИ-технологии (в отечественной транскрипции) [1-3], требующей, в свою очередь, мобилизации и концентрации имеющихся вычислительных ресурсов.

Математическая постановка задач, возникающих при этом, базируется на оптимизации технико-экономических показателей, в том числе не только в пространстве параметров, но и в пространстве состояний (структур), то есть ставятся и формулируются задачи не только параметрического синтеза и анализа, а и структурного.

### Модель вычислительных ресурсов в пространстве параметров

Для формализации способов принятия решений и моделирования процесса оценки вычислительных ресурсов структурных подразделений НГТУ в пространстве параметров  $\mathbf{P}$  при наличии альтернативных вариантов предложена математическая модель интерактивного

распределения ресурсов при выборе средств поддержки CALS-технологий [3]. При моделировании процесса распределения ресурсов в условиях наличия альтернативных вариантов предлагается использовать векторную модель  $\mathbf{Y}=\mathbf{F}(\mathbf{P},\mathbf{\Lambda})$  [3], где  $\mathbf{P}$  – вектор ресурсов системы (внутренних параметров, определяемых технико-экономическими характеристиками элементов);  $\mathbf{\Lambda}$  – вектор параметров внешних воздействий;  $\mathbf{Y}$  – вектор выходных параметров, определяющий интегральные технико-экономические характеристики системы и отображающий результаты проектирования;  $\mathbf{F}$  – теоретико-множественный функционал, выражающий соответствие  $\mathbf{q} = (\mathbf{P},\mathbf{Y},\mathbf{F})$  с учетом воздействия внешних факторов  $\mathbf{\Lambda}$ .

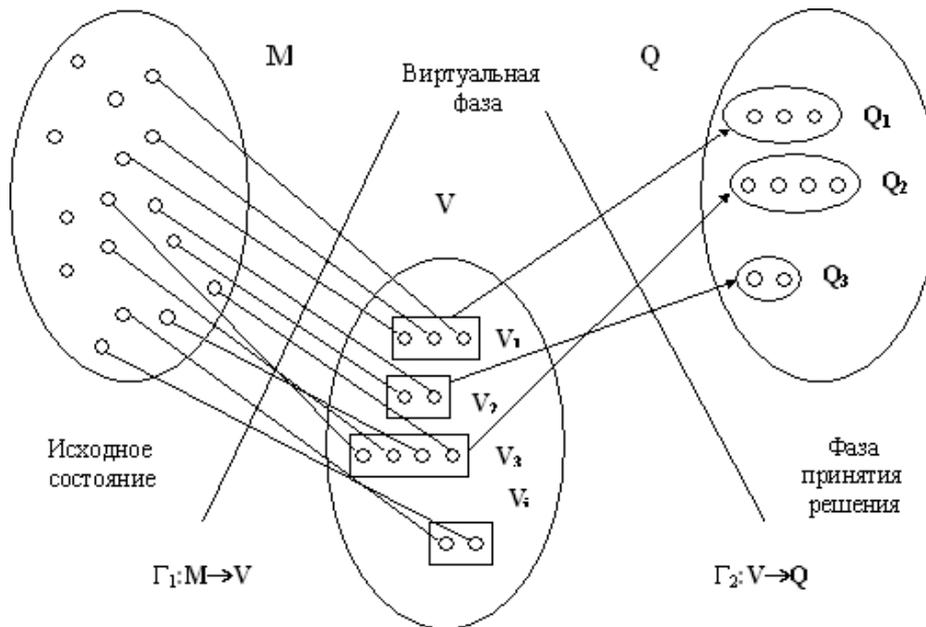
Дальнейшее решение задачи оценки вариантов системы связано с определением степени влияния отдельного показателя  $p_j$  на качество (эффективность) системы. Это предполагает задание в качестве внешнего управляющего параметра коэффициентов важности ("веса") показателей  $\lambda_j$ , образующих вектор весомости  $\mathbf{\Lambda}=\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$ . Значения весовых коэффициентов определяются, исходя из функционального назначения и особенностей эксплуатации компьютеров, методом экспертных оценок. В этом случае вектор весомости  $\mathbf{\Lambda}$  эквивалентен вектору внешних воздействий  $\mathbf{Q}$ . Такой подход позволяет в процедуре оценивания отдавать некоторое предпочтение более важным показателям, что приводит к оценке решения с помощью взвешенной целевой функции  $F(\mathbf{P},\mathbf{\Lambda})$ . Функцию  $F(\mathbf{P},\mathbf{\Lambda})$  можно представить как скалярное произведение векторов  $\mathbf{P}=\{p_{i,j}\}$  и  $\mathbf{\Lambda}=\{\lambda_j\}, j=1,n$ :  $F(\mathbf{P},\mathbf{\Lambda})=\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \lambda_j p_{i,j}$  [3]. Кроме того, сопоставимость влияния каждого показателя на величину целевой функции будет обеспечена в том случае, когда известна тенденция влияния изменения отдельных параметров на значение  $F(\mathbf{P},\mathbf{\Lambda})$  и диапазоны возможных изменений каждого из безразмерных значений показателей окажутся соизмеримыми в числовом выражении. При этом наиболее удобен диапазон  $0 \leq \bar{p}_j \leq 1$ , где  $\bar{p}_j$  – нормированное значение  $p_j$ . Операции нормирования и масштабирования могут быть осуществлены одним и тем же преобразованием  $\gamma(p_j)$  – нормирующей функцией, вид которой будет определяться особенностями решаемой задачи оценки или выбора.

Идентифицируем описанную модель для задачи оценки вычислительных ресурсов технического обеспечения информационных технологий в учебном процессе университета в пространстве параметров:  $p_1$  – тактовая частота процессора;  $p_2$  – объем RAM;  $p_3$  – объем ROM;  $p_4$  – объем VideoRAM;  $p_5$  – размер диагонали видеомонитора;  $p_6$  – срок службы. Тенденции влияния изменений всех параметров элементов на величину целевой функции – прямая. Математическое описание  $i$ -го варианта:  $y_i(p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6)$  [2,3]. Заданная таким образом математическая модель вычислительных ресурсов в пространстве параметров  $\mathbf{P}$  позволяет вычислять рейтинговую оценку вычислительных ресурсов специализированных подразделений информационно-вычислительного центра (ИВЦ) университета, формализовать определение потребности в изменении вычислительных ресурсов с целью их модернизации и перераспределения.

### Модель вычислительных ресурсов в пространстве состояний

Для представления модели управления вычислительными ресурсами в пространстве состояний рассмотрим задачу проектирования вычислительной системы –  $\mathbf{Q}$ , состоящей из объектно-ориентированных модулей–наборов (ООН)  $\mathbf{Q}_i$ , формируемых из множества вариантов проектных решений  $\mathbf{V}_j$  (рис. 1) [4].

Процедура формирования ООН включает этап анализа и оценки множества вариантов проектных решений  $\mathbf{V}$ , составленного из  $m_i \in \mathbf{M}$  в интерактивном режиме, с учетом предпочтений разработчика, качественных и количественных технико-экономических показателей и параметров элементов. Этот этап может осуществляться как в реальном процессе формирования наборов, так и виртуально путем имитационного комбинаторного моделирования.



**Рис. 1. Модель управления вычислительными ресурсами в пространстве состояний**

При достижении устойчивой работоспособности варианта реализации ООН, составленного из  $v_i \in V_j$ , перешедших, в свою очередь, из  $M$  при интерактивном участии разработчика, становится возможным зафиксировать ООН  $Q_i$ . При формировании структуры  $Q$  комбинацией элементов наборов  $v_i$  в виртуальной фазе  $V$  происходит перераспределение элементов модулей  $V_j$  и, соответственно, их параметров.

Таким образом, для формализованного описания состояний проектируемой вычислительной системы в пространстве состояний, определенного в обозначениях рассматриваемой модели, имеем составное теоретико-множественное отображение  $\Gamma: M \rightarrow Q$ ;  $\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2$ ;  $\Gamma_1: M \rightarrow V$  и  $\Gamma_2: V \rightarrow Q$  [4].

Нетрудно видеть, что данная модель отображает процесс сборки (виртуальная фаза) компьютера  $Q_j$  (фаза принятия решения) из комплектующих  $m_i \in M$  (исходное состояние) или изменения его конфигурации путем модернизации или замены (виртуальная фаза). Естественным образом изменения в пространстве состояний (структур) приводят к изменениям в пространстве параметров. При необходимости эти изменения моделируются внутренними операторами рассматриваемой динамической модели управления [4].

### Расчет рейтингов вычислительных ресурсов

Векторная модель вида:  $Y = F(P, \Lambda)$  допускает её использование для оценки вычислительных ресурсов структурных подразделений ИВЦ НГТУ, ориентированных на решение задач инженерной геометрии и компьютерной графики, в пространстве параметров  $P$ . Получаемые для каждого оцениваемого варианта значения скалярной целевой функции

$F(P, \Lambda)$ , выраженные как  $R_i = \sum_{j=1}^n \lambda_j \bar{p}_{i,j}$ , дают значение его интегральной оценки по при-

веденным (нормированным) значениям и позволяют провести сравнение различных конфигураций вычислительных средств (компьютеров и периферийных устройств) по введенным параметрам. Величина  $R_i$  определяет рейтинг варианта и используется для оценки и сравнения вычислительных ресурсов и эффективности формируемой или оцениваемой вычислительной системы.

Определение рейтинга при помощи нормированных значений параметров комплек-

тующих элементов позволяет перейти к процедуре «мягкого» сравнения альтернатив без учета различающихся диапазонов изменения значений и размерности их величин.

При использовании экстремальных критериев оценки рейтингов вариантов лучшему (худшему) из них будет соответствовать приведенное значение  $R_i = \max(\min) \sum_{j=1}^n \lambda_j \bar{p}_{i,j}$  [5].

Определенные таким образом рейтинги отдельных компьютеров подразделения (рис. 2) позволяют оценить их вычислительные ресурсы, а при суммировании получить интегральную оценку (рейтинг) всего подразделения (отдельного компьютерного класса ИВЦ).

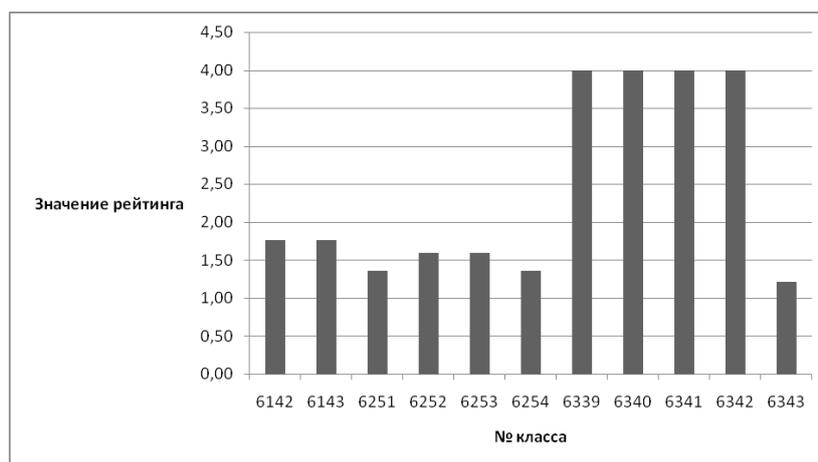


Рис. 2. Диаграмма рейтингов подразделений ИВЦ без учета весовых коэффициентов

### Применение рейтингов для оценки и мониторинга вычислительных ресурсов подразделений

Количественное выражение вычислительных ресурсов определяется техническими характеристиками (параметрами) компьютеров и основных периферийных устройств. Подразделения ИВЦ НГТУ (компьютерные классы), ориентированные на поддержку учебного процесса, оснащены персональными компьютерами на IBM-совместимой платформе, что означает поддержку процессоров Intel и операционной системы Windows [6, 7].

Оснащение компьютерами велось с начала 2000-х годов и, в большинстве случаев, приобретались отдельные комплектующие, а сборка производилась силами сотрудников ИВЦ. Ускорение технического прогресса, наблюдаемое в последние годы, и, как следствие, развитие технического обеспечения информационных технологий обуславливает большое количество разнообразных типов комплектующих.

В результате в классах ИВЦ НГТУ оказались компьютеры, оснащенные разными процессорами разных поколений [7]. У остальных комплектующих (оперативная память, жесткий диск и т.д.) также наблюдается большой разброс в значениях параметров. В первом (самом грубом) приближении оснащенность вычислительной техникой, и, как следствие, вычислительные ресурсы могут определяться лишь по количественным характеристикам, без учета параметров комплектующих.

Такой подход оправдывает себя лишь в случае условий дефицита и отсутствия достаточного ассортимента комплектующих либо в случае ограниченности финансовых ресурсов для их покупки. Если имеет место один из этих случаев (в случае НГТУ справедливо суждение об ограниченности ресурсов, выделяемых на покупку технического обеспечения), то простейший способ определения рейтинга вычислительных ресурсов без учета параметров элементов, входящих в их состав, предусматривает вычисление удельных показателей однотипных устройств или расчет усредненных показателей, определяемых с использованием статистической обработки. Получаемые значения рейтингов используются с целью мониторинга вычислительных ресурсов как отдельных компьютеров, так и для оценок групп ком-

пьютеров, выполняющих один тип задач. Мониторинг осуществляется с целью сравнения возможных вариантов конфигураций системы или выбора ее элементов с целью обеспечения функциональности или улучшения качественных или количественных показателей, определяющих работоспособность и экономическую эффективность применения вычислительных ресурсов [7].

Для анализа результатов расчета необходимо понимать, какие требования выдвигаются к тем или иным направлениям обучения. Учитывать целевую направленность и профессиональную ориентацию отдельных подразделений ИВЦ становится возможным при определении весовых коэффициентов, которые отображают степень влияния параметров каждого конкретного компонента на итоговый рейтинг компьютера, заданного принятой структурой модели вычислительных ресурсов [6].

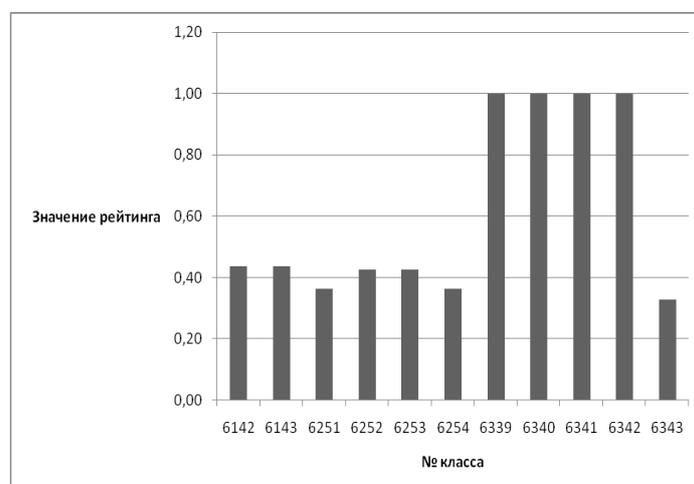
Состав основных направлений подготовки, структура реализации отдельных образовательных программ, анализ учебных планов и сложившиеся в НГТУ технологии информатизации учебного процесса позволяют разделить преподаваемые в цикле «Информационные технологии» дисциплины на три условные категории:

1. «Графика» – использование программных продуктов, связанных с обработкой изображений (AutoCAD, Inventor, Gimp и т.п.). Для комфортной работы продуктов этой группы более важны тактовая частота процессора и размер видеопамати, обеспечивающие отображение графики, а размер оперативной памяти и объем жесткого диска вторичны.

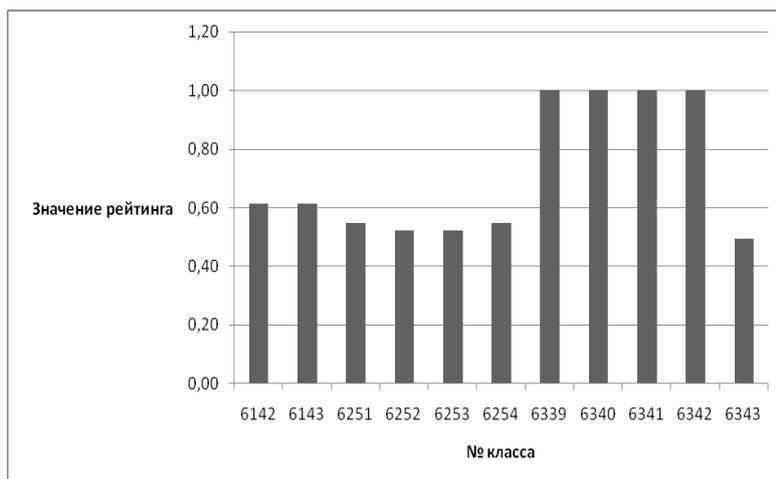
2. «Программирование» – использование программных продуктов, связанных с написанием, компиляцией и отладкой программ (Visual Studio, Free Pascal и т.п.). Такие продукты предполагают высокие уровни тактовой частоты процессора и оперативной памяти, необходимые для корректной работы, связанной с запуском и отладкой большого количества процессов, в то время, как объем жесткого диска и объем видеопамати не так важен по причине небольшого объема программ и упрощенного графического интерфейса.

3. «Информатика» – использование программных продуктов, предполагающих общее ознакомление с системами и возможностями компьютера на бытовом уровне (Microsoft Office). Для программных продуктов этой отрасли приоритетным является объем жесткого диска, тактовая частота процессора и объем оперативной памяти для хранения и обработки большого количества пользовательских файлов, не имеющих особых требований по графике, что определяет вторичность объема видеопамати.

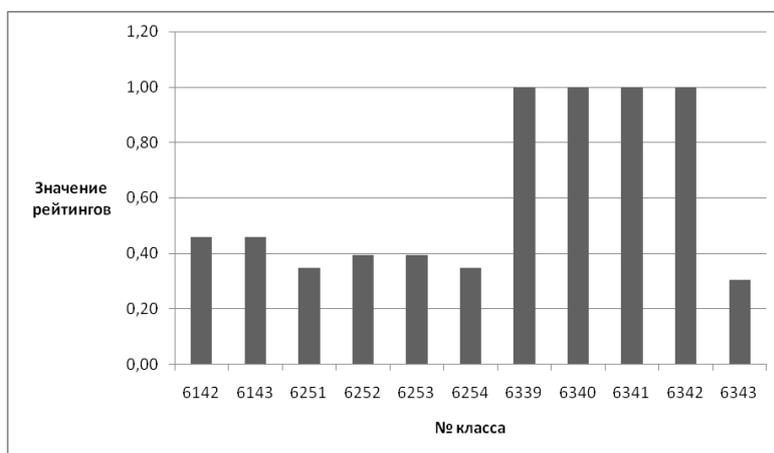
Таким образом, полученные диаграммы рейтингов требуют корректировки и представляются на рис. 3 – рис. 5.



**Рис. 3. Диаграмма рейтингов с учетом весовых коэффициентов направления «Графика»**



**Рис. 4. Диаграмма рейтингов с учетом весовых коэффициентов направления «Программирование»**



**Рис. 5. Диаграмма рейтингов с учетом весовых коэффициентов направления «Информатика»**

### **Анализ рейтингов. Прогнозирование ресурса работоспособности подразделений**

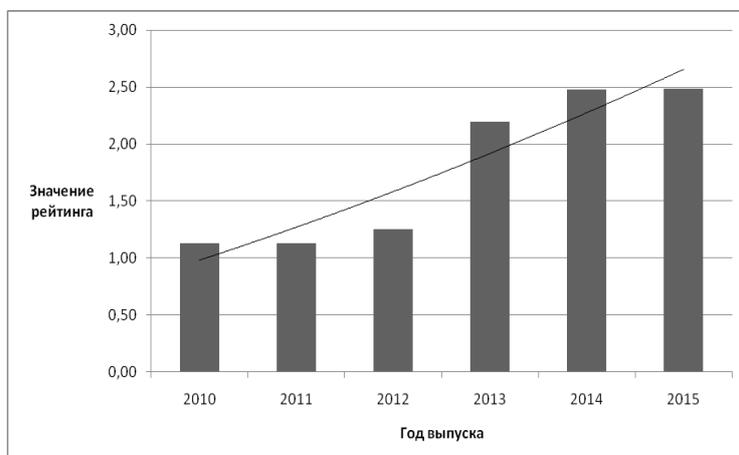
Дальнейший анализ полученных рейтингов подразумевает выделение так называемого опорного продукта – программного средства, с которым работает наибольшее число студентов в рамках выбранного направления обучения. В условиях ИВЦ НГТУ такими опорными программными продуктами могут выступать:

- AutoCAD версия 18.2 (AutoCAD 2012) – для направления «Графика»;
- Microsoft Visual Studio 2008 (версия 9.0) – для направления «Программирование»;
- Microsoft Office 2003 (версия 11.0) – для направления «Информатика».

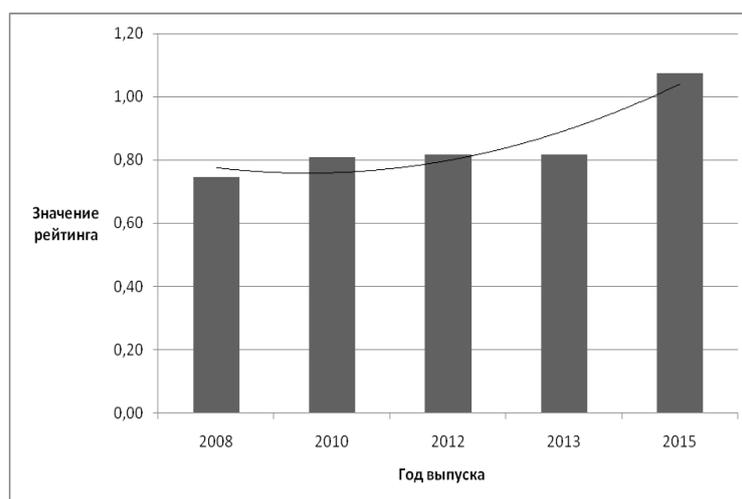
Каждый из перечисленных продуктов характеризуется совокупностью системных требований, определяющих минимальные значения соответствующих параметров компьютеров, при которых обеспечивается устойчивая работа установленной программы.

В условиях ограниченности бюджета организации (что, несомненно, справедливо по отношению к образовательным учреждениям) задачей особой важности является обеспечение максимальной длительности функционирования оборудования. Для того, чтобы грамотно спланировать финансовую деятельность, необходимо иметь формализованное выражение для изменений уровня требований опорных программных продуктов в будущем. Сделать это можно на основе ретроспективных данных – системных требований версий предыдущих лет. Эти данные используются для построения аппроксимирующей функции, которая, будучи по-

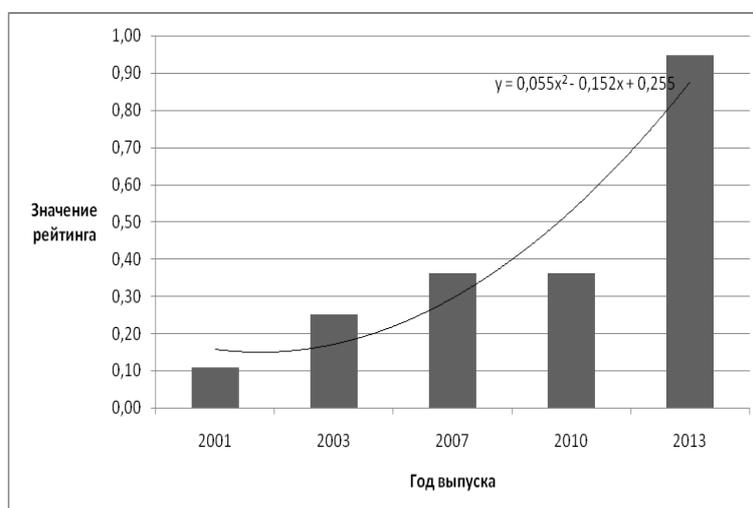
строенной по определенному количеству аргументов, позволит экстраполировать поведение рейтингов программных продуктов в будущем. Результаты моделирования таких аппроксимирующих зависимостей приведены на рис. 6 – рис. 8.



**Рис. 6. Изменение рейтингов системных требований опорного продукта AutoCAD**



**Рис. 7. Изменение рейтингов системных требований опорного продукта Visual Studio**



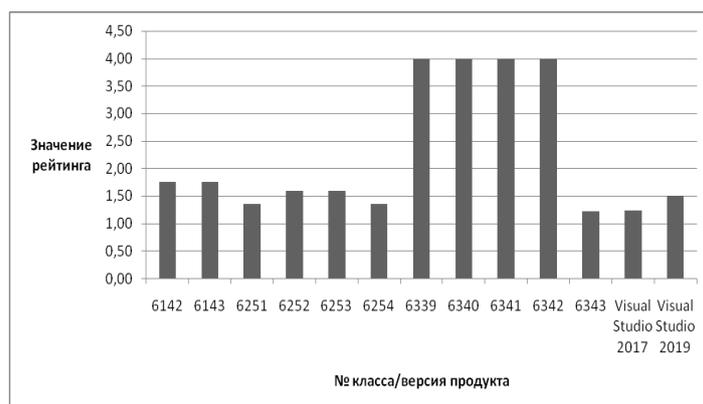
**Рис. 8. Изменение рейтингов системных требований опорного продукта Microsoft Office**

Таким образом, для AutoCAD – функция прогнозирования имеет следующий вид:  $y = 0,0115x^2 + 0,2553x + 0,7104$ ; для Visual Studio –  $y = 0,0274x^2 - 0,0979x + 0,8452$ ; для Microsoft Office –  $y = 0,0552x^2 - 0,1521x + 0,2552$ .

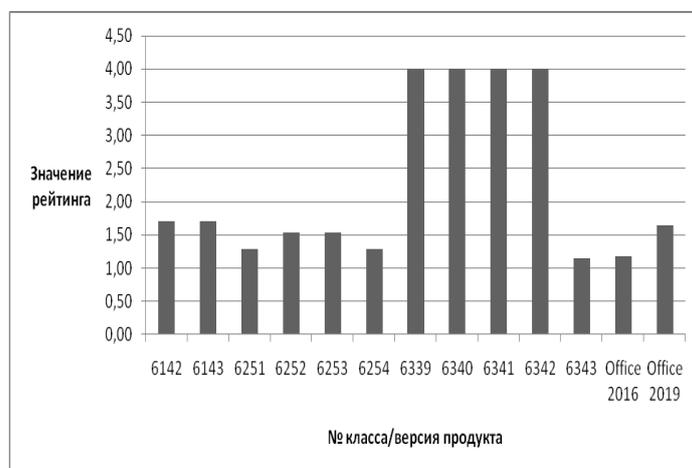
Для визуализации рассчитанных данных построим диаграмму рассчитанных рейтингов вычислительных ресурсов компьютеров в классах ИВЦ и спрогнозированных экстраполяцией значений рейтингов опорных программных продуктов, условно назвав их по наименованию программного продукта и года его предположительного выпуска. Соответствующие диаграммы представлены на рис. 9 – рис. 11.



**Рис. 9. Прогноз соответствия вычислительных ресурсов системным требованиям опорного продукта AutoCAD**



**Рис. 10. Прогноз соответствия вычислительных ресурсов системным требованиям опорного продукта Visual Studio**



**Рис. 11. Прогноз соответствия вычислительных ресурсов системным требованиям опорного продукта Microsoft Office**

### Выводы

На основании диаграмм, представленных на рис. 9 – рис. 11, можно сделать следующие выводы:

- По направлению обучения «Графика» требованиям текущей версии опорного программного продукта соответствуют только компьютерные классы №№ 6339 – 6342. Все остальные классы не удовлетворяют требованиям даже текущей версии. Как видно на рис.9, компьютерные классы № 6339 – 6342 способны принять на себя версии опорного продукта вплоть до 2019 года. Для принятия дальнейших версий потребуется их модернизация. Из всего вышесказанного следует, что для проведения занятий по направлению «Графика» срочная модернизация компьютерных классов не требуется.

- По направлению обучения «Программирование» все классы ИВЦ удовлетворяют текущим требованиям, однако к 2019 году компьютерные классы № 6251, 6254, 6343 уже не будут способны принять на себя версии опорного продукта Visual Studio. Как итог, в целом модернизация компьютерных классов для проведения занятий по направлению «Программирование» не требуется.

- По направлению обучения «Информатика» все классы ИВЦ удовлетворяют текущим требованиям, однако к 2020 году ряд компьютерных классов, а именно 6251, 6252, 6253, 6254, 6343 не будут способны принять на себя соответствующие версии опорного продукта. В целом, модернизация компьютерных классов в текущий момент не требуется, однако в ближайшем будущем такая необходимость может возникнуть.

- Компьютерные классы №№6339 – 6342 полностью удовлетворяют текущим требованиям по всем направлениям. В рамках рассмотрения ближайшего будущего можно говорить, что для использования этих классов в направлении обучения «Графика» модернизация потребуется только лишь в 2019 году. По остальным направлениям эти классы удовлетворяют прогнозируемым требованиям опорных программных продуктов вплоть до 2020 года.

- Компьютерные классы №6142, 6143 удовлетворяют требованиям опорных продуктов направлений «Информатика» и «Программирование» как текущим, так и вплоть до 2020 года. При использовании их в качестве классов с направлением обучения «Графика» необходима их глубокая модернизация.

- Компьютерные классы №6251-6254, 6343 удовлетворяют текущим требованиям опорных продуктов направлений «Информатика» и «Программирование», но нуждаются в модернизации, поскольку с разной степенью, но не удовлетворяют прогнозируемым условиям. При использовании их в качестве классов с направлением обучения «Графика» необходима их глубокая модернизация.

Предложенная рейтинговая оценка вычислительных ресурсов при систематической её реализации позволяет осуществить постоянный мониторинг вычислительных ресурсов подразделений университета.

Данные проведенного мониторинга позволяют принимать обоснованные расчетом организационные решения, связанные с модернизацией и перераспределением средств технического и программного обеспечения информационных технологий, предназначенных для информационной поддержки учебного процесса в вузе [8].

### Библиографический список

1. **Гунин, Л.Н.** Модель внедрения ИПИ-технологий на предприятии в условиях организационных изменений и ограниченных ресурсов / Л.Н. Гунин, В.П. Хранилов // Информационные системы и технологии. ИСТ-2006: тез. докл. междунар. конф.; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н.Новгород. – 2006. – С. 127.
2. **Гунин, Л.Н.** Модель внедрения ИПИ-технологий на предприятиях радиоприборостроения в условиях организационных изменений и ограниченных ресурсов: монография / Л.Н. Гунин, В.П. Хранилов. – Н.Новгород, НГТУ, 2006. – 153 с.
3. **Хранилов, В.П.** Идентификация математической модели внедрения CALS-технологий не

- предприятия радиоприборостроения / В.П. Хранилов, Л.Н. Гунин, А.В. Кашенков // Идентификация систем и задачи управления. SICPRO`12: тр. 9-й междунар. конф. / Ин-т. проблем управления им. В.А.Трапезникова РАН. –М., 2012. – С. 266-278.
4. **Хранилов, В.П.** Идентификация внутренних операторов моделей управления для задач проектирования технических систем // XII всероссийское совещание по проблемам управления. ВСПУ-2014: сб. науч. тр. / Ин-т. проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. – М., 2014. – С. 3281–3288.
  5. **Хранилов, В.П.** Многоуровневый мониторинг вычислительных ресурсов подразделений предприятия / В.П. Хранилов, Л.Н. Гунин, М.М. Егоров // Идентификация систем и задачи управления. SICPRO`06: тр. 5-й междунар. конф. / Ин-т. проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. – М., 2006. – С. 979–996.
  6. **Мерзляков, И.Н.** Формализация оценки вычислительных ресурсов, используемых в учебном процессе / И.Н. Мерзляков, М.В. Ширяев, В.П. Хранилов // Информационные системы и технологии. ИСТ-2006: тез. докл. междунар. конф. / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2006. – С. 136.
  7. **Мерзляков, И.Н.** Рейтинговая оценка вычислительных ресурсов учебных структурных подразделений вуза / И.Н. Мерзляков, М.В. Ширяев, В.П. Хранилов // Информационные системы и технологии. ИСТ-2006: тез. докл. междунар. конф. / НГТУ им. Р.Е. Алексеева.–Н.Новгород, 2006. С.137.
  8. **Баранов, В.Г.** Методы проектирования информационно-управляющих и телекоммуникационных систем: монография / В.Г. Баранов [ и др.]. – М.: Изд-во «Радиотехника», 2016. – 216 с.

*Дата поступления  
в редакцию 15.10.2016*

**A.M. Labaev, Iv.D. Okhotnikov, V.P. Khranilov**

## **MONITORING AND CONTROL COMPUTING RESOURCES TRAINING EQUIPMENT ITC NGTU UNDER IMPLEMENTATION CALS-TECHNOLOGIES**

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

**Purpose:** Development of computing resources control model in the conditions of implementation of CALS-technologies for support of educational process in high school.

**Design/methodology/approach:** Application of the model of computing resources and their monitoring algorithms enables the forecast of efficiency of computational tools to support the learning process and to optimize their economic parameters.

**Findings:** The model of interactive control information resources in the problems of development and implementation of tools CALS-technologies to support the organization of educational process in high school. Are diagrams illustrating the proposed model and algorithms of interactive computing resources.

**Research limitations/implications:** In order to effectively control computing resources, modernization and redistribution means hardware and software information technologies designed to support the educational process in technical universities.

**Originality/value:** These allow the monitoring to take reasonable expectation organizational decisions related to the control of computing resources, that is, modernization and redistribution of resources of hardware and software information technologies designed to support the educational process in technical universities.

*Key words:* CALS-technology, model of computing resources, the parameter space, the state space, rating, evaluation and prediction of computing resources.

УДК 004.021

М.А. Степаненко, Е.А. Фунтиков

## ОЦИФРОВКА И АНАЛИЗ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА ПЛАТФОРМЕ ANDROID

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Посвящена спектральному анализу акустических сигналов и определению нот музыкального произведения в реальном времени при помощи мобильных устройств на платформе Android.

*Ключевые слова:* захват звука, дискретизация, окно Гаусса, антиалиасинг, гармонический сигнал.

### Введение

Вопрос спектрального анализа оцифрованных звуков всегда стоял довольно остро, так как он применяется во многих сферах жизнедеятельности (например, обработка музыкального произведения или определение посторонних шумов у механизмов на производстве). В настоящее время темпы роста производительности мобильных устройств набирают обороты, что позволяет производить сложные и трудоёмкие математические операции прямо на портативном устройстве.

Результаты исследований будут реализованы в виде мобильного приложения, способного в реальном времени оцифровывать и анализировать игру на фортепиано и сравнивать полученные в процессе анализа музыкальные ноты с оригинальным произведением на предмет качества игры. Процесс обработки звука можно разделить на пять этапов: оцифровка (дискретизация аналогового сигнала) поступающей через микрофон устройства музыки, обработка оцифрованных данных, получение частотного и фазового спектров, их анализ и выделение музыкальных нот.

### Оцифровка аналогового акустического сигнала

Для того чтобы в дальнейшем обрабатывать звуковой сигнал, его нужно оцифровать. Это делается путём дискретизации (рис. 1) при помощи встроенного в мобильное устройство АЦП (аналогово-цифровой преобразователь) с определёнными параметрами. Платформа Android предоставляет необходимый API с возможностью конфигурирования следующих параметров: частота дискретизации, тип аудиоканала (моно/стерео), аудио формат (PCM 8 bit / PCM 16 bit), размер буфера (фрейма) данных. Одним из наиболее важных параметров является частота дискретизации (рис. 1).

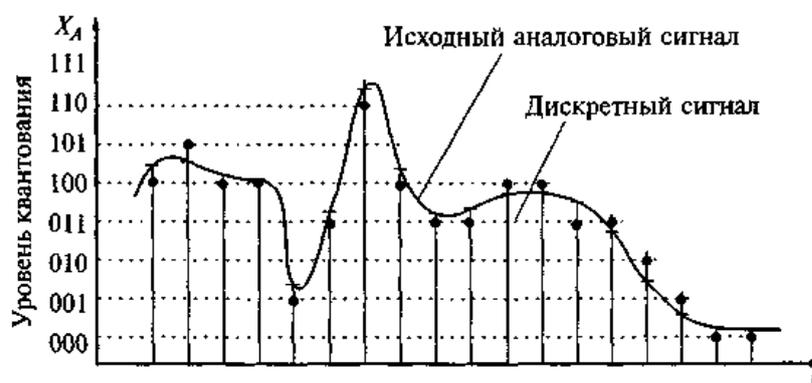


Рис. 1. Дискретизация аналогового сигнала

Она выбирается исходя из диапазона частот музыкальных нот. По теореме Шеннона-Найквиста, частота дискретизации должна быть, как минимум, в два раза больше частоты обрабатываемого звука. В табл. 1 отображены частоты всех музыкальных нот, начиная с «Ля субконтроктавы» и заканчивая самой высокой – «Ми пятой октавы».

Таблица 1

## Музыкальные ноты и соответствующие им музыкальные частоты.

Нота	Название	Частота (Hz)
A0	Ля субконтроктавы	27.50
A0 <sup>#</sup>	Ля-диез субконтроктавы	29.13
B0	Си субконтроктавы	30.87
~~~~	~~~~~	~~~~~
D8	Ре пятой октавы	4698.40
D8 <sup>#</sup>	Ре-диез пятой октавы	4978.00
E8	Ми пятой октавы	5274.00

Исходя из описанной теоремы, частота дискретизации выбрана следующим образом:

$$\omega \geq 5274 * 2 \approx 11000 \text{ Hz.}$$

Ближайшее к этой частоте значение из пакета API android.media – 11025 Hz.

В качестве аудиоформата был выбран PCM 16 bit, а тип аудиоканала – моно, соответственно, при такой конфигурации, одна секунда записи будет занимать

$$\frac{11025 * 16}{8} \approx 21.484 \text{ Кб}$$

памяти.

Размер буфера выбирается кратным степени 2, так как для работы алгоритма БПФ (о котором речь идет далее) требуется чётное количество отсчётов.

После задания необходимых параметров начинается цикл сбора и обработки заранее оцифрованного звука. На каждой итерации цикла буфер заполняется дискретными значениями, которые поступают на дальнейший анализ.

### Дискретное преобразование Фурье

Так как вычисления производятся на устройстве с ограниченными ресурсами и в реальном времени будет производиться быстрое преобразование Фурье (БПФ) каждого отдельного фрейма, это позволит сократить количество вычислений ( $N$ ) с  $N^2$  до  $N * \log_2 N$ . БПФ основано на том, что среди множителей (синусов) есть много повторяющихся значений (в силу периодичности синуса). Его алгоритм группирует слагаемые с одинаковыми множителями, существенно сокращая число умножений. В результате быстрое действие БПФ может во множество раз превосходить быстрое действие стандартного алгоритма (зависит от  $N$ ). При этом следует подчеркнуть, что алгоритм БПФ точнее, по сравнению со стандартным, так как сокращение числа операций уменьшает ошибки округления.

Выделяется короткий кадр (фрейм) композиции, состоящий из дискретных отсчётов, который условно считаем периодическим и применяем к нему преобразование Фурье. В результате преобразования получаем массив комплексных чисел, содержащий информацию об

амплитудном и фазовом спектрах анализируемого фрейма. Причём спектры также являются дискретными с шагом равным отношению частоты дискретизации к количеству отсчётов.

$$\delta = \frac{\omega}{n}.$$

Таким образом, чем больше делается отсчётов, тем более точное разрешение мы получаем по частоте. Однако если мы при постоянной частоте дискретизации увеличиваем число отсчётов, то увеличивается анализируемый временной интервал. В реальных музыкальных произведениях ноты звучат с различной длительностью и могут быстро сменять друг друга, а значит, возможно их наложение, поэтому амплитуда длительных нот будет перекрывать собой амплитуду коротких. С другой стороны, такой способ увеличения разрешения по частоте хорошо подходит для гитарных тюнеров, поскольку нота, как правило, звучит одна и достаточно долго.

Также существует относительно простой подход увеличения разрешения по частоте – исходный дискретный сигнал заполняется нулями между отсчётами. Однако применение такого подхода сильно искажает фазовый спектр, но при этом увеличивает разрешение амплитудного спектра. В этом случае возможно применение фильтров Фарроу и искусственное увеличение частоты дискретизации, однако это также вносит искажения в спектры.

Длительность фрейма обычно составляет приблизительно от  $3 \cdot 10^{-3}$  до 1 с. При этом чем фрейм короче, тем лучше разрешение по времени, но хуже по частоте, и наоборот. Это очень напоминает принцип неопределённости Гейзенберга из квантовой механики: чем точнее измеряется одна характеристика частицы, тем менее точно можно измерить вторую. В результате анализа фрейма одиночного синусоидального сигнала амплитудный спектр сильно напоминает дифракционную картинку.

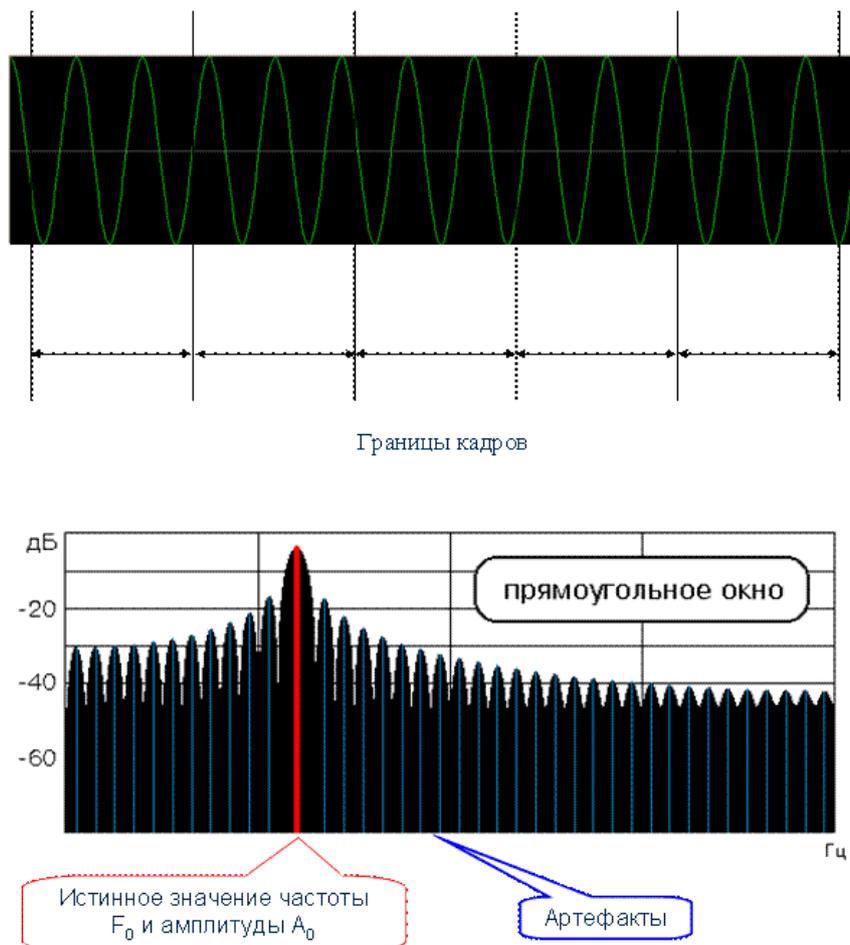


Рис. 2. Амплитудный спектр одного кадра гармонического сигнала

На практике это даёт нежелательный эффект, затрудняющий анализ сигналов, поэтому его стараются понизить путём применения оконных функций (рис. 3). На сегодняшний момент существуют следующие оконные функции: окно Ханна, окно Хэмминга, окно Наттол-ла, окно Гаусса и прямоугольное окно (сигнал без изменения). В качестве оконной функции будет использоваться окно Гаусса, так как его боковые лепестки в двойном логарифмическом масштабе не стремятся к прямой линии, но спадают намного быстрее, чем у остальных окон.

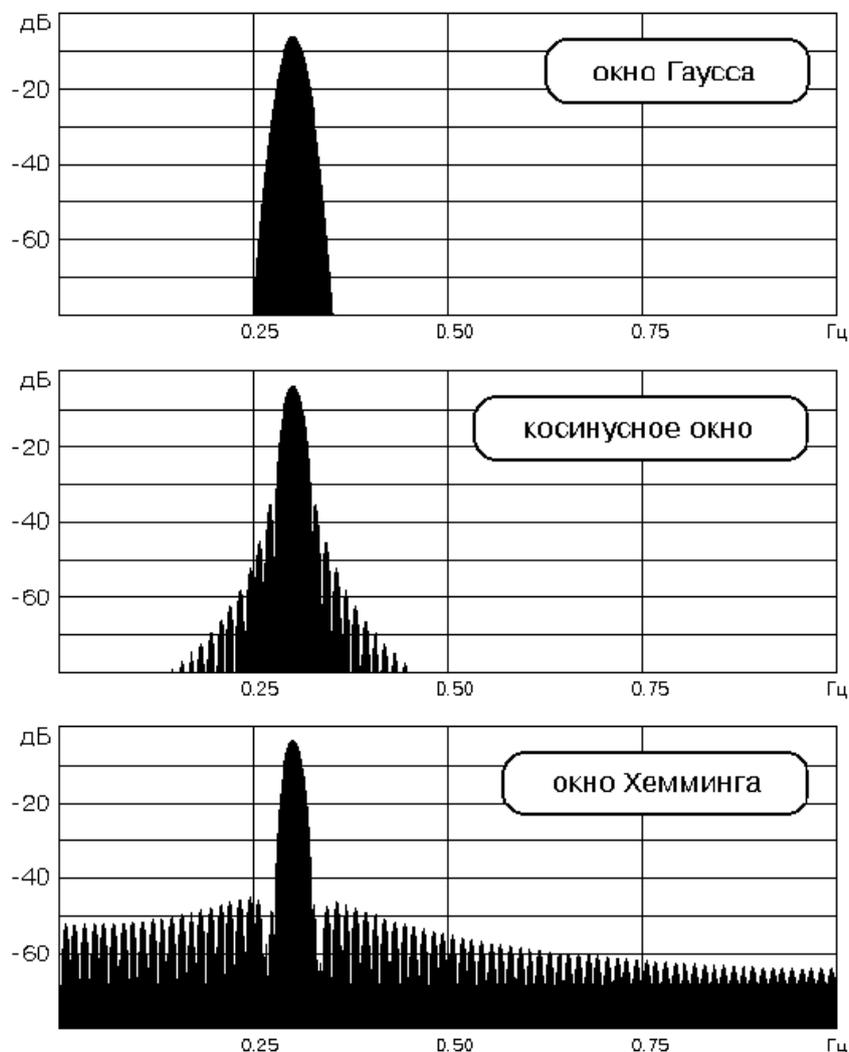


Рис. 3. Различные варианты оконных функций

Существует две разновидности алгоритма БПФ: с прореживанием по времени и частоте. Применение обоих даёт идентичные результаты. На входе функции принимают массив комплексных чисел, состоящий из реальных значений амплитуд сигнала во временной области, а на выходе дают массив комплексных чисел, содержащий информацию об амплитудном и фазовом спектрах.

Конечный массив комплексных чисел содержит в себе ровно половину полезной информации, другая половина является, на самом деле, зеркальным отражением первой и может быть исключена из рассмотрения. Этот момент подтверждает теорему Найквиста-Шеннона.

После преобразования Фурье амплитудный спектр следует нормализовать. Это приведёт к тому, что величины значений амплитуд будут одного порядка независимо от размеров фрейма.

Получив амплитудный и частотный спектры, можно произвести анализ сигнала, например, применить частотную фильтрацию или произвести сжатие. К примеру, таким об-

разом можно сделать эквалайзер: выполнив прямое преобразование Фурье, можно увеличить или уменьшить амплитуду конкретной области частот, после чего выполнить обратное преобразование Фурье (хотя работа настоящих эквалайзеров обычно основана на другом принципе – фазовом сдвиге сигнала) и получить обработанный акустический сигнал путём цифро-аналогового преобразования. К тому же сжать сигнал достаточно просто: необходимо сформировать словарь, где ключ – это частота, а значение – соответствующее ей комплексное число. В словарь нужно добавить только те частоты, амплитуда сигнала на которых превышает заданный минимальный порог. Данные о «тихих» частотах с малой амплитудой, не слышимых человеческим ухом, будут потеряны, но при этом получится ощутимое сжатие с сохранением надлежащего качества звучания. Частично этот принцип является основой для многих кодеков.

### Точное определение частоты

Дискретное преобразование Фурье предоставляет дискретный спектр, где значения амплитуд находятся на равных промежутках по частоте друг от друга. И если при этом частота в сигнале кратна шагу равному отношению частоты дискретизации к количеству отсчётов

$$\partial = \frac{\omega}{n},$$

то, в результате, мы получим выраженный остроконечный пик. Если же частота сигнала находится между границами шага, ближе к середине, то в этом случае образуется пик со «срезанной» вершиной и определение значения частоты сильно затруднится. Существует большая вероятность того, что в сигнале присутствуют две или более частот, находящиеся рядом друг с другом, – в этом и заключается ограничение разрешения по частоте. Подобно тому как на фотоснимке с малым разрешением мелкие предметы склеиваются и становятся неразличимы, тонкие детали спектра тоже могут теряться.

Но частоты музыкальных нот часто не совпадают с сеткой шагов преобразования Фурье, а для повседневных задач, таких как настройка музыкальных инструментов и потоковое распознавание музыкальных нот, необходимо знать точную частоту. К тому же, на низких октавах при разрешении от  $10,24 * 10^3$  отсчётов и ниже, сетка частот Фурье становится настолько редкой, что на одном шаге могут поместиться несколько нот, и определить, какая из них играет в данный момент становится фактически невозможно. Чтобы избежать это ограничение часто применяют аппроксимирующие функции, например, параболические. Но подобные меры являются искусственными. Они улучшают одни показатели и дают искажения в других.

Для уточнения частоты сигнала можно использовать его фазовый спектр. Этот подход основан на вычислении задержки фаз у спектров двух, наложенных друг на друга, фреймов, но, при этом, немного сдвинутых во времени.

В конечном итоге, мы получим словарь частота-амплитуда, где значения частот будут достаточно близки к реальным. Однако «срезанные пики» всё ещё будут проявляться, хоть и менее явно. Чтобы устранить этот недостаток, можно доопределить их путём антиалиасинга.

### Перспективы

Нотный анализ музыкальных произведений открывает ряд интересных возможностей. С помощью готового нотного рисунка можно производить поиск других музыкальных композиций с похожим рисунком.

Например, одно и то же произведение может быть исполнено на другом инструменте, с другой скоростью и/или с другим тембром, либо транспонировано по октавам, при этом нотный рисунок останется похожим, что позволит найти и определить различные варианты исполнения одного и того же произведения.

В некоторых конкретных случаях такой анализ поможет выявить плагиат в музыкальных произведениях. Также по нотному рисунку, теоретически, можно искать произведения определённого настроения или жанра, что поднимает поиск на новый уровень.

### Выводы

В этой статье отображены основные принципы точного определения частот акустических сигналов и выделения нот. А также показана тонкая связь дискретного преобразования Фурье с квантовой физикой.

### Библиографический список

1. Лукин, А. Введение в цифровую обработку сигналов (математические основы) / Лукин А. - Лаборатория компьютерной графики и мультимедиа, МГУ 2007. – С. 15–32.
2. Android API Reference and Guides <http://developer.android.com>
3. Основы спектрального анализа звуков. - Интернет ресурс: <http://pandia.org/text/77/481/644.php>

*Дата поступления  
в редакцию 15.10.2016*

**М.А. Stepanenko, Е.А. Funtikov**

### DIGITIZING AND ANALYSIS OF ACOUSTIC SIGNALS ON ANDROID PLATFORM

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

**Purpose:** This article is devoted to spectral analysis of acoustic signals and identify a piece of music notes in real time using mobile devices on the Android platform.

**Design/methodology/approach:** This article observes the methods of acoustic signals digitizing and time-to-frequency translation.

**Research limitations/implications:** The present study provides an introduction to mathematical base of acoustic signals analysis based on Fourier Transform algorithm.

**Originality/value:** In scope of this study, we described an amount of methods and algorithms for runtime music recognizing.

*Key words:* sound gathering, sampling, Gauss window, antialiasing, harmonic signal.

УДК 621.372.2

К.И. Кисиленко, А.В. Прядилов, Е.П. Тимофеев

**ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ ИЗМЕРЕНИЯ СВЧ МОЩНОСТИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты моделирования и расчета термоэлектрических датчиков измерения СВЧ мощности. Моделирование, расчет и оптимизация электрических параметров и конструкций датчика проводился с помощью пакета программ численного моделирования. Моделирование устройства в диапазоне 0,3–36 ГГц позволило получить оптимальную конструкцию датчика измерителя СВЧ мощности.

*Ключевые слова:* измерение мощности, термоэлектрические датчики, СВЧ диапазон, моделирование, САПР, HFSS.

**Введение**

Развитие современной науки и техники требует непрерывного совершенствования радиоизмерительных средств, расширения их динамического и частотного диапазонов, повышения точности. Среди большого разнообразия радиоизмерений важнейшим является измерение мощности в широком диапазоне частот. При этом хорошо известно, что в СВЧ диапазоне измерение напряжения и тока затруднительно, так как сопровождается появлением значительных частотных погрешностей, а измерение напряжения и тока в волноводных трактах при некоторых типах волн вообще теряет смысл. В связи с этим на частотах, начиная с десятков мегагерц, непосредственное измерение мощности становится предпочтительным и более точным видом измерений, а на частотах свыше 1000 МГц – единственным, однозначно характеризующим интенсивность электромагнитных колебаний.

Одним из непосредственных методов измерения СВЧ мощности является термоэлектрический метод [1], который заключается в измерении термоэдс высокочастотных дифференциальных термопар прямого или косвенного нагрева, возникающей в результате рассеяния в них СВЧ мощности. При этом величина образуемой термоэдс пропорциональна поглощенной термопарой СВЧ мощности. Причем несмотря на то, что термоэлектрический метод так же, как и болометрический, применяется в основном для измерения малых уровней мощности, он имеет ряд значительных преимуществ. Так как величина термоэдс почти не зависит от окружающей температуры, в термоэлектрических ваттметрах схемы и узлы для температурной компенсации имеют второстепенное значение. Приемные преобразователи термоэлектрического ваттметра не требуют длительного времени прогрева. Основным элементом термоэлектрического преобразователя ваттметра является СВЧ термопара (блок термопар). Материалы для ветвей термопар выбираются из расчета обеспечения линейности, минимального температурного коэффициента сопротивления и высокой чувствительности.

В данной статье рассматривается разработка термоэлектрических измерительных преобразователей СВЧ мощности для коаксиального тракта, работающих в диапазоне частот 0.3-36 ГГц [2,3]. В конструкции преобразователей применяются батареи термопар висмут-сурьма косвенного подогрева. Коэффициент преобразования одной термопары  $K = 100 \frac{\text{мкВ}}{\text{°C}}$ .

Нагревательный элемент, являясь согласованной нагрузкой для коаксиального тракта (низкое значение КСВн), должен обеспечивать эффективный и сосредоточенный нагрев «горячих» спаев термопар.

В качестве подложки, несущей нагревательный элемент и батарею термопар, используется полиимидная пленка толщиной 40 мкм. Благодаря малой толщине, такая пленка не препятствует нагреву «горячих» спаев расположенных под нагревательным элементом, а ее низкая теплопроводность (около  $0,25 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot^\circ\text{C}}$ ) позволяет уменьшить длину ветвей термопар, на которых из области нагрева выносятся «холодные» спаи.

### Модель датчика для измерителя мощности СВЧ диапазона с прямоугольным нагревательным элементом

В ходе разработки были проанализированы две конструкции измерительных преобразователей. Первая – с прямоугольным нагревательным элементом – показана на рис. 1 и рис. 2.

Как было отмечено, все функциональные элементы датчика измерителя мощности, а именно термопары и нагревательный резистор выполняются на подложке из полиимидной пленки путем вакуумного напыления. Предусмотрены также контактные площадки для подачи входного сигнала и снятия термоэдс.

На рис. 1 показан вид снизу прецизионной печатной платы датчика измерителя мощности. Подложка 1 на рисунке полупрозрачна, чтобы было видно функциональные элементы на обеих сторонах платы и их взаимное расположение.

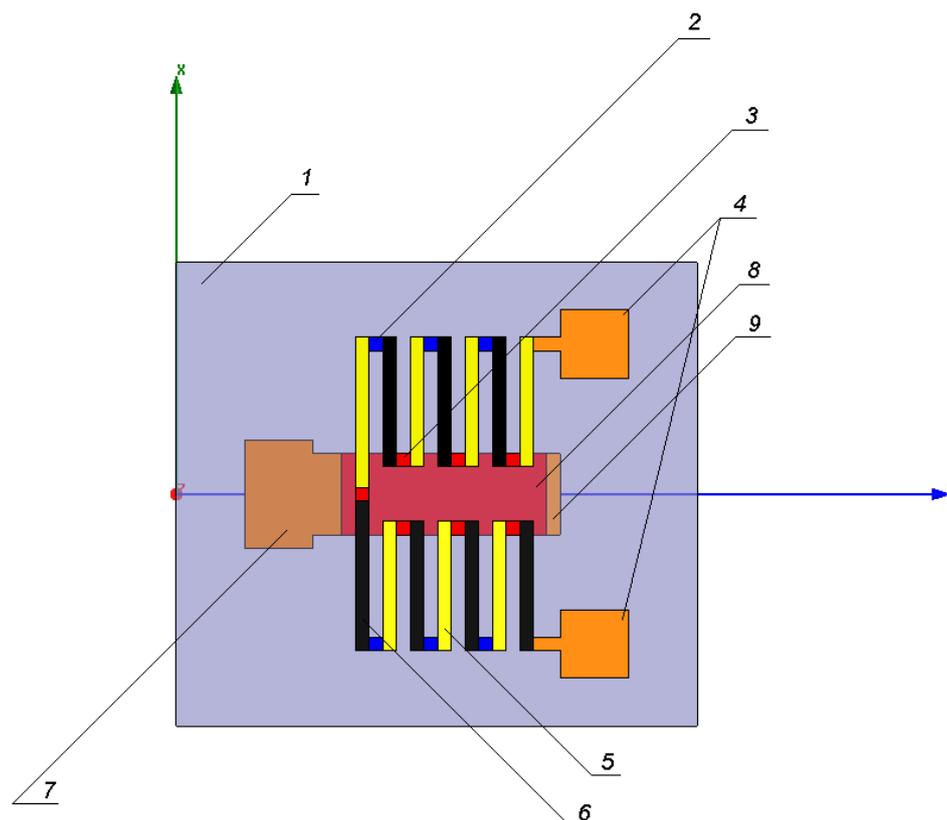
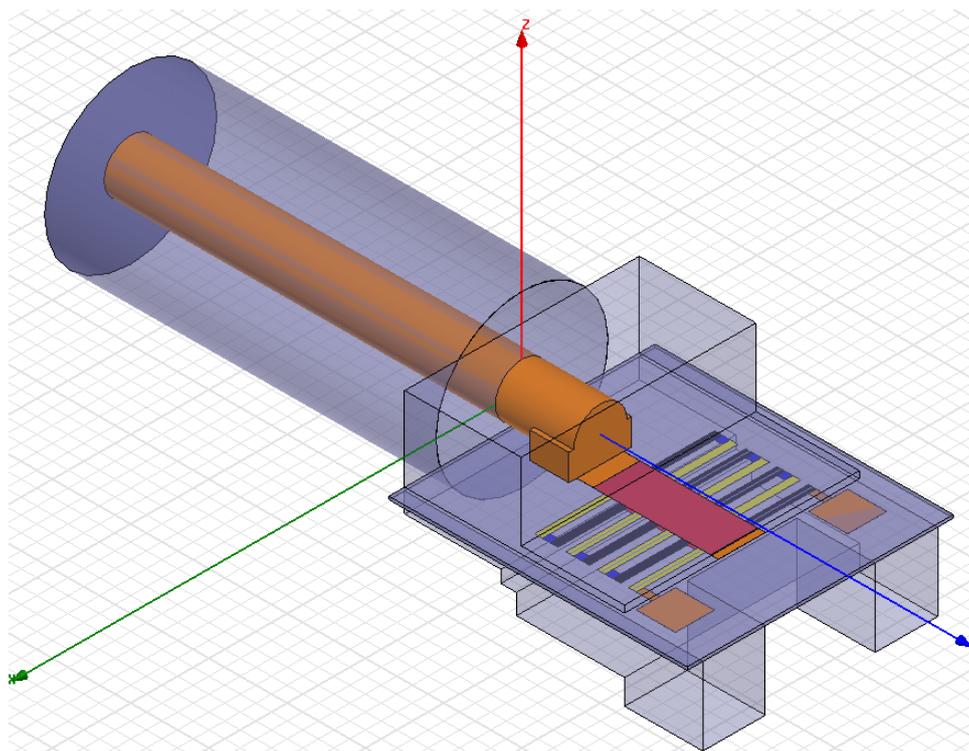


Рис. 1. Вид снизу прецизионной печатной платы датчика измерителя мощности

Обозначения на рис. 1: 1 – полиимидная подложка; 2 – «холодный» спай термопары (место соединения двух соседних термопар); 3 – «горячий» спай термопары; 4 – контактные площадки для снятия термоэдс батареи последовательно соединенных термопар; 5 – сурьма; 6 – висмут; 7 – контактная площадка для подачи входного сигнала (расположена с обратной

стороны платы); 8 – нагревательный элемент (расположен с обратной стороны платы); 9 – контактная площадка корпуса (расположена с обратной стороны платы).

На нижней стороне платы расположена батарея из семи последовательно соединенных термопар висмут – сурьма. Их «горячие» спаи 3 находятся под нагревательным элементом 8, который сформирован на верхней стороне платы. «Холодные» спаи 2 вынесены в стороны от нагревателя и имеют температуру, близкую к температуре окружающей среды, что создает разность температур «горячих» и «холодных» спаев. Контактные площадки 4 выполняются из меди, соединяются с выходом батареи термопар и служат для снятия термоэдс.



**Рис. 2. Общий вид модели датчика измерителя мощности**

Прецизионная плата датчика измерителя мощности располагается в металлическом корпусе, внутренняя полость которого показана на рис. 2. Сложная форма полости требуется для обеспечения широкополосного согласования и расположения конструктивных элементов.

#### **Модель датчика для измерителя мощности сигналов СВЧ диапазона с раздвоенным нагревательным элементом**

Вторая конструкция – с раздвоенным нагревательным элементом. Она показана на рис. 3 и рис. 4. Функциональные элементы и их назначение те же, что и в предыдущем случае, однако нагревательный элемент здесь состоит из двух резисторов, включенных параллельно.

На рис. 3 обозначено: 1 – полиимидная подложка; 2 – отверстие под металлический штифт, центрирующее подложку; 3 – контактная площадка корпуса (расположена с обратной стороны платы); 4 – контактная площадка для подачи входного сигнала (расположена с обратной стороны платы); 5 – раздвоенный нагревательный элемент (расположен с обратной стороны платы); 6 – «холодный» спай термопары (место соединения двух соседних термопар); 7 – «горячий» спай термопары; 8 – сурьма; 9 – висмут; 10 – контактные площадки для снятия термоэдс батареи последовательно соединенных термопар (под микросварку).

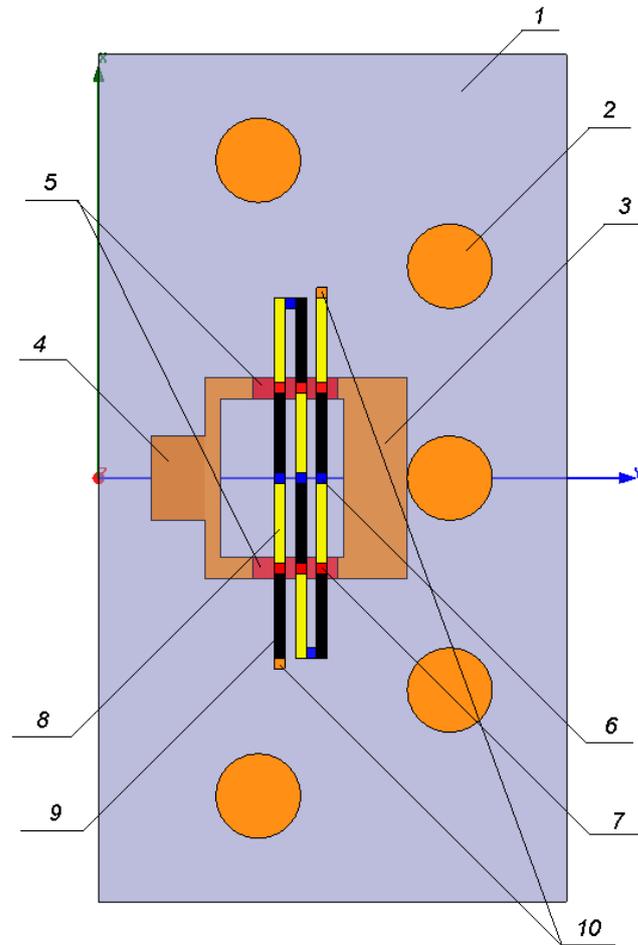


Рис. 3. Вид снизу прецизионной печатной платы датчика измерителя мощности

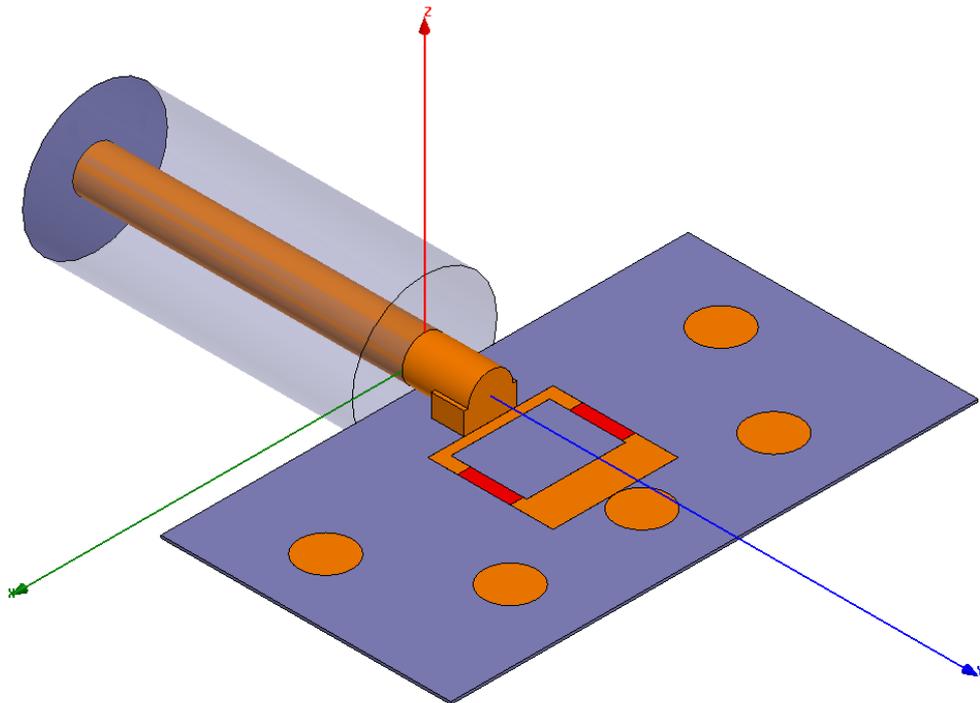


Рис. 4. Общий вид модели датчика измерителя мощности

### Расчет параметров конструкций методами численного моделирования

Расчеты основных параметров данных конструкций измерительных преобразователей в среде AnsysHFSS [4] дают следующие результаты.

КСВн измерительных преобразователей в диапазоне 0,3 – 36 ГГц.

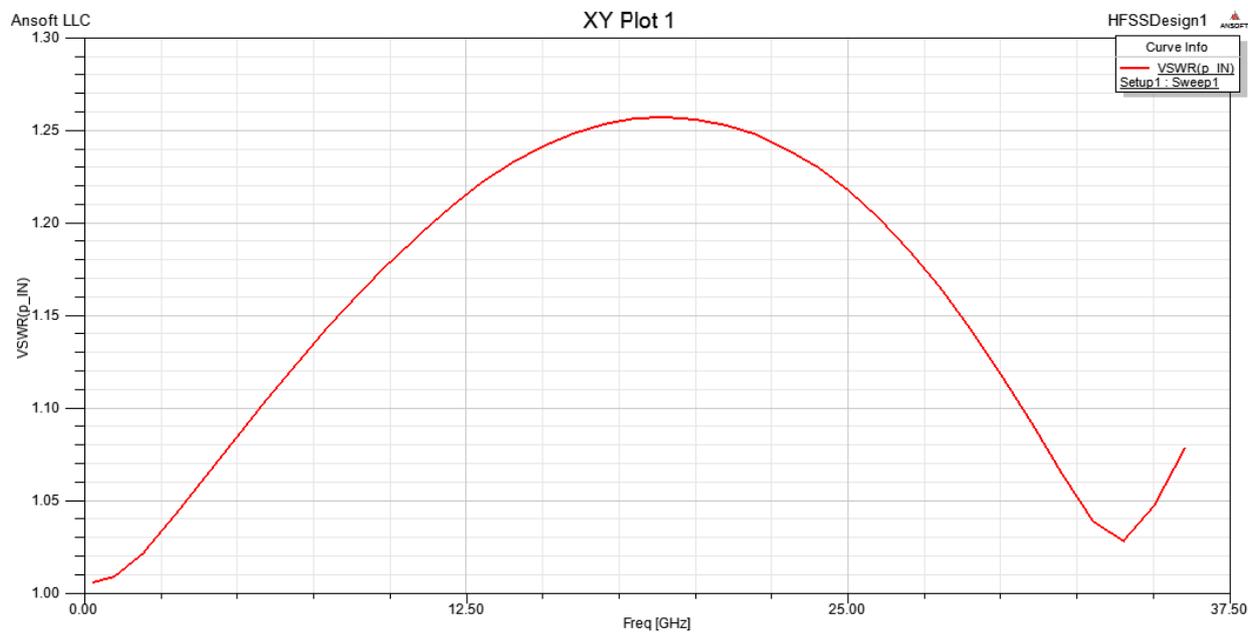


Рис.5. КСВн преобразователя с прямоугольным нагревательным элементом

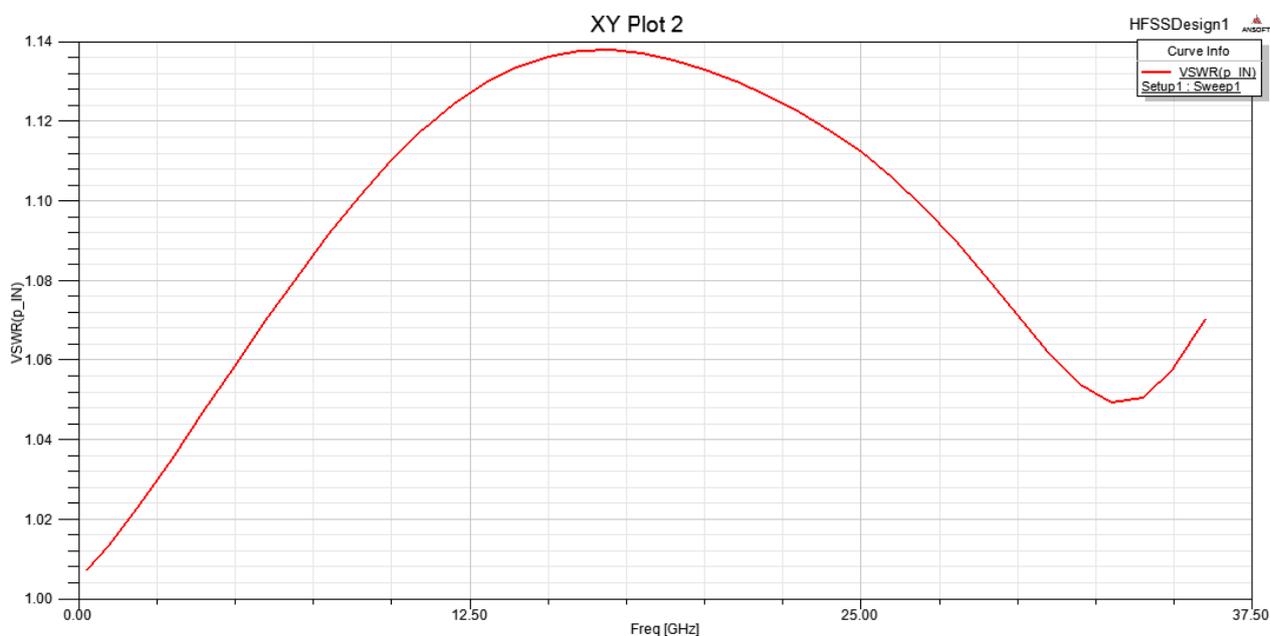


Рис. 6. КСВн преобразователя с раздвоенным нагревательным элементом

## Распределение температуры по термопарам на частотах 0,3 ГГц, 18 ГГц и 36 ГГц.

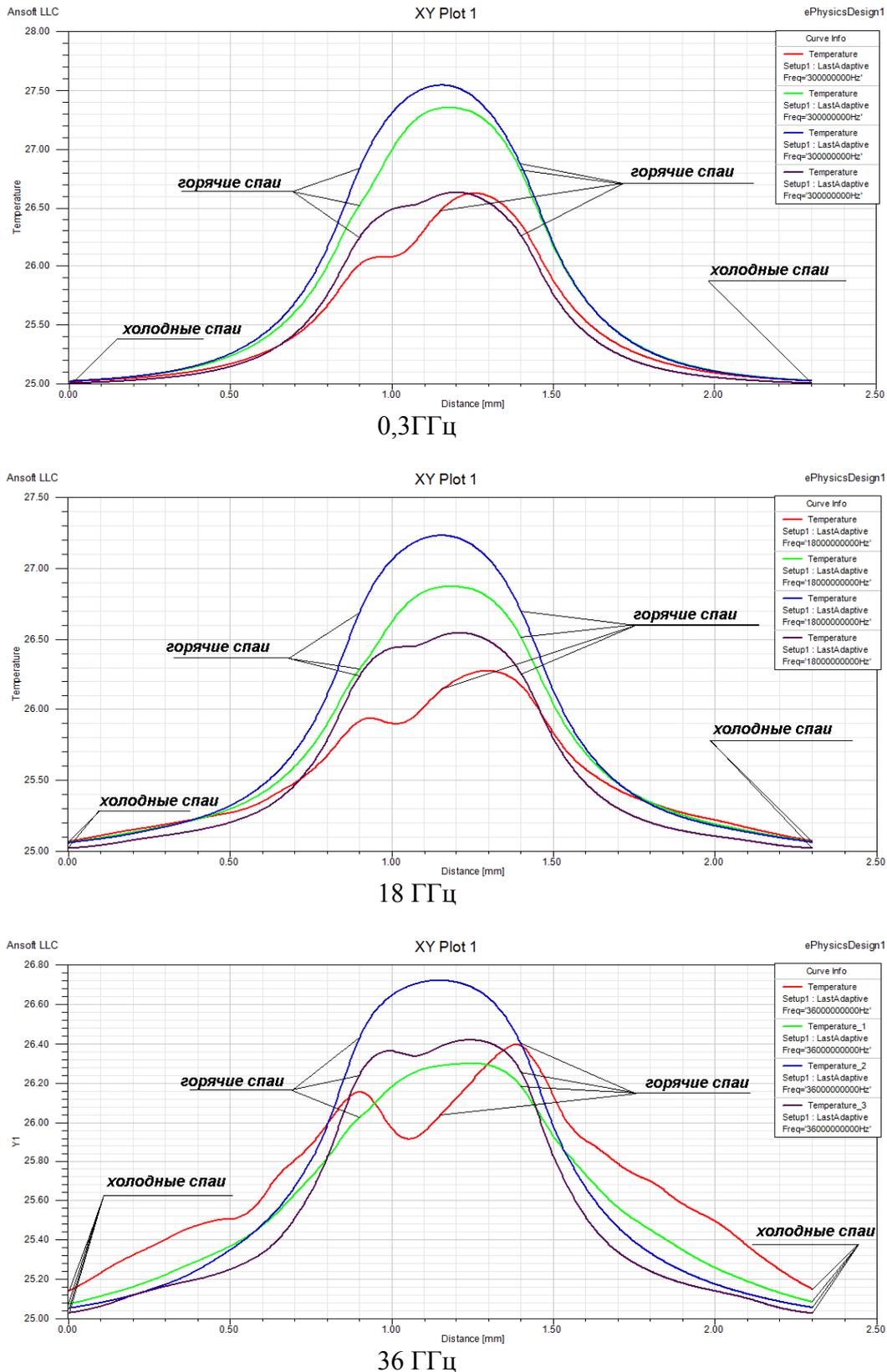
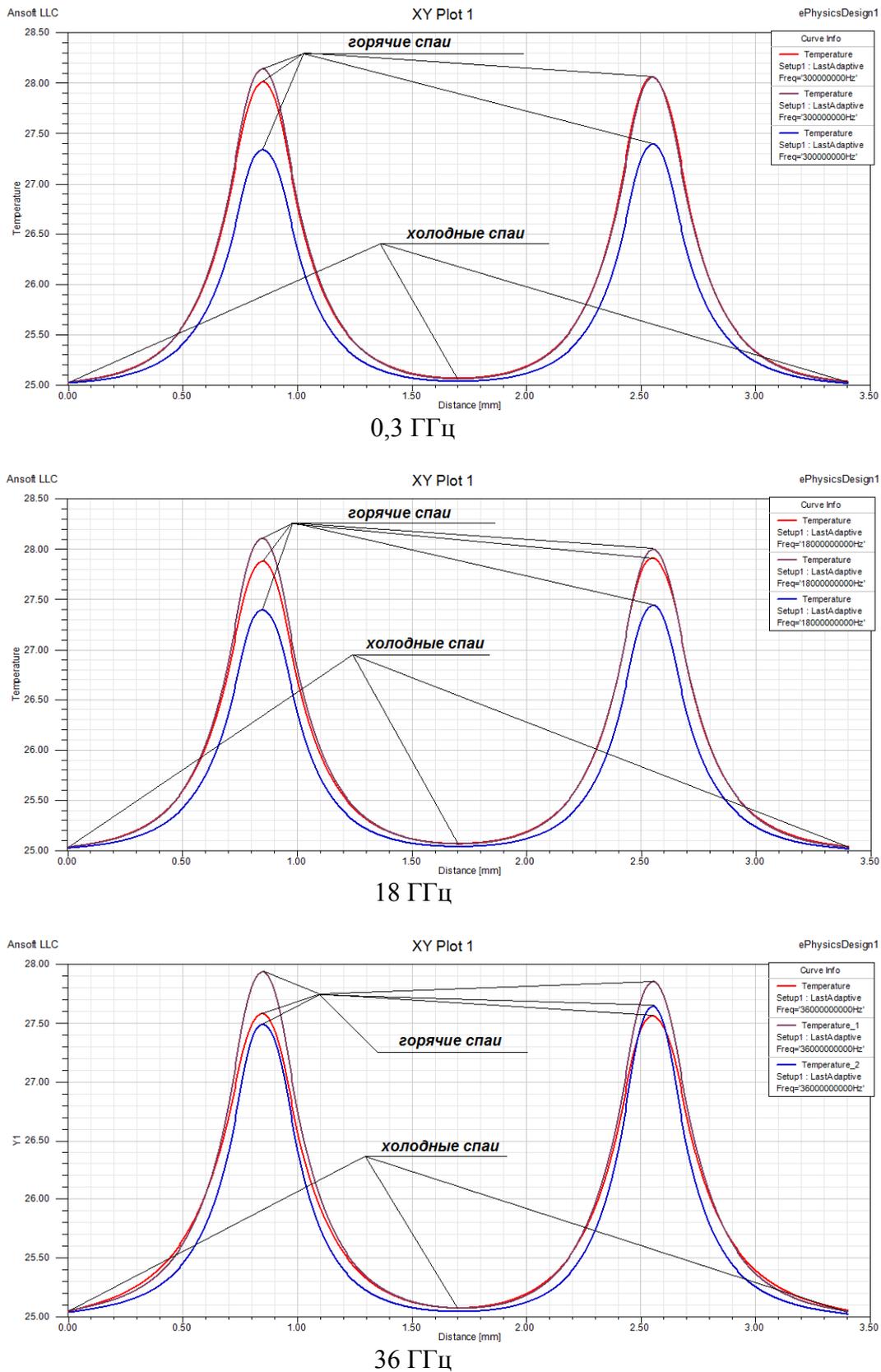


Рис. 7. Распределение температуры по термопарам в конструкции с прямоугольным нагревательным элементом



**Рис. 8. Распределение температуры по термопарам в конструкции с раздвоенным нагревательным элементом**

Полученные характеристики измерительных преобразователей представлены в табл. 1.

Таблица 1

Модель	Коэффициент преобразования			$K_{cp}$	$\delta_f$	КСВ
	0,3 ГГц	18 ГГц	36 ГГц			
Прямоугольный НЭ	1104 мкВ/мВт	949 мкВ/мВт	817 мкВ/мВт	961 мкВ/мВт	15%	<1,26
Раздвоенный НЭ	1664 мкВ/мВт	1637 мкВ/мВт	1565 мкВ/мВт	1614 мкВ/мВт	3,1%	<1,14

$K_{cp}$  – средний коэффициент преобразования,  $\delta_f$  - неравномерность коэффициента преобразования по частоте.

Как видно из графиков на рис. 5 и рис. 6, меньшим КСВн в рабочем диапазоне частот обладает конструкция с раздвоенным нагревательным элементом.

Важной характеристикой датчика является чувствительность или коэффициент преобразования. Чем больше эта величина, тем меньший уровень мощности может быть измерен с помощью датчика. Из результатов анализа моделей видно, что коэффициент преобразования снижается с ростом частоты входного сигнала. Это вызвано увеличением емкостной связи нагревательного элемента с корпусом и термопарами и, как следствие, выделением входной мощности в ветвях батареи термопар. Кроме уменьшения чувствительности, возникает также частотная зависимость коэффициента преобразования, которая будет вносить погрешность в результаты измерения.

Для уменьшения емкостной связи термопар и нагревательного элемента следует уменьшать площадь их перекрытия через подложку, при этом области «горячих» спаев термопар должны находиться в зоне максимального нагрева.

В модели с прямоугольным резистором конструкция нагревательного элемента не позволяет сместить «горячие» спаи к центру резистора, так как при этом резко возрастает емкость резистор – термопары. Поэтому выделяемое количество теплоты используется неоптимально и средний коэффициент преобразования находится на уровне 961 мкВ/мВт, а относительная неравномерность коэффициента преобразования составляет 15%.

Для увеличения коэффициента преобразования необходимо уменьшить площадь нагревательного элемента и изменить конструкцию батареи термопар так, чтобы их «горячие спаи» находились в области максимального нагрева. Этого удалось добиться в модели с раздвоенным нагревательным элементом. В этом случае «горячие» спаи термопар находятся в наиболее нагретой области, а благодаря малой площади пересечения термопар с резистором, образовавшаяся емкостная связь не вызывает нагрева ветвей батареи термопар. Средний коэффициент преобразования составляет в данном случае 1614 мкВ/мВт, а относительная неравномерность коэффициента преобразования – 3,1%.

### Выводы

Таким образом, на основе анализа технических характеристик двух различных конструкций датчика измерителя мощности можно сделать вывод, что оптимальной является конструкция датчика с раздвоенным нагревательным элементом. Этот датчик имеет следующие преимущества:

- обладает наименьшим в рабочем диапазоне частот КСВн<1,14 (прямоугольный нагреватель КСВн<1,26);
- обладает наименьшей относительной неравномерностью коэффициента преобразования по частоте:  $\delta_f=3,1\%$  (прямоугольный нагреватель  $\delta_f=15\%$ );
- средний коэффициент преобразования в 1,7 раза больше, чем у датчика с прямоугольным нагревательным элементом;
- простота конструкции и изготовления, (корпус в отличие от модели с прямоугольным нагревателем не содержит полостей сложной формы).

## Библиографический список

1. **Дворянин, Б.В.** Радиотехнические издания: учеб. пособие для вузов / Б.В. Дворянин, Л.И. Кузнецов. – М.: Сов. Радио, 1978. – 360 с.
2. **Прядилов, А.В.** Математическое моделирование широкополосных датчиков измерителя мощности сигналов СВЧ диапазона / А.В. Прядилов, Е.П. Тимофеев, В.П. Хилев // XVIII МНТК «Информационные системы и технологии» ИСТ-2012: мат. конференции, Н.Новгород. – 2012. – С. 119.
3. **Прядилов, А.В.** Исследование теплофизических характеристик термоэлектрического датчика измерителя мощности СВЧ сигналов. / А.В. Прядилов, Е.П. Тимофеев, В.П. Хилев // XVIII МНТК «Информационные системы и технологии» ИСТ-2012: мат. конференции, Н.Новгород. – 2012. – С. 119.
4. **Банков, С.Е.** Расчет антенн и СВЧ структур с помощью Ansoft HFSS / С.Е. Банков, А.А. Курушин. – М.: ЗАО НИИ «Родник», 2009. – 736 с.

*Дата поступления  
в редакцию 15.10. 2016*

**K.I. Kisilenko, A.V. Pryadilov, E.P. Timofeev**

**THERMOELECTRIC SENSORS FOR MEASURING THE MICROWAVE POWER**

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

**Purpose:** Create and measurement thermoelectric sensors in microwave range.

**Design/methodology/approach:** Converting microwave energy into thermal energy to form followed by measuring the change of temperature or resistance of the working fluid, in which this transformation occurs.

**Originality/value:** Simulation device structure in the range 0.3 - 36 GHz produced the following results: the input and output VSWR of less than 1.14;  $\delta_f = 3,1\%$ .

*Key words:* power measurement, thermoelectric sensors, microwave range, modeling, CAD, HFSS.

УДК 621.396.677.833.2

К.И. Кисиленко, В.А. Малахов, В.А. Узлов, В.В. Щербаков

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ АНТЕННЫ КАССЕГРЕНА НА 290 ГГц**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты моделирования и расчета параметров антенны Кассегрена предназначенной для системы беспроводной связи в терагерцовом диапазоне. Расчет геометрических размеров антенны выполнен методом геометрической оптики. Моделирование и расчет электрических параметров антенны проводился с помощью пакета программ численного моделирования. Приведены результаты расчета основных параметров антенны, моделирования технических неточностей при изготовлении и настройке антенны и их влияния на коэффициент усиления антенны.

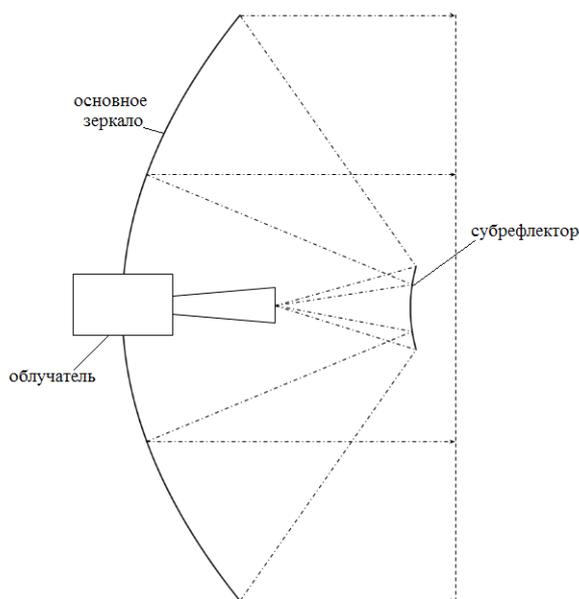
*Ключевые слова:* зеркальные антенны, рупорная антенна, антенна Кассегрена, терагерцовый диапазон, моделирование, САПР, CST Studio, HFSS.

**Введение**

Активное освоение терагерцового диапазона частот открывает возможность создания систем беспроводной связи с высокой скоростью передачи данных.

Особенностью терагерцовых волн, расположенных между инфракрасным и сверхвысокочастотным диапазонами, является относительно сильное затухание в атмосфере, основной вклад в поглощение излучения вносит вода и ее пары. Насчитывается около 900 линий поглощения воды, которые и обуславливают высокий уровень поглощения излучения в этом диапазоне. Но есть несколько частотных окон ниже 1 ТГц, на которых возможно построение систем беспроводной связи, хотя будет достаточно трудно использовать терагерцовые волны в качестве носителя данных на открытом воздухе из-за различных погодных условий.

Диапазон частот вблизи 300 ГГц относится к такому частотному окну прозрачности, для которого дальность связи составляет величину до нескольких километров. Как показывают расчеты, для беспроводной системы связи требуются антенны с узкой диаграммой направленности (ДН) и коэффициентом усиления (КУ) не менее 40 дБ [1].

**Рис. 1. Схема антенны Кассегрена**

С такими параметрами наиболее подходит антенна Кассегрена (рис. 1), которая состоит из рупорного облучателя, вспомогательного зеркала - субрефлектора в виде гиперboloида вращения, и основного зеркала в виде параболоида вращения. Преимуществом антенны является небольшой размер, простота изготовления [1].

### Пакеты программ численного моделирования

Антенна Кассегрена моделировалась в пакете программ CST Microwave Studio [3], которая предназначена для численного моделирования высокочастотных устройств (антенн, фильтров, ответвителей мощности, планарных и многослойных структур).

Расчет электрических параметров антенны Кассегрена в программе электромагнитного моделирования – очень ресурсоемкая задача, поэтому для экономии вычислительных ресурсов и времени используют методы геометрической и физической оптики, реализуемые в данном пакете программ.

Расчеты проводились в несколько этапов. На первом этапе моделировался рупорный облучатель, являющийся источником первичного электромагнитного излучения. Расчет облучателя проводился в пакете программ ANSYS HFSS [2].

На втором этапе, используя результаты вычислений облучателя, определялись токи на поверхности субрефлектора, через которые находится излучение, отраженное от субрефлектора.

На третьем этапе вычислялись токи на поверхности основного рефлектора, через которые определялось поле антенны Кассегрена в дальней зоне.

Данная поэтапность позволяет существенно сократить время расчета.

### Расчет рупорного облучателя Пикетта-Поттера

В виду того, что рабочая полоса частот системы связи невелика и составляет менее 3,5 %, в качестве облучателя для антенной системы был выбран круглый рупор Пикетта-Поттера (рис. 2), который является конструктивно более упрощенным и узкополосным вариантом рупора Поттера [4]. Рупор состоит из входного круглого волновода, работающего в одноволновом режиме, волноводного перехода на больший диаметр и собственно рупора.

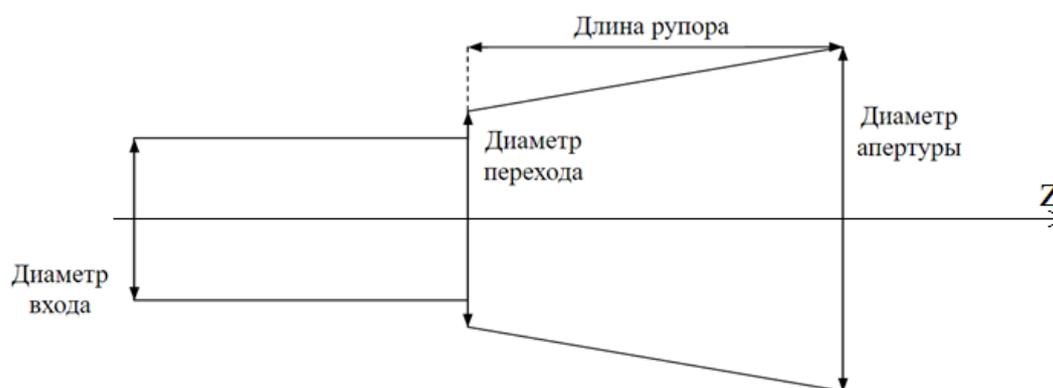


Рис. 2. Рупор Пикетта-Поттера

Благодаря волноводному переходу кроме волны основного типа  $TE_{11}$  в рупоре возбуждается волна высшего типа  $TM_{11}$ . Суммарное действие этих волн обеспечивает высокий коэффициент использования апертуры рупора и низкий уровень кросс-поляризации, одинаковую ширину главного лепестка во всех плоскостях, совпадение фазового центра в  $E$ - и  $H$ -плоскостях, уровень боковых лепестков -25 дБ.

Рупор Пикетта-Поттера имеет гладкие стенки и достаточно прост в изготовлении. Его широко используют в многолучевых антеннах телекоммуникационных систем [4].

Расчет рупора Пикетта-Поттера проводился в частотной области с использованием программы HFSS. Моделирование дало следующие размеры рупора: диаметр входа  $1.016 \lambda$ ,

диаметр перехода  $1.3 \lambda$ , диаметр апертуры  $6.4 \lambda$ , длина рупора  $10.62 \lambda$  (рис. 2), где  $\lambda = 1,0345$  длина волны соответствует частоте 290 ГГц.

Расчет электрических параметров приведен на рис. 3, рис. 4, где представлена ДН коэффициента усиления для  $E$ - и  $H$ -плоскостей для основной и кросс-поляризации соответственно. Как видно из рисунков ширина ДН в обеих плоскостях примерно одинаковая и составляет по уровню половинной мощности  $14,5^\circ$ , коэффициент усиления составляет 21,2 дБ, уровень боковых лепестков -27 дБ, уровень кросс-поляризации не превышает -12,5 дБ.

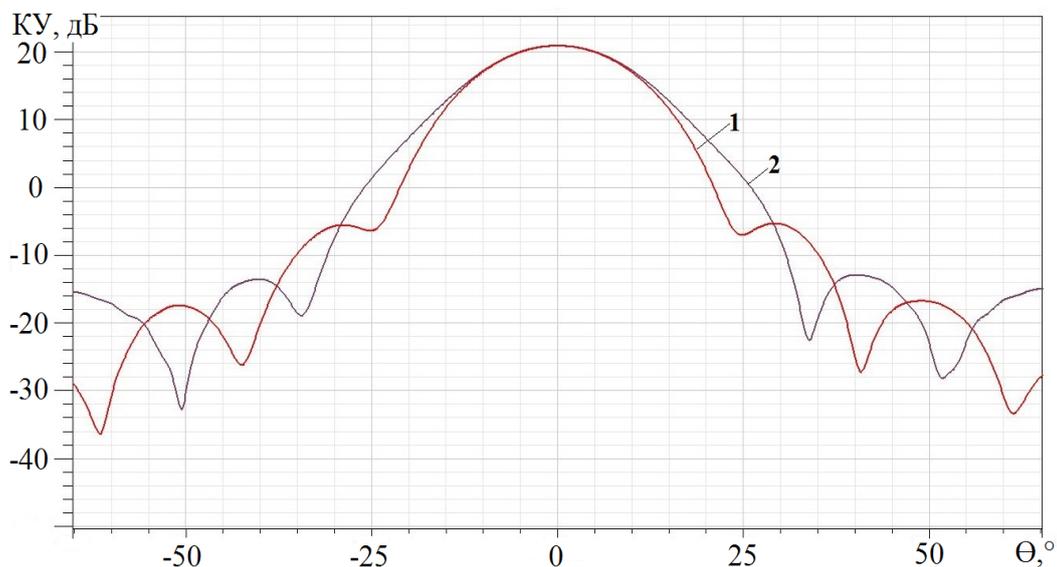


Рис. 3. Коэффициент усиления основной поляризации:  
1 –  $E$ -; 2 –  $H$ -плоскости

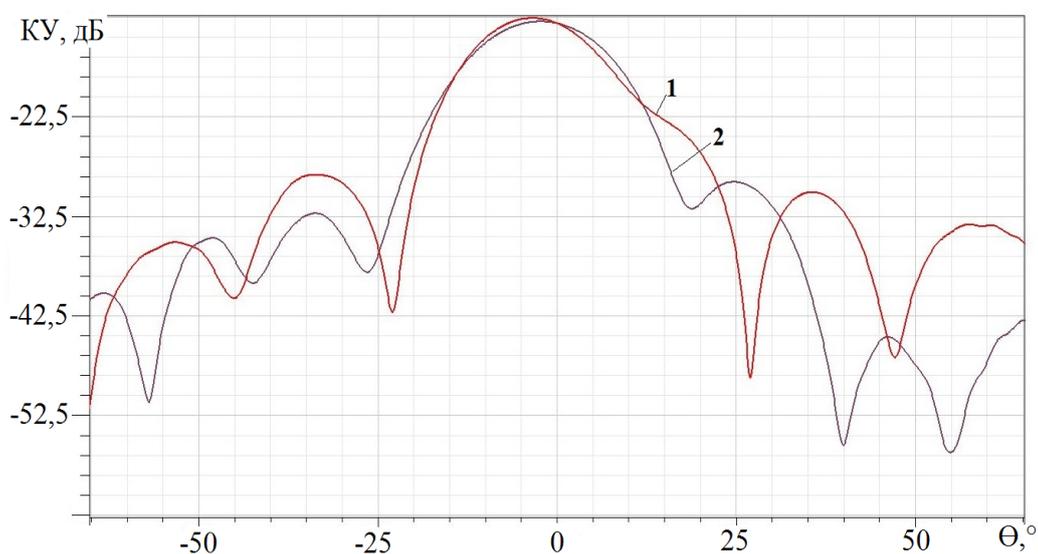
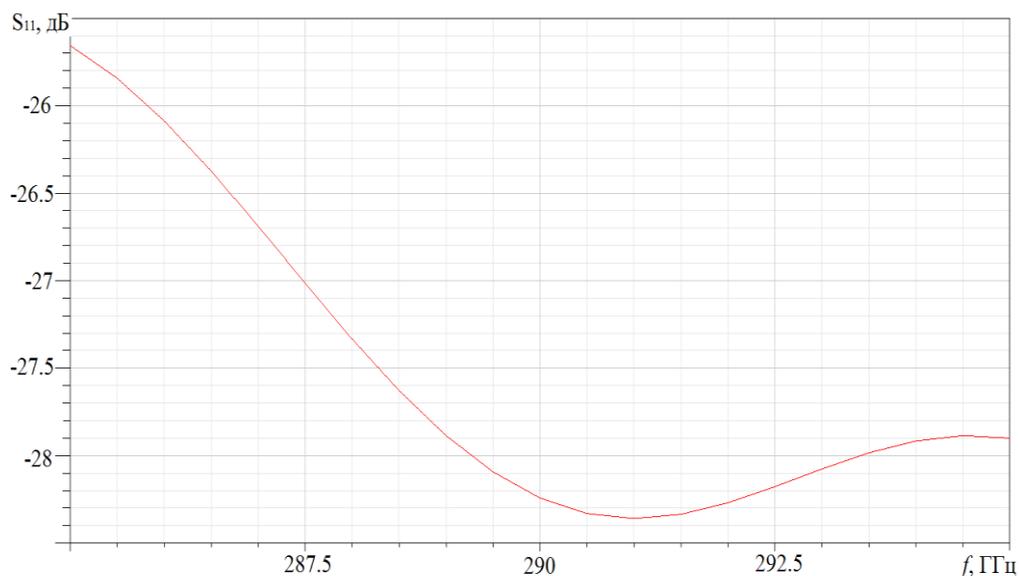


Рис. 4. Коэффициент усиления кросс-поляризации:  
1 –  $E$ -; 2 –  $H$ -плоскости

На рис. 5 приведена зависимость параметра  $S_{11}$  от частоты в диапазоне 285 – 295 ГГц.

Как видно из рисунка, рупор очень хорошо согласован с волноводным трактом при излучении в свободное пространство

Полученные результаты расчетов основных параметров и характеристик рупора Пиккетта-Поттера дает возможность использования его в составе антенны Кассегрена.

Рис. 5. Частотная зависимость параметра  $S_{11}$  рупора

### Расчет антенны Кассегрена

Для расчета геометрических параметров антенны используем метод геометрической оптики [5]. Основные геометрические размеры антенны приведены на рис. 6.

Для обеспечения высокого КУ антенны диаметр основного зеркала выбираем равным  $D_m = 140\lambda$ . Исходя из рассчитанной на предыдущем этапе ДН рупорного облучателя диаметр вспомогательного выбираем  $D_s = 20\lambda$ , а расстояние от основного зеркала до точки фокуса  $f_m = 58\lambda$ .

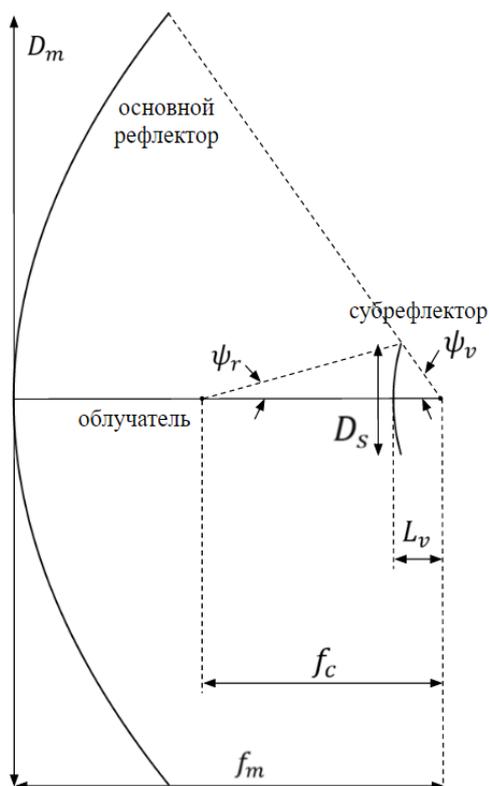


Рис. 6. Основные геометрические параметры антенны Кассегрена

Остальные геометрические параметры антенны находим из соотношений [6, 7]

$$\begin{cases} \tan(\psi_v/2) = D_m/(4f_m); \\ \tan(\psi_v/2)/\tan(\psi_r/2) = 2f_c/D_s; \\ 1 - \frac{\sin((\psi_v - \psi_r)/2)}{\sin((\psi_v + \psi_r)/2)} = 2L_v/f_c. \end{cases} \quad (1)$$

Расчет электрических параметров и характеристик антенны Кассегрена проводим с использованием программы CST Microwave Studio с применением метода интегральных уравнений (Integral Equation Solver), который позволяет выполнять расчет крупных (в длинах волн) структур.

Для получения требуемого КУ проводим параметрическую оптимизацию антенны. На рис. 7 и рис. 8 приведены результаты расчета ДН коэффициента усиления оптимизированной антенны Кассегрена.

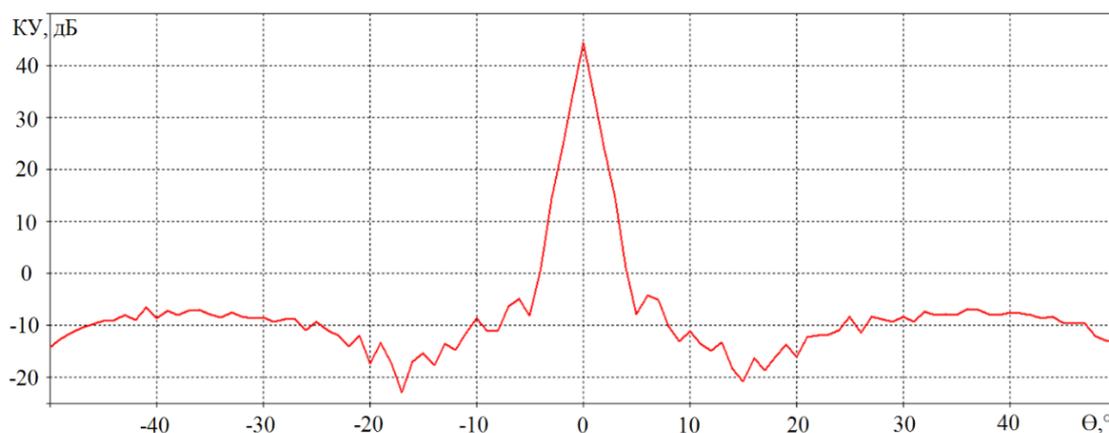


Рис. 7. Коэффициент усиления (E-плоскость)

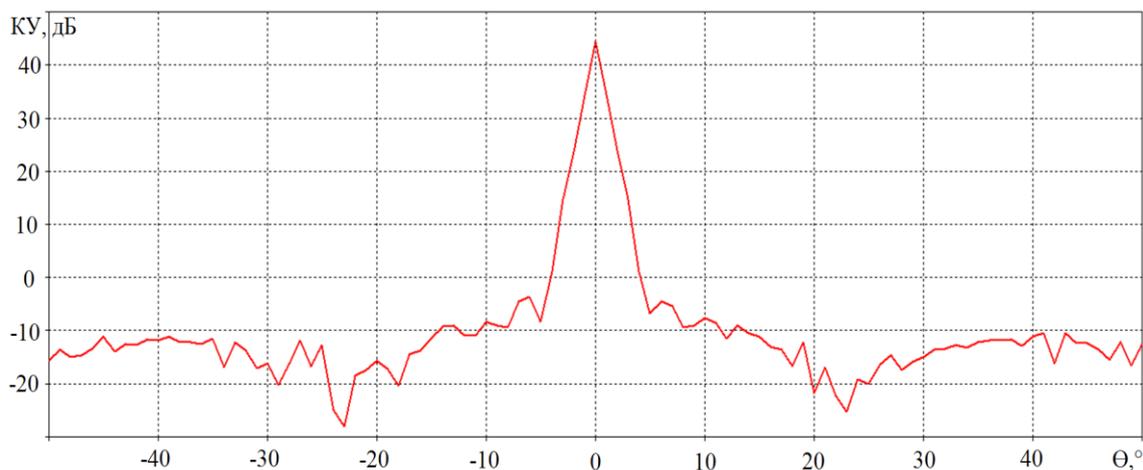


Рис. 8. Коэффициент усиления (H-плоскость)

Как видно из рисунков, коэффициент усиления антенны составляет 44,5 дБ при ширине главного лепестка ДН 0,6 градуса, уровень боковых лепестков -50 дБ. Параметр  $S_{11}$  составляет примерно -9 дБ. Такое значение можно объяснить конструкцией двух зеркальных осесимметричных антенн.

На рис. 9 приведены результаты расчета коэффициента усиления антенны в полосе частот 285-295 ГГц.

Из рисунка видно, что в данной полосе частота КУ антенны слабо меняется и остается практически постоянным.

Разработанный алгоритм расчета параметров антенны позволяет моделировать технические неточности при изготовлении и настройки антенны. На рис. 10 показана зависимость коэффициента усиления от смещения рупора фазового центра в фокальной плоскости.

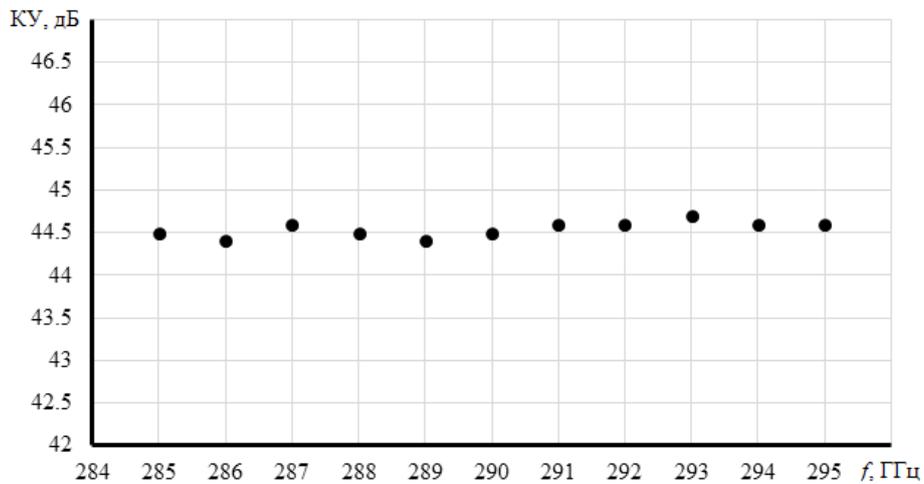


Рис. 9. Зависимость КУ от частоты

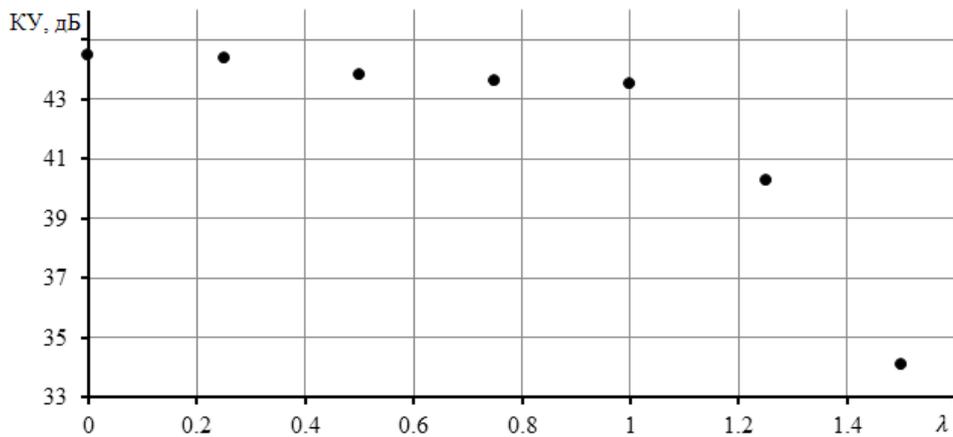


Рис. 10. Зависимость КУ от смещения рупора фазового центра в фокальной плоскости

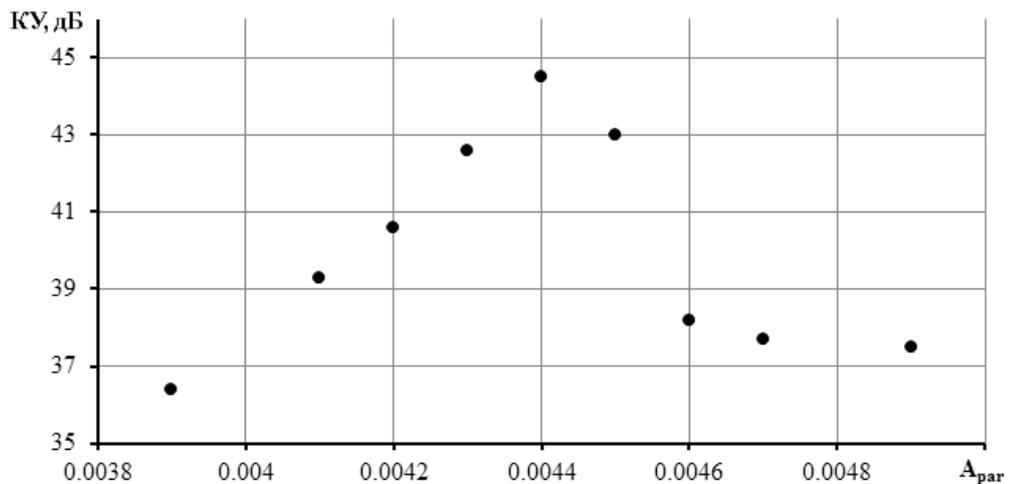


Рис. 11. Зависимость КУ от фокального параметра

При смещении фазового центра рупора на расстояние больше, чем  $1,2 \lambda$  КУ антенны становится меньше 40 дБ, и в этом случае антенна не пригодна для использования ее в системе связи в терагерцовом диапазоне частот.

На рис. 11 приведена зависимость коэффициента усиления от фокального параметра основного зеркала

$$A_{par} = \frac{1}{4f_m}. \quad (2)$$

Из рисунка видно, что коэффициент усиления антенной системы чувствителен к фокальному параметру основного зеркала, поэтому должна быть высокая точность при изготовлении зеркал. При изменении фокального параметра на 0,0002, КУ становится меньше 40 дБ.

### Выводы

В данной работе приведены результаты расчета модели антенны Кассегрена при использовании ее в беспроводной системе связи терагерцового диапазона частот. Для расчета антенны использованы программные пакеты HFSS и CST Microwave Studio, позволяющие быстро и эффективно проводить расчеты основных параметров и характеристик антенны Кассегрена и моделировать технические неточности при изготовлении и настройке антенны.

### Библиографический список

5. X. Xu, X. Zhang, Z. Zhou. Terahertz Cassegrain Reflector Antenna // in Antennas & Propagation (IS-AP), 2013 Proceedings of the International Symposium. – 2013. P. 969–971.
6. ANSOFT HFSS. <http://cae-expert.ru>
7. CST – Computer Simulation Technology. <https://www.cst.com>
8. **Bram, Lap.** Design of a Pickett-Potter Horn to measure the CMB at 11 GHz / Bram Lap. – Kapteyn Astronomical Institute & SRON, Netherlands Institute for Space Research, 2015. – 71 p.
9. **Peter W. Hannan.** Microwave Antennas Derived from the Cassegrain Telescope // IRE Transactions on Antennas and Propagation. – 1961. – P. 140–153,
10. **Сазонов, Д.М.** Антенны и устройства СВЧ: учеб. пособие для вузов / Д.М. Сазонов. – М.: Высшая школа, 1988. – 432 с.
11. **Кочержевский, Г.Н.** Антенно-фидерные устройства: учебник для вузов / Г.Н. Кочержевский. – М.: Радио и связь, 1981. – 280 с.

*Дата поступления  
в редакцию 15.10.2016*

**K.I. Kisilenko, V.A. Malakhov, V.A. Uzlov, V.V. Sherbakov**

### MODELING AND MEASUREMENT CASSEGRAIN ANTENNA AT 290 GHZ

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

**Purpose:** Create and measurement Cassegrain antenna in terahertz range.

**Design/methodology/approach:** Configuration Cassegrain antenna: two reflectors, one hyperbolic subreflector and parabolic main reflector combined with feeding horn (Pickett-Potter horn). The geometrical and electrical performance of the Cassegrain reflector system are calculated and analyzed through folded optics approach and numerical package simulations.

**Originality/value:** The results of modeling show high directivity 44,5 dB, side love -50 dB and beam width  $0,6^\circ$  from far field radiation pattern.

*Key words:* reflector antenna, horn antenna, Cassegrain antenna, terahertz range, modeling and simulation, CAD, CST Studio, HFSS.

УДК 621.384.6

М.Б. Гойхман, А.В. Громов, Н.Ф. Ковалев, А.В. Палицин

## ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОНОВ ЗАМАГНИЧЕННОГО РЕЛЯТИВИСТСКОГО ПУЧКА ПО ЦИКЛОТРОННОМУ ПОГЛОЩЕНИЮ ПРОБНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород

Рассмотрена возможность применения явления циклотронного поглощения пробной электромагнитной волны для измерения энергии релятивистских электронов в тонкостенных трубчатых пучках, направляемых продольным однородным магнитным полем. Работоспособность метода была проверена экспериментально.

*Ключевые слова:* замагниченный релятивистский электронный пучок, циклотронное поглощение, электромагнитная волна, циркулятор, детекторный датчик.

В короткоимпульсных гигаваттных лампах обратной волны (ЛОВ) обычно применяются сильно замагниченные сильноточные электронные пучки, получаемые с холодных взрывоэмиссионных кромочных катодов [1-4]. Качество таких пучков невысокое и для успешного их применения в гигаваттных СВЧ генераторах, в том числе и релятивистских ЛОВ, нужны более детальные сведения об их свойствах. Соответственно, для этого нужны дополнительные средства измерений, более полно учитывающие как побочные факторы, так и специфику применения таких пучков в мощных и, особенно, предельно мощных СВЧ генераторах.

В статье кратко рассмотрен один из дополнительных методов измерения энергии релятивистских электронов в тонкостенных трубчатых пучках, направляемых продольным однородным магнитным полем ( $\vec{H}$ ) и основанный на явлении циклотронного поглощения [1, 4] пробной электромагнитной волны. Метод не самый точный, но во многом прямой и универсальный, позволяющий к тому же построить простые качественные картины преобразования поступательной энергии электронных пучков в электромагнитное излучение.

В замагниченных электронных пучках, проходящих по вакуумным каналам транспортировки, возможно существование обратных электронно-циклотронных волн с положительной энергией [3, 4]. Их дисперсионные характеристики на плоскости Бриллюэна ( $\omega, h$ ) близки к прямым (рис. 1, а)

$$\omega = hv_z + \omega_{ц} \quad (1)$$

даже при больших разбросах по скоростям  $v_z$ . В (1):  $\omega$  - циклическая частота,  $h$  - продольное волновое число,  $v_z$  - поступательная скорость электронов ( $v_z = \vec{v} \cdot \vec{z}_0$ ),

$$\omega_{ц} = \frac{eH}{\gamma mc} \quad (2)$$

- циклотронная частота,  $c$  - скорость света,  $m$  и  $e$  - соответственно, масса и заряд электронов (во всех формулах знак заряда учтен явно, т.е. считается  $e > 0$ ),

$$\gamma = \left[ 1 - \left( \frac{v_z}{c} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (3)$$

- релятивистский фактор электронов, в котором предполагается, что

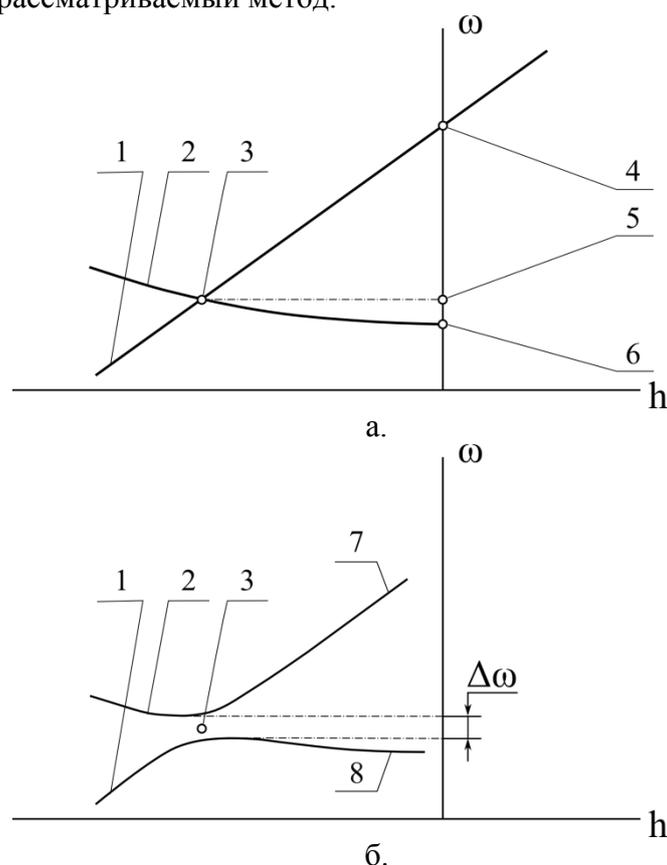
$$v_{\perp} \ll |\vec{v}|. \quad (4)$$

Обратные циклотронные волны при взаимодействии со встречными электромагнитными волнами образуют полосы запирания  $\Delta\omega$  (рис. 1, б) с центральными частотами  $\omega_0$ , определяемыми из условия синхронизма

$$\frac{eH_0}{\gamma mc} = \omega_0 - h(\omega_0)v_z. \quad (5)$$

Таким образом, если в полосе запирания ( $\Delta\omega$ ) выполнено условие (4), то по измерени-

ям  $\omega_0$ ,  $H_0$  и по известной зависимости  $h(\omega_0)$  всегда можно вычислить  $v_z$  или  $\gamma$ . На этом простом факте и основан рассматриваемый метод.



**Рис. 1** Дисперсионные зависимости на плоскости Бриллюэна для парциальных (а) и нормальных (б) волн:

1 и 7 - электронно-циклотронная волна (формула (1)); 2 и 8 - электромагнитная волна; 3 - точка пересечения парциальных волн, соответствующая точному резонансу (формула (5)); 5 -  $\omega_0$  из (формулы (5)); 6 - критическая частота волновода рабочего пространства

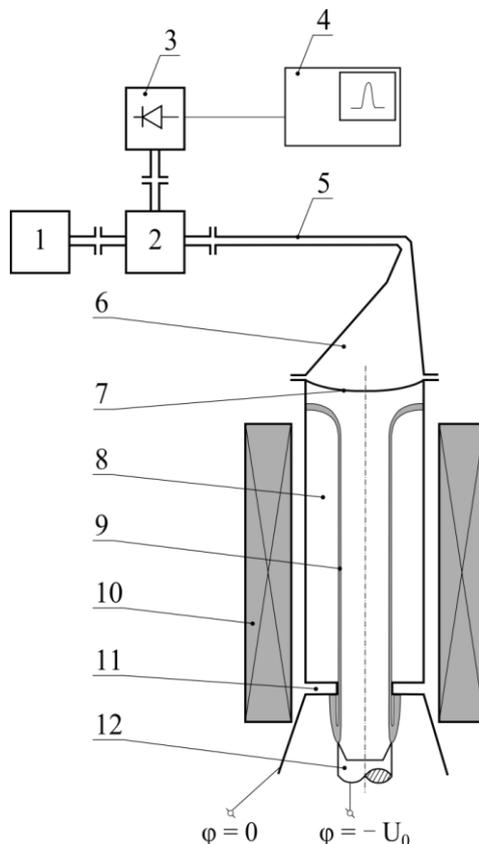
Работоспособность метода была проверена экспериментально на установке, схема которой приведена на рис. 2. Излучение от магнетрона (обозначен цифрой 1 на рис. 2) по волноводному тракту (обозначен цифрой 5 на рис. 2) с циркулятором (обозначен цифрой 2 на рис. 2), трансформатором волн (обозначен цифрой 6 на рис. 2) и вакуумным окном (обозначен цифрой 7 на рис. 2) подается с коллекторной стороны в круглый волновод, имеющий длину  $L$ .

С другой стороны в этот же круглый волновод через коллиматор в виде диафрагмы (обозначен цифрой 11 на рис. 2) подается исследуемый трубчатый электронный пучок (обозначен цифрой 9 на рис. 2), получаемый с кромочного катода (обозначен цифрой 12 на рис. 2). Отрезок ( $L$ ) круглого волновода, помещенный в соленоид (обозначен цифрой 10 на рис. 2) образует пространство взаимодействия или рабочее пространство (обозначен цифрой 8 на рис. 2) с длиной немного меньшей  $L$ . Эксперименты проводились в 3-сантиметровом диапазоне длин волн ( $\lambda \cong 3$  см) при величине давления остаточных газов в рабочем пространстве не ниже  $10^{-4}$  торр. В тестовых экспериментах длину  $L$  можно было изменять, но, как правило,  $L$  выбиралась столь большой, что линия поглощения принимала "прямоугольный вид", что значительно упрощало определение центральной частоты ( $\omega_0$ ) или резонансного значения магнитного поля ( $H_0$ ).

В полосе запираения излучение от магнетрона полностью переизлучалось в циклотронную волну, которая, в свою очередь, вместе с электронным пучком полностью поглощалась коллектором.

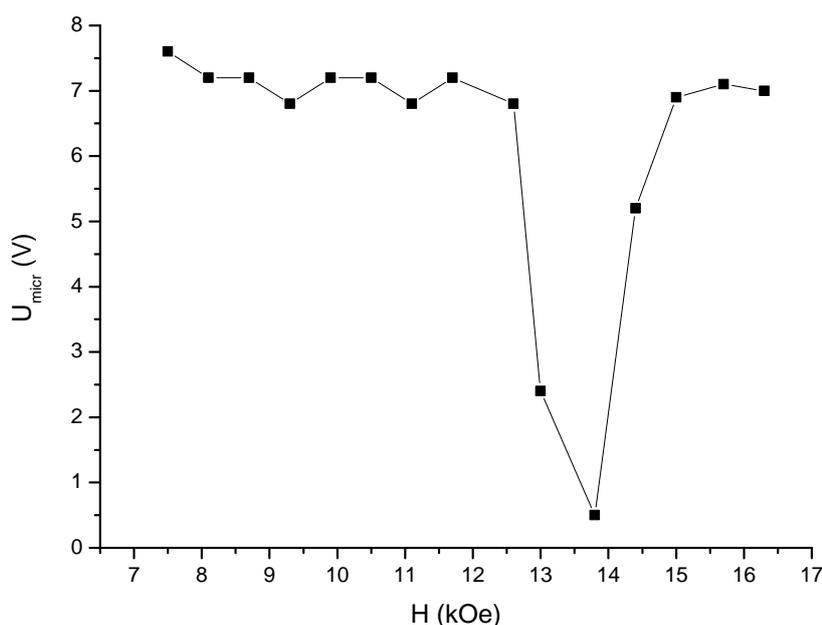
Если же частота излучения магнетрона была вне полосы запираения ( $\Delta\omega$ ), то пробное

излучение без потерь проходит через рабочее пространство, переотражается диафрагмой (11 на рис. 2) и затем опять без потерь на переизлучение в циклотронную волну проходит через рабочее пространство и регистрируется СВЧ датчиком (3 на рис. 2).



**Рис. 2. Схема экспериментов:**

1 - магнетронный источник излучения; 2 - циркулятор; 3 - детекторный датчик; 4 - индикатор (осциллограф); 5 - 3-сантиметровый волноводный тракт; 6 - согласующий преобразователь волн; 7 - вакуумное окно; 8 - рабочее пространство; 9 - трубчатый электронный пучок; 10 - соленоид; 11 - диафрагма; 12 - кромочный взрывоэмиссионный катод



**Рис. 3. Типичная резонансная кривая циклотронного поглощения на плоскости параметров ( $U, H$ )**

На рис. 3 показана полученная в эксперименте резонансная зависимость сигнала на выходе детектора  $U_{micr}$  от величины направляющего магнитного поля  $H$

$$U_{micr} = U_{micr}(H). \quad (6)$$

На следующем рис. 4 приведена калибровочная кривая

$$H_0 = H_0(U_0), \quad (7)$$

которая к тому же позволяет оценить и точность измерения энергии электронов

$$\gamma_0 = 1 + \frac{eU_0}{mc^2}, \quad (8)$$

и разрешающие способности.

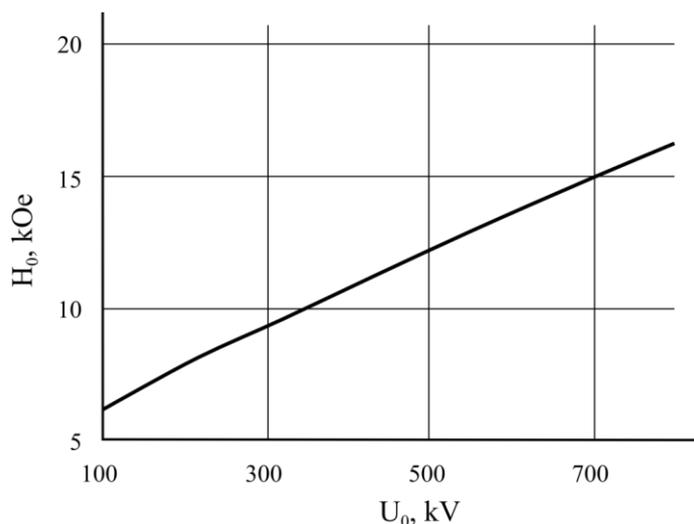
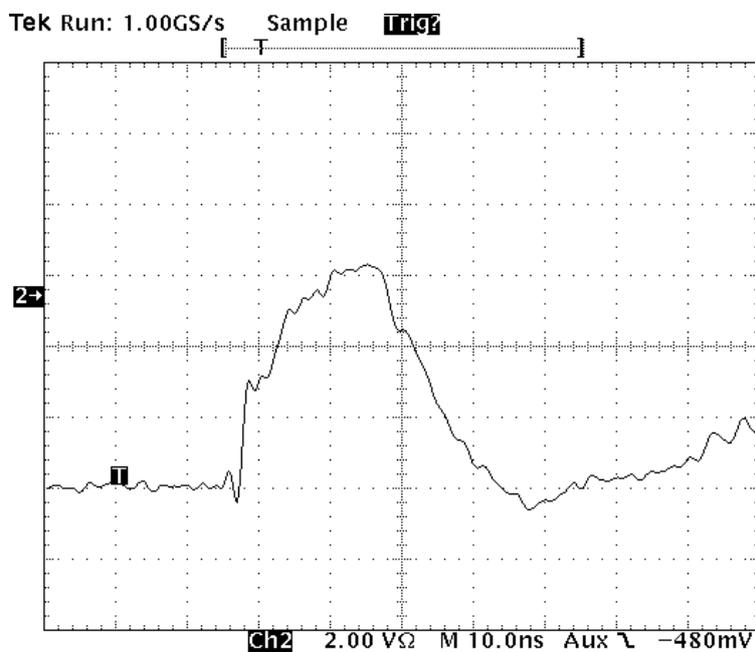
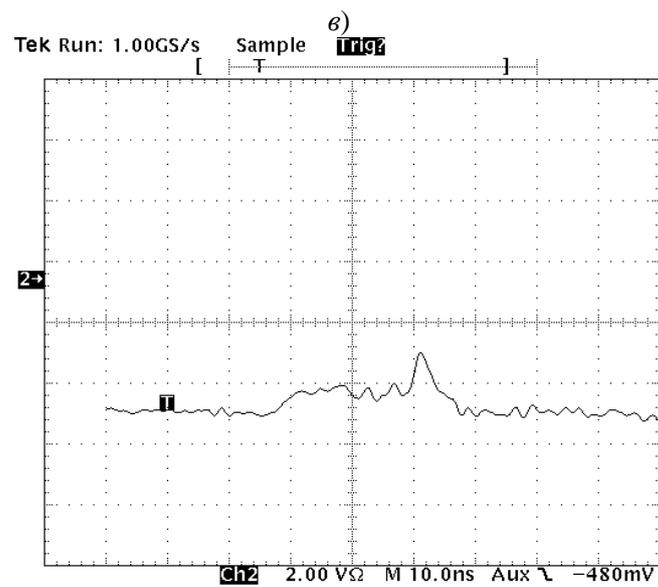
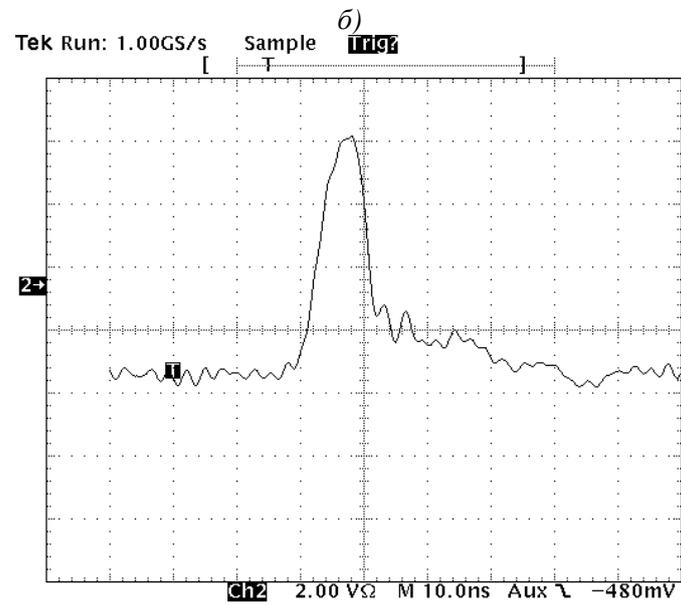
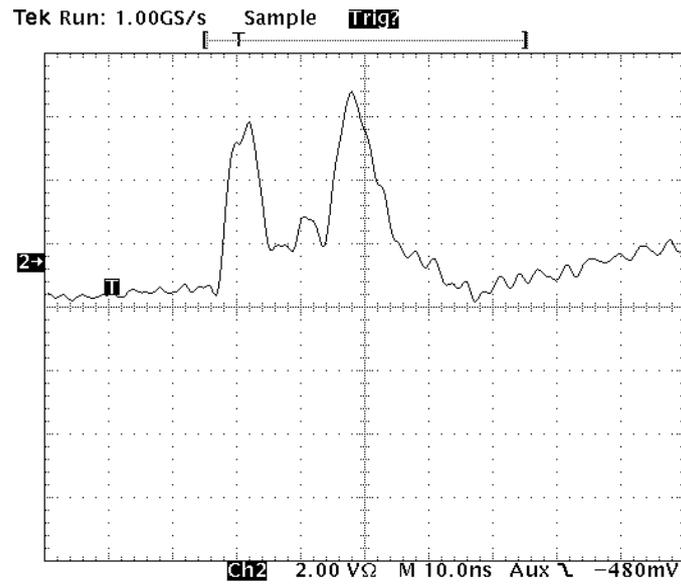


Рис. 4. Калибровочная кривая



a)

Рис. 5. Осциллограммы протектированных импульсов в разных режимах измерений



з)

Рис. 5. (Окончание). Осциллограммы протектированных импульсов в разных режимах измерений

На следующих нескольких рисунках (рис. 5, *a–z*) приведены характерные осциллограммы протектированных импульсов в различных режимах работы, иллюстрирующие на качественном уровне, возможности рассматриваемого метода. Из представленной серии осциллограмм видно, что метод позволяет исследовать как энергетическую структуру самого импульса, так и отдельно фронта и спада. Метод ценен также и тем, что позволяет оценить величину взаимосвязи электронных волн с электромагнитными волнами и определить время установления полосы запираания.

В заключении следует сказать, что возможности рассмотренного метода (и подобных ему) не исчерпаны и для дальнейшего его развития нужны более детальная теоретическая проработка и более подробные экспериментальные исследования. Причем не только как эффективного диагностического средства, а и как побочного фактора, влияющего на переизлучение волн и их устойчивость, в том числе и образование высокочастотных электронно-электромагнитных резонансов, подобных брегговским. К этому необходимо добавить, что собранную экспериментальную установку не трудно преобразовать (приспособить) к измерениям линейных и нелинейных коэффициентов взаимной связи электронных и электромагнитных волн, что предполагается обсудить в следующих статьях.

#### Библиографический список

1. Сб. Релятивистская высокочастотная электроника. вып. 1. Горький: ИПФ АН СССР, 1979. – 297 с.
2. High-Power Microwave Sources and Technologies / Edited by Robert J. Barker, Edl Schamiloglu. New York: IEEE press series on RF and microwave technology, 2001. – 485 p.
3. Miller, R.B. An Introduction to the Physics of Intense Charged Particle Beams / R.B. Miller. – New York: Plenum Press, 1982. – 351 p.
4. Кузелев, М.В. Плазменная релятивистская СВЧ электроника / М.В. Кузелев, А.А. Рухадзе, П.С. Стрелков. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 544 с.

*Дата поступления  
в редакцию 25.10.2016*

**M.B. Goykhman, A.V. Gromov, N.F. Kovalev, A.V. Palitsin**

#### **THE MEASUREMENT OF ENERGY OF MAGNETIZED RELATIVISTIC ELECTRON BEAMBY CYCLOTRON ABSORPTION OF A PROBE ELECTROMAGNETIC WAVE**

Institute of Applied Physics Russian Academy of Science

**Purpose:** We considered the possibility to use the cyclotron absorption of a probe electromagnetic wave for measurement of energy of relativistic electrons in thin-walled tubular beams, which are guided by longitudinal uniform magnetic field.

**Approach:** The investigation was considered as analytically as experimentally.

**Findings:** As a result it is shown that the energy of magnetized relativistic electron beam can be measured by cyclotron absorption of a probe electromagnetic wave. The method was tested in experiment.

*Key words:* magnetized relativistic electron beam, cyclotron absorption, electromagnetic wave, circulator, detector.

УДК 681.518.3

В.И. Гребенщиков, А.И. Чивенков

**РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ СБОРА  
И ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приведено обоснование целесообразности использования одноплатных микрокомпьютеров для создания автоматизированных систем сбора информации. Показаны достоинства и недостатки использования специализированных программно-аппаратных средств сбора информации. Предложен принцип наглядной визуализации устройства с применением интерфейса веб-сервера. Описаны принципы работы сетевых протоколов оповещения оператора.

*Ключевые слова:* микрокомпьютер; одноплатный компьютер; автоматизация; мониторинг; датчики; программное обеспечение; протоколы.

Автоматизированные системы сбора и обмена информацией стремительно совершенствуются и должны соответствовать возрастающим требованиям к функционалу разрабатываемых устройств. При этом на разработчика накладываются все более жесткие ограничения как по стоимости предлагаемого решения, так и по возможности его адаптации к изменению обрабатываемой информации.

В статье [1] рассмотрена целесообразность использования 8-битного микроконтроллера Atmel ATMEGA128A-AU в качестве системы сбора и обмена информацией. Микроконтроллер располагает 128 килобайтами памяти для хранения микропрограммы, но авторы не смогли использовать программы, написанные на языке высокого уровня. Дело в том, что в результате выполнения компиляции с языка «Си» полученный код составил 35 килобайт для протокола TCP/IP и увеличился до 60 килобайт при использовании протокола UDP. Таким образом, для алгоритма обработки информации, поступающей с датчиков, осталась лишь половина программной памяти микроконтроллера.

Кроме того, разработка систем на базе микроконтроллеров предполагает проектирование соответствующей печатной платы, что осложняет последующую модификацию. Таким образом становится проблематичной использование таких систем в научно-исследовательских разработках, предполагающих изменение состава обрабатываемых сигналов и типа информационных каналов.

Можно сделать вывод, что применение микроконтроллеров в составе систем сбора и передачи информации представляется целесообразным на этапе их тиражирования с целью снижения производственных затрат на единицу изделия.

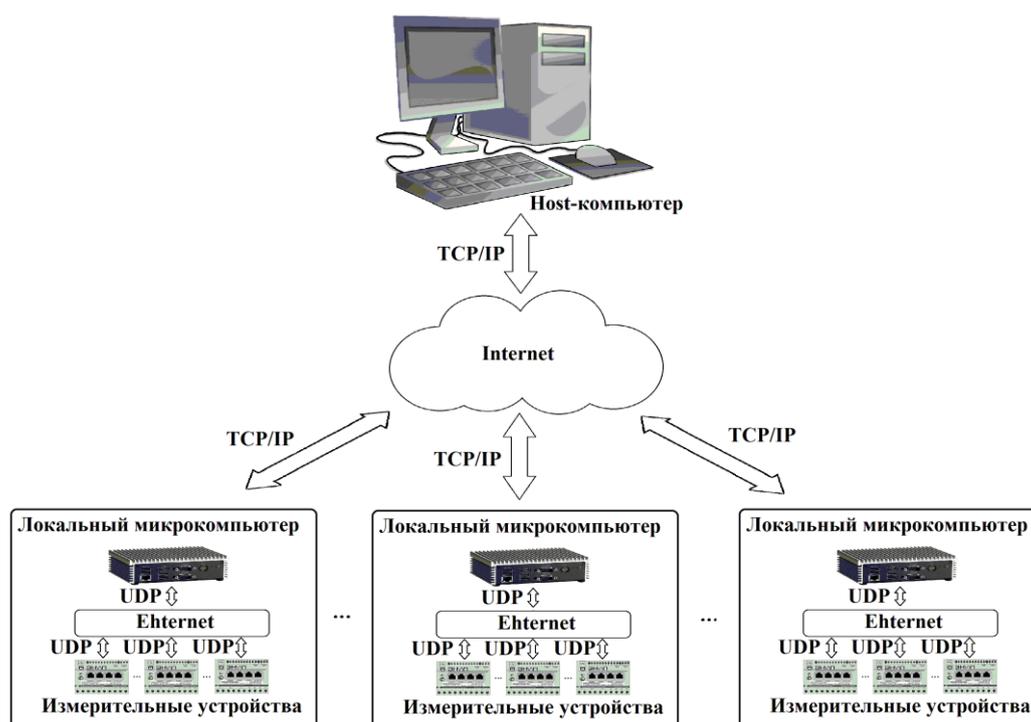
Альтернативным решением использованию микроконтроллеров в составе опытно-промышленных систем сбора и передачи информации является их построение на основе специализированных программно-аппаратных средств. В качестве примера можно привести систему мониторинга и управления цифровой трансформаторной подстанцией [2].

Указанная система была реализована на шасси с интегрированным контроллером реального времени частотой 400 МГц NI cRIO 9076 с установленными в нем 8-канальным модулем измерения напряжения NI 9201, 32-канальный модулем аналогового ввода (16 дифференциальных каналов) разрешением 16 бит NI 9205, а также 8-канальным модулем цифрового ввода – вывода NI 9401. Устройство NI cRIO-9076 состоит из промышленного контроллера реального времени на базе процессора Freescale с тактовой частотой 400 МГц и 4-слотового шасси со встроенной ПЛИС Xilinx Spartan-6 LX45 для подключения и синхронизации каналов ввода/вывода, управления и обработки сигналов.

Данное решение представляют собой законченную реконфигурируемую систему вво-

да-вывода, программируемую с помощью пакета LabVIEW, что существенно упрощает процесс разработки систем сбора и передачи информации. Открытая архитектура системы позволяет менять ее функциональность путем соответствующего подбора модулей. Применение специализированного оборудования представляется эффективным в случае создания единичных устройств, но высокая стоимость используемого оборудования является весомым аргументом, препятствующим их повсеместному использованию.

В тоже время для построения встраиваемых систем управления и мониторинга в таких областях промышленности, как энергетика, в качестве первичных датчиков могут использоваться специализированные устройства, осуществляющие первичную обработку информации о состоянии электрических цепей и передачи их текущих параметров посредством общепринятых протоколов связи.



**Рис. 1. Структура мониторинга транспортных потоков мощности в интеллектуальной распределительной сети**

Например, в рамках выполнения работ по теме «Разработка автоматизированного узла регулирования транспортных потоков мощности в интеллектуальной распределительной электрической сети» (рис. 1) в силовом шкафу установлены многофункциональные измерительные преобразователи ЭНИП-2 а также многофункциональные счетчики электрической энергии Меркурий 234 ARTM (рис. 2).

Многофункциональные счетчики электрической энергии Меркурий 234 ARTM имеют дополнительные интерфейсы на сменных модулях RS-485 и Ethernet.

В свою очередь, измерительный преобразователь ЭНИП-2-45/380-220-A1E4-23 представляет собой многофункциональное измерительное устройство с интерфейсами RS-485 и Ethernet, а также 8-дискретными входами. Большой объем измеряемых и вычисляемых параметров электрической сети в сочетании возможностью передачи данных позволяет создавать на базе ЭНИП-2 распределенные системы мониторинга энергообъектов.

Устройство позволяет производить измерения и вычисления значений следующих параметров режима электрической сети:

- действующие значения напряжений (фазных, междуфазных и средних);
- действующие значения токов (фазных и среднего);

- фазная и суммарная мощность нагрузки (активной, реактивной, полной);
- частота сети;
- фазные и полные  $\cos\varphi$ .
- активная и реактивная энергия в прямом и обратном направлениях.

Таким образом, в системе сбора и передачи информации, предназначенной для работы в составе физической модели гексагональной (интеллектуальной) сети и реализованной с применением указанного оборудования уже присутствуют первичные устройства сбора информации, обладающие при этом современными интерфейсами для обмена с периферийными устройствами. В данном случае представляется целесообразным реализация системы сбора и передачи данных на основе встраиваемого компьютера eBOX560-880-FL.

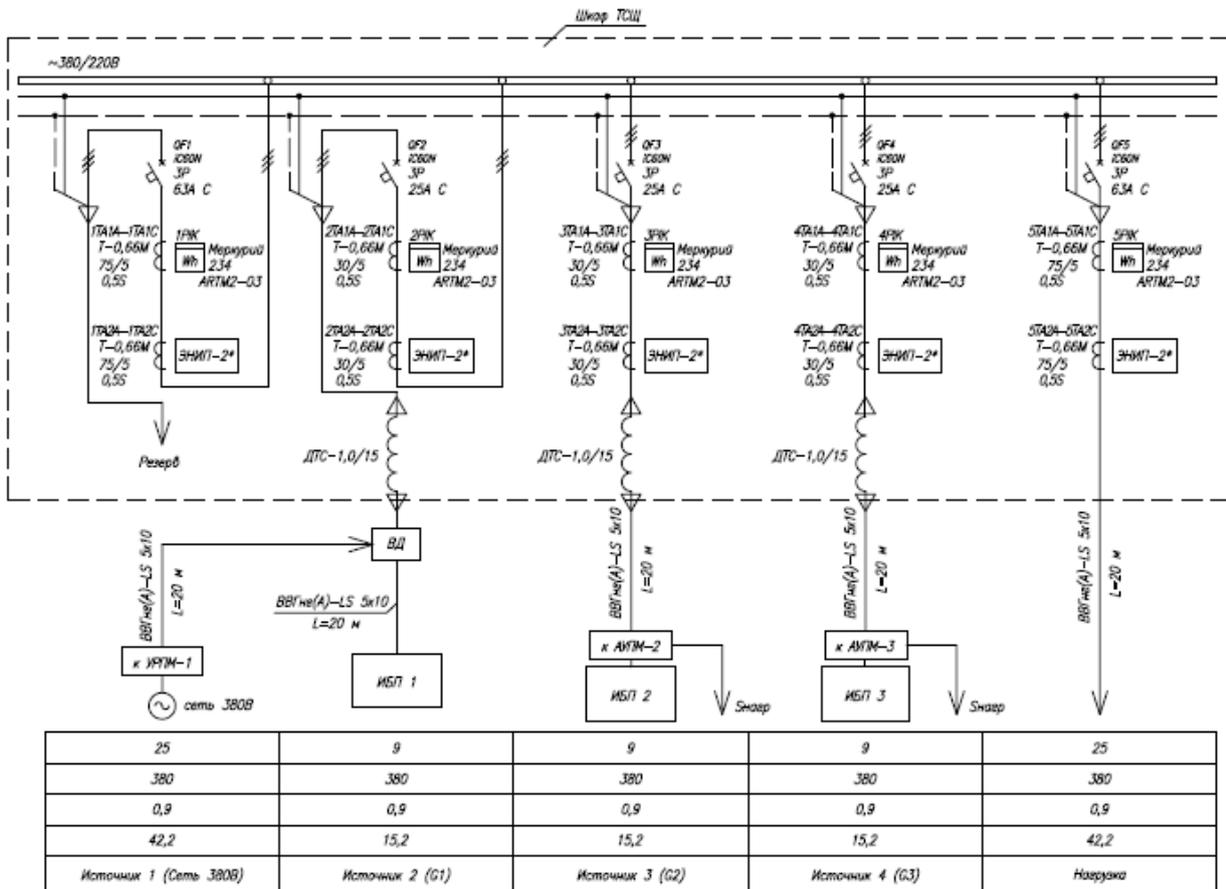


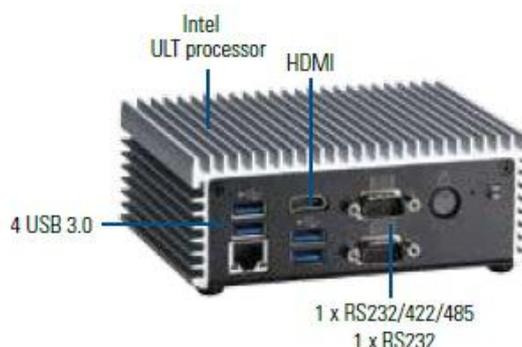
Рис. 2. Физическая модель автоматизированного узла регулирования

В случае возникновения необходимости работы с дополнительными аналоговыми датчиками понадобится подключение внешних АЦП. В тоже время на рынке присутствует достаточное количество современных АЦП работающих по USB, что позволяет получать данные с минимальными потерями в производительности.

По сравнению с микроконтроллерами микрокомпьютеры обладают значительно большими функциональными возможностями для создания систем сбора и передачи информации, поскольку, несмотря на малые размеры, их вычислительные мощности равны полноценным системным блокам. Благодаря поддержке большинства операционных систем, высокоуровневых объектно-ориентированных языков программирования, наличию стандартных шин передачи данных данное устройство представляет интерес при решении задач, связанных автоматизацией процесса сбора и передачи информации.

Предполагается, что эксплуатация встраиваемого компьютера должна производиться в условиях ограниченного пространства, где требуется его естественное охлаждение, высо-

кая защита от проникновения пыли и виброустойчивость. Основой компьютера служит алюминиевый П-образный радиатор с ребрами охлаждения, к которому крепятся стальные передняя и задняя панели, а также нижняя крышка, т.е. фактически радиатором охлаждения системы служит весь корпус (рис. 3).



**Рис. 3. Встраиваемый компьютер eBOX560-880**

Имеются три модели компьютера eBOX560-880, отличающиеся друг от друга только установленным на системной плате SoC-процессором. SoC (System-on-a-Chip) — однокристалльная система, выполняющая функции целого устройства (например, компьютера) и размещенная на одной интегральной схеме. Модели eBOX560-880-FL-4300U (Intel® Core™ i5-4300U) и eBOX560-880-FL-2980U (Intel® Celeron® 2980U) построены на процессорах семейства Haswell ULT, выполненных по технологии 22нм. Модель eBOX560-880-FL-5010U (Intel® Core™ i3-5010U) выполнена на процессоре следующего поколения Broadwell ULT с техпроцессом 14 нм.

В качестве компьютера, на основе которого реализована система сбора и передачи информации использован встраиваемый одноплатный компьютер eBOX560-880-FL-4300U, технические характеристики которого представлены в табл. 1.

**Таблица 1**

**Технические характеристики eBOX560-880-FL-4300U**

Процессор	Intel Core i5-4300U Haswell 1.9ГГц, 3МБ
Ethernet	2 x 10/100/1000 МБит/с
COM порты	1 x RS-232, 1 x RS-232/422/285
USB порты	4 x USB 3.0
Тип оперативной памяти	1 x DDR3L SO-DIMM до 8Гб
VGA контроллер	Intel HD Graphics
Интерфейсы	HDMI, DisplayPort(до двух дисплеев)
Отсеки для накопителей	1 x 2.5" SATA HDD/SSD
Слоты расширения	1 x Mini PCI-Express
BIOS	AMI
Источник питания	Внешний адаптер AC/DC 12В постоянного тока
Конструкция	Алюминиевый корпус
Охлаждение	Fanless (Пассивное)
Габаритные размеры (ДхШхВ), мм	141,5 x 106 x55 мм
Рабочая температура, град. С	-20 ... 50С
Относительная влажность, %	10 ~ 95% (без образования конденсата)
Возможности монтажа	Монтаж на стене, установка на столе
Сертификаты	CE Class A
Соответствие стандартам	ROHS

Значительным преимуществом предлагаемого решения является то, что eBOX560-880-FL-4300U полноценный компьютер, на котором можно запустить операционную систему Windows и появляется возможность использовать современное программное обеспечение, например пакеты MatLab или LabVIEW совместимые с операционной системой.

После установки и настройки необходимого программного обеспечения, компиляторов и интерпретаторов, а так же установки поддержки сетевых протоколов TCP/IP и UDP микрокомпьютер монтируется непосредственно в силовом шкафу и подключается к устройствам, осуществляющим сбор и первичную обработку информации от установленных датчиков. Поскольку встраиваемый компьютер обладает малыми размерами, его можно монтировать в любом подходящем месте шкафа управления, однако при этом следует предусмотреть наличие возможности свободно к нему подключаться. Для того, чтобы не устанавливать непосредственно в силовом шкафу монитор и клавиатуру должна быть обеспечена возможность удаленного доступа к встраиваемому микрокомпьютеру.

Удаленный доступ обеспечивается при помощи установленной терминальной программы и настройки соединения по безопасному протоколу SSH (Secure Shell). После чего, к микрокомпьютеру можно будет подключиться, введя в терминальной программе имя пользователя и IP адрес устройства. Также следует предусмотреть визуализацию полученных компьютером данных. Представляется, что указанную визуализацию наиболее целесообразно обеспечить через развертывание на микрокомпьютере WEB сервера. В этом случае на запрос клиента по протоколу HTTP устройство формирует WEB страницу с данными, представленными виде соответствующих таблиц и графиков. Использование такой структурированной информации явно предпочтительнее работе с удаленным компьютером посредством ввода запросов в командной строке операционной системы и последующего получения цифробуквенной информации о значении того или иного контролируемого параметра.

Использование протокола SNMP (Simple Network Management Protocol — стандартный интернет-протокол для управления устройствами в IP-сетях на основе архитектур TCP/UDP) предоставляет возможность реализации оповещения оператора об интересующих его событиях, расширяя тем самым его возможности по управлению системой. Настроить такое оповещение можно, например, по наиболее критичным для системы событиям, требующим незамедлительного вмешательства оператора.

Таким образом, использование в составе системы сбора, обработки и передачи информации встраиваемого одноплатного компьютера (eBOX560-880-FL) позволяет выполнять быструю адаптацию устройства без внесения каких-либо изменений в аппаратной части, что позволяет значительно сократить трудозатраты на внесение требуемых изменений.

### **Выводы**

Применение микроконтроллеров представляется целесообразным в системах сбора и передачи информации на этапе их массового производства с целью снижения стоимости.

Построение опытно-промышленных систем сбора и передачи информации на основе специализированных программно-аппаратных средств с открытой архитектурой позволяет менять ее функциональность системы путем соответствующего подбора модулей.

Использование среды графического программирования существенно упрощает процесс разработки и модификации. Основным сдерживающим фактором в применении таких систем является высокая стоимость используемого оборудования.

Встраиваемые одноплатные микрокомпьютеры обладают вычислительными мощностями, не уступающими полноразмерным системным блокам, и по сравнению с микроконтроллерами, имеют значительно больше функциональных возможностей для создания сложных систем сбора и передачи информации.

В качестве АЦП можно использовать внешние устройства, подключаемые через USB.

Использование относительно недорогих одноплатных микрокомпьютеров, в частности eBOX560-880-FL, позволяет существенно снизить временные и финансовые затраты на разработку системы сбора и передачи информации.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение № 14.577.21.0098 о предоставлении субсидии по теме «Разработка автоматизированного узла регулирования транспортных потоков мощности в интеллектуальной распределительной электрической сети», шифр 2014-14-579-0034).*

#### **Библиографический список**

1. **Иванов, И.М.** Применение микрокомпьютеров Friendly ARM в качестве платформы для спутниковых терминалов сбора и передачи данных / И.М. Иванов, Ю.А. Понятов // Вестник КазНТУ. – Алматы. – 2013. – №3 (97).
2. Пат. 2552842 Рос. Федерация. Цифровая трансформаторная подстанция / Р. Ш. Бедретдинов, И. А. Липужин, А. Б. Лоскутов, Е. Н. Соснина, И. В. Белянин, А. И. Чивенков; НГТУ (RU); Заявл. 17.10.2013; Опубл.10.06.2015.

*Дата поступления  
в редакцию 15.09.2016*

**V.I. Grebenschikov, A.I. Chivenkov**

#### **DEVELOPMENT OF SYSTEMS AUTOMATED INFORMATION COLLECTION AND TRANSMISSION**

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

The article presents the rationale for the use of single-board microcomputers to create automated information-gathering systems. Advantages and disadvantages of the use of specialized software and hardware /information-gathering. The principle of visual imaging device using the interface provided on the web server. The principles of network protocols alert the operator.

*Key words:* microcomputer; single board computer; automation; monitoring; sensors; protocols; software.

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 537.311.3

А.Н. Мешков, С.В. Хорьков, А.Н. Яшина

### НЕЛИНЕЙНЫЙ ОТКЛИК ПРОВОДЯЩЕЙ СРЕДЫ КАК ФУНКЦИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ЕЕ МИКРОСТРУКТУРЫ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Показано, что эффективные характеристики неоднородных проводящих сред определяются односточными корреляторами полей: эффективная линейная проводимость среды выражается через квадратичный коррелятор, а нелинейная проводимость среды в целом определяется коррелятором четвёртой степени от электрического поля. Получена зависимость локального электрического поля в среде с неоднородностями углового типа. Проанализирована расходимость функции отклика в зависимости от характеристик среды.

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

Рассмотрим неоднородную проводящую среду приготовленную из смеси изотропных материалов (композит), в каждом из которых плотность тока  $\vec{j}$  и электрическое поле  $\vec{e}$  связаны законом Ома  $\vec{j} = \sigma \vec{e}$ , где  $\sigma$  – проводимость материала. Характер неоднородности определяется как формой (острыми углами, сужениями и т. п.) и объемным содержанием материалов, так и различием их проводимостей. В сильно неоднородных средах, например в средах, находящихся в области перколяционного перехода, флуктуации локальных полей велики. Поэтому имеются участки, где в силу разогрева электронного газа проявляются нелинейные эффекты. Ограничимся изучением кубической нелинейности путём обобщения выражения для плотности тока в каждом материале

$$\vec{j} = \sigma \vec{e} + \chi \vec{e}^2 \vec{e}, \quad (1)$$

где  $\chi$  – будет означать нелинейную локальную проводимость. В выражении (1) второе слагаемое мы будем полагать малым в сравнении с первым. Данное ограничение означает, что мы находимся в квазилинейном режиме. Определим эффективную линейную  $\sigma_{eff}$  и нелинейную  $\chi_{eff}$  проводимости многокомпонентной среды из соотношения  $\vec{J} = \sigma_{eff} \vec{E} + \chi_{eff} \vec{E}^3$ , где

$$\vec{J} = \frac{1}{V} \int \vec{j} dV, \quad \vec{E} = \frac{1}{V} \int \vec{e} dV,$$

а  $V$  – объём композита. Выражение для диссипации энергии в единице объёма, в единицу времени имеет вид

$$\langle \vec{j} \vec{e} \rangle = \langle \sigma \vec{e}^2 \rangle + \langle \chi \vec{e}^4 \rangle. \quad (2)$$

В силу расщепления коррелятора  $\langle \vec{j} \vec{e} \rangle$  и выражения (1) также можно записать:

$$\langle \vec{j} \vec{e} \rangle = \langle \vec{j} \rangle \langle \vec{e} \rangle = \sigma_{eff} \vec{E}^2 + \chi_{eff} \vec{E}^4. \quad (3)$$

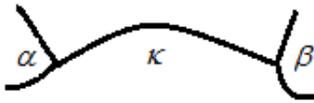


Рис. 1

Для определения эффективных характеристик разложим электрическое поле по степеням нелинейного параметра  $\chi$

$$\vec{e} = \vec{e}_0 + \vec{e}_1 + \vec{e}_2 + \dots$$

В первом приближении по нелинейному параметру первое слагаемое в выражении (2) имеет вид  $\langle \sigma \vec{e}^2 \rangle = \langle \sigma \vec{e}_0^2 \rangle + 2 \langle \sigma \vec{e}_0 \vec{e}_1 \rangle$ . Покажем, что слагаемое

$2 \langle \sigma \vec{e}_0 \vec{e}_1 \rangle = 2 \int (\vec{\sigma} \vec{e}_0, \vec{e}_1) dV / V$  обращается в ноль. Для этого от интегрирования перейдём к суммированию по проводящим каналам.  $2 \langle \sigma \vec{e}_0 \vec{e}_1 \rangle = 2 \sum_k I_k U_k / V$  (рис. 1) Выражение в числителе представим в виде  $2 \sum_k I_k U_k = \sum_{\alpha, \beta} I_{\alpha\beta} (\varphi_\alpha - \varphi_\beta)$ , где  $\alpha, \beta$  — независимые индексы суммирования, а  $\varphi_\alpha - \varphi_\beta$  — разность потенциалов между узлами проводящих каналов связанная с первой поправкой по нелинейному параметру.

$\sum_{\alpha, \beta} I_{\alpha\beta} (\varphi_\alpha - \varphi_\beta) = \sum_\alpha \varphi_\alpha \sum_\beta I_{\alpha\beta} - \sum_\beta \varphi_\beta \sum_\alpha I_{\alpha\beta}$ . В силу первого правила Кирхгофа  $\sum_\beta I_{\alpha\beta} = \sum_\alpha I_{\alpha\beta} = 0$ .

Второе слагаемое в выражении (2), в том же приближении записывается, как  $\langle \chi \vec{e}^4 \rangle = \langle \chi \vec{e}_0^4 \rangle$ . Приравнявая выражения (2) и (3) и сопоставляя слагаемые одного порядка малости, находим

$$\sigma_{eff} = \frac{\langle \sigma \vec{e}_0^2 \rangle}{\langle \vec{e}_0^2 \rangle}, \quad \chi_{eff} = \frac{\langle \chi \vec{e}_0^4 \rangle}{\langle \vec{e}_0^4 \rangle}. \quad (4)$$

Таким образом, в квазинелийном приближении линейная и нелинейная эффективные проводимости определяются корреляторами соответственно второй и четвёртой степенями от поля. Важно отметить, что в данном приближении величина  $\chi_{eff}$  выражается через поле  $\vec{e}_0$  эквивалентной линейной среды. Выражения (4) были получены в работе [1] иным способом.

Рассмотрим поликристаллическую плёнку, приготовленную из материалов с проводимостями  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ . При протекании по ней тока в местах геометрических неоднородностей электрические поля могут достигать огромных значений. Вследствие этого высшие корреляторы поля могут иметь особенности.

В данной работе определено электрическое поле плёнки вблизи неоднородностей углового типа, фрагменты которых представлены на рис. 2, а и 2, б. Для нахождения поля необходимо решить уравнения:

$$\vec{j} = \sigma \vec{e}, \quad \text{div} \vec{j} = 0, \quad \text{rot} \vec{e} = 0 \quad (5)$$

и удовлетворить граничным условиям

$$(\vec{j} \vec{n})_1 = (\vec{j} \vec{n})_2, \quad (\vec{e} \vec{\tau})_1 = (\vec{e} \vec{\tau})_2,$$

где  $\vec{n}$  и  $\vec{\tau}$  — соответственно нормальный и тангенциальный векторы к границе раздела материалов среды. В силу соотношения  $\vec{j} = -\sigma \nabla \varphi$ , первые два из уравнений (5) сводятся к уравнению Лапласа для потенциала  $\varphi$

$$\Delta \varphi = 0, \quad (6)$$

которое справедливо в каждой из областей проводящей среды исключая границы. Потенциал будем искать в виде  $\varphi(r, \theta) = r^\lambda f(\theta)$ , где  $r, \theta$  – полярные координаты, а функция  $f(\theta)$  удовлетворяет уравнения  $\frac{\partial^2 f}{\partial \theta^2} + \lambda^2 f = 0$ .

В качестве первого примера рассмотрим наиболее часто встречающиеся неоднородности в виде «уединенных» «углов» с раствором  $\alpha$  ( $0 \leq \alpha \leq 2\pi$ ) (рис. 2, а).

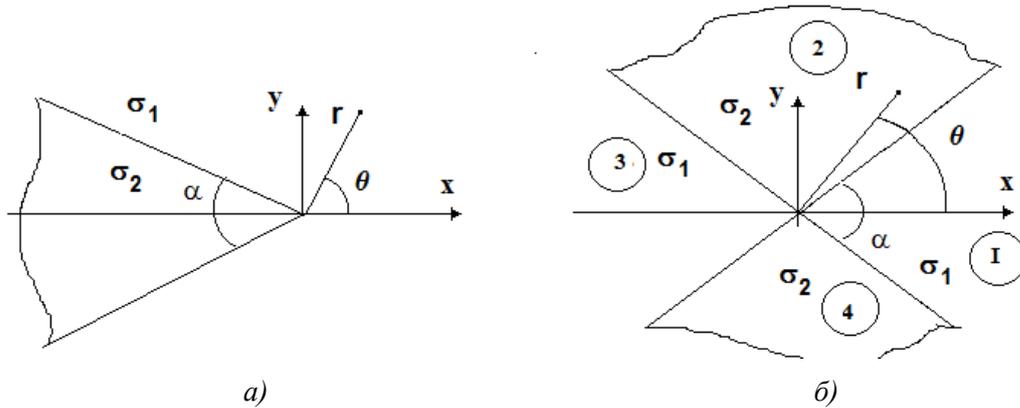


Рис. 2. Геометрии микрообластей пленки с различной проводимостью

Обозначим их проводимость как  $\sigma_2$ , а проводимость оставшейся части среды- $\sigma_1$ . Представим потенциалы в областях с разной проводимостью в виде

$$\varphi_i(r, \theta) = r^\lambda A_i \sin(\lambda\theta + \theta_i), \quad i = 1, 2. \tag{7}$$

Определим распределение электрического поля в данной структуре соответствующее частному случаю, когда средний ток  $\vec{J}$  направлен по биссектрисе угла  $\alpha$ . Тогда из симметрии задачи следует, что в каждом секторе справедливо соотношение  $\varphi_i(r, \theta) = \varphi_i(r, -\theta)$ , которое позволяет определить “начальные” фазы:  $\theta_1 = \pi/2$ ,  $\theta_2 = \pi/2 - \lambda\pi$ . Условия непрерывности потенциала (это эквивалентно равенству тангенциальных составляющих поля) и нормальной составляющей тока на луче  $\theta = \pi - \alpha/2$  приводит соответственно к уравнениям

$$A_1 \cos \lambda(\pi - \alpha/2) = A_2 \cos \lambda\alpha/2, \tag{8}$$

$$-\sigma_1 A_1 \sin \lambda(\pi - \alpha/2) = \sigma_2 A_2 \sin \lambda\alpha/2.$$

Из решения (8) соотношение, определяющее  $\lambda$  имеет вид

$$h = -\frac{\text{tg} \lambda(\pi - \alpha/2)}{\text{tg} \lambda\alpha/2}, \tag{9}$$

где  $h = \sigma_2/\sigma_1$ . Другой частный случай распределения локального поля соответствует ситуации, когда внешний ток  $\vec{J}$  направлен перпендикулярно к биссектрисе угла  $\alpha$ . Из симметрии очевидно, что линия, совпадающая с биссектрисой угла, является эквипотенциалью. Это позволяет определить начальные фазы в выражениях (7). Если положить, что на луче  $\theta = 0$  потенциал равен нулю, тогда  $\theta_1 = 0$ ,  $\theta_2 = -\lambda\pi$ .

Граничные условия для потенциала и плотности тока на луче  $\theta = \pi - \alpha/2$  соответствуют уравнениям

$$-A_1 \sin \lambda(\pi - \alpha/2) = A_2 \sin \lambda\alpha/2, \tag{10}$$

$$\sigma_1 A_1 \cos \lambda(\pi - \alpha/2) = \sigma_2 A_2 \cos \lambda\alpha/2,$$

из решения, которых следует

$$h = -\frac{\operatorname{tg} \lambda \alpha / 2}{\operatorname{tg} \lambda (\pi - \alpha / 2)}. \quad (11)$$

При произвольном направлении внешнего тока решением для поля будет являться суперпозиция частных решений со значениями  $\lambda$  из уравнений (9) и (11). Зная потенциал, запишем величину электрического в зависимости от расстояния до угла  $|\vec{e}| \propto r^{\lambda-1}$ . Нетрудно показать, что коррелятор  $\langle \vec{e}^4 \rangle$ , определяющий нелинейный кондактанс и другие эффективные и шумовые характеристики расходится при  $\lambda \leq 1/2$ .

Положим в уравнении (11)  $\lambda = 1/2$ , тогда  $\operatorname{tg}^2 \alpha / 4 = -h$  ( $h > 0$ ). Данное соотношение может быть выполнено только при условии, что  $h = 0$ ,  $\alpha = 0$ . Таким образом, влияние угловых неоднородностей существенно на формирование нелинейного отклика среды, если они непроницаемы для тока и имеют предельно малый угол раствора. Если же внешний ток направлен по биссектрисе угла, то из уравнения (9) нетрудно установить, что коррелятор  $\langle \vec{e}^4 \rangle$  ведет себя критическим образом при условии, что при малом угле раствора заострение является идеально проводящим.

Следовательно, в среде составленной из материалов с проводимостями  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  влияние «уединенных» углов на эффективные характеристики связанные с высшими моментами поля несущественно. Это связано с тем, что образование «иглообразных» микронеоднородностей маловероятно и, следовательно, их концентрация мала.

В качестве второго примера рассмотрим микрообласть, геометрия которой представлена на рис. 2, б. Области 1 и 3 имеют проводимость  $\sigma_1$ , а области 2 и 4 – проводимость  $\sigma_2$ . Найдём распределение электрического поля вблизи данной неоднородности. Электрическое поле определяется уравнениями (5) и условием на границе областей. Решение уравнения (6) для потенциала  $\varphi(r, \theta)$  будем искать в виде

$$\varphi^{(k)} = r^\lambda A_k \cos(\lambda\theta + \theta_k), \quad (12)$$

где  $k$  – индекс, нумерующий области, образованные пересечением прямых,  $A_k, \theta_k$  – некоторые постоянные. Данная структура имеет две оси симметрии, проходящие вдоль биссектрисы секторов с разной проводимостью. Направляя внешний ток вдоль одной из осей, замечаем, что потенциал электрического поля симметричен относительно этой оси и антисимметричен относительно другой. Такая симметрия позволяет однозначно определить значения фаз в каждом секторе.

Кроме того, рассматриваемая задача обладает симметрией инверсии  $\vec{e}(-\vec{r}) = \vec{e}(\vec{r})$ , что в итоге позволяет свести полную систему граничных условий (при любом направлении внешнего тока) к граничным условиям только между двумя соседними секторами. Выбирая систему координат с началом в точке пересечения прямых, направляя ось  $OX$  и внешний ток вдоль биссектрисы сектора с углом  $\alpha$  и проводимостью  $\sigma_1$  получим потенциал электрического поля в виде:  $\varphi^{(1)} = r^\lambda A_1 \cos(\lambda\theta)$ ,  $\varphi^{(2)} = -r^\lambda A_2 \sin(\lambda(\theta - \pi/2))$ , где  $k=1$  соответствует области  $-\alpha/2 < \theta < \alpha/2$ , а при  $k=2$  угол  $\theta$  меняется в интервале  $\alpha/2 < \theta < \pi - \alpha/2$ . При указанном направлении внешнего тока достаточно рассмотреть граничное условие лишь на одной границе между секторами, например, на луче  $\theta = \alpha/2$ . Приравнявая потенциалы и нормальные составляющие токов на данной границе, получаем систему алгебраических уравнений

$$A_1 \cos(\lambda \alpha / 2) + A_2 \sin(\lambda (\alpha - \pi) / 2) = 0, \quad (13)$$

$$A_1 \sigma_1 \sin(\lambda \alpha / 2) - A_2 \sigma_2 \cos(\lambda (\alpha - \pi) / 2) = 0.$$

Ненулевое решение существует только тогда, когда определитель системы равен нулю. Это приводит к выражению

$$\operatorname{tg} \frac{\lambda \alpha}{2} \operatorname{tg} \frac{\lambda(\pi - \alpha)}{2} = h. \quad (14)$$

Уравнение (14) определяет значение  $\lambda$ , а одно из уравнений системы (13) (при вычисленном  $\lambda$ ) дает величину  $A_1/A_2$ .

Найдем теперь второе частное решение с направлением внешнего тока вдоль биссектрисы секторов с проводимостью  $\sigma_2$ , т.е. по оси "OY". В данном случае потенциал (12) удовлетворяет соотношениям симметрии в первом и во втором секторах

$$\varphi^{(1)}(r, \theta) = -\varphi^{(1)}(r, -\theta), \quad (15)$$

$$\varphi^{(2)}(r, \theta) = \varphi^{(2)}(r, \pi - \theta).$$

Исходя из (12) и уравнений (15) приходим к следующим выражениям  $\varphi^{(1)} = -r^\lambda A_1 \sin(\lambda\theta)$ ,  $\varphi^{(2)} = -r^\lambda A_2 \cos \lambda(\theta - \pi/2)$ . Используя непрерывность потенциала и нормальной составляющей плотности тока на луче с  $\theta = \alpha/2$ , приходим к уравнениям

$$A_2 \cos(\lambda(\alpha - \pi)/2) - A_1 \sin(\lambda\alpha/2) = 0,$$

$$A_2 \sigma_2 \sin(\lambda(\alpha - \pi)/2) + A_1 \sigma_1 \cos(\lambda\alpha/2) = 0,$$

из которых следует соотношение, определяющее  $\lambda$ :

$$\operatorname{tg} \frac{\lambda \alpha}{2} \operatorname{tg} \frac{\lambda(\pi - \alpha)}{2} = \frac{1}{h}. \quad (16)$$

Таким образом, из решения данной задачи следует, что имеется два значения  $\lambda$ , определяемые соотношениями (14) и (16). К сингулярному значению электрического поля в начале координат приводит зависимость (14) при условии, что  $h < 1$ . Найдем такое значение  $h_c$ , при котором коррелятор поля  $\langle \bar{e}^4 \rangle$  начинает расходиться. Подставляя в (14) значение  $\lambda = 1/2$ , получим

$$h_c = \operatorname{tg}(\alpha/4) \frac{1 - \operatorname{tg}(\alpha/4)}{1 + \operatorname{tg}(\alpha/4)}. \quad (17)$$

Из (17) следует, что максимальное значение  $h_c = (\sqrt{2} - 1)^2$  соответствует значению угла  $\alpha = \pi/2$ .

### Выводы

Выведены общие соотношения, определяющие эффективную линейную и нелинейную проводимости неоднородных сред. Из них следует, что для определения отклика необходимо знать распределение в них электрического поля.

Если проводящая среда сильно неоднородна, то следует ожидать усиления нелинейных свойств, определяемых коррелятором  $\langle \bar{e}^4 \rangle$ .

Такие свойства обнаруживались в многочисленных экспериментах, например, в [2-5]. В работе получено распределение электрического поля в двухкомпонентных плёнках с неоднородностями угловых типов. Для одной из них (рис. 2, б) показано, что при некотором конечном значении отношения линейных проводимостей компонент  $h_c$  коррелятор  $\langle \bar{e}^4 \rangle$  расходится, что свидетельствует об усилении нелинейной проводимости среды. Современные планарные технологии способны создавать плёнки с заданным составом и заданной структурой неоднородностей. Допустим приготовлена плёнка, текстурированная ромбами с разной

линейной проводимостью компонент. Тогда варьированием проводимостей можно управлять нелинейным откликом такой проводящей структуры.

#### Библиографический список

1. **Stroud, D.** Nonlinear susceptibilities of granular matter / D. Stroud, P.M. Hui // Phys.Rev. – 1988. – V. B37. – P. 8719–8724.
2. **Yagil, Y.** Electrical breakdown measurements of semicontinuous metal films / Y. Yagil, G. Deutcher, D.J. Bergman // Phys. Rev. Lett. – 1992. – V. 69. – P. 1423–1426.
3. **Yagil, Y.** Third-harmonic generation in semicontinuous metal films / Y. Yagil, G. Deutscher // Phys. Rev. – 1992. – V. B46. – P. 16115–16121.
4. **Gefen, Y.** Nonlinear behavior near the percolation metal-insulator transition / Y. Gefen, W.H. Shih, R.B. Laibowitz, J.M. Viggiano // Phys. Rev. Lett. – 1986. – V. 57. – P. 3097–3100.
5. **Chakrabarty, R.K.** Nonlinear  $I-V$  characteristics near the percolation threshold / R.K. Chakrabarty, K.K. Bardhan, A. Basu // Phys. Rev. – 1991. – V. B44. – P. 6773–6779.

*Дата поступления  
в редакцию 18.10.2016*

**A.N. Meshkov, S.V.Khorkov, A.N. Yashina**

#### **NONLINEAR RESPONSE OF A CONDUCTING MEDIUM AS A FUNCTION OF THE HETEROGENEITY OF ITS MICROSTRUCTURE**

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

It is shown that the effective characteristics of inhomogeneous conducting media are determined by the one-point correlators of fields: effective linear conductivity of the medium is expressed through a quadratic correlator and the non-linear conductivity of the medium as a whole is determined by the correlator to the fourth power from the electric field. The dependence of the local electric field in a medium with inhomogeneities of angular type. Analyzed the divergence of the response function depending on the characteristics of the environment.

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

УДК 62-50:621.3

В.А. Тихомиров, М.Н. Охотников, А.С. Плехов, А.Н. Блохин

**АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ НАГРУЗОЧНОГО СТЕНДА**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены вопросы разработки и реализации алгоритмов управления электромеханическими преобразователями нагрузочного стенда для испытания механических полуавтоматических и автоматических (роботизированных) трансмиссий автомобилей. Показана целесообразность исполнения системы управления на базе программируемого логического контроллера.

*Ключевые слова:* испытательный стенд; коробка передач; электромеханические комплексы; программируемый логический контроллер; сенсорная панель управления.

Технические решения известных стендов для исследования и испытания элементов трансмиссии автомобиля [1, 2] позволяют проводить исследования только для одного узла трансмиссии – коробки передач. Эти стенды предназначены для испытания коробок передач с ручным и автоматическим управлением и позволяют проводить ресурсные испытания, исследования трансмиссии на шумность, оценку КПД, внешних (нагрузочных) и энергетических характеристик. Они не предназначены для проведения комплексных одновременных испытаний нескольких трансмиссионных узлов и агрегатов таких как фрикционное сцепление и механическая коробка передач, или более сложное сочетание: фрикционное сцепление - механическая коробка передач - коробка отбора мощности или раздаточная коробка.

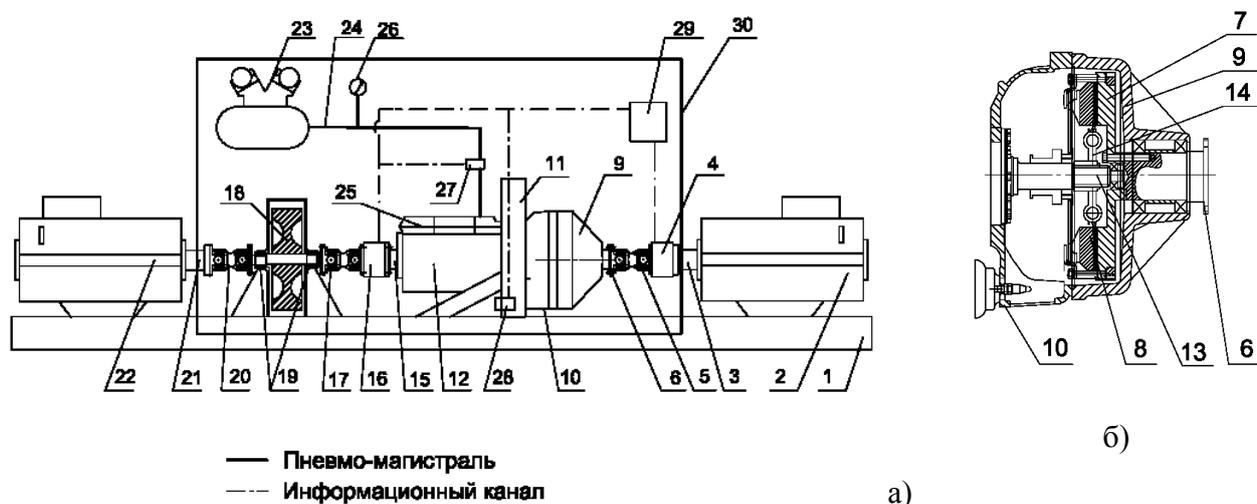
Кроме этого, вышерассмотренные решения не позволяют осуществлять доводку конструкции трансмиссии с командным (полуавтоматическим) или автоматическим управлением и проверку работы алгоритмов управления механизмами механической трансмиссии. На этих стендах нельзя провести исследования динамических процессов при трогании и переключении передач, на них невозможно рассмотреть особенности работы электропневматического привода управления узлами и агрегатами, которые используются на транспортных средствах средней, большой и особо большой грузоподъемности.

Для решения перечисленных задач в Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева разработан и изготовлен электромеханический комплекс [3], предназначенный для испытания механических полуавтоматических и автоматических (роботизированных) трансмиссий автомобилей, имеющих электропневматический привод (рис. 1).

На рис. 1 обозначено: 1 – монтажная плита; 2 – приводной электродвигатель; 3 – фланец вала электродвигателя; 4 – датчик крутящего момента и частоты вращения; 5, 17, 20 – карданная передача; 6 – вал маховика; 7 – маховик; 8 – фрикционное сцепление; 9 – корпус маховика; 10 – картер фрикционного сцепления; 11 – опора коробки передач; 12 – коробка передач; 13 – первичный вал коробки передач; 14 – ведомый диск сцепления; 15 – выходной вал коробки передач; 16 – датчик крутящего момента и частоты вращения; 18 – инерционная масса; 19 – опора инерционной массы; 21 – вал нагружающего электродвигателя; 22 – нагружающий электродвигатель; 23 – ресивер; 24 – пневмомагистраль; 25 – блок электромагнитных клапанов; 26 – манометр; 27 – датчик давления; 28 – датчик перемещения вилки выключения сцепления; 29 – вычислительный комплекс; 30 – механическая и пневматическая часть стенда.

Для контроля работы узлов и агрегатов, стенд оснащен контрольно-измерительной аппаратурой, включающей датчики крутящего момента и частоты вращения 4 и 16, датчик перемещения 28 вилки (на схеме не показана) выключения испытуемого фрикционного сцепления автомобильного типа 8, датчики давления 27 установленные в исполнительных пневматических узлах. Сигналы от этих датчиков поступают на вычислительный комплекс 29, с

которого передается информация на персональный компьютер (на схеме не показан). По датчикам крутящего момента и частоты вращения 4 и 16 оценивается характер работы трансмиссии и определяются энергетические затраты в узлах и агрегатах трансмиссии.



**Рис. 1. Структурная схема электромеханического комплекса для испытания автомобильных трансмиссий с автоматическим или командным управлением:**

а – электромеханическая и пневматическая часть стенда;

б – узел фрикционного сцепления

В командном режиме управления стенд работает следующим образом: электрическая часть получает из сети переменный ток направляемый в тиристорный преобразователь 30, который преобразует переменный ток в постоянный ток приводного двигателя 2, расположенного на монтажной плите 1. Посредством пульта управления осуществляется выбор необходимого числа оборотов приводного двигателя 2, который вращает ведущий вал 6, на котором установлен маховик 7 соединенный с испытуемым фрикционным сцеплением автомобильного типа 8, через датчики крутящего момента и частоты вращения 4, связанный с валом 6 посредством карданной передачи 5. Испытуемое фрикционное сцепление автомобильного типа 8 позволяет осуществить безударное и плавное переключения передач в испытуемой коробке 12. Крутящий момент через выходной вал испытуемой коробки передач 12 соединенный с ним датчик крутящего момента и частоты вращения 16 и карданную передачу 17 передается на инерционную массу 18 связанную, посредством карданной передачи 20, с нагружающим устройством 22, управление которым осуществляется при помощи пульта управления 33. Нагружающее устройство – электромеханический преобразователь 22 вырабатывает электрическую энергию постоянного тока и направляет ее в тиристорный преобразователь 31, переводящий постоянный ток в переменный и передает его в электрическую сеть 32. Возможно и другое использование нагружающего устройства – в функции двигателя, приводящего в движение выходной вал коробки передач в целях имитации движения автомобиля под действием инерционных или внешних движущих сил.

В автоматическом режиме управления работа стенда в целом аналогична командному режиму управления за исключением того, что включение передачи в испытуемой коробке 12 осуществляется не на основании сигнала от механизма выбора и включения передач (на схеме не показан) о выбираемой передаче, а в соответствии с алгоритмом переключения передач, заключенным в электронном блоке управления (на схеме не показан) изготовителем коробок передач.

На электромеханическом комплексе стенда обеспечиваются следующие режимы испытаний механических полуавтоматических и автоматических (роботизированных) трансмиссий автомобилей, имеющих электропневматический привод:

- расширенные (провокационные) испытания на работоспособность:
  - завышенные усилия включения;
  - минимальная величина рабочего давления пневмосистемы;
- испытания в автоматическом и преселекторном режимах работы коробок передач с определением моментов переключения передач;
- определение параметров работоспособности электропневматического управления коробкой передач и сцеплением;
- определение внутренних потерь в коробке передач;
- определение динамических усилий на деталях коробки передач при переключении;
- определение времени синхронизации и переключения передач;
- определение времени срабатывания и времени выключения/включения механизма управления сцеплением.

В целях иллюстрации возможностей стенда и разработанной авторами системы программного управления рассмотрим наиболее трудный в реализации режим испытания механизма управления сцеплением;

С целью уменьшения динамических нагрузок в трансмиссии и обеспечения плавного включения сцепления осуществляется экспериментальное определение зависимости положения вилки сцепления от положения педали газа. Проверка проводится в режим имитации трогания с места.

Испытание механизма управления сцеплением обычно выполняется в ручном режиме. При этом исследуются и анализируются все процессы, происходящие в механизме, и выбираются оптимальные параметры работы. Все параметры процессов фиксируются с помощью специального программного обеспечения на персональном компьютере.

При установке частоты вращения вала приводного электродвигателя 650 об/мин, на механизме выбора и включения передач устанавливается передача, соответствующая троганию автомобиля с места. При этом происходит выключение фрикционного сцепления и последующее перемещение ведущего диска в положение, обеспечивающее минимальный зазор между дисками без передачи крутящего момента. Затем происходит включение первой передачи в коробке. После включения первой передачи осуществляется плавное изменение углового положения педали газа, что приводит к увеличению частоты вращения вала приводного электродвигателя с 650 до 800 об/мин. Это должно приводить к изменению положения вилки сцепления, обеспечивающее сближение дисков сцепления с последующим плавным увеличением передаваемого крутящего момента от приводного электродвигателя до максимального значения. При резком уменьшении частоты вращения вала двигателя происходит разведение дисков сцепления до установления стабильной частоты вращения вала двигателя.

При достижении 800 об/мин происходит быстрый выпуск воздуха из пневмокамеры механизма управления сцеплением, что приводит к полному включению сцепления. При уменьшении частоты вращения до значения меньше 650 об/мин происходит разведение дисков сцепления до установления 650 об/мин.

Проверка закона автоматического переключения передач на электромеханическом комплексе может быть выполнена полностью в автоматическом режиме.

Для этого требуется обеспечить автоматический разгон приводного двигателя до заданной скорости с заданным темпом разгона. Это является имитацией управления педалью газа у реального автомобиля для получения заданной скорости движения автомобиля.

Аналогично в ручном режиме выполняется проверка времени включения передачи.

При ручной проверке закона автоматического переключения передач используется педаль, имитирующая педаль газа автомобиля, показанная на рис. 2.

На электромеханическом комплексе эта педаль задает скорость вращения приводного электродвигателя коробки передач. При этом исследуются и анализируются все процессы,

происходящие в трансмиссии, и выбираются оптимальные законы переключения передач. Все параметры процессов фиксируются с помощью специального программного обеспечения на персональном компьютере.



**Рис. 2. Имитатор педали газа автомобиля**

Определение передаточных чисел коробки передач на промежуточных передачах  $U_{km}$  производится по одному из следующих методов:

- 1) геометрическому ряду;
- 2) гармоническому ряду;
- 3) арифметическому ряду.

В основу первого метода положено условие постоянство скоростного интервала двигателя ( $we1 - we2$ ), используемого при разгоне на различных передачах. Соблюдение этого условия (пренебрегая снижением скорости при переключении) обеспечивает равенство скоростей движения в конце разгона на данной передаче и в начале на последующей.

Проверка закона автоматического переключения передач требует реализации сложного алгоритма управления приводным электродвигателем и двигателем имитации движения автомобиля.

Алгоритм проверки закона автоматического переключения передач требует выполнения следующих действий:

1. Задание частоты вращения холостого хода приводного двигателя  $n_{xx} = 600 \dots 650$  об/мин;
2. Включение  $j$ -й передачи в трансмиссии для трогания с места;
3. Увеличение частоты вращения приводного двигателя  $n$  педалью газа до оборотов, при которых происходит переключение на следующую ( $j+1$ ) передачу;
4. Передача значения скорости двигателю-имитатору движения. Задание должно соответствовать с учетом передаточного числа коробки значению скорости, достигнутому приводным двигателем непосредственно перед переключением передачи. Сигнал на задание скорости двигателя имитации передается в момент отключения сцепления. Скорость двигателя имитации в момент отключения сцепления контролируется датчиком оборотов, и надо ее сохранить, воздействуя на вход управления тиристорного преобразователя, который питает этот двигатель.
5. Продолжаем движение на ( $j+1$ ) передаче, увеличивая частоту вращения приводного двигателя с помощью педали газа до переключения на следующую ( $j+2$ ) передачу;
6. Продолжаем процесс переключения передач до тех пор, пока не достигнем высшей передачи.

Требуемая зависимость скорости двигателя имитации  $n_2$  от скорости приводного двигателя  $n_1$  иллюстрируется рис. 3.

При автоматизации сложных технологических процессов в настоящее время обычно применяют программируемые промышленные контроллеры. Промышленный контроллер является законченным устройством, которое обладает широкими возможностями по реали-

зации программным способом различных алгоритмов управления и содержит встроенные подпрограммы регуляторов для автоматического регулирования параметров технологического процесса. Промышленный контроллер имеет встроенные интерфейсы для связи с внешними устройствами и различные блоки расширения. Все это позволяет выполнять программирование контроллера в соответствии с заданным алгоритмом управления, вводить в промышленный контроллер командные сигналы и сигналы от внешних датчиков, выдавать на внешние устройства управляющие и информационные сигналы.

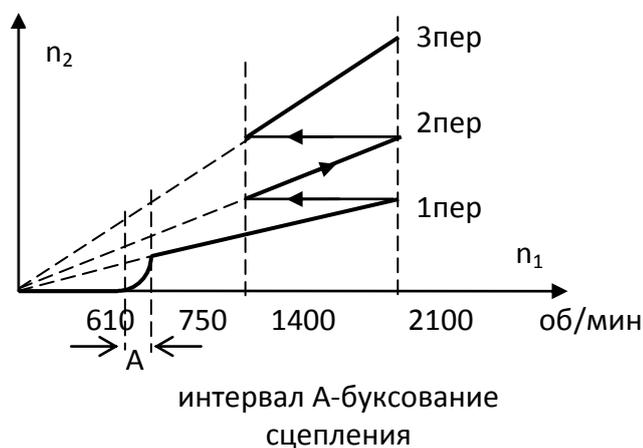


Рис. 3. Требуемая зависимость скоростей вращения двигателей стенда

Для оперативного изменения параметров программы логического управления и динамического регулирования в промышленном контроллере и визуального наблюдения параметров технологического процесса наиболее подходит другой элемент современных систем автоматизации – программируемая сенсорная графическая панель (сенсорный экран). Эта связка (контроллер и сенсорный экран) позволяет автоматизировать и визуализировать процедуру автоматической настройки трансмиссии.

Именно эта концепция и была принята при реализации системы управления электро-механическим комплексом для испытания механических трансмиссий автомобилей с автоматическим управлением. Совместно с контроллером и сенсорным экраном используется персональный компьютер, который собирает все данные о ходе испытаний механических полуавтоматических и автоматических (роботизированных) трансмиссий автомобилей.

Автоматический разгон приводного двигателя реализован с помощью формирования сигнала управления от промышленного контроллера для преобразователя питания приводного двигателя. В контроллере формируется линейно нарастающий код, который через цифро-аналоговый преобразователь подается на вход управления тиристорного преобразователя, питающего приводной двигатель. Плавно нарастающий код образуется путем заполнения двоичного счетчика, имеющегося в контроллере, импульсами от управляемого генератора импульсов на таймерах, которые имеются в составе контроллера. Изменяя период этих импульсов, можно менять темп разгона. Период является программным параметром таймера. Чем больше период, тем медленнее нарастает код на выходе счетчика и медленнее разгон приводного двигателя. На стенде предусмотрено 10 темпов разгона. Время разгона  $t_{разг}$  определяется по следующей формуле:

$$t_{разг} = T_T * N_n = 0,01 * (11 - A) * N_n, \quad (1)$$

где  $T_T = 0,01$  с – это время уставки таймера, который используется для построения генератора импульсов;  $N_n$  – код задаваемой скорости;  $A$  – темп разгона, 1, 2, 3, ..., 10. Здесь  $A=1$  – минимальный темп разгона,  $A=10$  – максимальный темп разгона.

При этом линейно нарастающий код задания скорости  $N_n$  изменяется следующим образом:

$$N_n = (N_{\text{зад}}/T_u) * k T_T,$$

где  $N_{\text{зад}}$  – заданный код установившейся скорости;  $T_u$  – постоянная интегрирования;  $T_T$  – период тактов счета;  $k = 0, 1, 2, \dots$  – номер такта.

Постоянная интегрирования  $T_u$  определяется по выражению

$$T_u = N_{\text{зад}} T_T / K_I,$$

где  $K_I$  – величина приращения за 1 такт счета (может меняться программным способом). Код  $N_n$  достигает значения  $N_{\text{зад}}$ , и на этом его возрастание прекращается.

Испытательный стенд имеет систему датчиков. Оба электродвигателя, приводной и имитации движения, имеют на валу импульсные датчики оборотов с количеством импульсов на оборот 120 имп./об. Сигналы этих датчиков используются для индикации действительных скоростей вращения  $n$  электродвигателей на сенсорном экране. Пересчет сигналов импульсных датчиков в код скорости  $N_n$  выполняется по следующему выражению:

$$N_n = \frac{60}{k * T} N, \quad (2)$$

где  $k$  – количество импульсов на оборот (датчики имеют 120 имп./об);  $T$  – интервал измерения в сек (принято  $T = 50 * 10^{-3}$  сек);  $N$  – программный код скорости.

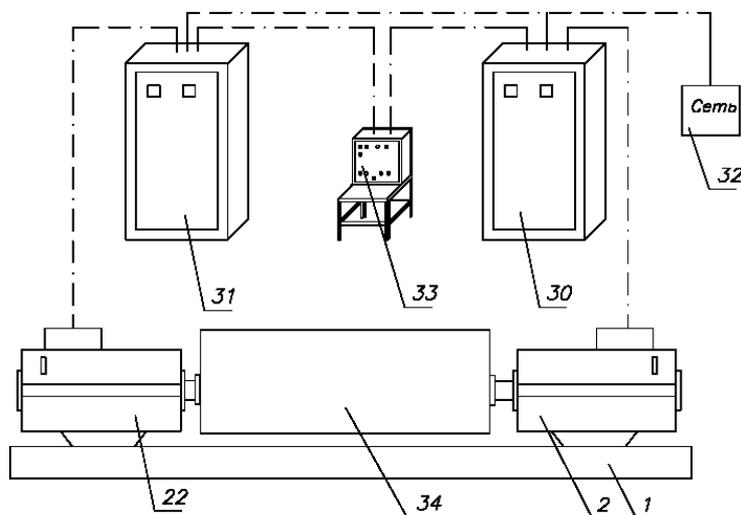
Программный код скорости определяется по формуле

$$N = T * f,$$

где  $f$  – частота импульсов в Гц от импульсного датчика оборотов,  $f = k * n / 60$ . Здесь  $n$  в об/мин.

Электромеханический комплекс позволяет выполнить испытания фрикционных сцеплений, коробок передач, коробок отбора мощности, раздаточных коробок и т.д., имеющих непосредственное ручное, дистанционное ручное, командное (полуавтоматическое) или автоматическое управление. Кроме этого, электромеханический комплекс позволяет осуществлять доводку конструкции трансмиссионных механизмов, узлов и агрегатов и алгоритмов их управления.

Электрическая часть стенда (рис. 4) состоит из приводного двигателя 2; механизма нагрузки 22, являющихся обратимыми электрическими машинами, закрепленных на монтажной плите 1; тиристорных преобразователей 30 и 31, питающиеся от сети 32 (380 В), расположенные рядом с монтажной плитой; пульт управления 33 приводным двигателем 2 и механизмом нагрузки 22. Позиция 34 – схематичное изображение механической и пневматической частей стенда.



— Соединительные провода

Рис. 4. Электрическая часть стенда

В качестве приводного двигателя 2 был выбран электродвигатель 4ПН280СГУХЛ4 220/220 1500/2600 с тахогенератором ТС-1М (производство ПАО «Электромашина», г. Харьков). Мощность 110 кВт, номинальные обороты 1500 об/мин, максимальные обороты – 2600 об/мин (рис. 4).

Тормозные устройства необходимы для того, чтобы нагружать двигатель при стендовых испытаниях путем поглощения его механической энергии специальным устройством – тормозом и измерять при помощи контрольно-измерительного оборудования развиваемый двигателем крутящий момент.

В настоящее время широкое применение получили тормозные устройства с гидравлическими и электрическими тормозами, в том числе электромагнитные.

Для обеспечения и поддержания требуемых оборотов и нагрузки для двигателя и генератора были выбраны преобразователи 30 и 31 для привода постоянного тока тиристорного типа ТП-500/460Н-2-2УХЛ4.

Электрические машины имеют мощность по 110 кВт каждая при номинальном напряжении 220 В. Преобразователи 30 и 32 характеризуются номинальным выпрямленным напряжением 460 В. Эти обстоятельства обуславливают потери из-за реактивных токов не менее 15% от установленной мощности электрических машин, которые покрываются генератором. Последний при мощности 150 кВА способен обеспечить менее 40 кВАр реактивной мощности, потребляемой преобразователями, что недостаточно для рассматриваемого комплекса.

В связи с этим, модернизированный тиристорный выпрямитель в звене постоянного тока наименее нагруженного преобразователя работает при опережающих углах управления с принудительной коммутацией в целях обеспечения генерации в питающую сеть реактивной мощности [4]. Последняя компенсирует реактивную мощность, потребляемую приводным двигателем стенда.

Все вычисления по приведенным выражениям выполняются с помощью промышленного контроллера. Причем для вычисления кода  $N$  и отсчета интервала измерения  $T$  используются имеющиеся в составе промышленного контроллера быстродействующие аппаратные счетчики с предельной рабочей частотой 20 кГц [5].

Схема взаимодействия отдельных блоков стенда, системы управления и измерения приведена на рис. 5.

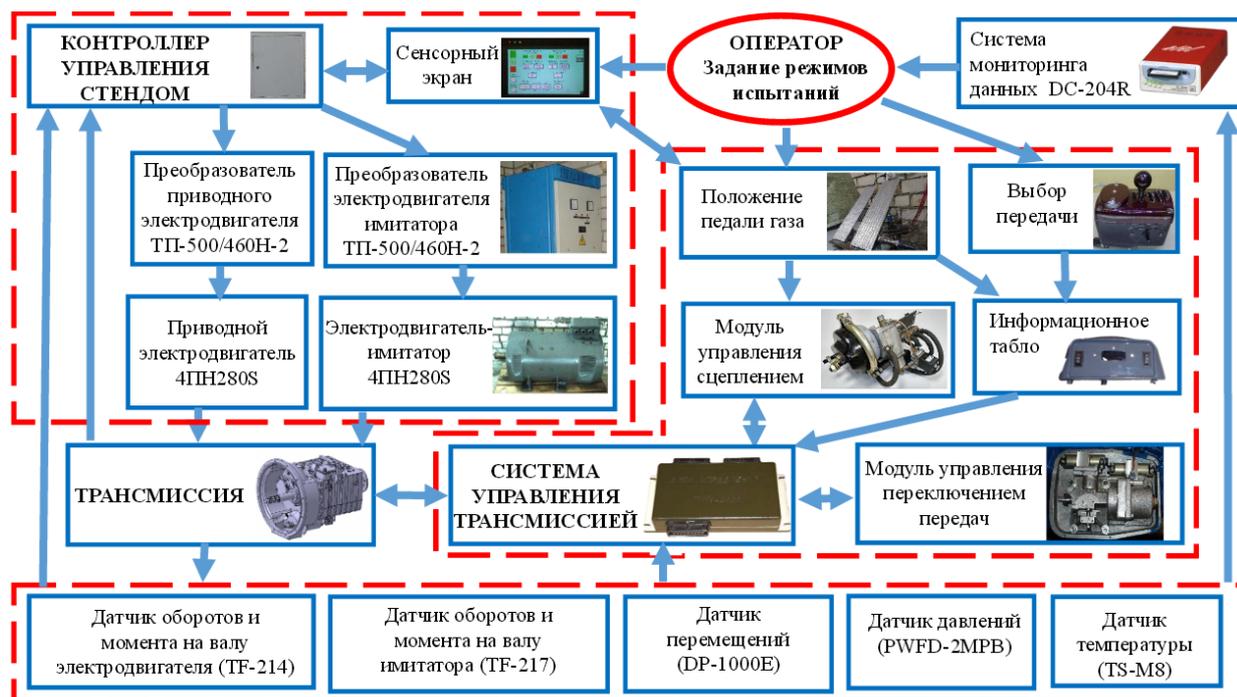


Рис. 5. Схема взаимодействия отдельных блоков стенда, системы управления и измерения

Силовые шкафы питания электродвигателей (приводного и имитации движения) и шкафы управления представлены на рис. 6.

Задание параметров управления и регистрация рабочих электромеханических параметров комплекса в автоматическом режиме проверки закона переключения передач выполняется с применением сенсорной панели. С ее помощью формируются командные сигналы, собирается полученная от оборудования информация в аналоговом или цифровом виде. Вид сенсорной графической панели при задании и отработке 1-й скорости представлен на рис. 7.



**Рис. 6. Фотография шкафов управления стендом**



**Рис. 7. Вид сенсорной графической панели при задании и отработке 1-й скорости**

На сенсорной панели имеются все необходимые органы управления (кнопки «Пуск» и «Стоп») для подачи питания на испытательный стенд и подключения преобразователей приводного двигателя и двигателя имитации движения. На ней отображаются рабочие параметры этих электродвигателей: напряжение на двигателе, скорость двигателя и ток двигателя. Имеются цифровые сенсорные дисплеи для задания уровня скорости, до которой будет разгоняться приводной двигатель, дисплей для задания темпа разгона и дисплей, отображающий процесс нарастания скорости до заданного значения с заданным темпом. Также имеется цифровой дисплей, отображающий в % положение педали газа автомобиля при ручной проверке закона автоматического переключения передач. Вся информация на сенсорную панель поступает после обработки ее контроллером от имеющейся на стенде системы датчиков.

### Выводы

1. Реализованы законы энергосберегающего и функционального управления электромеханическими преобразователями стенда.
2. Показана возможность реализации алгоритмов управления режимами стенда средствами регулируемого электропривода и программируемого контроллера.
3. Разработана и реализована современная система управления, совмещенная с системой измерения и фиксации результатов экспериментов.

*Работы выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки в рамках Соглашения №14.577.21.0080 от 05.06.2014 по теме «Разработка, исследование и создание амфибийного вездеходного транспортного средства с колесной формулой 8x8 и высокими экологическими качествами движителя для обеспечения жизнедеятельности на Севере», уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57714X0080.*

**Библиографический список**

1. [www.kopis.ru](http://www.kopis.ru).
2. <http://www.powerlinkpt.com/index.php/en/>.
3. Пат. 154 871(13) U1 Российская Федерация, МПК G01M 13/02. Стенд для ногофункциональных испытаний узлов и агрегатов Механических трансмиссий автомобилей с автоматическим или командным управлением [Текст] / Блохин Александр Николаевич, Плехов Александр Сергеевич, Маньковский Василий Владимирович, Шатилов Владимир Викторович, Любичев Павел Владимирович (RU); Заявка: 2014151594/28, 19.12.2014, 10.09.2015 Бюл. № 25.
4. **Blokhin, A.** Electromechanical Complex of Test Loading Stand of Multistage Transmissions with Automatic Control / A. Blokhin, S. Dobryaev, A. Plekhov, V. Titov // Applied Mechanics and Materials Vol. 763 (2015) pp 78-85, Trans Tech Publications, Switzerland, doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.763.78.
5. **Тихомиров, В.А.** Программируемый регулятор нагрева для сложных технологических процессов / В.А. Тихомиров, Г.В. Свердлик // Труды НГТУ. – 2015. – № 1 (108). – С. 209–216.

*Дата поступления  
в редакцию 28.09.2016*

**V.A. Tikhomirov, M.N. Ohotnikov, A.S. Plekhov, A.N. Blokhin**

**AUTOMATION OF MANAGEMENT ELECTROMECHANICAL  
TRANSDUCER LOAD STAND**

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

The article is devoted to problems of development and implementation of control algorithms electromechanical test of bench load for mechanical semiautomatic and automatic (robotic) vehicle transmissions. It demonstrated the effectiveness of the control system based on programmable logic controller.

*Key words:* test bench; transmission; electromechanical systems; programmable logic controller; touch panel.

УДК 621.793.3:669.248

В.В. Рогожин, Е.Ю. Ананьева, Н.О. Кузякин, Ю.Л. Гунько,  
О.Л. Козина, М.Г. Михаленко

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗБАВЛЕННЫХ ЦИТРАТНЫХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ  
ДЛЯ ОСАЖДЕНИЯ ПОКРЫТИЯ НИКЕЛЬ-БОР В КАЧЕСТВЕ  
КОРРОЗИОННОСТОЙКОГО КАРКАСА ВОЛОКОННОГО  
ОКСИДНО-НИКЕЛЕВОГО ЭЛЕКТРОДА ХИМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА<sup>1</sup>**

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

Рассматривается влияние разбавления цитратного электролита никелирования на равномерность распределения бора в покрытии никель-бор, при никелировании сложно профильной детали в условиях различных плотностей тока.

*Ключевые слова:* никель, никель-бор, оксидно-никелевый электрод, цитратный электролит никелирования, химические источники тока.

Покрытия никель-бор, полученные гальваническим осаждением из электролитов никелирования, обладают ценными функциональными характеристиками, что позволяет применять их в различных отраслях техники от электроники и приборостроения до машиностроения и энергетики [1, 2].

В последнее время такие покрытия стали рекомендовать для получения коррозионно-стойких токопроводящих основ волоконных оксидно-никелевых электродов химических источников тока. Высокая пористость несущих активную массу волоконных основ обеспечивает развитый токоподвод к активной массе, что увеличивает коэффициент её использования. Технология изготовления таких пористых электродов включает операции подготовки поверхности волокна как диэлектрика и операцию гальванического никелирования, для последующего заполнения, металлизированного никелем, волоконного каркаса активным веществом [3, 4].

Гальваническое никелирование здесь является одной из самых значимых операций, так как нанесение этого покрытия влияет на срок службы аккумулятора, его характеристики и расход никеля на единицу емкости.

От самого процесса никелирования пористой основы требуется равномерность толщины покрытия по глубине пористой основы и высокая коррозионная стойкость для обеспечения максимального срока службы аккумулятора в 1000 и более циклов заряд – разряд [3].

Было установлено, что покрытия никель-бор с содержанием бора 5-6 % обладают высокой коррозионной стойкостью, что позволяет повысить работоспособность электрода в условиях его многократного циклирования [4].

Коррозионностойкие покрытия были получены из сульфатного и цитратного электролитов никелирования, путем введения в них борсодержащих добавок, например декагидродекабората натрия (ДГБН) [5].

Однако при работе с цитратным электролитом возникают определенные трудности, связанные с выпадением труднорастворимых двойных никель-аммонийных солей и гидроксидов.

Повысить работоспособность цитратных электролитов удалось, как показано в [6], модификацией его состава и разбавлением по соли никеля и цитрату. Из таких электролитов можно получать необходимые по составу и коррозионной стойкости покрытия, в том числе и для оксидно-никелевых электродов на волоконной основе [4].

Однако для разбавленных электролитов неизвестно распределение толщины покрытия, а главное, содержания в нем бора на сложном профиле волоконной основы, что должно обеспечивать равноценность всех участков по коррозионной стойкости.

Изучению распределения содержания бора в никелевом покрытии, полученном из разбавленных цитратных электролитов на сложном профиле основы, посвящена данная работа.

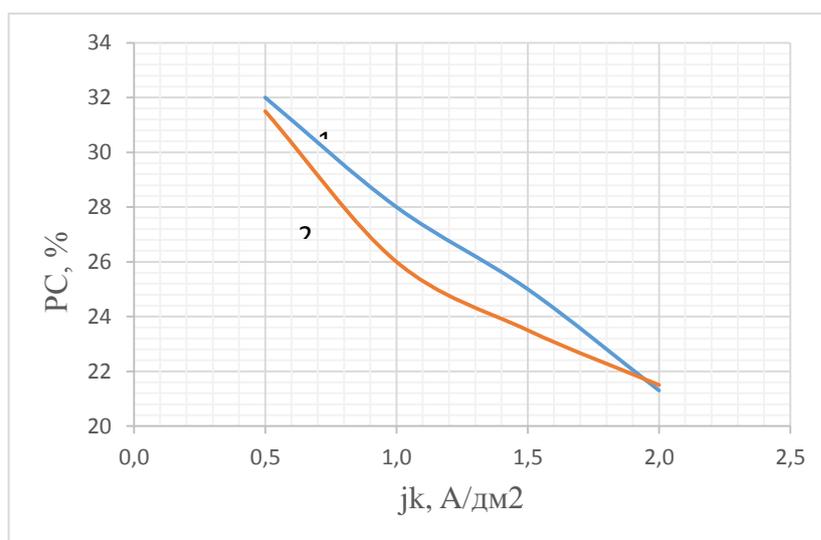
### Экспериментальная часть

В качестве электролита для осаждения покрытия использовался электролит состава, описанный в [6]. Содержание бора в покрытии определялось аналитически и рассчитывалось по уравнениям регрессии приведенным в [4].

Распределение бора на сложном профиле основы оценивалось по методике, описанной в [7] для определения вторичного распределения тока в щелевой ячейке Молера обычной конструкции [8]. Зная величину вторичного распределения тока, можно определить содержание бора в никелевом покрытии на любом из участков катода щелевой ячейки и выявить факторы, приводящие к максимально равномерному его распределению.

На основании проведенных исследований [5] предложено использовать разбавление цитратного электролита по сульфату никеля и цитрату натрия. Разбавленный электролит должен иметь характеристики, близкие к характеристикам используемого ранее электролита, то есть выход по току должен составлять порядка 93-95% при рабочей плотности тока  $1 \text{ А/дм}^2$ . С учетом этих требований была проведена оптимизация состава электролита и получено следующее соотношение компонентов: сульфат никеля 80-120 г/л; хлорид аммония 20-25 г/л; цитрат натрия 110-160 г/л.

Рассеивающая способность (РС), отвечающая за равномерность толщины покрытия, определяется зависимостью катодного выхода по току от плотности тока, поляризуемостью и электропроводностью рассматриваемого электролита. В нашем случае меняется лишь поляризуемость катодного процесса - для разбавленного электролита она выше вследствие снижения концентрации цитратных комплексов никеля. В результате, рассеивающая способность разбавленного цитратного электролита оказалась немного выше, чем неразбавленного (рис. 1) [6].



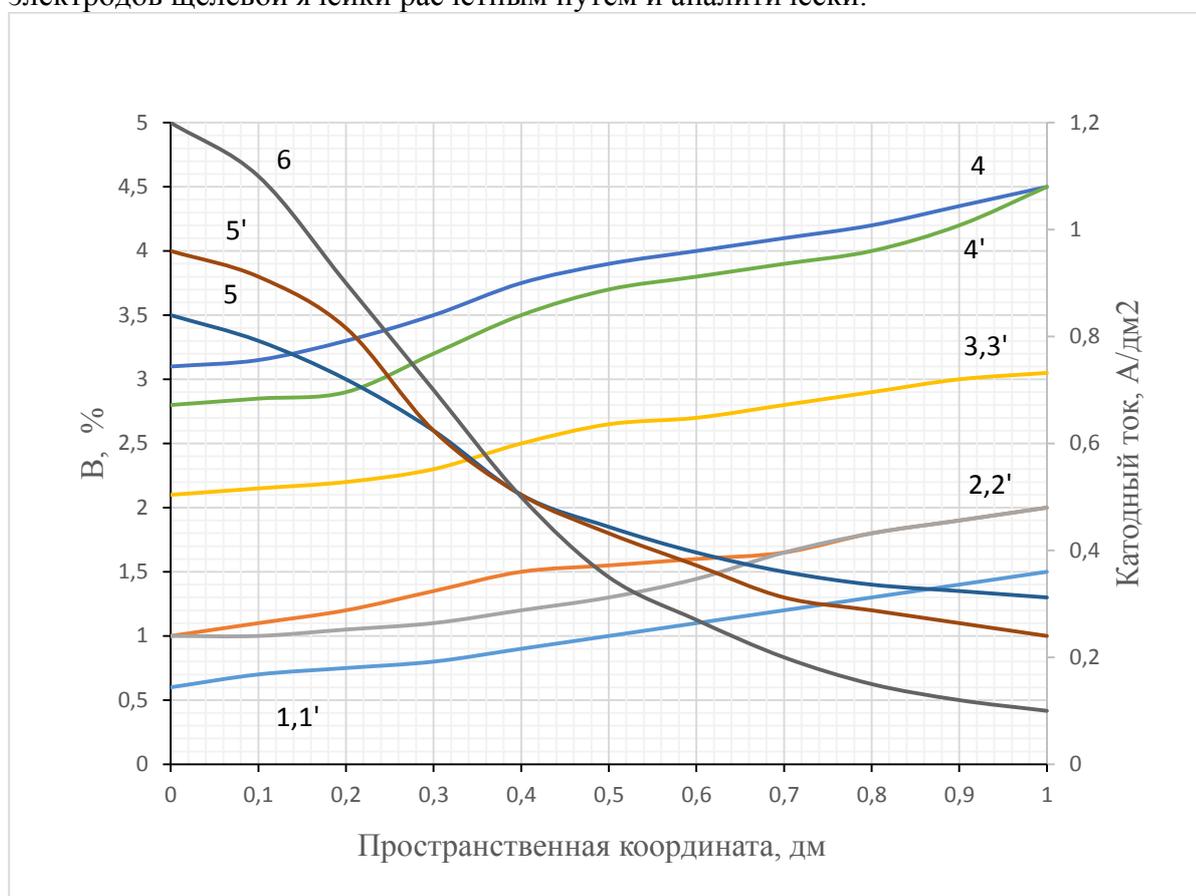
**Рис. 1. Рассеивающая способность цитратного электролита:**  
1 - разбавленный электролит; 2 - не разбавленный электролит

Экспериментальное определение РС может быть заменено компьютерным расчетом по предложенной авторами методике [7], что позволяет быстро оценить влияние на однородность покрытия по толщине и составу основных технологических параметров и прежде всего плотности тока.

При осаждении сплава никель-бор, используя полученное в результате расчета РС вторичное распределение тока, можно произвести расчет распределения каждого компонента сплава, обычно на основе парциальных поляризационных кривых. В случае включения неметалла - бора целесообразно использовать зависимость процентного содержания бора от плотности тока и концентрации бордобавки в электролите, полученную ранее из уравнений регрессии, представленных в [4].

При этом стандартная ошибка, характеризующая различие экспериментальных и расчетных значений, составляет не более 6%, что не превышает ошибки, допускающейся в экспериментальном методе определения РС (10%) [7].

На рис. 2 и рис. 3 показано вторичное распределение тока, определенное расчетным путем с использованием выше описанной методики. По данным, полученным с использованием компьютерной программы "STATGRAF" по прогнозированию содержания бора в покрытиях (в зависимости от концентрации борсодержащей добавки ДГБН в электролите и плотности катодного тока), было определено процентное содержание бора на каждом из пяти электродов щелевой ячейки расчетным путем и аналитически.



**Рис. 2. Распределение бора по поверхности катода в разбавленном цитратном электролите при заданной плотности тока ( $j=0,5 \text{ А/дм}^2$ ) и концентрации ДГБН (г/л):**

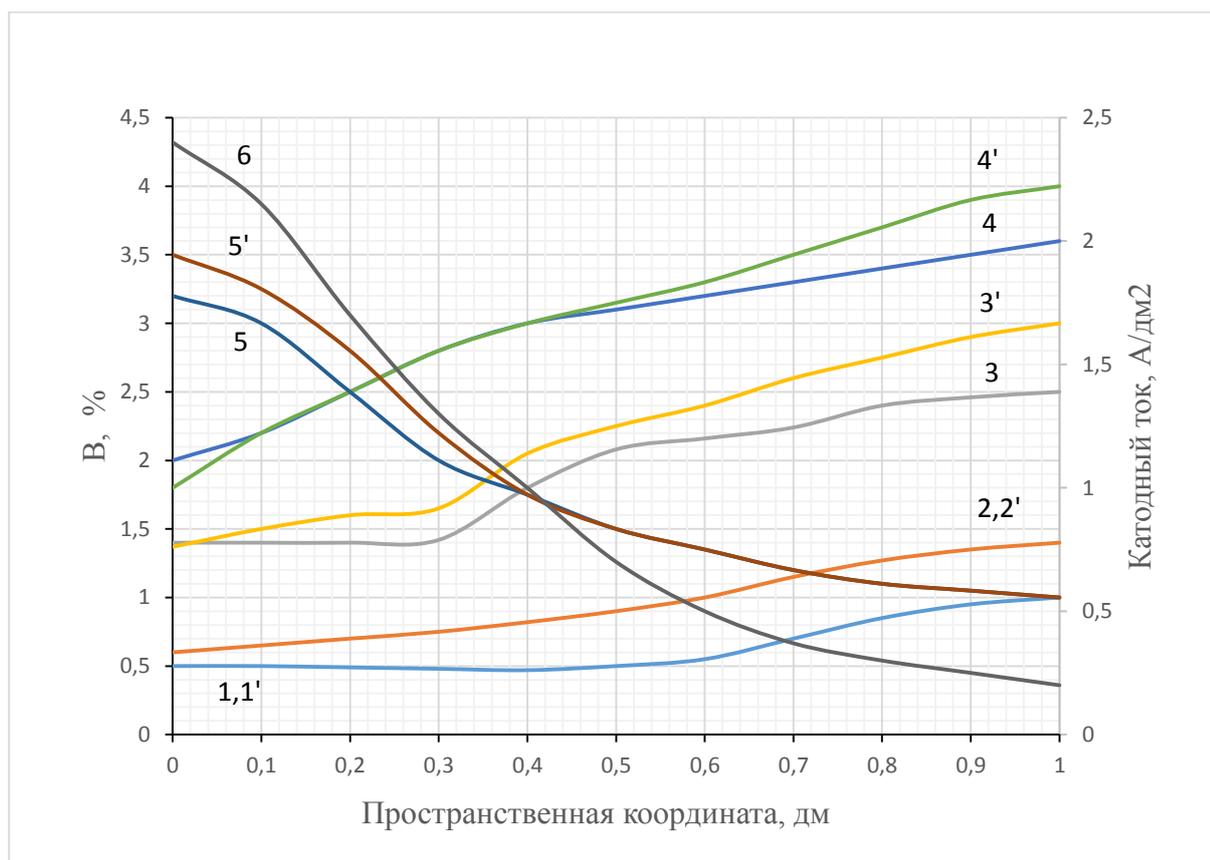
1 – 0,05; 2 - 0,1; 3 - 0,3; 4 - 0,5; 5 - вторичное распределение тока;

6 - первичное распределение тока; 1'-5' для разбавленного электролита

Хорошая сходимость экспериментальных (по анализу) и расчетных (по математической модели) данных по составу сплава никель-бор позволяет прогнозировать количество борной компоненты в осаждаемом покрытии на различных участках изделий сложного профиля, исходя из величины рассеивающей способности (РС) применяемых электролитов, которая прежде всего определяется вторичным реальным распределением тока. При стремлении вторичного распределения тока к единице (идеальное распределение) рассеивающая

способность будет близкой к 100%, а высокая РС будет обеспечивать меньший разброс по содержанию бора в осадках на различных участках сложнопрофилированного катода, что стабилизирует функциональные характеристики покрытий.

Это важно для изделий электронной техники и приборостроения (интегральные схемы, печатные платы и т. д.), где требуются покрытия с минимальным содержанием бора для проведения сборочных операций (каналы, площадки, отверстия), а также для металлизации волоконных материалов оксидно-никелевого электрода щелочных химических источников тока, где для обеспечения высокой коррозионной стойкости содержание бора должно быть большим.



**Рис. 3. Распределение бора по поверхности катода в разбавленном цитратном электролите при заданной плотности тока ( $j=1$  А/дм<sup>2</sup>) и концентрации ДГБН (г/л):**

1 - 0,05; 2 - 0,1; 3 - 0,3; 4 - 0,5; 5 - вторичное распределение тока;  
6 - первичное распределение тока; 1' - 5' для разбавленного электролита

Из рис. 2 следует, что при осаждении никель-борных покрытий на изделия, где требуется невысокое содержание бора в покрытии, когда процесс ведут при малом содержании ДГБН в электролите и низкой плотности тока 0,5 А/дм<sup>2</sup>, распределение борной компоненты на катоде сложного профиля будет наиболее равномерным и разбавление электролита практически не влияет на это распределение (кривые 1-4 и 1'-4').

Из рис. 3 следует, что увеличение концентрации бордобавки в электролите равно, как и катодной плотности тока процесса электроосаждения, приводит к снижению равномерности распределения бора в сплаве (кривые 3-4 и 3'-4').

Таким образом, наибольшее значение рассеивающей способности для никеля достигается при низких плотностях катодного тока, при этом распределение борной компоненты в осаждаемом покрытии по поверхности изделий сложного профиля будет более равномерным, хотя процент бора, включаемого в покрытие, небольшой. При увеличении концентрации бордобавки ДГБН в электролите, когда общее количество бора в покрытии возрастает,

распределение бора по поверхности ухудшается, приводя к образованию осадков с различным содержанием борной компоненты сплава никель-бор и в этом случае использование разбавленного цитратного электролита приводит к более равномерному распределению бора на сложно профилированном катоде при ведении процесса никелирования на высоких плотностях тока ( $1\text{А/дм}^2$  и выше). Это обеспечивает интенсификацию процесса никелирования волоконных основ, постоянство состава сплава по бору, а значит, ведет к равноценности покрытия по высокой коррозионной стойкости всех участков поверхности волоконных основ оксидно-никелевого электрода для щелочных химических источников тока.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение №14.577.21.0073 о предоставлении субсидии от 05.06.2014, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57714X0073).*

#### Библиографический список

1. Электрохимическое осаждение функциональных покрытий никель-бор: монография. НГТУ. – Нижний Новгород, 2012. – 112 с.
2. **Звягинцева, А.В.** Физико-механические свойства никелевых покрытий легированных бором / А.В. Звягинцева, А.И. Фаличева // Гальванотехника и обработка поверхности. – 1997. – Т.5. – № 2. – С. 24–31.
3. Гришин С.В., Якубовская Е.В., Волынский В.В., Казаринов А.И. // Электрохимическая энергетика. – 2010. – Т. 10. – №2. – С. 96–101.
4. **Рогожин, В.В.** Осаждение коррозионностойкого никелевого покрытия на пористые основы безламельных оксидно-никелевых электродов / В.В. Рогожин [и др.] // Журнал прикладной химии. – 2015. – Т.88. – Вып. 3. – С. 406–410.
5. **Грибанова, Ю.Н.** Гальваническое осаждение покрытий никель-бор из электролитов с добавкой ДГБН / Ю.Н. Грибанова, В.В. Рогожин, В.Н. Флеров // Гальванотехника и обработка поверхности. Москва. – 2000. – Т. – 4. №<sup>0</sup> 4. – С. 22–27.
6. **Рогожин, В.В.** Особенности электроосаждения никелевых покрытий из разбавленных аммиачно-цитратных электролитов / В.В. Рогожин, Е.Ю. Ананьева, М.Г. Михаленко // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – №2. – С. 237–240.
7. **Ананьева, Е.Ю.** Компьютерный расчет показателя рассеивающей способности электролит/ Е.Ю. Ананьева, В.В. Рогожин, Е.В. Андрощук // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. – 2004. – Т. 47. – №10. – С. 71–74.
8. ГОСТ 9.309-86 Покрытия гальванические. Определение рассеивающей способности электролитов при получении покрытий. – М.: Изд-во стандартов. 1979.

*Дата поступления  
в редакцию 12.10.2016*

**V.V. Rogozhin , E.J. Ananieva , N.O. Kuzyakin , J.L. Gunko ,  
O.L. Kozina , M.G. Mikhailenko**

#### **USING DILUTE CITRATE ELECTROLYTE FOR THE DEPOSITION OF NICKEL-BORON CORROSION-RESISTANT STRUCTURE AS FIBERS OXIDE NICKEL ELECTRODE CHEMICAL CURRENT SOURCES**

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

The effect of the dilution of citrate electrolyte nickel plating on the uniform distribution of boron in the coating of nickel- boron, nickel plating with difficult profile piece in a different current densities

*Key words* : Nickel , nickel - boron, nickel oxide electrode citrate electrolyte nickel plating , chemical current sources.

УДК 62-52-83:656.56

А.В. Серебряков

**К ВОПРОСУ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ  
АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ**

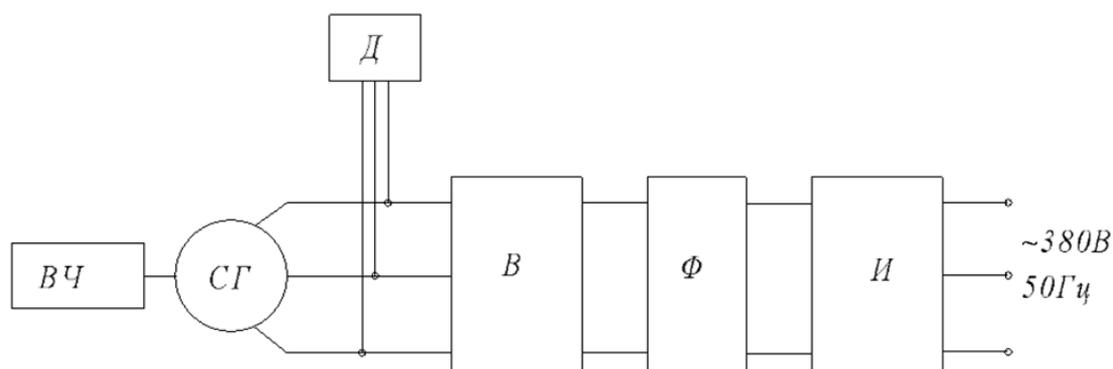
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Предложена универсальная схема стабилизации выходных параметров электроэнергии, вырабатываемой различными альтернативными источниками энергии. Получена функциональная модель электромеханической части автономного источника энергии. Разработана математическая модель, позволяющая установить зависимость значений выходной переменной от значений входных переменных. Предложен алгоритм диагностирования электромеханической части альтернативных источников энергии, позволяющий выявить неисправность каждого элемента системы.

*Ключевые слова:* альтернативный источник энергии, система диагностики, диагностика, алгоритм диагностирования.

Развитие отечественной промышленности и увеличение потребления электроэнергии со стороны населения стимулируют расширение масштабов исследований, направленных на совершенствование топливно-энергетического комплекса РФ и снижение расходов традиционных углеводородных источников электроэнергии [1]. Вместе с тем, в отечественной и мировой электроэнергетике за многие годы накоплен достаточно большой опыт по созданию и использованию альтернативных автономных источников энергии. Исследования по созданию и совершенствованию возобновляемых источников энергии имеют высокие перспективы применения в настоящее время [2]. Более того, новая аппаратная база электромашиностроения, силовой электроники и микропроцессорной техники предрасполагает к созданию высокотехнологичных, энергоэффективных и быстро окупаемых агрегатов и систем. В связи с этим, потребуется новая или усовершенствованная система диагностики и прогнозирования технического состояния существующего или создаваемого автономного источника [3].

Принцип работы целого ряда нетрадиционных источников энергии основан на вращении ротора генератора за счет различных внешних сил [4]. Величина напряжения и частота на зажимах статорной обмотки генератора зависит от целого ряда факторов. Изменение скорости вращения, электрической нагрузки на валу генератора приводит к изменению величины выходного напряжения и частоты. Для стабилизации выходных параметров применяется следующая схема (рис. 1).



**Рис. 1. Функциональная схема стабилизации тока нетрадиционных источников энергии:**  
ВЧ – вращающаяся часть; СГ – синхронный генератор; Д – система датчиков;  
В – выпрямитель; Ф – фильтр; И – инвертор

Использование данной схемы позволяет получить на выходе системы стабилизированное напряжение 380В, 50Гц. Для достижения наиболее эффективной и надежной работы установки, целесообразно разработать систему оперативной диагностики технического состояния, которая обеспечит корректную и безотказную работу электромеханической части автономной установки. Система должна сигнализировать о параметрах нагрева, электродинамических нагрузках, состоянии питающей сети и возникших ошибках и неисправностях.

Важность анализа электропривода как объекта диагностирования связана с исследованием функционирования исправного состояния электропривода, разделением на элементы электропривода, определением параметров, характеризующих техническое состояние, пределами изменения технической возможности установки, оценкой степени детализации возможных мест, видов, причин и частоты появления дефектов электропривода, учитывая затраты, связанных с осуществлением элементарных проверок [5, 6].

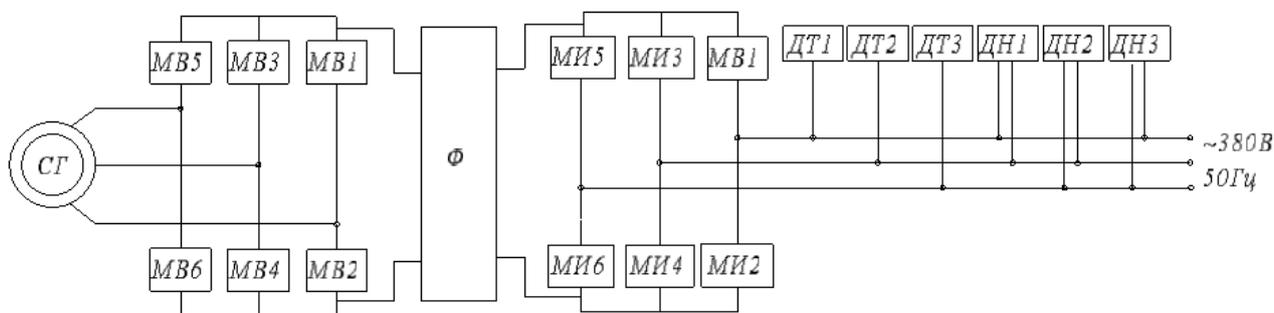
Факторы, влияющие на надежность электромеханической части электропривода в процессе эксплуатации, можно разбить на три группы:

- конструкция и качество изготовления (факторы, не зависящие от потребителя);
- режим эксплуатации (частично зависящие от потребителя);
- качество обслуживания, качество ремонта (зависящие от потребителя).

Так как необходимо иметь постоянный контроль за работой системы, то следует применить функциональную модель диагностирования, построенную при определенных предположениях:

- каждый функциональный элемент модели может иметь конечное множество входных сигналов и только один выходной сигнал;
- для каждого функционального элемента модели есть определённые функциональные зависимости между входными и выходными сигналами, а также их допустимые значения;
- внешние входные сигналы функционального элемента принимают только допустимые значения;
- линии связи между функциональными элементами модели абсолютно надежны и должны соответствовать направленной взаимосвязи элементов принципиальной электрической или функциональной схемы объекта диагностирования;
- при выходе за пределы допустимых значений хотя бы одного из входных сигналов на выходе функционального элемента появляется недопустимый сигнал;
- функциональный элемент модели считается дефектным, если при допустимых входных сигналах на выходе элемента появляется недопустимый сигнал.

Таким образом, функциональная модель электромеханической части альтернативного источника энергии имеет вид (рис. 2).



**Рис. 2. Функциональная модель электромеханической части:**

ДТ1-ДТ3, ДН1-ДН3 – датчики токов и напряжений;

МВ 1 – МВ6, МИ 1 – МИ6 - модули выпрямителя и инвертора соответственно;

U – выходное трехфазное напряжение

На основе функциональной модели строится математическая (логическая) модель, где указывается заключение о техническом состоянии каждого элемента по результатам оценки значений его входных и выходных сигналов вида «в допуске - не в допуске», «ноль или единица». При описании элементов диагностирования логично применять те математические формы и аппараты, которые бы наилучшим образом соответствовали поиску дефекта в данном устройстве. Однако необходимость сопряжения между собой разнородных математических моделей вынуждает пользоваться более общими математическими описаниями электропривода как объекта диагностирования. Одно из таких описаний представление электропривода абстрактной динамической системой, функционирование которой состоит в изменении состояния системы под внешними и внутренними воздействиями. Математическая модель подобной системы может быть определена как взаимосвязь переменных [7,8]:

$$(T, X, Z, S, S_0, F^*, F, L^*, L), \tag{1}$$

где  $T$  – множество моментов времени  $t$ ;

$X, Z$  – множества входных  $x$  и выходных  $z$  сигналов системы;

$S$  – множество состояний  $s$  системы;

$S_0$  – замкнутая область состояний системы, ограничивающая возможные перемещения  $s$  в процессе функционирования системы;

$F^*(T, X, S) = S_c^*$ ,  $F(T, X, S) = S_c$  – операторы переходов, отражающие изменения состояния системы под действием внутренних и внешних возмущений;

$L^*(T, X, S) = Z_c^*$ ,  $L(T, X, S) = Z_c$  – операторы выходов, описывающие формирование выходного сигнала под действием внутренних и внешних возмущений.

Индекс \* принадлежит операторам, учитывающим действие внутренних возмущений.

Для распознавания технического состояния объекта диагностирования принято пользоваться набором классов технических состояний

$$E = \{ E_i \}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, N, \tag{2}$$

где  $E_i$  – подмножество технических состояний объекта, характеризующих совокупность возможных его состояний  $s_i$  с указанием соответствующих граничных условий (областей  $s_{oi}$ ) и выполнимости этих условий по всем переменным состояниям  $s_i$ .

Предположим, что каждый  $i$  – й элемент объекта диагностирования выполняет лишь один алгоритм функционирования, а минимальная форма функции условия его работы состоит из одного члена конъюнкции внешних и внутренних переменных, т. е. имеет вид

$$\Phi_i = (F_i * L_i) \wedge x_{i1} \wedge x_{i2} \wedge \dots \wedge x_{ik}, \tag{3}$$

где  $F_i, L_i$  – операторы переходов и выходов в зависимости (1);

\* – знак взаимодействия операторов;

$x_{ik}$  –  $k$  входных сигналов 1-го элемента.

Тогда фактическое значение выходного сигнала  $z_i$  1-го элемента логической модели будет зависеть от значения функции и его технического состояния  $E_i$  (2).

Возможные наборы значений двоичных переменных и  $E_i$  и соответствующие им значения выходного сигнала:

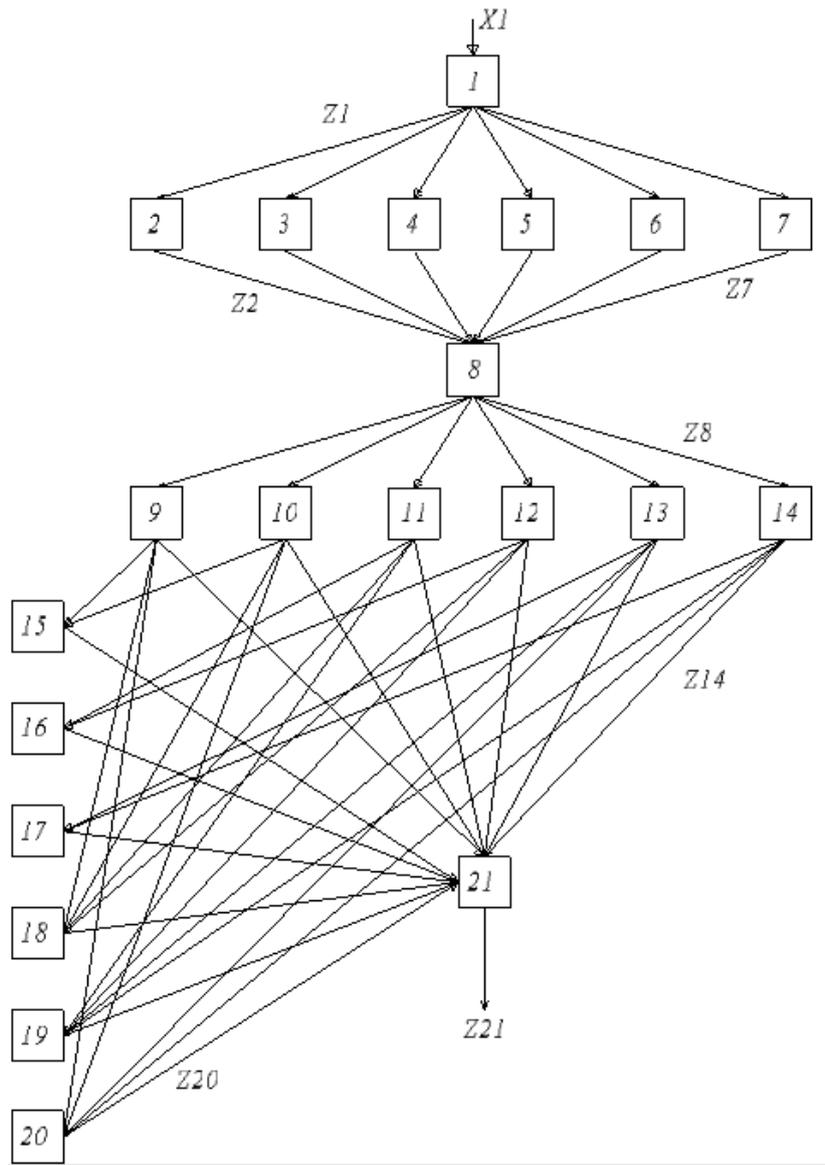
$\Phi_i = 1$ , если функция условий работы  $i$ -го элемента является конъюнкцией его входных сигналов, все значения которых допустимы (т. е. равны единице);

$\Phi_i = 0$ , если функция условий работы  $i$ -го элемента является конъюнкцией его входных сигналов, не все значения которых допустимы;

$E_i = 1$ , если  $i$ -й элемент является исправным;

$E_i = 0$ , если  $i$  – элемент неисправен.

Для получения логической (математической) модели объекта каждый его функциональный элемент заменяется логическим блоком, имеющим один выход и существенные для данного выхода входы. Построение логической модели производится непосредственно по функциональной схеме объекта диагностирования. Логическая модель может быть представлена в виде графа. Вершины графа будут являться элементами логической модели, а также ее входными и выходными сигналами, а дуги – связью между элементами и внешними входными и выходными сигналами (рис. 3).



**Рис. 3. Математическая модель электромеханической части**

Входные и выходные сигналы объекта диагностирования представлены дугами с символами  $x$  и  $Z$ . Индекс  $i$ , соответствует номеру элемента на функциональной схеме. Соответствие внешних входных  $x$  и выходных  $Z$  сигналов.

После математического описания строится таблица функций неисправностей. Она задает поведение объекта диагностирования в исправном и всех возможных неисправных состояниях. На рис. 4 в форме ориентированного графа представлен алгоритм диагностирования в системе оперативной диагностики технического состояния. Внутренние вершины графа представляют собой элементарные проверки (выходные координаты  $Z_i$ ).

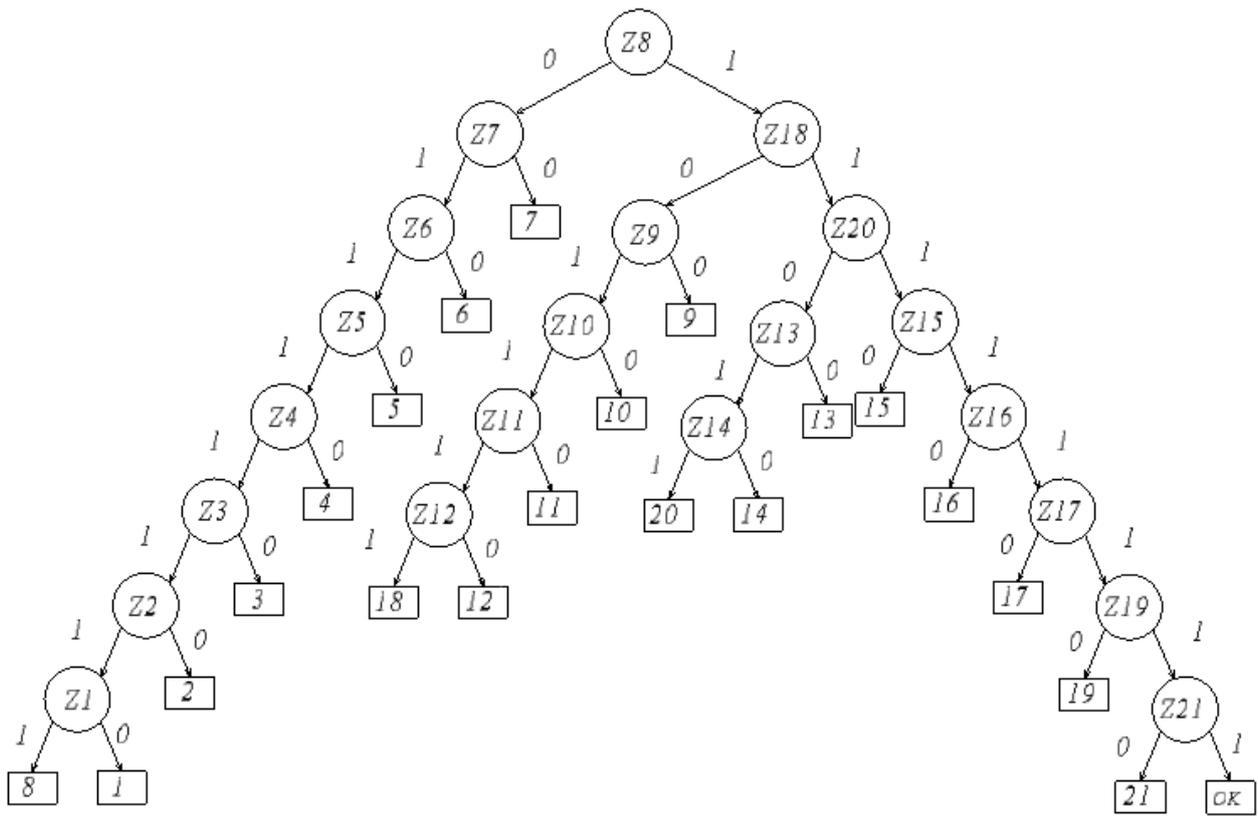


Рис. 4. Алгоритм диагностирования привода

Для наглядности граф представлен в виде квадратов с номерами элементов, неисправности которых выявлены, и дугами, которые указывают на исправное (единица) или неисправное (ноль) техническое состояние  $i$ -го элемента, из вершин которого исходят дуги.

### Выводы

Предложенная универсальная схема стабилизации выходных параметров электроэнергии, вырабатываемой различными альтернативными источниками энергии, применима к электромеханическим системам малых ГЭС, ветроэнергетических установок, приливных, волновых электростанций и целого ряда других альтернативных источников энергии, где используется вращение вала генератора для выработки электроэнергии. Полученные функциональная и математическая модель электромеханической части автономного источника энергии позволяют установить зависимость и взаимовлияние между различными элементами системы. Предложенный алгоритм диагностирования позволяет выявить неисправность любого элемента.

### 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. **Крюков, О.В.** Интеллектуальные ветроэнергетические установки для автономных систем электроснабжения / А.В. Серебряков, О.В. Крюков; НГТУ им. Р.Е. Алексева. – Нижний Новгород, 2014. – 135 с.
3. **Васенин, А.Б.** Диагностика электромеханической части ветроэнергетических установок / А.Б. Васенин, О.В. Крюков // Электромеханичні і енергозберігаючі системи. – 2012. – №3(19). – С. 549–552.
4. **Титов, В.Г.** Дифференцирование нагрузки в системах электроснабжения автономных потребителей / В.Г. Титов, Е.А.Чернов, А.В. Шахов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексева. – 2015. – № 2 (109). – С. 203–209.
5. **Крюков, О.В.** Метод и система принятия решений по прогнозированию технического состоя-

- ния электроприводных газоперекачивающих агрегатов / О.В. Крюков, А.В. Серебряков // Электротехнические системы и комплексы. – 2015. – № 4 (29). – С. 35–38.
6. **Крюков, О.В.** Artificial neural networks of technical state prediction of gas compressor units electric motors / О.В. Крюков, А.В. Серебряков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2016. – Т. 16. – № 1. – С. 66–74.
  7. **Серебряков, А.В.** Оптимизация диагностирования электромеханической части ветроэнергетических установок // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2013. № 3. С. 39-46.
  8. **Серебряков, А.В.** Универсальная система мониторинга электродвигателей газоперекачивающих агрегатов / А.В. Серебряков, О.В. Крюков // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2016. – № 4 (546). – С. 74–81.

*Дата поступления  
в редакцию 23.09.2016*

**A.V. Serebryakov**

## **TO THE QUESTION OF DIAGNOSTICS OF TECHNICAL CONDITION OF ALTERNATIVE SOURCES OF ENERGY**

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

We propose a universal scheme of stabilization of output parameters of electricity generated by various alternative sources of energy in this paper. The obtained functional model of the electromechanical part of the autonomous energy source. A mathematical model is developed, allowing to establish the dependence of values of the output variable from the values of the input variables. The algorithm of diagnosing of the electromechanical part of the alternative energy sources, allowing to identify the fault in each system component.

*Key words:* alternative energy source, system of diagnostic, diagnostics, algorithm of diagnostics.

УДК 621.039

С.М. Дмитриев, А.А. Добров, М.А. Легчанов, А.Е. Хробостов

**ВЕРИФИКАЦИЯ CFD-ПРОГРАММЫ ЛОГОС НА БАЗЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НГТУ ПО ИЗУЧЕНИЮ ЛОКАЛЬНОГО МАССООБМЕНА ПОТОКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ТВС**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Посвящена расчетному моделированию процессов перемешивания теплоносителя во фрагменте топливной сборке ядерного реактора с перемешивающей решеткой. Для проведения расчетов использовался программный комплекс «ЛОГОС 5.0», результаты расчетов в котором сравнивались с экспериментальными данными, а также с результатами, полученными в аналогичных программах Ansys CFX 14.0 и Ansys FLUENT 14.0.

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

**Введение**

В данной работе проводится сравнение результатов, полученных в программах вычислительной гидродинамики «ЛОГОС 5.0», с результатами экспериментальных исследований перемешивания потока теплоносителя в модели тепловыделяющей сборки (ТВС), проведенных на аэродинамическом стенде НГТУ им. Р.Е. Алексеева [1-3], а также с результатами кросс-верификационных расчетов, выполненных в программах Ansys CFX 14.0 и Ansys FLUENT 14.0.

Актуальность проведения расчетных исследований локальных гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВС связана с внедрением современных программ вычислительной гидродинамики в практику теплогидравлического расчета активных зон ядерных реакторов. CFD-программы позволяют учесть локальные гидродинамические эффекты в потоке теплоносителя, вызванные за счет установки дополнительных турбулизаторов потока, и спрогнозировать отдельные теплогидравлические характеристики элементов ТВС еще на этапе проектирования, тем самым сократить объем экспериментальных исследований.

Пакет программ «ЛОГОС», разработанный в ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», предназначен для решения связанных и сопряженных задач тепломассопереноса и гидродинамики на параллельных ЭВМ с десятками тысяч расчетных ядер. Пакет программ «ЛОГОС» позволяет численно моделировать течения вязкого несжимаемого газа с учетом турбулентного перемешивания, процессы распространения тепла в твердом теле с учетом излучения, течения в анизотропных пористых средах и другие процессы [4–8].

**Описание методики проведения эксперимента**

Экспериментальный стенд для исследований локальных характеристик межъячеечного массообмена и гидродинамических характеристик потока теплоносителя в модели ТВС представляет собой аэродинамический разомкнутый контур, через который прокачивается воздух. Экспериментальная модель (ЭМ), представляющая собой фрагмент ТВС с треугольной упаковкой твэлов (рис. 1), выполнена в увеличенном масштабе и состоит:

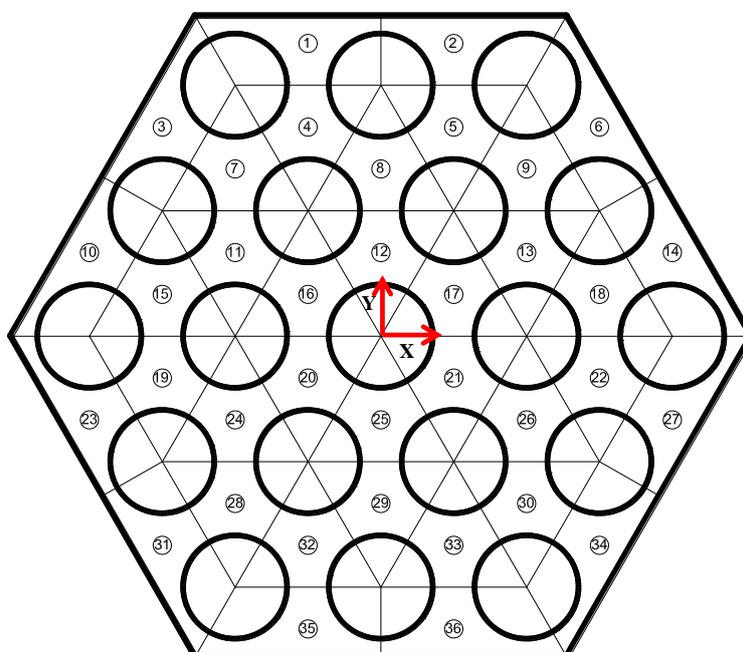
- из девятнадцати цилиндрических твэлов-имитаторов;
- устройства фиксации датчика;
- трех поясов дистанционирующих решеток (ДР);
- пояса пластинчатой перемешивающей решетки (ПР).



**Рис. 1. Общий вид экспериментальной модели**

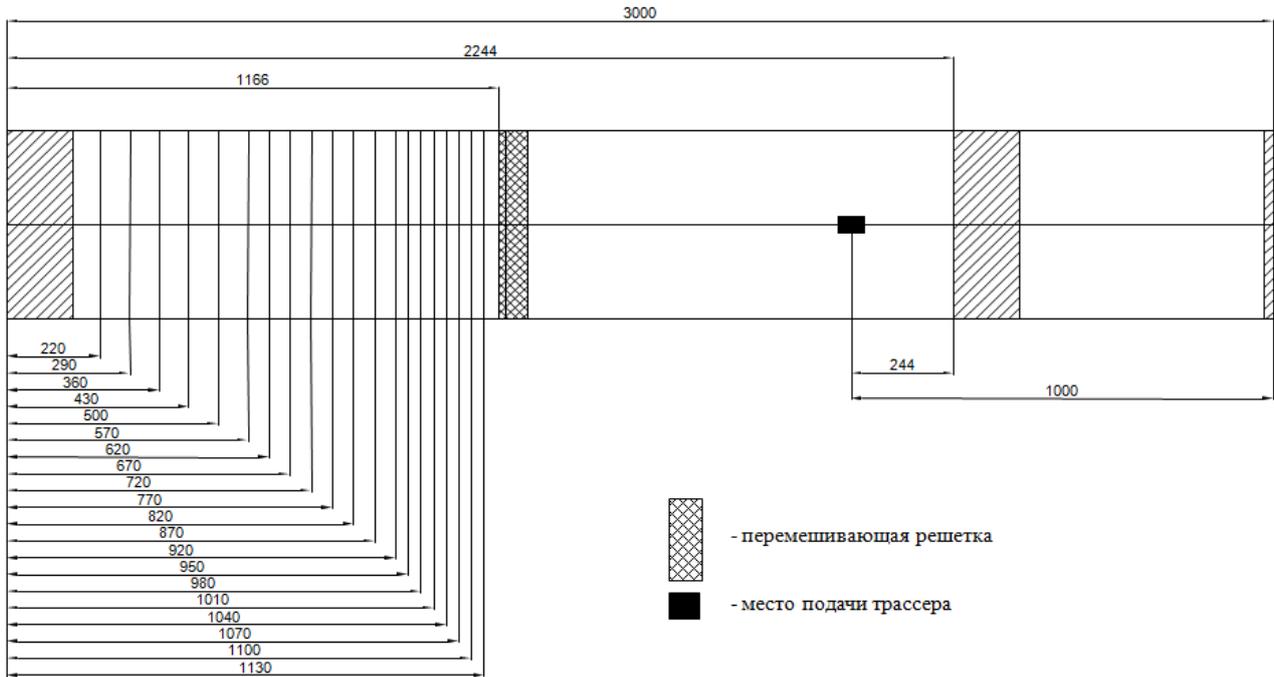
Методика проведения экспериментальных исследований основана на методе диффузии пассивной примеси в основной поток теплоносителя. В эксперименте в качестве примеси использовался пропановый трассер.

Основной целью данного эксперимента, используемого в качестве верификационной базы для CFD-программ, являлось получение данных о распределении концентрации трассера по центрам всех условных ячеек ЭМ. Поперечное сечение экспериментальной модели условно разбивалось на ячейки согласно схеме, представленной на рис. 2. Каждой ячейке присваивался свой порядковый номер.



**Рис. 2. Нумерация ячеек модели ТВС в поперечном сечении**

Подача трассера осуществлялась в ячейку №11. За поясом ПР с помощью отборного зонда газоанализатором измерялась концентрация трассера во всех 36 ячейках по сечению модели. В каждой из ячеек производился замер концентрации по 20 сечениям по длине ЭМ (рис. 3).



**Рис. 3. Сечения отбора трассера по длине ЭМ для измерения концентрации трассера в пучке с перемешивающей решеткой**

**Постановка расчетной задачи и описание методики проведения расчетных исследований**

Модель переноса пассивной примеси реализована в программном комплексе ЛОГОС добавлением к основной системе уравнений гидродинамики уравнения переноса скалярной величины.

Уравнение переноса произвольной скалярной величины записывается в следующем виде:

$$\frac{d(\rho\phi)}{dt} + \nabla \cdot (\rho U\phi) = \nabla \cdot (D_\phi \nabla \phi) + S_\phi, \tag{1}$$

где  $U$  - скорость потока;  $\rho$  – плотность;  $D_\phi$  - диффузионная вязкость.

Для турбулентных течений, осредненных по Рейнольдсу, уравнение записывается в следующем виде:

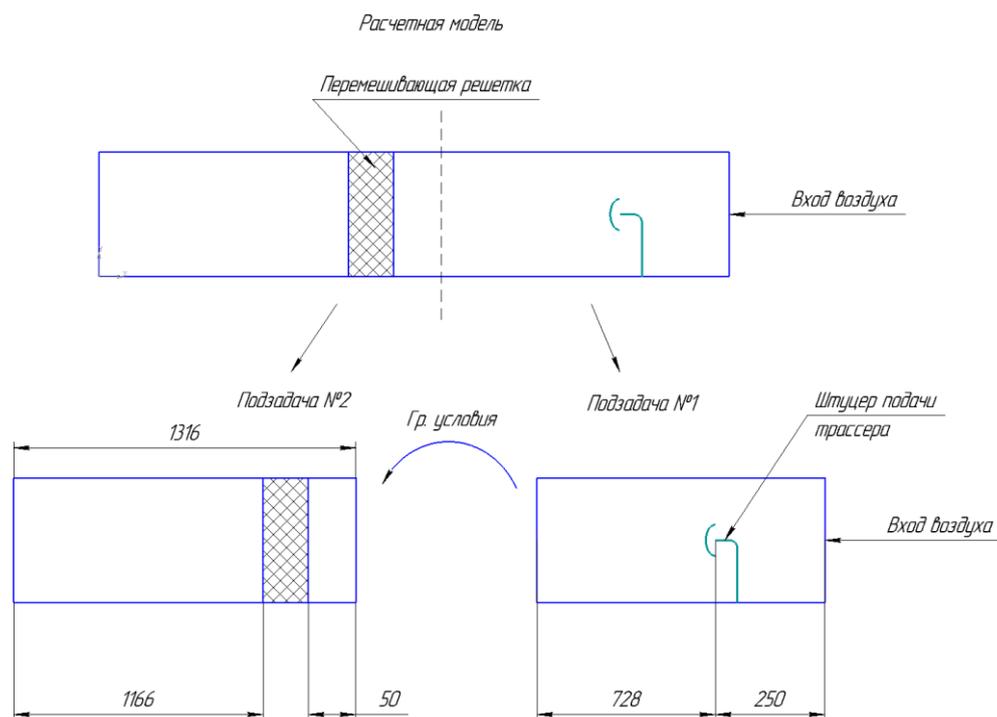
$$\frac{d(\rho\phi)}{dt} + \nabla \cdot (\rho U\phi) = \nabla \cdot \left( (D_\phi + \frac{\mu_t}{Sc_t}) \nabla \phi \right) + S_\phi, \tag{2}$$

где  $\mu_t$  - турбулентная вязкость;  $Sc_t$  - турбулентное число Шмидта.

При проведении расчетов использовались следующие параметры физической модели:

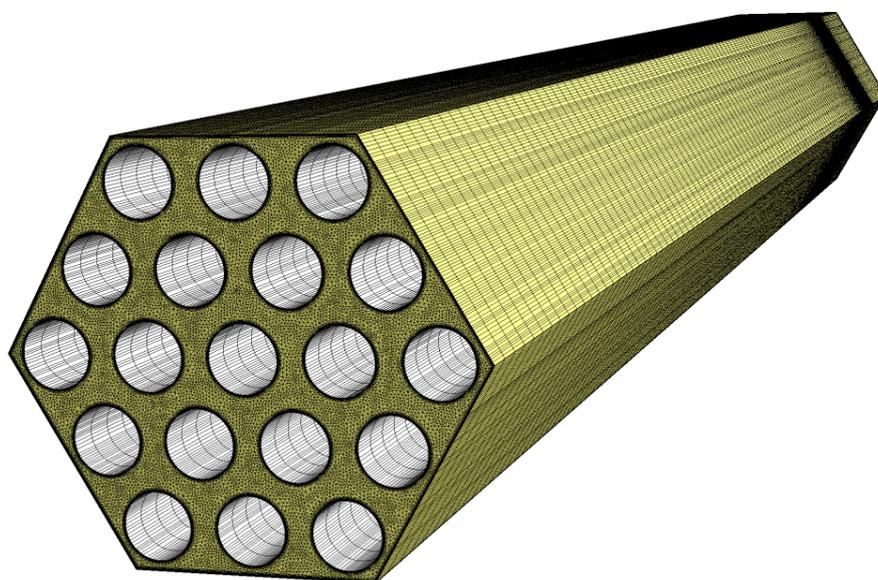
- тип течения – изотермическое, турбулентное;
- модель турбулентности – k- $\omega$  SST;
- пристеночная функция – All Reynolds;
- вещество – воздух при температуре 20 °С (соответствует условиям проведения физического эксперимента);

Задача расчетного исследования распределения концентрации трассера (пассивной примеси) за перемешивающей решеткой тепловыделяющей сборки разбивалась на две подзадачи (схема расчетной области представлена на рис. 4).



**Рис. 4.** Схема расчетных моделей для подзадач 1 и 2

*Подзадача 1* - строится расчетная область (рис. 5), включающая в себя имитаторы твэлов и устройство подачи трассера в модель (впускной зонд), расположение которого соответствовало экспериментальной модели. Подача трассера осуществляется в ячейку №11.



**Рис. 5.** Общий вид расчетной сетки для проведения расчетных исследований турбулентного перемешивания теплоносителя в «гладком» 19-стержневом фрагменте ТВС

Полученные в результате расчета подзадачи 1 данные о распределении проекций скорости теплоносителя и данные о распределении концентрации пассивной примеси на выходной границе используются для задания входных граничных условий для решения подзадачи 2.

*Подзадача 2* - строится расчетная область, включающая в себя имитаторы твэлов и перемешивающую решетку. Общий вид расчетной области представлен на рис. 6.

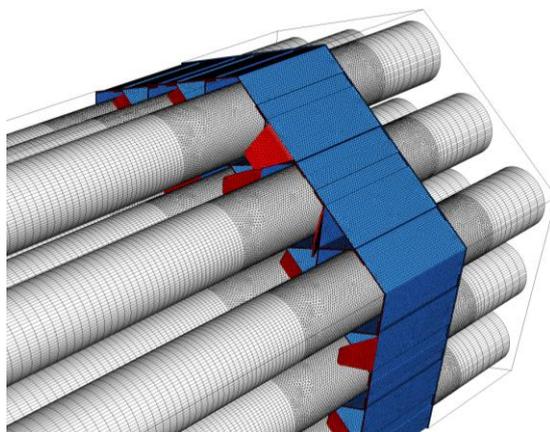


Рис. 6. Вид расчетной сетки в области перемешивающей решетки

На входе в расчетную область задаются поля проекций скорости и поле концентрации пассивной примеси, полученные на выходной границе расчетной области подзадачи 1.

### Результаты

На рис. 7 – рис. 12 представлены результаты распределения концентрации трассера за перемешивающей решеткой модели ТВС в характерных ячейках. В качестве осевой координаты на графиках использовано относительное расстояние от перемешивающей решетки  $L/d_2$ , где  $L$  – абсолютное расстояние от решетки, м;  $d_2$  – гидравлический диаметр модели ТВС, определенный на участке без перемешивающей решетки, м. Данная величина позволяет оценить эффективное расстояние воздействия решетки на поток и перенести результаты на натурную ТВС.

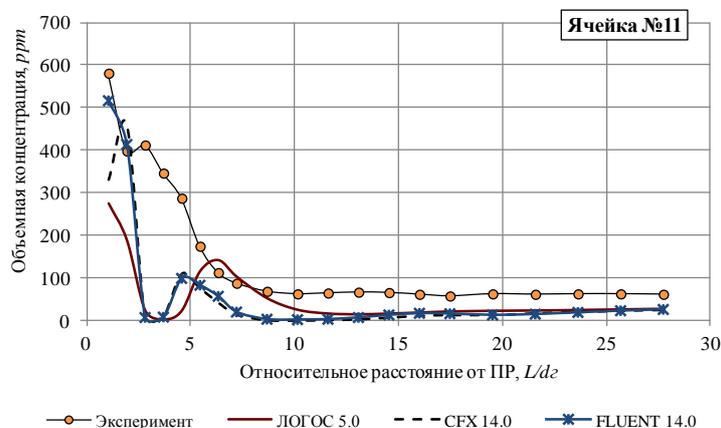


Рис. 7. Распределение концентрации трассера за ПР по длине модели в ячейке №11

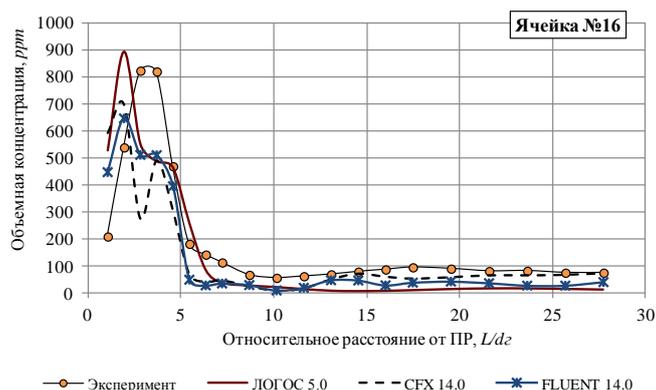


Рис. 8. Распределение концентрации трассера за ПР по длине модели в ячейке №16

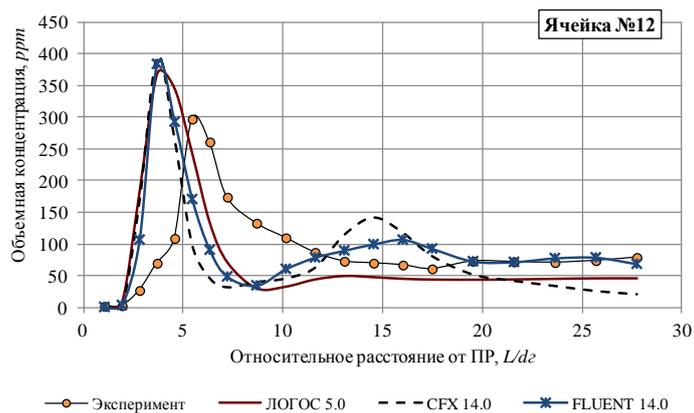


Рис. 9. Распределение концентрации трассера за ПР по длине модели в ячейке №12

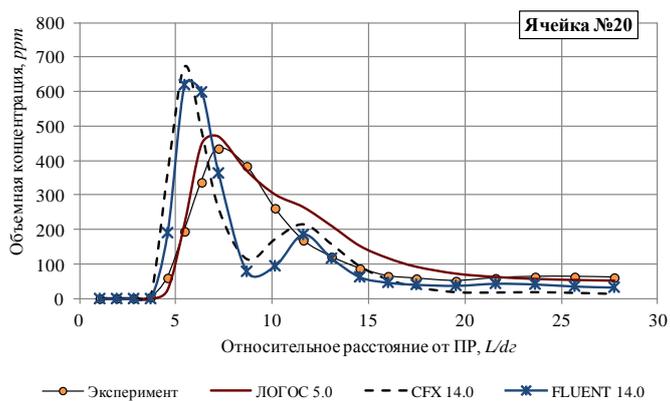


Рис. 11. Распределение концентрации трассера за ПР по длине модели в ячейке №20

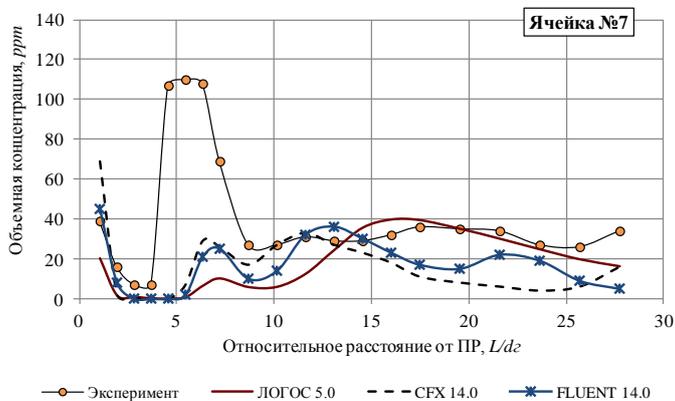


Рис. 10. Распределение концентрации трассера за ПР по длине модели в ячейке №7

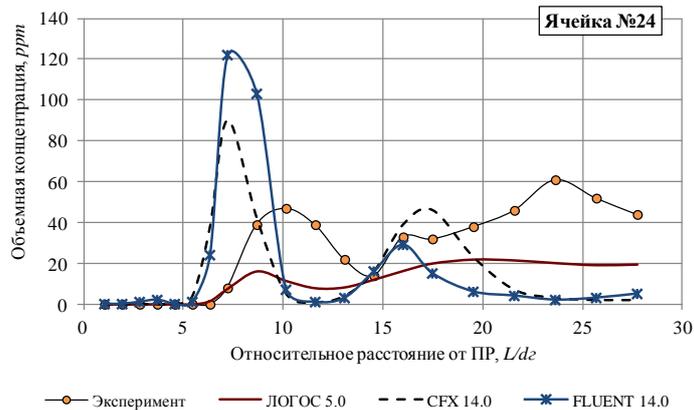
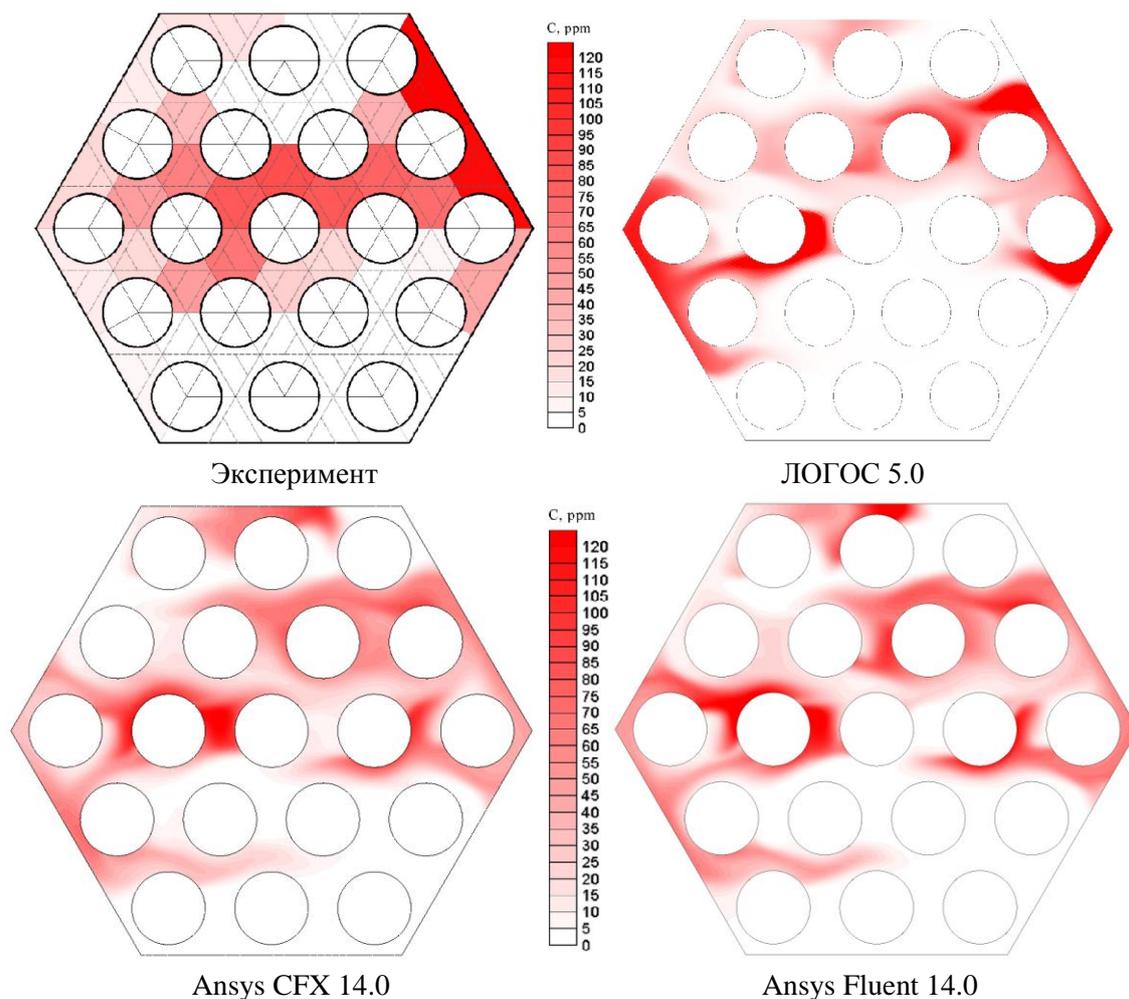


Рис. 12. Распределение концентрации трассера за ПР по длине модели в ячейке №24



**Рис. 13. Распределение концентрации трассера в выходном сечении модели**

В результате качественного и количественного сравнения графиков распределения концентрации трассера по длине ЭМ в характерных ячейках можно сделать следующие выводы:

1. В расчете по программе ЛОГОС 5.0 не было получено совпадения по значениям концентрации трассера сразу за ПР в ячейке подачи, однако уже на расстоянии  $L/d_s=6$  расчетные значения концентрации соответствуют экспериментальным. Это может свидетельствовать о том, что коэффициент турбулентной диффузии в программе ЛОГОС, входящий в уравнение переноса пассивной примеси, принимает слишком низкое значение на участке до ПР. В результате этого на участке до ПР не происходит достаточного перемешивания трассера по сечению модели. Пройдя дефлектор ПР струя трассера отклоняется от осевого направления течения, и проходит мимо центра ячейки, где в эксперименте размещался измерительный зонд.

2. Для следующей по направлению дефлектора ячейки №16 в программе ЛОГОС получено весьма точное совпадение с экспериментом по максимальному значению концентрации трассера (отличие не более 5-6%), хотя по длине этот максимум смещен на расстояние порядка двух калибров вверх по потоку. Аналогичное смещение максимума наблюдается также и в программах Ansys CFX и Ansys FLUENT, однако значение максимума концентрации по длине ниже экспериментального на 22% и 17% соответственно.

3. В ячейке №7, расположенной против направления дефлектора от ячейки подачи сразу за решеткой значения концентрации, полученные по программе ЛОГОС опять оказываются самыми низкими, что также может свидетельствовать о недостаточном перемешивании на участке модели до ПР. При этом на достаточном удалении от ПР (порядка 12–13 ка-

либров) результаты по программе ЛОГОС гораздо лучше, как качественно, так и количественно согласуются с экспериментальными данными.

4. В ячейке №20 наблюдается практически полное совпадение результатов по программе ЛОГОС с данными эксперимента.

На рис. 13 представлены картограммы распределения концентрации трассера в выходном сечении модели ТВС, приведенные к экспериментальной шкале. Можно видеть, что в целом все три CFD-программы выдали похожие результаты. Качественное сравнение этих результатов с данными эксперимента показало, что программы Ansys CFX и Ansys FLUENT несколько сильнее размещали трассер в поперечном сечении. Об этом свидетельствует наличие примеси в ячейках №№2, 21, 26, 29, 32, что не наблюдалось в эксперименте. В результатах программы ЛОГОС трассер в указанных ячейках отсутствовал.

### Выводы

В данной работе проведено сравнение результатов, полученных в программах вычислительной гидродинамики «ЛОГОС 5.0», с результатами экспериментальных исследований перемешивания потока теплоносителя в модели ТВС, проведенных на аэродинамическом стенде НГТУ им. П.Е. Алексеева, а также с результатами кросс-верификационных расчетов, выполненных в программах Ansys CFX 14.0 и Ansys FLUENT 14.0.

Комплексный анализ полученных данных позволяет говорить о достаточно высокой эффективности применения программ вычислительной гидродинамики к расчету процессов локального массопереноса потока теплоносителя за перемешивающими решетками в ТВС. Хотя в отдельных точках наблюдалось некоторое расхождение с экспериментом, в целом полученные данные позволяют оценить эффективность конструкции перемешивающей решетки ТВС с точки зрения таких критериев как длина затухания массообменных процессов, т.е. расстояние на котором заканчивается интенсивный поперечный перенос массы за счет конвективных течений, обусловленных дефлекторами решетки; а также позволяет определить на основании численных экспериментов значения эффективного коэффициента межканального обмена, используемого в программах поячеечного расчета при обосновании теплотехнической надежности активных зон.

### Библиографический список

1. **Дмитриев, С.М.** Экспериментальные исследования эффективности перемешивания теплоносителя в обоснование выбора оптимальной конструкции ТВСА для внедрения в реакторы типа ВВЭР / С.М. Дмитриев [и др.] // Ядерная энергетика. – 2009. – №1. – С. 88–97.
2. **Бородин, С.С.** Исследование эффективности перемешивающих решеток в обоснование выбора оптимальной конструкции ТВСА-Альфа реактора типа ВВЭР / С.С. Бородин [и др.] // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. – 2010. – № 1 (80). – С. 101–108.
3. **Бородин, С.С.** Особенности гидродинамики и массообмена теплоносителя в ТВСА-Альфа реактора ВВЭР / С.С. Бородин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2010. – № 1. – С. 42.
4. **Гребенников, А.Н.** Адаптация, верификация и использование пакета программ ЛОГОС для решения задач атомной энергетики / А.Н. Гребенников [и др.] // 8-я Международная научно-техническая конференция «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». Сборник тезисов докладов. – Подольск. – 2013. – С. 65–66.
5. **Шагалиев, Р.М.** Пакет программ ЛОГОС для моделирования задач атомной энергетики / Р.М. Шагалиев [и др.] // International Congress on Advances in Nuclear Power Plants. Сборник тезисов и докладов, Южная Корея, остров Четжу (Jeju), 2013.
6. Пакет программ ЛОГОС 5.0. Техническое руководство // ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ».
7. **Дмитриев, С.М.** Применение программы ЛОГОС для исследования особенностей гидродинамики в тепловыделяющей сборке реактора КЛТ-40С / С.М. Дмитриев [и др.] // Системы управления и информационные технологии. – 2014. – Т. 57. – №3.2. – С. 232–236.

8. Дмитриев, С.М. Моделирование течения потока теплоносителя в топливной сборке реактора плавучей АЭС с использованием CFD-программы «ЛОГОС» / С.М. Дмитриев [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 2015. – Т. 88. – № 5. – С. 1253–1259.

*Дата поступления  
в редакцию 25.10.2016*

**S.M. Dmitriev, A.A. Dobrov, M.A. Legchanov, A.E. Khrobostov**

**VERIFICATION OF CFD-PROGRAM LOGOS BASED ON NNSTU EXPERIMENTS  
FOR THE STUDY OF COOLANT MASS TRANSFER IN FUEL ASSEMBLY**

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

**Purpose:** Numerical simulation of coolant flow in FA with mixing grid using LOGOS CFD-program and it's verification based on NNSTU experiments.

**Design/methodology/approach:** Computational domain is a fragment of fuel assembly with mixing grid. Simulation of tracer carried out by introducing an additional passive scalar and solution of its transfer equation.

**Results:** As a result, the distribution of the passive scalar concentration behind mixing grid were received. These data were compared with the experimental results and the calculation results in the CFD-programs.

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

УДК 621.039.542

А.В. Безносков, А.С. Черныш, Р.А. Метринский, М.Ю. Котоврасов

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛООБМЕНА В ТЕПЛООБМЕННЫХ СИСТЕМАХ С ДАВЛЕНИЕМ, БЛИЗКИМ К АТМОСФЕРНОМУ, ПРИМЕНИТЕЛЬНО К КОНТУРАМ, ОХЛАЖДАЕМЫМ СВИНЦОМ**

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

Рассмотрена проблема отвода тепла при переходных процессах в ЯЭУ и стендовых контурах, охлаждаемых свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителем. Доказана эффективность применения теплообменного оборудования низкого давления для решения проблем теплоотвода.

Исследования проводились в неизотермическом контуре с циркуляцией свинцового теплоносителя при температуре 450 – 500°C, средней скорости теплоносителя в узком сечении зазора, при продольном обтекании теплообменной поверхности 0,1 – 1,05 м/с, числе Пекле 300 – 3300, термодинамической активности кислорода в свинце  $1 - 10^{-3}$ . Процессы в неизотермическом жидкометаллическом контуре с охладительным экспериментальным участком моделируют зависимость характеристик теплообмена от массопереноса примесей в контуре.

*Ключевые слова:* теплоноситель, теплообменник, теплоотвод, форсунка, свинец, циркуляция, конденсат воды, воздух, мощность, давление.

Обеспечение безопасного и эффективного отвода тепла остаточных тепловыделений зоны в стояночных и аварийных режимах реакторных установок с тяжелыми теплоносителями (ТЖМТ) необходимо при разработке проекта и для эксплуатации таких установок. Температура застывания (плавления) свинцового (326°C) и свинец-висмутового (125°C) теплоносителей (в этих условиях), при традиционном для водяных и газовых реакторных установок отводе тепла водой при давлении близком к атмосферному (при температуре до 100°C), приводит к застыванию ТЖМТ в теплообменнике и прекращению циркуляции через него теплоносителя.

В стояночных режимах в РУ с ТЖМТ при наличии остаточных тепловыделений в активной зоне, отвод этого тепла может производиться в парогенераторах или других теплообменниках только в случае их осушения и замены воды на пар, при соответствующем снижении давления в их водяных полостях для исключения застывания теплоносителя.

Перевод контуров и систем РУ с ТЖМТ в стояночные режимы и отвод остаточных тепловыделений активной зоны требует выполнения достаточно сложных и потенциально опасных операций, как и операций при их последующем вводе в действие.

В испытательных и сдаточных стендах, с главными циркуляционными насосами РУ с ТЖМТ, всегда необходимо отводить тепло, адиабатически вводимое в свинцовый или свинец-висмутовый теплоноситель при работе насосного агрегата, что традиционно требует введения в состав стенда сложных и потенциально опасных единиц оборудования. При создании таких теплообменников необходимо решить две задачи:

- разогрев до температуры, большей температуры плавления теплоносителя и поддержание его в теплообменнике при этой температуре (326°C и более для Pb);
- отвода тепла от теплоносителя, мощностью от нескольких сотен киловатт до мегаватта, при работе контура по прямому назначению.

Отвод тепла от ТЖМТ эффективным, традиционным теплоносителем-водой, во всем диапазоне её давлений до критического, может привести к застыванию свинца в теплообменнике. Для эвтектики свинец-висмут, для этого, необходима вода с давлением около десяти атмосфер для гарантированного исключения застывания ТЖМТ в полости теплообменника. Отвод тепла от ТЖМТ водой требует введения в состав стенда потенциально опасных систем циркуляции воды высокого давления.

Отвод тепла от ТЖМТ другим традиционным теплоносителем-воздухом, требует существенно больших поверхностей теплообмена ввиду не высокой его эффективности и соответственно, существенного увеличения объема жидкого металла в теплообменнике. Теплообменник должен иметь одновременно разветвленную систему электрообогрева или др. систему, обеспечивающую разогрев оборудования до температуры, гарантированно превышающую температуру плавления (застывания) ТЖМТ и поддержание его в разогретом состоянии, в режимах без адиабатического ввода тепла испытуемыми циркуляционными насосами.

### Цель эксперимента

Цель испытаний, составной частью которых является настоящая работа – определение характеристик теплообмена и температуры свинцового теплоносителя, подтверждение возможности и целесообразности применения теплообменного оборудования низкого давления в стендовых и реакторных контурах. На данном этапе работ проводятся оценка эффективности данного вида теплообменного оборудования, применительно к исследовательским и промышленным стендам со свинцовым теплоносителем, а также выбор оптимального режима обтекания и конструктивной схемы теплообменной поверхности.

### Экспериментальное определение локальных характеристик теплоотвода водо-воздушной смесью от высокотемпературного свинцового теплоносителя на стенде ФТ-7 НГТУ

Локальные характеристики теплоотвода измеряли при давлении, близком к атмосферному, температуре теплоносителя 450–480°C, расходе свинца 0,7–3,6 м<sup>3</sup>/ч (7–36 т/ч), средней скорости 0,1–1,05 м/с, что соответствовало числу Пекле  $Re=320–3000$ , при содержании термодинамически активного кислорода в свинце  $10^{-3}–10^{-1}$  и наличии твердой фазы оксидов свинца. Расход охлаждающего воздуха составлял 3,1–6,3 м<sup>3</sup>/ч, что соответствовало средней скорости потока в теплообменном элементе 9–18,7 м/с. Расход воды, вводимой в дисперсном состоянии (в виде капель), составлял до 0,03 м<sup>3</sup>/ч, размер капель 0,1–1 мм.

Экспериментальный участок был выполнен в виде коаксиально расположенных труб ( $d1/d2=2,35$ ). Внешняя труба длиной 1350 мм, диаметром 45 мм, толщиной 2,5 мм изготовлена из стали 12X18H10T. Внутренняя труба длиной 1674 мм, диаметром 17 мм, толщиной 3 мм изготовлена из ферритно-мартенситной стали 10X9HСМФБ. Движение свинцового теплоносителя в кольцевом зазоре сверху вниз. Движение водо-воздушной смеси осуществлялось по центральной трубке. Перед вводом воздуха в экспериментальный участок установлена форсунка, в которой диспергируется вода и перемешиваются капли конденсата с воздухом. Выходной конец трубы с потоком водо-воздушной смеси сообщен без арматуры и гидрозатвора с атмосферой, в которую отводится образующаяся воздушно-паровая смесь.

Температуру свинцового теплоносителя на входе и выходе из экспериментального участка и смеси воздуха с водой и паром измеряли термомпарами ТМПК-ХА-1-18-500-2500-НН с диаметром спая 3 мм с индивидуальной градуировочной характеристикой (погрешность градуировки  $\pm 0,2^\circ\text{C}$ ). На расстоянии 1034 мм от входа свинца в кольцевом зазоре установлен термозонд, состоящий из восьми закрепленных на дистанционирующих пластинах микротермопар типа ТМПК-ХА-1-27-30-1500-2500-НН с диаметром спая 1.0 мм в капилляре из аустенитной стали с индивидуальной градуировочной характеристикой (погрешность градуировки –  $\pm 0,2^\circ\text{C}$ ) для измерения температуры в потоке теплоносителя.

В двух сечения по высоте на внутренней и внешней трубе, (на расстоянии от входа свинца в кольцевом зазоре 713 мм ("горячее" сечение) и 1013 мм ("холодное" сечение) соответственно) установлены две микротермопары на наружной поверхности трубы через  $180^\circ$  по периметру и две микротермопары на внутренней поверхности трубы для определения локального теплового потока. На наружной и внутренней поверхностях труб в указанных сечениях в пазы шириной  $0,5\pm 0,03$  мм и глубиной  $0,5\pm 0,1$  мм уложены и затем зачеканены с последующей металлизацией участка поверхности микротермопреобразователи.

Конструкция экспериментального стенда с циркуляционным контуром высокотемпературного свинцового теплоносителя выполнена согласно традиционным решениям.

### Методика эксперимента

Эксперимент по определению локальных характеристик теплоотвода заключался в следующем. После разогрева и заполнения стенда рабочей средой устанавливалась циркуляция свинцового теплоносителя с требуемыми режимными параметрами. В экспериментальный участок подавали воздух, после чего фиксировались параметры стенда. Поэтапно в поток воздуха вводился конденсат воды с фиксацией параметров стенда. Характеристики теплообмена определялись в экспериментальном участке при фиксированных режимных параметрах стенда. Движение сред в контуре было противоточным, где свинец поступал сверху – вниз. Данный режим движения сред был выбран оптимальным с точки зрения законов теплообмена.

### Результаты экспериментов

На рис. 1 показано изменение мощности теплоотвода при регулируемом изменении расхода воды в водо-воздушной смеси. Ввод конденсата воды в воздух существенно расширяет диапазон отводимой мощности с сохранением давления внутри теплообменной трубы близкого к атмосферному. Так, при содержании воды около 1% объемного расхода среды, отводимая мощность увеличилась от 0,1 до 4500 Вт.

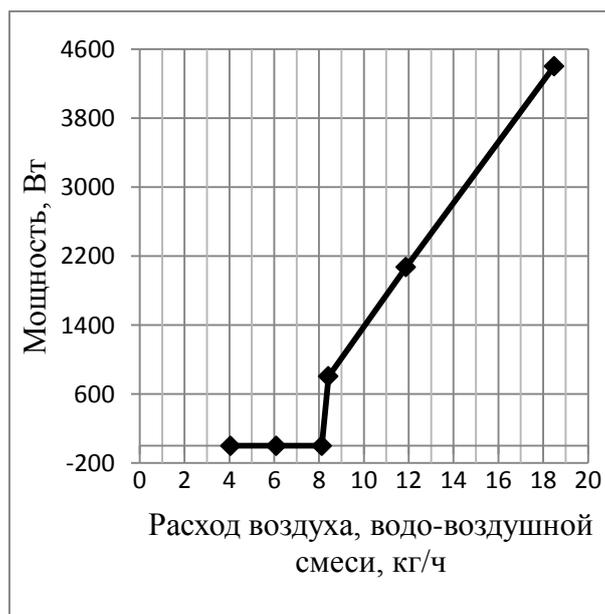
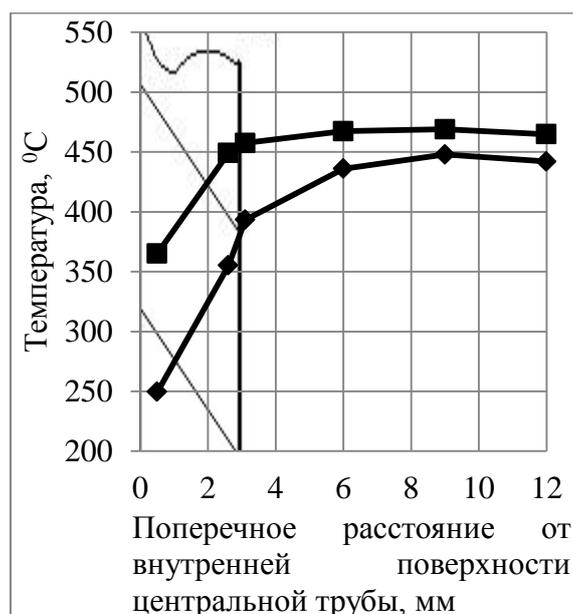
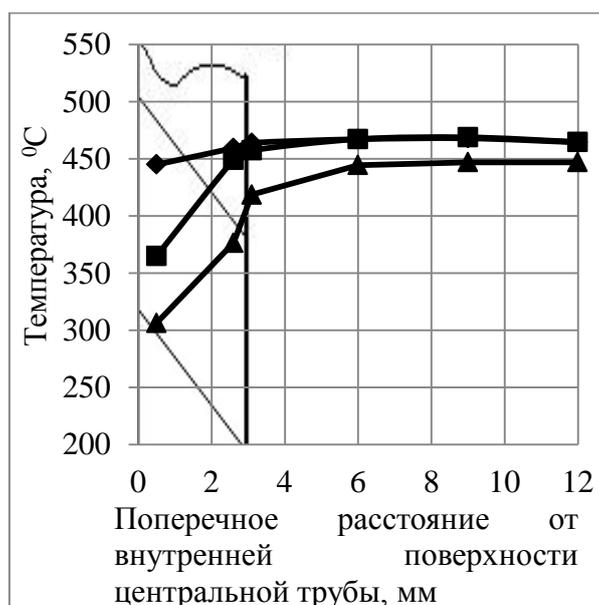


Рис. 1. Зависимость мощности, отводимой от высокотемпературного свинцового теплоносителя с температурой 450–480<sup>0</sup>С

На рис. 2 и рис. 3 показано распределение температур в поперечном (холодном) сечении экспериментального участка при фиксированных режимных параметрах стенда. Было выявлено влияние скорости теплоносителя и состава охлаждающей смеси на температуры вблизи теплообменной поверхности. При большой скорости обтекания профиль температур слабо зависит от перепада температур в стенке, а значит и от состава смеси. Однако при малых скоростях обтекания свинцом теплообменной поверхности, состав смеси достаточно сильно влиял на профиль температур. Эксперимент показал возможность локального замерзания свинца на теплообменную поверхность с числом Пекле  $Pe < 600$ , что может сказаться на теплоотводе в целом.



**Рис. 2. Распределение температур в поперечном (холодном) сечении экспериментального участка при различных числах Re:**  
 1 –  $Re=300$ ,  $Q_{в}=0,02$  м<sup>3</sup>/ч; 2 –  $Re=3100$ ,  $Q_{в}=0,02$  м<sup>3</sup>/ч



**Рис. 3. Распределение температур в поперечном (холодном) сечении экспериментального участка при различном содержании воды в охлаждающей смеси:**  
 1 –  $Re=300$ ,  $Q_{в}=0,01$  м<sup>3</sup>/ч; 2 –  $Re=300$ ,  $Q_{в}=0,02$  м<sup>3</sup>/ч; 3 –  $Re=300$ ,  $Q_{в}=0,03$  м<sup>3</sup>/ч

На рис. 4 и рис. 5 показаны экспериментальные зависимости  $Nu=f(Re)$  при содержании термодинамически активного кислорода в свинце в горячем и холодном сечениях соответственно  $10^{-3} < a < 10^{-2}$ . Анализ показал, что концентрация воды в смеси влияет на критерий Нуссельта – при повышении концентрации воды теплообмен незначительно ухудшается (рис. 4). Это может быть вызвано увеличением размеров капель воды в смеси и, как следствие – менее равномерное орошение поверхности теплообмена. Увеличение размера капель обусловлено особенностями работы форсунки. Этот эффект возможен также за счет увеличения термического сопротивления со стороны свинца в данной зоне. Теплообмен в холодном сечении оказался несколько хуже. Это различие может быть вызвано образованием от-

ложений дисперсных частиц примесей в пристенной области за счет термодиффузии. Слой отложений примесей в пристенной зоне этого участка поверхности обладает большим термическим сопротивлением, ухудшающим теплообмен.

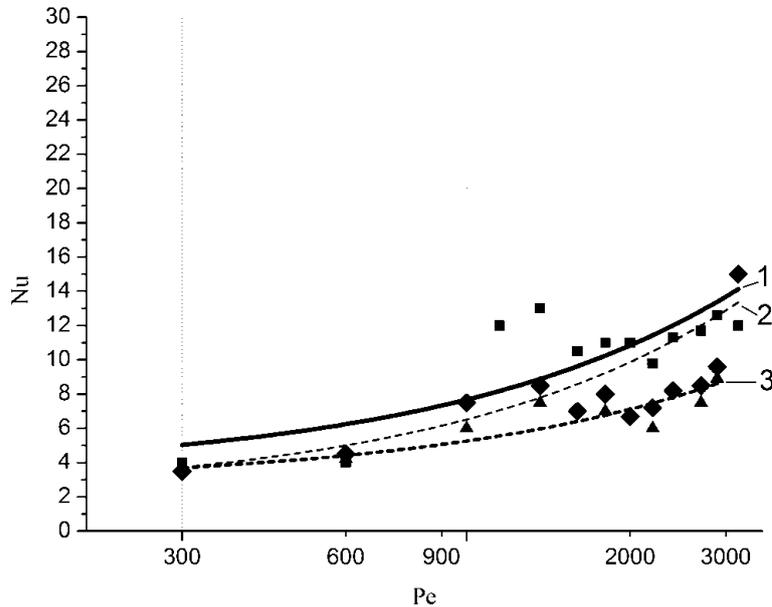


Рис. 4 Локальные характеристики теплообмена в "холодном" сечении.

Сводный график  $Nu=f(Re)$ :

- 1 – ■ -  $Nu, Q_B=0,01\text{м}^3/\text{ч}$ ; (—)  $Nu=3,4+0,017Pe^{0,8}$ ;  
 2 – ◆ -  $Nu, Q_B=0,02\text{м}^3/\text{ч}$ ; (- -)  $Nu=2+0,015Pe^{0,8}$ ;  
 3 – ▲ -  $Nu, Q_B=0,03\text{м}^3/\text{ч}$ ; (—)  $Nu=2,75+0,01Pe^{0,8}$

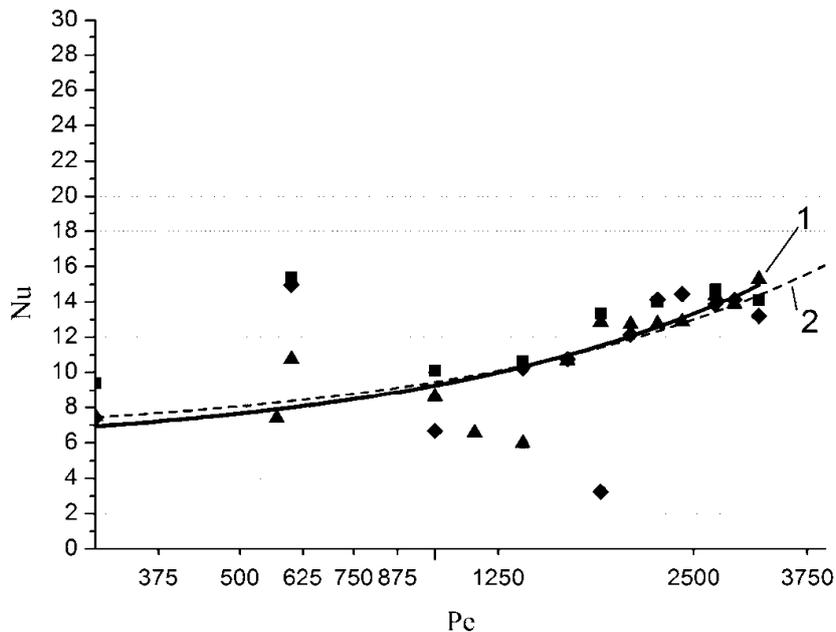


Рис. 5. Локальные характеристики теплообмена в "горячем" сечении.

Сводный график  $Nu=f(Re)$ :

- -  $Nu, Q_B=0,01\text{м}^3/\text{ч}$ , ◆ -  $Nu, Q_B=0,02\text{м}^3/\text{ч}$ , ▲ -  $Nu, Q_B=0,03\text{м}^3/\text{ч}$ ;  
 1 – по формуле  $Nu=5,5+0,015Pe^{0,8}$  – результат аппроксимации;  
 2 – по формуле  $Nu=6,2+0,013Pe^{0,8}$  – предложена ранее

Характеристики теплообмена коррелируют с полученными ранее [1, 2] при аналогичных условиях обтекания теплообменных поверхностей потоком свинцового теплоносителя, что свидетельствует об их достоверности.

Опыт использования теплообменника низкого давления для регулируемого охлаждения свинцового теплоносителя на установке испытаний и отработки моделей проточной части главного циркуляционного насоса реакторной установки БРЕСТ-ОД-300.

Эксплуатирующимся теплообменником данного типа является парогенератор системы отвода тепла на стенде ФТ-4. Его применение необходимо для отвода тепла, адиабатически вносимого осевым электронасосом на установке для испытаний и отработки моделей лопастной системы главного циркуляционного насоса установки БРЕСТ-ОД-300 в масштабе около 1:3. Основные характеристики стенда: расход до 200 м<sup>3</sup>/ч (до 2000 т/ч), температура свинцового теплоносителя 450–500°С, кратковременно до 550°С, напор осевого электронасоса свинцового контура – до 2,5 м. ст. свинца, контролируемая и регулируемая термодинамическая активность кислорода в свинце 10<sup>-5</sup>–100, в том числе при наличии твердой фазы оксидов свинца. Характеристики системы отвода тепла адиабатически, вносимого электронасосом стенда: максимальная мощность 50 кВт, плавно регулируемая температура свинца в контуре 440–550°С при мощности электродвигателя циркуляционного электронасоса стенда до 50 кВт, расход свинца через теплообменник (парогенератор) системы – до 200 м<sup>3</sup>/час (2000 т/ч), гидравлическое сопротивление парогенератора по свинцовому теплоносителю не более 0,5 м ст. свинца при расходе около 200 м<sup>3</sup>/ч.

Парогенератор включает четыре параллельно омываемых свинцом элемента в виде трубок Фильда. Воздух подается компрессором с расходом до 200 м<sup>3</sup>/ч, вода из расходных баков поступает самотеком в каждый из диспергаторов четырех элементов теплообменника через регулирующие вентили. Паровоздушная смесь из каждого теплообменного элемента поступает в коллектор, из которого без арматуры и гидрозатвора направляется в атмосферу воздуха за пределами помещений стенда.

Работа системы отвода тепла, адиабатически вносимого в контур электронасосом стенда ФТ-4 заключается в следующем. При циркуляции свинца для поддержания заданной температуры осуществляет теплоотвод водо-воздушной смесью. Свинец охлаждается от температуры на входе в теплообменник до температуры, заданной в программе испытаний (440–450°С). Температура на входе в теплообменник определяется адиабатически вносимой мощностью, соответствующей скорости вращения электронасоса, его напору и подаче

Длительная, более трех лет эксплуатация системы в составе стенда ФТ-4 подтвердила эффективную работу в диапазоне регулируемой температуры свинца 440–550°С при мощности электронасоса до 50 кВт, давлении воздушно-водяной (паровой) смеси, близком к атмосферному.

### Выводы

Таким образом, экспериментально полученные характеристики теплообмена, зависимость  $Nu=f(Re)$ , коррелирующая с ранее полученной, подтверждают работоспособность экспериментальной установки и представительность данных. Экспериментальные исследования теплоотвода от свинцового теплоносителя водо-воздушным потоком с диспергированными до 1 мм и менее каплями воды в воздушном потоке, а также работа системы теплоотвода подтвердила эффективность, простоту, безопасность и экономичность данного метода теплоотвода.

Возможность тонкого регулирования отводимой мощности при сохранении безопасности установки расширяет область применения данного типа теплообменного оборудования.

**Библиографический список**

1. **Безносков, А.В.** Экспериментальные исследования характеристик контактного теплообмена свинцовый теплоноситель – рабочее тело / А.В. Безносков [и др.] // Атомная энергия. – М., 2005. – Т. 98. – Вып. 3. – С. 182–191.
2. **Безносков, А.В.** Теплоотдача от свинцового теплоносителя к продольно обтекаемой трубе / А.В. Безносков [и др.] // Известия вузов. Ядерная энергетика, 2006. – Вып. 3. – С. 83–90.

*Дата поступления  
в редакцию 30.10.2016*

**A.V. Beznosov, A.S. Chernysh, R.A. Metrinsky, M.Y. Kotovrasov**

**INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS IN THE HEAT EXCHANGER WITH PRESSURE CLOSE TO ATMOSPHERIC PRESSURE, IN RELATION TO THE CIRCUIT, COOLED LEAD**

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

**Purpose:** The purpose of the test, which is an integral part of the present work - definition of heat transfer and temperature characteristics in the lead coolant, confirmation of the possibility and feasibility of using heat exchange equipment of low pressure in the bench and reactor circuits.

**Approach:** The studies were conducted in non-isothermal loop circulation lead coolant at a temperature of 450–500°C, the average rate of the coolant in the narrow section of the gap, the longitudinal flow heat exchange surface 0,1–1,05 m/s, including Peclet 300 - 3300, the thermodynamic activity of oxygen in lead 1 - 3.10. Processes in a non-isothermal liquid metal loop with a cooling portion experimental model the dependence of heat transfer characteristics of the mass transfer of impurities in the circuit. Fig. 5 pieces, references 2.

**Findings:** The problem of heat removal during transients in nuclear power and bench circuits cooled lead and lead-bismuth coolant. The efficiency of the use of heat exchange equipment of low pressure to solve the heat dissipation problems.

*Key words:* coolant, a heat exchanger, heat sink, nozzle, lead, circulation, condensation water, air, power, pressure.

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

УДК 624.124.791

В.А. Зуев, Е.М. Грамузов

## НОВЫЕ ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ЛЕДОВОЙ СРЕДЫ ПРИ МОДЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЯХ СУДОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены вопросы создания новой физической модели ледяного покрова для проведения модельных исследований взаимодействия судов со льдом.

*Ключевые слова:* лед, модель ледяного поля, ледовое сопротивление, пересчет результатов на натуру

### Введение

Сложность процессов взаимодействия судов и сооружений со льдом не всегда позволяет составить достоверную математическую модель такого взаимодействия. Поэтому получение данных о ледовых качествах судов еще при проектировании приводит к необходимости обращаться к экспериментальным методам исследования на моделях. Сейчас в мире насчитывается более 15 работающих ледовых бассейнов, в которых проводятся испытания судов в сплошных, битых, торосистых льдах, моделируется работа буровых установок и мостовых опор в ледовых условиях с целью прогнозирования силового воздействия льда на суда и морские сооружения, исследуется работа различных устройств и систем, повышающих эффективность проведения операций во льдах.

Основной проблемой моделирования ледового сопротивления является создание физической модели льда, адекватно отображающей его взаимодействие с судами и сооружениями в натуральных условиях.

Теоретические обоснования моделирования движения судов во льдах, разработаны в середине прошлого века Ю.А. Шиманским и Л. М. Ногидом (г. Санкт – Петербург) [1, 2]. Согласно этой теории, основными критериями подобия являются:

$$\rho_H^л = \rho_M^л; \rho_H^в = \rho_M^в; \mu_H = \mu_M; f_H = f_M; E_M = \frac{E_H}{\lambda};$$

$$\sigma_M = \frac{\sigma_H}{\lambda} \frac{E}{\sigma} = idem; Fr = idem; Re = idem; Ch = idem.$$
(1)

где  $\rho_H^л, \rho_M^л$  - плотность натурального и модельного льда;  $\rho_H^в, \rho_M^в$  - плотность воды натуре и модели;  $E, \mu$  - модуль упругости и коэффициент Пуассона для льда;  $\sigma_M = \sigma_H$  - разрушающие лед нормальные напряжения;  $f_H, f_M$  - коэффициенты трения льда о корпус для натуре и модели;  $\lambda$  - геометрический масштаб моделирования;  $Fr = v/\sqrt{gL}$  - число Фруда;  $Re = vL/\eta$  - число Рейнольдса;  $Ch = \rho_x v^2/E$  - число Коши;  $\eta_H, \eta_M$  - скорости движения натуре и модели;  $v_H, v_M$  - кинематический коэффициент вязкости жидкости натуре и модели.

К этим критериям в последние годы стали добавлять критерий А.С. Аткинса [3], учитывающий трещинообразование в ледяном покрове.

$$Yn = Ch^2 \left( \frac{El}{k} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

где  $Yn$  - ледовое число;  $l$  - характерная длина дефектов кристаллической решетки;  $k$  - вязкость разрушения.

Полное сопротивление среды при движении судна во льдах  $R$  обычно представляется в виде:

$$R = R_p + R_{обл} + R_v, \quad (3)$$

где  $R_p$  - сопротивление разрушения льда и трения его о корпус;  $R_{обл}$  - сопротивление обломков;  $R_v$  - сопротивление воды.

Различная природа сил, составляющих ледовое сопротивление, подчиняющихся разным законам, требует при моделировании одновременного выполнения перечисленных критериев подобия (формула (1)). Этого, как правило, достичь не удастся, и обычно речь идет о частичном подобии.

В этой статье приводятся новые подходы к моделированию воздействия льда на суда и морские сооружения.

### Моделирование разрушения льда

Казалось бы, материалом для имитации ледовых условий мог бы быть тонкий естественный лед, но его повышенная прочность по сравнению с требуемой теорией моделирования при сохранении геометрического подобия по толщине ( $h_M = h_H / \lambda$ ) делает его мало пригодным для испытаний. В соответствии с условиями (1) необходимо, чтобы прочность и упругость модели льда были в масштаб раз меньше, чем у природы при сохранении постоянного отношения  $E/\sigma$ . Но при таком подходе лед становится более пластичным, чем упругим телом, что при его разрушении приводит к несоответствию геометрии образования трещин в натуральных условиях и, как следствие, к нарушению динамического подобия.

Поэтому во всем мире ведутся поиски новых моделей льда как в отношении материала, его имитирующего, так и в отношении управления его характеристиками.

Для определения сопротивления разрушения льда при движении модели предлагается использовать тонкий естественный лед. Этот лед имеет повышенную прочность [5] и, очевидно, поэтому получило распространенное мнение о невозможности его применения. Однако при использовании такой модели льда компенсировать повышенную прочность ледяного покрова при разрушении изгибом можно меньшей толщиной, чем требуемая в формуле (1).

Необходимо отметить, что моделирование сопротивления от разрушения ледяного покрова при движении модели в тонкой ледяной пластине вносит погрешности в определение инерционной и скоростной составляющих полного сопротивления, зависящих от толщины льда.

Поэтому в статье речь идет о раздельном моделировании составляющих полного сопротивления льда (от разрушения и от движения в обломках), которые не моделируются одновременно и подчиняются разным законам.

Такой подход к использованию в качестве модельной среды лабораторного пресноводного льда был применен Д.П. Вэнсом [6] и в Гамбургском опытовом бассейне О. Гримом, причем пересчет толщины льда велся по величине  $\lambda^{1.5}$ , а сил по  $\lambda^3$ .

Как отмечает автор работы [6], этот метод не нашел большого числа последователей из-за «отсутствия в бассейнах соответствующего оборудования, трудностей с контролем роста льда в режиме намерзания».

Однако этот метод с введением дополнительных критериев пересчета результатов на натуру успешно применяется в ледовом бассейне Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева, расположенного на открытом воздухе, используемого в холодное время года. Последнее приводит к существенному снижению стоимости и трудоемкости проведения испытаний.

Для определения дополнительных критериев подобия для проведения модельных испытаний в тонком естественном льду с сохранением геометрии образования обломков запишем уравнение напряженно – деформированного состояния (НДС) ледяного покрова под действием поперечной нагрузки.

$$D\nabla^4 w + \rho_B g w = 0. \tag{4}$$

где  $w$  - прогиб льда;  $D = Eh^3 / (12(1 - \mu^2))$  - цилиндрическая жесткость ледяной пластины.

В формуле (4) предполагается, что ледокол движется в предельных льдах постоянной толщины с малой скоростью. Ледяной покров принят как упругая изотропная пластина постоянной толщины.

Для определения условий подобия при моделировании приведем формулу (4) к безразмерному виду.

$$D / (\rho_B g L^4) w + w = 0. \tag{5}$$

Коэффициенты при безразмерных членах уравнения (5) являются условиями подобия при определении НДС ледяной пластины, т.е.:

$$D / (\rho_B g L^4) = idem. \tag{6}$$

Откуда  $\frac{E_H h_H^3 L_M^4}{E_M h_M^3 L_H^4} = \frac{\rho_B^H}{\rho_B^M}$ . Обозначим  $\lambda_h = \frac{h_H}{h_M}$ ;  $\lambda_E = \frac{E_H}{E_M}$ ;  $\lambda_\rho = \frac{\rho_B^H}{\rho_B^M}$ . Получим для

масштаба толщины льда:

$$\frac{h_H}{h_M} = \lambda_h = \lambda^{4/3} \lambda_\rho^{1/3} \lambda_E^{-1/3}. \tag{7}$$

Данных о модуле упругости тонкого модельного льда мало, поэтому, при недостаточной информации об этом, целесообразно перед испытаниями проводить опыты по определению  $E_M$ .

Следует отметить, что анализ несущей способности, основанный на теории изгиба упругих пластин, позволяет получить лишь НДС ледяной пластины. Комплексные исследования сопротивления льда при движении ледоколов зависят не только от критических напряжений при изгибе, но и от прочности льда при срезе, смятии и др., возникающих одновременно.

Однако в работе [8] показано, что увеличение одних прочностных характеристик приводит к уменьшению других и наоборот. При этом, сопротивление льда при его разрушении ледоколом остается практически постоянным при его неизменной толщине [8]. Наши исследования [4] показали, что наиболее полной характеристикой является работа на полное разрушение (пролом) льда, а не только на образование магистральных трещин, от которых несущая способность ледяного покрова чаще всего сохраняется.

Поэтому целесообразно для определения сопротивления льда при его разрушении использовать энергетический подход, характеристикой которого является работа, затрачиваемая ледоколом на разрушение льда.

$$A_p = \int_0^{w_p} P(w) dw, \tag{8}$$

где  $P(w)$  - вертикальная сила, приложенная к ледяной пластине,  $w_p$  – прогиб, при котором происходит полное разрушение льда.

В работах [4, 8] и других показано, что проломная нагрузка хорошо аппроксимируется формулой:

$$P = kh^2, \quad (9)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности.

Прогиб ледяной пластины под действием вертикальной силы может быть выражен зависимостью

$$w = k_w P / \sqrt{\rho_B g D}, \quad (10)$$

где  $k_w$  - коэффициент, зависящий от формы ледяной пластины в плане.

Используя (8), (9), (10), можно получить масштаб работы.

$$\lambda_A = \lambda_p \lambda_w = \lambda_h^{5/2} \cdot \lambda_E^{-1/2}. \quad (11)$$

Необходимо отметить, что  $A_p$  наиболее полная характеристика ледяного покрова с точки зрения разрушения его ледоколом, охватывающая в интегральном виде все этапы разрушения – от образования трещин до полного пролома.

Масштаб подобия сопротивления разрушения льда можно определить следующим образом:

$$\lambda_R = \frac{R_{pH}}{R_{pM}} = \frac{A_{pH}}{A_{pM}} \cdot \frac{l_M}{l_H} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{A_{pH}}{A_{pM}} = \lambda^3. \quad (12)$$

Формула (12) не противоречит строгой теории моделирования, но расширяет поиск модели льда.

Таким образом, составляющая сопротивления льда при движении модели ледокола, связанная с разрушением ледяного покрова, определяется при моделировании в естественном льду, замороженном при отрицательных температурах воздуха следующим образом:

- сопротивление от разрушения льда  $R_H = \lambda^3 R_M$ ;
- толщина льда

$$h_H = \lambda^{4/3} \lambda_E^{-1/3} h_M; \quad (13)$$

- скорость движения  $v_H = \lambda^{1/2} v_M$ .

Коэффициенты трения корпуса модели о лед ( $f$ ) подбираются перед испытаниями известными способами. Как показал А.Я. Рывлин [7], солёность льда не оказывает существенного влияния на коэффициенты трения, которые для морского и пресного льда практически одинаковы. Рекомендуемые МКОБ [9] значения коэффициента трения при реальных скоростях движения  $f = 0,10 \div 0,12$ .

### Моделирование битого льда

При моделировании движения судна в битом льду удается выполнить более строгие условия моделирования, связанные с критерием Фруда. Эти условия записываются следующим образом:

$$Fr = idem, \frac{\rho_{\text{л}}}{\rho_{\text{в}}} = idem, f = idem, s = idem, \quad (14)$$

где  $s$  – сплоченность битого льда. В этом случае

$$R_H^{\text{обл}} = \lambda^3 R_M^{\text{обл}}, h_H = \lambda h_M, v_H = \sqrt{\lambda} v_M. \quad (15)$$

Поскольку толщины льда при разрушении ледяного покрова не соответствуют толщинам при моделировании движения в обломках льда, совместное моделирование составля-

ющих сопротивления льда от разрушения и движения в обломках в этом способе не возможно. Наибольшее несоответствие сил сопротивления при моделировании возникает из-за сил плавучести и трения обломков о корпус, линейно зависящих от толщины льда. Инерционные составляющие, связанные с поворотом и раздвиганием льдин, а также с присоединенными массами воды, меньше зависят от толщины, а больше от площади льдин.

Поэтому для более строгого моделирования  $R_p$  и  $R_{обл}$  предлагается способ экспериментального разделения составляющих, требующих дополнительных испытаний в битом льду.

Эти испытания могут быть и самостоятельными при определении сопротивления в битых льдах.

Большое разнообразие ледовых условий, нестабильность характеристик битых льдов делают достаточно сложным выполнение многочисленных условий, характеризующих натурную ледовую обстановку (в том числе форму и размеры отдельных льдин, их сплоченность). Поэтому в эксперименте движение судна моделируется приближенно в некоторой условной среде с обломками льда. Условия подобия соблюдаются в отношении наиболее важных характеристик битого льда (толщины льдин, сплоченности, ширине канала, коэффициента трения льда о корпус, размеров обломков в плане, плотности).

Это дает возможность моделировать битый лед с помощью пластинок из полиэтилена высокого давления, предложенного нами ранее [4]. Пластинки могут быть квадратной или треугольной формы и одинаковых размеров, что обеспечивает повторяемость опытов. Эти опыты можно проводить в обычном (не ледовом) бассейне.

У полиэтилена высокого давления  $\rho_{л} = 0,91 - 0,92 \text{ т/м}^3$ ,  $f \approx 0,12 \div 0,15$ , что соответствует условиям (14).

### Методика и технология проведения испытаний

В бассейне намораживают лед требуемой (или близкой к ней) толщины и проводят буксировочные испытания при постоянной тяге (в бассейнах гравитационного типа).

Такие испытания при постоянной тяге проводятся для ряда толщин льда и строится диаграмма ледопроеходимости  $h = f(V)$  при  $T_e = \text{const}$ .

Испытания повторяются для ряда тяговых усилий.

На построенных диаграммах проводятся сечения для одинаковых толщин льда и строятся кривые буксировочного сопротивления для каждой толщины льда.

После каждого испытания проводятся испытания в обломках разрушенного льда при разных скоростях. Строятся кривые  $R_{обл} + R_e = f(v)$  для разных толщин льда.

Как показали наши эксперименты [4], некоторое измельчение обломков тонкого льда при повторных прогонах не приводит к существенным погрешностям, к тому же, величина этого сопротивления мала по сравнению с сопротивлением от разрушения.

Из кривых полного сопротивления вычитаются сопротивления обломков и воды. Полученные результаты сопротивления от разрушения пересчитываются по формулам (13).

Проводятся испытания модели в битом льду заданной толщины и сплоченности, имитируемом плитками полиэтилена. Результаты пересчитываются по формулам (15). Ввиду малости сопротивления воды по сравнению с сопротивлением обломков отдельно составляющую сопротивления воды не выделяют и пересчитывают вместе с обломками по критерию Фруда.

Пересчитанные на натуре силы сопротивления от разрушения льда и от сопротивления обломков льда и воды суммируются. Такой подход к пересчету результатов модельных испытаний с разделением составляющих сопротивления с применением разных законов их пересчета аналогичен и экспериментальному определению сопротивления воды с разделением его на трение и остаточное с разными методами их пересчета на натуре.

Необходимо упомянуть еще одно обстоятельство, отмеченное нами во время испытаний – это испытания моделей в битом льду в соленой и пресной воде. Испытания в

соленой воде приводят к увеличению сопротивления обломков примерно на 20%. Это важно, когда испытания проводятся в пресной воде, а эксплуатация судна в морской. Очевидно, что увеличение солености воды вызывает увеличение давления обломков льда на корпус судна и связанное с этим увеличение трения льда о корпус. Принято [1], [4], [7] и др сопротивление обломков льда при движении ледокола разделять на статическую (не зависящую от скорости) и динамическую составляющую.

Анализ показал, что соленость оказывает значительное влияние на статическую составляющую сопротивления обломков, когда  $v \rightarrow 0$  [10]. Очевидно, это связано с возрастанием давления на обломки льда и сопротивления трения. Учесть это можно введением коэффициента  $k$  в выражение статической составляющей обломков.

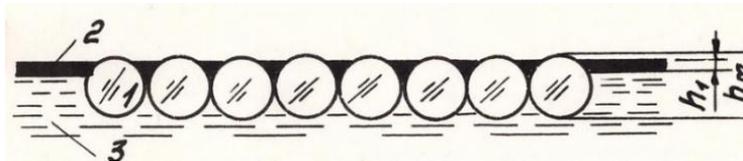
$$R_{обл}^H = k \lambda^3 R_{обл}^M, \quad k = \frac{\rho_H^6 - \rho_M^L}{\rho_M^6 - \rho_M^L}. \quad (16)$$

Динамическая составляющая при переходе из пресной воды в соленую увеличивается пропорционально увеличению плотности.

### Модель льда композитной конструкции

Предложенный способ моделирования взаимодействия судов и морских сооружений со льдом с разделением составляющих, хотя и позволяет быстро, достаточно надежно и с низкой стоимостью получить результаты, но он не свободен от ряда недостатков. В частности, раздельное моделирование значительно усложняет испытания, которые необходимо проводить в разных средах: моделированном тонком естественном сплошном льду и в битом льду из плиток полиэтилена. Сложно обеспечить при движении в сплошном естественном льду требуемый для натуральных условий коэффициент трения.

Поэтому предложенный способ можно усовершенствовать, не разделяя составляющие. Это можно сделать, используя модель льда композитной структуры, представленной на рис. 1.



**Рис. 1. Модель ледяного поля композитной структуры:**  
1 - гранулы полиэтилена; 2 - замерзший слой воды; 3 - вода

Поверхность воды засыпается гранулами полиэтилена высокого давления, диаметр которых соответствует геометрическому масштабу натурального льда. При этом выполняются условия моделирования (14), (15). При отрицательных температурах на поверхности воды (между гранулами) намораживается тонкий слой ( $h_1$ ) естественного льда, характеристики которого соответствуют условиям (12), (13) в отношении толщины, прочности и упругости.

В этом случае не требуется проводить испытания в двух средах, и удается выполнить условия моделирования (как указывалось ранее условия частичного подобия).

Некоторая сложность в этих испытаниях заключается в том, что относительный объем (и следовательно масса модели) льда в виде гранул меньше при взаимодействии с моделью, чем относительная масса льда, взаимодействующая с судном. Поэтому в расчет сопротивления льда необходимо вводить коэффициент (аналогичный коэффициенту упаковки гранул, равный отношению объема гранул полиэтилена с учетом объема замороженного слоя к объему описанного вокруг них прямоугольного параллелепипеда).

В этом случае полное сопротивление, полученное при испытаниях

$$R = \kappa_1 (R_p + R_{обл}) + R_B \quad (17)$$

Пересчет на натуру проводится так:

$$R_H = \lambda^3 R_M, h_H = \lambda h_M, v_H = \sqrt{\lambda} v_M \quad (18)$$

Ввиду малости сопротивления воды при движении модели в ледовых условиях в полном балансе сил сопротивления ее отдельно можно не рассчитывать, а пересчитывать по кубу масштаба (в соответствии с законом подобия Фруда).

Как показали наши опыты, функциональная зависимость  $E^*(h)$  для композитной структуры остается с точностью до постоянной такой же, как и для естественного льда. Прочностные свойства льда соответствуют моделированию по толщине замороженного слоя  $h_M$ .

Модельный лед композитной структуры со стабильными характеристиками легко приготовить в открытых опытовых бассейнах в зимнее время, причем даже значительные колебания температуры воздуха практически не оказывают влияния на адгезионные свойства полиэтилена и влияют лишь на скорость роста льда.

К положительным эффектам новой технологии относится близость диаграммы разрушения композитного и естественного льда реальных толщин, что приводит к соответствию работ разрушения и геометрии обломков льда в натуральных и модельных условиях.

На рис. 2 в качестве примера приведена диаграмма ледопроеходимости ледокола проекта 1105, полученная пересчетом данных проведенных в ледовом бассейне НГТУ испытаниях и сравнение их с натурными данными, полученными в Нижегородской академии водного транспорта [4].

На рис. 3 приведены результаты испытаний модели ледокола R-класса в масштабе  $\lambda=40$  и сравнение с данными натурных испытаний.

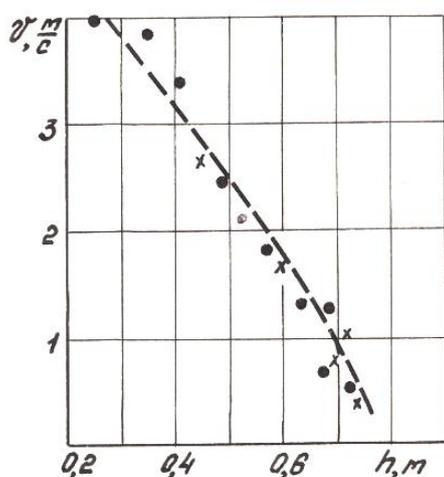


Рис. 2. Диаграмма ледопроеходимости ледокола пр. 1105:

- - - натурные испытания;
- – результаты пересчета в композитном льду;
- x – то же в тонком естественном льду

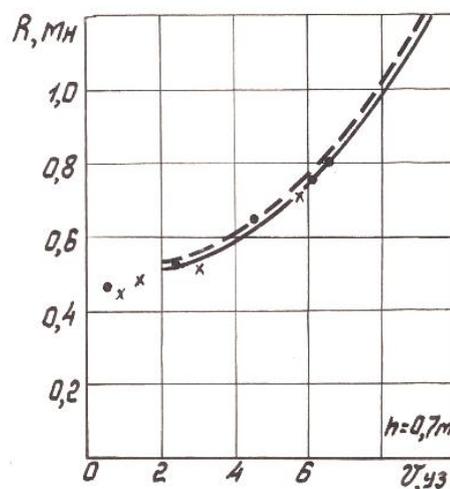


Рис. 3. Сопротивление ледокола R-класса во льду по данным натурных испытаний и по пересчету испытаний модели в бассейне НГТУ:

- – естественный лед;
- x – композитный лед)

На рис. 4 и рис. 5 показаны фрагменты испытаний.

Приведенные способы моделирования, проведения испытаний и пересчета результатов на натуре не ставят цели замены работы ледовых бассейнов с отработанными способами и приемами, но позволяют проводить недорогие и высокопроизводительные испытания, не требующие уникального оборудования для выявления оптимального варианта.

Оптимальный вариант можно всесторонне испытать в специальных ледовых бассейнах.



**Рис. 4. Фрагмент испытаний ледокола R-класса  
в естественном льду**



**Рис. 5. Фрагмент испытаний модели  
ледокола в битом льду  
(в плитках полиэтилена)**

#### Библиографический список

1. **Ногид, Л.М.** Моделирование движения судна в сплошном ледяном поле и в битых льдах // Труды ЛКИ. Вып. XXVIII. – Л. – С. 179–185.
2. **Шиманский, Ю.А.** Теория моделирования движения судна в сплошном ледяном поле. Современные вопросы ледоколостроения / Ю. А. Шиманский. – Л.: Гидрометеиздат, 1960. – 89 с.
3. Atkins, A.G. Icebreaking modeling // Journal of Ship Research. Vol. 19. No1. March 1975. P. 40-43.
4. **Зуев, В. А.** Средства продления навигации на внутренних водных путях / В. А. Зуев. – Л.: Судостроение, 1986. – 206 с.
5. **Лавров, В.В.** Деформация и прочность льда / В.В. Лавров. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 206 с.
6. **Vance, G.P.** Model testing in ice // Naval Engineers Journal. 1968. – IV. – Vol. 80. – № 2. – P. 259–264.
7. **Доронин, Ю.П.** Морской лед / Ю.П. Доронин, Д. Е. Хейсин. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 318 с.
8. Kivicild et all mathematical and physical modeling of ice. Symposium of ice. Lulea Sweden. August 1978. POAC – 78. Proc. Part I. P. 379–391.
9. **Сазонов, К.Е.** Буксировочные испытания эталонной модели МКОБ в ледовом опытовом бассейне / К.Е. Сазонов, О.М. Старовойтов // Судостроительная промышленность. Сер. Проектирование судов, 1989. – Вып. 12. – С. 42–47.
10. **Семенов, Д.А.** Моделирование солёности воды и льда при модельных испытаниях судов в битых льдах // Известия калининградского государственного технического университета. – 2012. – № 25. – С. 127–134.

*Дата поступления  
в редакцию 08.11.2016*

**V. A. Zuev, E. M. Gramzow**

#### **NEW APPROACHES TO MODELING OF ICE ENVIRONMENT DURING THE TESTS OF SHIP MODELS**

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

Deals with creating a new physical model of the ice cover to conduct model studies of the interaction of ships with ice. Proposed methods of simulation of broken ice, a composite model of ice, the technique and technology of testing models of ships in broken ice.

*Key words:* ice model of ice fields, ice resistance, calculation of results on nature.

УДК 62-52-83:656.56

О.В. Крюков

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ ГАЗА С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОПРИВОДНЫХ АГРЕГАТОВ

АО «Гипрогазцентр», г. Нижний Новгород

Рассмотрены разработанные принципы энергоэффективного транспорта природного газа по магистральным газопроводам исходя из нормативно-технических документов. Представлена схема и современные технические средства частотно-регулируемых электроприводов и алгоритмов управления технологическими установками компрессорных станций магистрального транспорта газа.

*Ключевые слова:* энергоэффективность, магистральные газопроводы, электроприводные компрессорные станции, оптимальное управление технологическими агрегатами.

Оптимальный режим эксплуатации магистральных газопроводов (МГ) заключается в максимальном использовании их пропускной способности (газоперекачки) при минимальных энергозатратах на компримирование, охлаждение и транспортировку [1-3]. В значительной степени этот режим определяется работой компрессорных станций (КС) и характеризуется неравномерностью подачи и потребления газа в течение года, месяца, суток, несмотря на наличие газохранилищ, а также научно обоснованных нормативных методик оптимизации [4-6].

Для уменьшения затрат мощности КС на перекачку газа, увеличения пропускной способности газопровода и экономии энергоресурсов выгодно поддерживать максимальное расчетное давление газа в трубопроводе, снижать температуру перекачиваемого газа за счет его охлаждения, использовать газопроводы большего диаметра с очисткой внутренней полости трубопровода [7-10].

Анализ показателей, характеризующих работу МГ страны сегодня, говорит о значительном износе, снижении технического состояния и производительности основных агрегатов КС [11-14]. Средний возраст газопроводов в России составляет 22 года, большая часть которых (около 80 %) имеет возраст от 15 до 40 лет, что превышает нормативные показатели.

В последние годы интерес к проблемам энергоэффективности и энергосбережению на МГ значительно возрос на уровне разработки новых концепций оптимального управления [15-18], реализации интеллектуальных и малолюдных технологий функционирования [19-21], технических решений по применению новой техники, включая высоковольтные многоуровневые преобразователи частоты [7, 13, 22-23]. Появились первые реализации подобных систем для основных технологических установок КС (рис. 1) – электроприводных газоперекачивающих агрегатов (ЭГПА) и аппаратов воздушного охлаждения газа (АВО) [1, 2, 9].

Все отмеченные факторы при их системной реализации в рамках КС значительно повышают технико-экономическую привлекательность и конкурентоспособность ЭГПА, обеспечивая главные задачи энергоэффективности и безопасности функционирования магистральных газопроводов, а также стабильности, надежности и экологичности транспорта энергоресурсов России.

**Возможности ЭГПА.** Согласно нормам технологического проектирования МГ ОНТП 51-1-85\* (п.3.116) «В комплексе средств автоматизации компрессорных цехов (КЦ) следует предусматривать системы автоматического регулирования, обеспечивающие поддержание заданных величин давления и температуры газа на выходе станции, устройства антипомпажного регулирования и защиты газоперекачивающих агрегатов (ГПА)» [1,2]. Однако существующие средства автоматики в основном работают автономно от агрегатов в ручном режиме, выполняя в основном защитные функции, и не обеспечивают энергоэффективные режимы [3,4]. Вместе с тем, сегодня возможности регулируемого ЭГПА позволяют оптими-

зировать энергопотребление КЦ с автоматическим слежением за возмущениями детерминированного и стохастического характера [5-7].

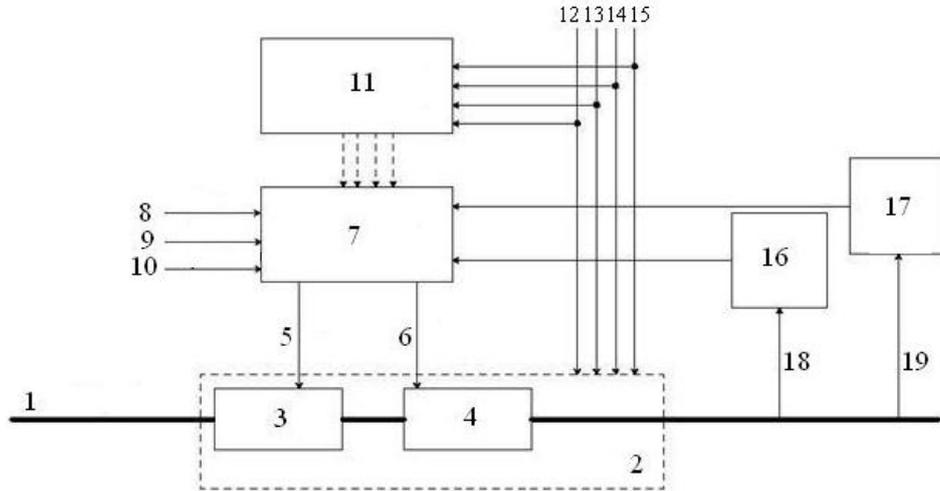


**Рис. 1. Варианты новых моноблочных электроприводных газоперекачивающих агрегатов для энергоэффективного транспорта газа**

В соответствии с патентом на изобретение ведущего проектного института ПАО «Газпром» – АО «Гипрогазцентр» [8] при участии автора предложен способ магистрального транспорта газа, обеспечивающий наивысшую энергоэффективность при любых режимах работы магистральных газопроводов (рис. 2). Это достигается тем, что температура и давление компримированного газа на выходе всех КС в начале каждого линейного участка МГ измеряются и автоматически регулируются из условия поддержания их на оптимальном уровне в соответствии с заданием и значениями внешних возмущений, действующих на параметры потока газа в газопроводах [9, 10].

Сопоставительный анализ данного способа, заключающегося в формировании давления и температуры потока сжатого газа по всей трассе МГ с помощью ЭГПА и вентиляторов АВО, установленных на всех КС в начале каждого линейного участка МГ, с аналогами показывает, что предлагаемый способ магистрального транспорта газа отличается от известных тем, что в нем автоматически устанавливаются и плавно регулируются величины давления и температуры газа с помощью регулируемых ЭГПА и АВО в зависимости от текущих значе-

ний давления и температуры газа в МГ, измеряемых соответственно датчиками давления и температуры газа, заданных параметров давления и температуры участка МГ, а также величин возмущающих воздействий стохастического характера и, тем самым, минимизируются параметрические изменения давления и температуры газопровода, что повышает его эксплуатационную надежность, а также минимизируют интегральные энергозатраты на привод ЭГПА и вентиляторов АВО газа.



**Рис. 2. Структура энергоэффективного транспорта газа через электроприводную компрессорную станцию:**

1 - линейная часть МГ, 2 – КС, 3 – ЭГПА, 4 – АВО газа, 5 и 6 - скорости вращения приводов ЭГПА ( $\omega_{зад}^{ЭГПА}$ ) и вентиляторов АВО ( $\omega_{зад}^{АВО}$ ), 7 - блок расчета параметров регулирования, 8, 9, 10 - заданные значения производительности, давления и температуры газа, 11 - датчики измерения внешних воздействий, 12 – влажность воздуха ( $\beta$ ), 13 – температура воздуха ( $\theta$ ), 14 – перепад температур ( $\Delta t$ ) или давлений на КС ( $\Delta p$ ), 15 – производительность КС ( $Q$ ), 16 и 17 - датчики давления и температуры газа, измеряющих 18 и 19 - реальные значения давления и температуры газа на выходе КС

В качестве исходного состояния оптимизации необходимо выбрать интервалы значений непрерывно изменяющихся переменных и наборы значений дискретных переменных. При этом достигается минимум целевой функции, которая имеет следующий трехфакторный вид:

$$\mathbf{G} = \alpha \times \mathbf{R} + \beta \times \mathbf{W} + \gamma \times \mathbf{C}, \quad (1)$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  - весовые коэффициенты,  $\mathbf{R}$  - фактор «режима», т.е. минимизации (максимизации) давления в определенных точках ГТС, таких как любые точки, расположенные выше и ниже КС или регулирующего вентиля, а также устройства потребления газа,  $\mathbf{W}$  - фактор «энергии» или минимизации потребления электроэнергии на компримирование газа и его охлаждение в АВО перед подачей в газопровод,  $\mathbf{C}$  - фактор «цели», т.е. максимизации (минимизации) расхода газа на участке системы, расположенном между двумя точками газопровода, или давления в определенной точке соединения.

Указанные ограничения включают в себя ограничения равенства, в число которых входят закон потери напора в трубопроводах и первое правило Кирхгофа, определяющие расчеты сетей, и ограничения неравенства, в число которых входят ограничения на минимальные и максимальные значения расхода газа, ограничения на минимальное и максимальное давление в активных или пассивных объектах и ограничения мощности ЭГПА КС.

Оптимальная конфигурация активных объектов КС моделируется в виде программы  $\mathbf{P}$  оптимизации следующего вида:

$$\begin{cases} \min_{\{x,s,e\}} f(x,s) = G(x) + \alpha \cdot \|S\|, \\ \mathbf{P} = C_I(x) + \beta \cdot e \leq s_I, \\ C_E(x) = s_E, \end{cases} \quad (2)$$

где  $x \in R^n$ ,  $s_I \in R^p$ ,  $s_E \in R^q$ ,  $e \in \{0,1\}$ ,  $x$  - совокупность переменных расхода газа  $Q$  и давления  $P$ ,  $G(x)$  - целевая функция, представляющая собой экономический критерий оптимизации,  $C_I(x)$  - совокупность  $p$  линейных и нелинейных ограничений неравенства для активных объектов,  $\beta$  - вектор, коэффициенты которого равны нулю или максимальным значениям ограничений,  $e$  - вектор двоичных переменных,  $C_E(x)$  - совокупность  $q$  линейных и нелинейных ограничений равенства,  $s$  - переменная отклонения, ненулевое значение которой обозначает нарушение ограничения,  $\alpha$  - коэффициент, соответствующий допустимой степени нарушения ограничений.

В результате при заданном расходе газа  $8$  (рис. 2) давление  $19$  и температура  $18$  газа на выходе КС устанавливаются и стабилизируются на заданном оптимальном по энергопотреблению КС уровне. Данный способ магистрального транспорта газа при этом представляет собой надежную и долговечную в эксплуатации систему, ограничивающую превышение давления и температуры газа выше и ниже предельных значений.

Использование предлагаемого способа магистрального транспорта газа обеспечивает по сравнению с существующими способами автоматическую стабилизацию давления и температуры газа на выходе КС, и тем самым практически полностью устраняет недопустимые деформации и напряженные состояния трубопровода и возможные разрушения его противокоррозионной изоляции, в результате чего повышается эксплуатационная надежность, а также оптимизируются интегральные энергозатраты на привод ЭГПА и вентиляторов АВО газа магистральных газопроводов.

Для реализации данной энергоэффективной технологической схемы система электропривода ЭГПА должна быть частотно-регулируемой и инвариантной ко всем параметрам возмущениям детерминированного и стохастического характера [11-15], т.е. комбинированной САР (по отклонению и возмущению) с отрицательной обратной связью по главному технологическому параметру – давлению газа на выходе компрессорной станции. Такая система, разработанная при участии автора [16], показана на рис. 3.

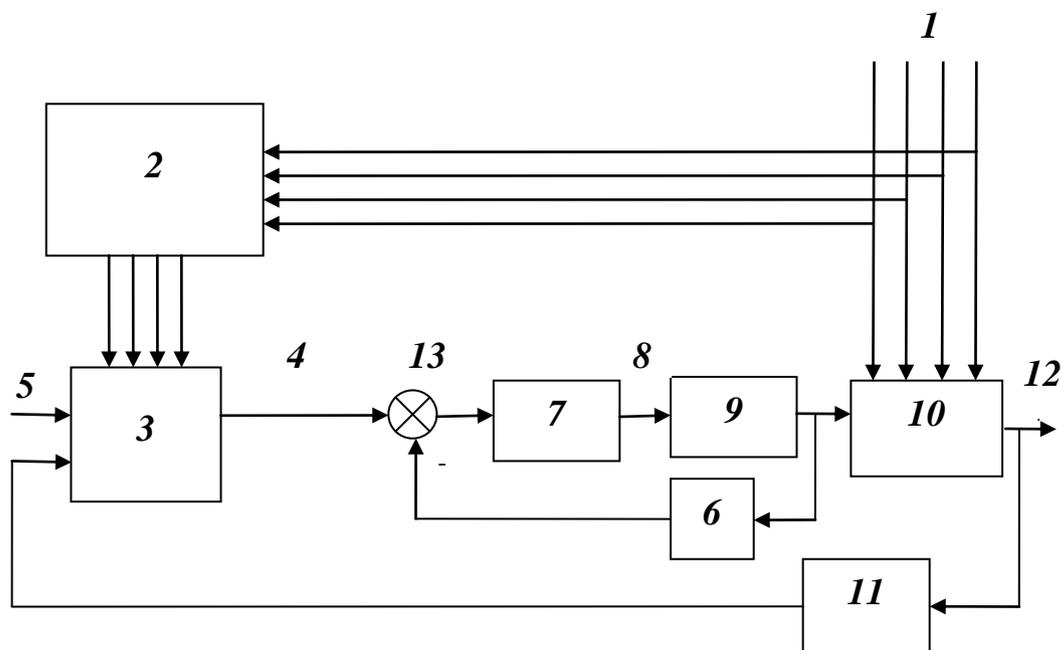


Рис. 3. Структура инвариантной системы частотно-регулируемого ЭГПА

Объектом управления для электропривода  $9$  является газоперекачивающий агрегат  $10$ , на вход которого подводится газ. Повышение давления (компримирование) газа происходит за счет политропной работы компрессоров ГПА. Вращение газоперекачивающего агрегата  $10$  обеспечивает двигатель  $9$  с устройством изменения его частоты вращения (ПЧ) с законом

управления  $U/f^2 = \text{const}$  ( $U, f$  – напряжение и частота питающего двигателя напряжения). На вход блока 3 расчета необходимой скорости вращения поступают сигналы о величине возмущающих воздействий с датчиков 2 измерения внешних воздействий 1 и сигнал задания давления 5, который корректируется с датчика давления 11. Динамические колебания скорости вращения электропривода ГПА 9 поступают на датчик скорости вращения 6 и далее на второй вход сумматора 13. Сигнал 4 с выхода блока 3 расчета необходимой скорости вращения электропривода ГПА поступает на сумматор 13, где корректируется сигналом с датчика скорости 6. Сигнал с сумматора 13 поступает на ПИ-регулятор 7, на выходе которого формируется сигнал 8, пропорциональный требуемой скорости вращения электропривода 9. Газоперекачивающий агрегат 10, вращаемый электроприводом 9, создает требуемое давление газа на выходе компрессорной станции 12.

Данная комбинированная система, состоящая из САР по отклонению (давления газа) и САР по возмущению (стохастических возмущений), обеспечивает автоматизацию процесса компримирования газа до оптимального стабильного давления в условиях различных случайных воздействий средствами инвариантной системы управления частотно-регулируемого ЭГПА. При этом решается искомая задача повышения точности отработки требуемой величины давления газа на выходе КС и стабилизации процесса компримирования газа средствами ЭГПА. Этому способствует строгое соблюдение параметров основного технологического процесса компримирования газа, что позволяет повысить производительность и надежность газопровода в условиях действия возмущающих воздействий [17-22].

При необходимости перевода ЭГПА в турбодетандерный режим работы необходимо обеспечивать на выходе ПЧ параметры напряжения с помощью введения внешней отрицательной обратной связи по выходному напряжению, как это выполнено в работах [22, 23].

#### Библиографический список

1. **Пужайло, А.Ф.** Энергосбережение и автоматизация электрооборудования компрессорных станций: монография / А.Ф. Пужайло [и др.]; под ред. О. В. Крюкова. – Н. Новгород: Вектор ТиС, 2010. – 560 с.
2. **Крюков, О.В.** Прикладные задачи теории планирования эксперимента для инвариантных объектов газотранспортных систем // Идентификация систем и задачи управления, SICPRO'12: труды IX Международной конференции. – 2012. – С. 222–236.
3. **Крюков, О.В.** Сравнительный анализ приводной техники газоперекачивающих агрегатов // Приводная техника. – 2010. – № 5. – С. 2–11.
4. **Крюков, О.В.** Анализ моноблочных конструкций электрических машин для газоперекачивающих агрегатов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2015. – Т. 3. – № 4. – С. 53–58.
5. **Захаров, П.А.** Принципы инвариантного управления электроприводами газотранспортных систем при случайных возмущениях / П.А. Захаров, О.В. Крюков // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2008. – № 2. – С. 98–103.
6. **Захаров, П.А.** Методология инвариантного управления агрегатами компрессорных станций при случайных воздействиях / П.А. Захаров, О.В. Крюков // Известия ВУЗов. Электромеханика. – 2009. – № 5. – С. 64–70.
7. **Серебряков, А.В.** Нечеткие модели и алгоритмы управления ветроэнергетическими установками / А.В. Серебряков, О.В. Крюков, А.Б. Васенин // Управление в технических, эргатических, орг. и сетевых системах: материалы конференции; под ред. С.Н. Васильева. – 2012. – С. 467–469.
8. Пат. на изобретение №2502914 МПК F17D1/02. Способ магистрального транспорта газа.– АО «Гипрогазцентр» / Пужайло А.Ф., Крюков О.В., Репин Д.Г. – Оpubл. 27.12.2013, БИ №36.
9. **Крюков, О.В.** Стратегии инвариантных систем управления электроприводами объектов ПАО «Газпром» // Идентификация систем и задачи управления SICPRO'15: сб. трудов. – М.: ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН. – 2015. – С. 368–386.
10. **Крюков, О.В.** Инвариантные системы технологически связанных электроприводов объектов магистральных газопроводов / О.В. Крюков, С.Е. Степанов, Е.В. Бычков // Труды VIII Между-

- народной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014; отв. за выпуск И.В. Гуляев. Саранск, 2014. – С. 409–414.
11. **Крюков, О.В.** Диагностика электромеханической части энергетических установок / О.В.Крюков, А.В. Серебряков, А.Б. Васенин // Электромеханичні І енергозберігаючі системи. – 2012. – № 3 (19). – С. 549–552.
  12. **Пужайло, А.Ф.** Энергосбережение а агрегатах компрессорных станций средствами частотно-регулируемого электропривода / А.Ф. Пужайло, О.В. Крюков, И.Е. Рубцова // Наука и техника в газовой промышленности. – 2012. – № 2 (50). – С. 98–106.
  13. **Крюков, О.В.** Экспериментальный стенд электромеханической части энергетической установки / О.В. Крюков, А.Б. Васенин, А.В. Серебряков // Приводная техника. – 2012. – №4. – С. 2–13.
  14. **Киянов, Н.В.** Концепция разработки инвариантных автоматизированных электроприводов для водооборотных систем с вентиляторными градирнями / Н.В. Киянов, О.В. Крюков, Д.Н. Прибытков // Электротехника. – 2007. – № 11. – С. 62–67.
  15. **Крюков, О.В.** Принципы построения инвариантных электроприводов энергетических объектов / О.В. Крюков, А.В.Горбатушков, С.Е. Степанов // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: труды IV Всероссийской научно-практической конференции; под общ. ред. В.Ю. Островлянчика. Новокузнецк, 2010. – С. 38–45.
  16. **Milov, V.R.** Intellectual management decision support in gas industry / V.R.Milov, B.A. Suslov, O.V. Kryukov // Automation and Remote Control. – 2011. – Т. 72. – № 5. – С. 1095–1101.
  17. **Крюков, О.В.** Виртуальный датчик нагрузки синхронных машин // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2014. – № 3. – С. 45–50.
  18. **Крюков, О.В.** Повышение устойчивости работы электроприводов центробежных нагнетателей на компрессорных станциях ОАО «Газпром» / О.В. Крюков, С.Е. Степанов // Газовая промышленность. – 2014. – № 8 (710). – С. 50–56.
  19. **Бабичев, С.А.** Анализ технического состояния и безопасности электроприводных газоперекачивающих агрегатов / С.А. Бабичев, Е.В. Бычков, О.В. Крюков // Электротехника. – 2010. – № 9. – С. 30–36.
  20. **Крюков, О.В.** Опыт создания энергоэффективных электроприводов газоперекачивающих агрегатов // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014 в 2-х томах; отв. за выпуск И.В. Гуляев. Саранск, 2014. – С. 157–163.
  21. **Babichev, S.A.** Automated monitoring system for drive motors of gas-compressor units / S.A. Babichev, P.A.Zakharov, O.V. Kryukov // Automation and Remote Control. – 2011. – Т. 72. – №. 6. – С. 175–180.
  22. **Крюков, О.В.** Методология и средства нейро-нечеткого прогнозирования состояния электроприводов газоперекачивающих агрегатов // Электротехника. – 2012. – № 9. – С. 52–60.
  23. **Kryukov, O.V.** Electric drive systems in compressor stations with stochastic perturbations // Russian Electrical Engineering. – 2013. – Т. 84. – С. 135–138.

*Дата поступления  
в редакцию 08.11.2016*

**O.V. Kryukov**

## **POWER OPTIMIZATION OF TRANSPORT STREAMS OF GAS BY MEANS OF ELECTRIC DRIVING UNITS**

JSC “Giprogazcentr”, Nizhny Novgorod

**Summary:** The developed principles of energy efficient transport of natural gas on the main gas pipelines proceeding from normative and technical documents are considered. The scheme and modern technical means of frequency and adjustable electric drives and control algorithms of technological installations of compressor stations of the main transport of gas is submitted.

*Key words:* Energy efficiency, main gas pipelines, electric driving compressor stations, optimum control of technological units.

УДК 621.791.14

С.Ю. Смоленский, Р. И. Якимов

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫНОСЛИВОСТИ СОЕДИНЕНИЙ,  
ПОЛУЧЕННЫХ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ, ИЗ ПРЕЦИЗИОННЫХ СПЛАВОВ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты исследования усталостной прочности сварных соединений, полученных конвенционной сваркой трением, из прецизионного сплава 36НХТЮ. Построение кривой усталости и определение предела выносливости сварных соединений выполнялось с применением многообразцового метода и метода ускоренной оценки – Локати.

Установлено, что сварка трением позволяет получать качественные соединения из прецизионных сплавов, работоспособные в условиях циклического нагружения. Исследования показали, что для рассматриваемых условий ускоренный метод ступенчатого нагружения Локати дает вполне удовлетворительную точность при определении предела выносливости и может быть использован для сварных соединений, выполненных сваркой трением из данных сплавов.

*Ключевые слова:* усталостные испытания, сварка трением, предел выносливости, метод Локати

Среди работ, посвященных исследованию сопротивления усталости соединений, полученных сваркой трением, большинство работ относится к соединениям, выполненным из различных марок низкоуглеродистых, углеродистых и легированных конструкционных сталей. Данные для соединений из прецизионных сплавов отсутствуют. В то же время надежность и долговечность многих машин и приборов, в которых применяются элементы из прецизионных сплавов, в значительной степени определяются сопротивлением усталости этих элементов.

Определение предела выносливости сварных соединений из прецизионного сплава 36НХТЮ [1], полученных сваркой трением, производилась двумя методами: обычным многообразцовым (длительным) методом и методом ускоренной оценки выносливости – Локати [2]. В последние годы проблемы ускоренного определения предела выносливости приобретают особое значение, так как на предприятиях и в проектных организациях часто отсутствует возможность в проведении длительных и дорогостоящих испытаний на усталость. В тоже время развитие современной техники требует решения круга вопросов, подлежащих исследованию в области усталостных испытаний. Метод Локати среди ускоренных методов усталостных испытаний занимает особое место благодаря более высокой точности и производительности.

При испытаниях на усталость применялась схема нагружения: растяжение – сжатие с мягким нагружением, характерная для эксплуатационных условий работы деталей. Использовался асимметричный цикл напряжений с однозначным изменением величин напряжений, с постоянными амплитудными значениями напряжений при синусоидальной (гармоничной) форме цикла (рис. 1). Коэффициент асимметрии  $R$  цикла при испытаниях составлял  $R=1/3$ , частота нагружения  $f=1000$  цикл/мин. Испытания проводились на испытательной машине с гидравлическим пульсатором ЦД-10.

Для определения предела выносливости  $\sigma_R$  соединений и основного металла применялись гладкие образцы круглого профиля типа II с рабочей частью по ГОСТ 23026 (рис. 2), изготовленные из сварных соединений, полученных сваркой трением, и цельного прутка из сплава 36НХТЮ [1].

Сварка выполнялась на режиме, обеспечивающем получение качественных сварных соединений в условиях воздействия статических нагрузок. При испытании на статическое растяжение сварные образцы разрушались по основному металлу вдали от стыка. Угол загиба при испытании на статический изгиб составлял  $180^\circ$  без разрушения соединения. На данном режиме была сварена партия образцов диаметром 12 мм, состоящая из двух серий.

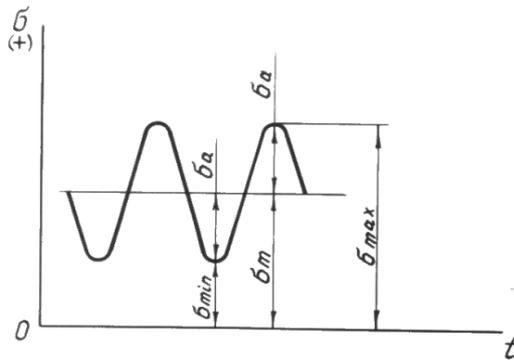


Рис. 1. Цикл напряжений

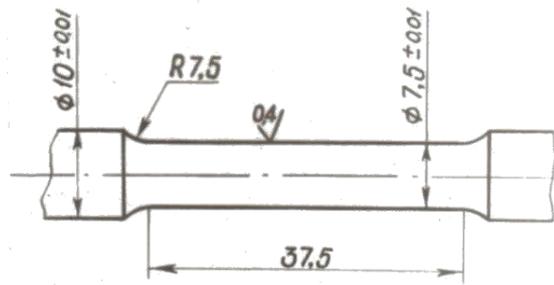


Рис. 2. Рабочая часть образца при определении предела выносливости

База испытаний  $N_B$  для сравнительных испытаний сварных и цельных образцов при определении предела выносливости и построения кривой усталости принималась согласно рекомендациям [2] равной  $5 \times 10^6$  циклов. Построение кривой усталости при использовании многообразцового метода по результатам испытаний ограниченного объема образцов (10–12 шт.) производилось по методу наименьших квадратов. Ускоренные испытания ступенчато-увеличивающейся нагрузкой по Локати и обработка полученных экспериментальных данных выполнялась по методике, изложенной в работе [2]. Найденные значения предела выносливости, определенные ускоренным методом Локати ( $\sigma_R^y$ ), для партии образцов усреднялись по формуле:

$$\bar{\sigma}_R^y = (\sum \sigma_R^y) / m \quad (1)$$

где  $m$  – число образцов в испытываемой партии.

Первая серия сварных образцов подвергалась испытаниям стандартным многообразцовым методом для определения предела выносливости с построением кривой усталости. Основным критерием при определении предела выносливости и построения кривых усталости принималось полное разрушение испытываемых образцов. Результаты длительных (многообразцовых) усталостных испытаний из сварных соединений представлены в табл.1 и на рис. 3. Аналитической обработкой [3] результатов длительных усталостных испытаний получено следующее уравнение для кривой усталости

$$\lg N = 8,7107 - 0,7304 \cdot 10^{-2} \sigma. \quad (2)$$

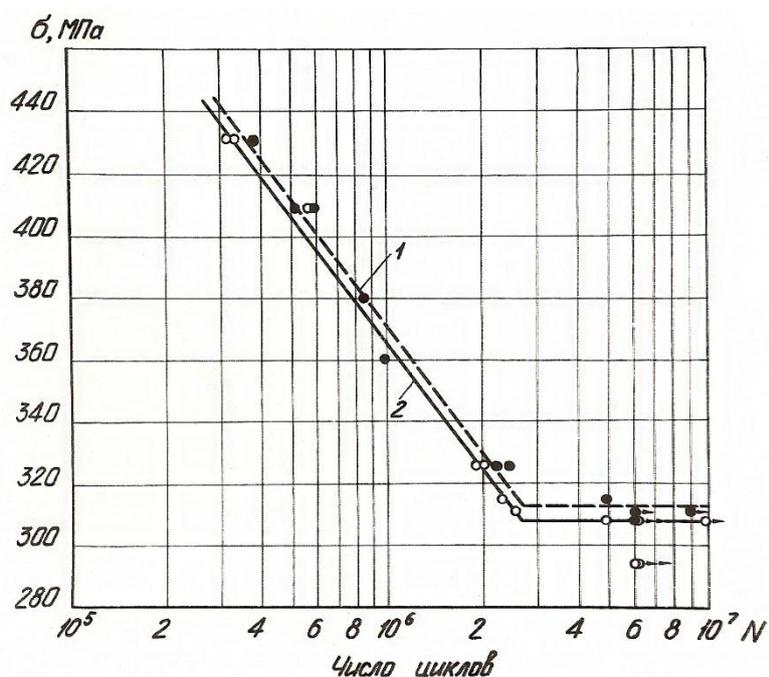
$r_{\text{расч}} = -0,988$ ,  $r_{\text{кр}} = 0,754$  при  $f=5$ , т. е. линейная связь статистически значима.

Таблица 1

## Результаты длительных усталостных испытаний сварных образцов

Номер	Параметры нагружения			N · 10 <sup>5</sup> , цикл	Место разрушения
	$\sigma_{\text{max}}$ , МПа	$\sigma_m$ , МПа	$\sigma_{\text{min}}$ , МПа		
1	430,8	287,2	143,6	3,82	Основной металл
2	408,6	272,4	136,2	5,14	Основной металл
3	408,6	272,4	136,2	5,81	Основной металл
4	379,7	253,3	126,6	8,42	Основной металл
5	359,7	239,8	119,9	9,83	Основной металл
6	326,4	217,6	108,8	21,88	Основной металл
7	326,4	217,6	108,8	23,82	Основной металл
8	315,3	210,2	105,1	49,03	Основной металл
9	310,9	207,3	103,6	60,0 <sup>x)</sup>	Не разрушился
10	310,9	207,3	103,6	60,0 <sup>x)</sup>	Не разрушился
11	310,9	207,3	103,6	90,0 <sup>x)</sup>	Не разрушился
12	307,5	205,0	102,5	90,0 <sup>x)</sup>	Не разрушился

Примечание:<sup>x)</sup> – испытание прекращено.



**Рис. 3. Кривые усталости. Сплав 36НХТЮ:**  
 1 – сварные образцы; 2 – цельные образцы

Как показывают результаты длительных усталостных испытаний, разрушение образцов происходит по основному металлу, что свидетельствует о более низком значении  $\sigma_R$  основного металла по сравнению с  $\sigma_R$  сплава в зоне стыка для соединений, выполненных сваркой трением.

Полученная кривая усталости (уравнение 2) и предел выносливости  $\sigma_R^D = 313,1$  МПа являются характеристиками сплава 36НХТЮ, полученными на образцах, характеризующихся наличием в них прослойки, представляющей собой сварной шов.

В табл. 2 и на рис.3 представлены результаты длительных усталостных испытаний, полученных на цельных образцах.

**Таблица 2**

**Результаты длительных усталостных испытаний цельных образцов**

Номер	Параметры нагружения			N · 10 <sup>5</sup> , цикл
	$\sigma_{max}$ , МПа	$\sigma_m$ , МПа	$\sigma_{min}$ , МПа	
1	430,8	287,2	143,6	3,14
2	430,8	287,2	143,6	3,28
3	408,6	272,4	136,2	5,59
4	326,4	217,6	108,8	18,53
5	326,4	217,6	108,8	19,85
6	315,3	210,2	105,1	23,06
7	310,9	207,3	103,6	25,02
8	307,5	205,0	102,5	60,0 <sup>x)</sup>
9	307,5	205,0	102,5	48,76
10	307,5	205,0	102,5	100,0 <sup>x)</sup>
11	294,2	196,2	98,1	60,0 <sup>x)</sup>
12	294,2	196,2	98,1	60,0 <sup>x)</sup>

Примечание:<sup>x)</sup> – испытание прекращено, образец не разрушался.

Кривая усталости описывается статистически значимым уравнением

$$\lg N = 8,6538 - 0,7253 \cdot 10^{-2} \sigma. \quad (3)$$

Расчетный коэффициент корреляции  $r_{\text{расч}} = -0,988$ ;  $|r_{\text{расч}}| > |r_{\text{кр}}|$ ,  $r_{\text{кр}} = 0,754$  при  $f = 5$ . При этом предел усталости равен  $\sigma_R^D = 307,5$  МПа.

Отклонение коэффициента линейной регрессии кривой усталости, полученной на сварных образцах составило 0,7%, а полученное отклонение предела выносливости  $\sigma_R^D$  равно

$$\Delta = \left| \frac{\sigma_{R(c)}^D - \sigma_{R(u)}^D}{\sigma_{R(c)}^D} \right| \cdot 100\% = 1,8\%, \quad (4)$$

что весьма незначительно.

Полученные результаты свидетельствуют, что наличие в образцах прослойки в виде шва, выполненного сваркой трением, в данных условиях практически не сказывается на величине предела выносливости.

Вторая серия сварных образцов была испытана на выносливость ступенчато-увеличивающейся нагрузкой по методу Локати [2]. При ускоренных испытаниях по методу Локати начальный уровень напряжения  $\sigma_0$  брался из расчета  $0,8\sigma_R^{\text{ож}}$  и принимался равным 236 МПа. Оптимальное значение средней скорости роста напряжений определялось по номограмме и составляло  $\alpha = 9,8 \cdot 10^{-5}$  МПа/цикл. Приращение напряжения при переходе на следующую ступень  $\Delta\sigma = 29,5$  МПа, число циклов нагружения на ступени  $n_i = 3 \cdot 10^5$ .

Результаты ускоренных испытаний для определения предела выносливости по методу Локати представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты ускоренных усталостных испытаний сварных образцов

Напряжение на ступени, МПа	Число циклов нагружения на ступени, $\times 10^3$		
	Образец 1	Образец 2	Образец 3
236,0	300	300	300
265,5	300	300	300
295,0	300	300	300
324,5	300	300	300
354,0	300	217	300
383,5	300	-	18
413,0	6	-	-

Так как разрушающее напряжение  $\sigma_p$  на последних ступенях меньше 500 МПа, обработка экспериментальных данных для всех образцов производится по методике обработки материалов с  $\sigma_p < 500$  МПа. По номограмме по величине  $\sigma_p$  (для 1-го образца) определяли предел выносливости  $\sigma_R^{\text{б}}$  условной усталостной кривой б (наиболее вероятной), число циклов  $N_0^{\text{б}}$  и напряжение соответствующее долговечности в  $10^5$  циклов  $\sigma_{10^5}$ . Тангенс угла наклона левой ветви условной кривой усталости б ( $K_{\sigma}$ ) определяется уравнением

$$K_{\sigma} = \frac{\sigma_{10^5} - \sigma_R^{\text{б}}}{\lg N_0^{\text{б}} - \lg 10^5}. \quad (5)$$

Полученные значения сведены в табл. 4.

В табл. 5 представлены результаты вычисления суммы  $\Sigma n_i/N_i$  (отношение чисел циклов, пройденных образцом на каждой ступени нагружения до разрушения,  $n_i$  к ресурсу долго-

вечности условной усталостной кривой б на этих же уровнях напряжений  $N_i$ ). Значения  $\sigma_i$  и  $n_i$  брались из результатов испытаний (табл. 3), значения  $N_0^b, \sigma_R^b, K_b$  из табл. 4.

$N_i$  определялось из уравнения

$$\lg N_i = \lg N_0^b - \frac{\sigma_i - \sigma_R^b}{K_b} \quad (6)$$

Таблица 4

Определение тангенса угла наклона кривой усталости б

Номер образца	$\sigma_p$ , МПа	$\sigma_{10^5}$ , МПа	$\sigma_R^b$ , МПа	$N_0^b$ , цикл	$\lg N_0^b$	$\lg 10^5$	$K_b$
1	413	413	340	$1,7 \cdot 10^6$	6,2304	5	59,3303
2	354	354	280	$1,87 \cdot 10^6$	6,2718	5	58,1852
3	383,5	383,5	310	$1,73 \cdot 10^6$	6,2380	5	59,37

Таблица 5

Определение отношения чисел циклов нагружения к ресурсу долговечности на кривой б

МПа	$\sigma_i$	$n_i \cdot 10^3$ , цикл	$\frac{\sigma_i}{K_b}$	$\lg N_i$	$N_i$ , цикл	$\frac{n_i}{N_i}$
	236,0	300	3,9777	7,9833	96227675	0,0031
	265,5	300	4,4749	7,4861	30626685	0,0098
	295,0	300	4,9722	6,9888	9745407	0,0308
	324,5	300	5,4694	6,4916	3101702	0,0967
	354,0	300	5,9666	5,9944	987188	0,3039
	383,5	300	6,4638	5,4972	314196	0,9548
	413,0	6	6,961	5,0	100000	0,06
$(\sum \frac{n_i}{N_i})_b = 1,4591$						

Примечание:  $\sigma_R^b = 340$  МПа.

Аналогично производилось определение суммы  $\sum n_i/N_i$  для условных усталостных кривых а и в (табл. 6 и табл.7). Вычисления производились при  $\sigma_R^a = 1,1\sigma_R^b, \sigma_R^в = 0,9\sigma_R^b, N_0^a = N_0^b = N_0^в$  и  $K_a = K_b = K_в$ .

Таблица 6

Определение отношения чисел циклов нагружения к ресурсу долговечности на кривой а

$\sigma_i$ , МПа	$n_i \cdot 10^3$ , цикл	$\frac{\sigma_i}{K_a}$	$\lg N_i$	$N_i$ , цикл	$\frac{n_i}{N_i}$
236,0	300	3,9777	8,5564	$3,6008083 \cdot 10^8$	0,0008
265,5	300	4,4749	8,0592	$1,1460406 \cdot 10^8$	0,0026
295,0	300	4,9722	7,5619	36466996	0,0082
324,5	300	5,4694	7,0647	11606466	0,0258
354,0	300	5,9666	6,5675	3694026	0,0812
383,5	300	6,4638	6,0703	1175709	0,2552
413,0	6	6,961	5,5731	374197	0,016
$(\sum \frac{n_i}{N_i})_a = 0,3898$					

Примечание:  $\sigma_R^a = 374$  МПа

Таблица 7

Определение отношения чисел циклов нагружения к ресурсу долговечности на кривой в

$\sigma_i$ , МПа	$n_i \cdot 10^3$ , цикл	$\frac{\sigma_i}{K_b}$	$\lg N_i$	$N_i$ , цикл	$\frac{n_i}{N_i}$
236,0	300	3,9777	7,4103	25721720	0,0117
265,5	300	4,4749	6,9131	8186533	0,0366
295,0	300	4,9722	6,4158	2604954	0,1152
324,5	300	5,4694	5,9186	829087	0,3618
354,0	300	5,9666	5,4214	263876	1,1369
383,5	300	6,4638	4,9242	83985	3,5721
413,0	6	6,961	4,427	26730	0,2245
$(\sum \frac{n_i}{N_i})_6 = 5,4588$					

Примечание:  $\sigma_R^b = 306$  МПа.

По трем суммам относительных долговечностей  $(\sum n_i/N_i)_a$ ,  $(\sum n_i/N_i)_b$  и  $(\sum n_i/N_i)_c$  и соответствующим условным кривым усталости значениям пределов выносливости  $\sigma_R^a$ ,  $\sigma_R^b$  и  $\sigma_R^c$  строили график в координатах  $\sigma_R - \sum n_i/N_i$  (рис. 4). Согласно гипотезе линейного суммирования значение предела выносливости при  $\sum n_i/N_i = 1$   $\sigma_R^y = 348$  МПа.

В табл. 8 представлены вычисленные аналогичным образом значения величин относительных долговечностей для остальных образцов и соответствующие им пределы выносливости, определенные путем графической интерполяции по трем точкам (рис. 4).

Таблица 8

Результаты расчета значений  $\sum n_i/N_i$  и  $\sigma_R^y$ 

Образец	Сумма относительных долговечностей			$\sigma_R^y$ , МПа
	Кривая а	Кривая б	Кривая в	
1	0,3898	1,4591	5,4588	348
2	1,1599	3,5125	0,3831	311
3	0,4742	1,5774	5,250	320

Примечание: значения пределов выносливости, соответствующие условным кривым усталости а, б, в, соответственно: 374, 340, 306 МПа (обр. № 1); 308, 280, 336 МПа (обр. № 2); 341, 310, 279 МПа (обр. № 3).

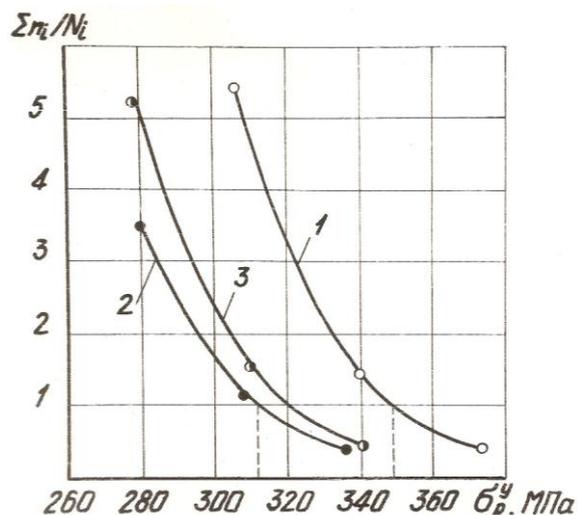


Рис. 4. График зависимости  $\sigma_R^y$  от  $\sum n_i/N_i$ :  
1 — обр. № 1; 2 — обр. № 2; 3 — обр. № 3

Найденные значения  $\sigma_R^y$  усреднялись по формуле (1). Полученное значение  $\bar{\sigma}_R^y = 326,3$  МПа является искомой оценкой предела выносливости при ускоренных испытаниях.

Результаты сравнений величин предела выносливости, определенных двумя методами, показывают, что имеет место достаточно хорошее их совпадение (313,1 и 326,3 МПа). Отклонение  $\bar{\sigma}_R^y$  от  $\sigma_R^D$  при этом составило

$$\Delta = \left| \frac{\bar{\sigma}_R^y - \sigma_R^D}{\bar{\sigma}_R^y} \right| \cdot 100\% = \frac{326,3 - 313,1}{326,3} \cdot 100\% = 4,0\%.$$

Как видно, метод Локати дает достаточно точные результаты и этим методом можно пользоваться для определения предела выносливости соединений, выполненных сваркой трением из данных сплавов, при этом сварка трением обеспечивает получение качественных сварных соединений

### Библиографический список

1. ГОСТ 14119-85.
2. Методика усталостных испытаний: справочник / под ред. Л.М. Школьника. – М.: Metallurgy, 1978. – 304 с.
3. Батунер, Л.М. Математические методы в химической технике / Л.М. Батунер, М.Е. Позин. – Л.: Химия, 1968. – 824 с.

*Дата поступления  
в редакцию 17.10.2016*

**S. Yu. Smolensky, R. I. Yakimov**

### RESEARCH OF ENDURANCE OF JOINTS OBTAINED BY FRICTION WELDING OF PRECISION ALLOYS

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

**Purpose:** Presents results of a study of the fatigue strength of welded joints obtained by conventional friction welding, precision alloy 36NHTYU.

**Design/methodology/approach:** The construction of the fatigue curve and the determination of the fatigue strength of welded joints were performed by the multi sample method and the Lokati method of an accelerated estimation.

**Findings:** It is established that the friction welding allows to obtain high-quality joints of precision alloys which can work in conditions of cyclic loading.

**Research limitations/implications:** For the considered conditions, studies have shown that accelerated step-loading Lokati method gives satisfactory accuracy in determining the fatigue strength and can be used for welded joints made by friction welding of these alloys.

*Key words:* fatigue tests, friction welding, fatigue strength, Lokati method.

УДК 629.113

В.В. Беляков<sup>1</sup>, А.М. Беляев<sup>1</sup>, П.О. Береснев<sup>1</sup>, М.Е. Бушуева<sup>1</sup>, Д.В. Зезюлин<sup>1</sup>,  
В.Е. Колотилин<sup>1</sup>, Е.Е. Клубничкин<sup>2</sup>, В.Е. Клубничкин<sup>2</sup>, З.А. Кострова<sup>1</sup>,  
В.С. Макаров<sup>1</sup>, А.В. Михеев<sup>1</sup>, Д.М. Порубов<sup>1,3</sup>, В.И. Филатов<sup>1</sup>

## КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
Мытищинский филиал МГТУ им Н.Э. Баумана<sup>2</sup>,  
АО ЦНИИ «Буревестник»<sup>3</sup>

Рассматриваются общие подходы к многокритериальной оценке качества машин. Приведены исторический и библиографический обзоры различных критериев для оценки проходимости, подвижности, эффективности и конкурентоспособности автотракторной и вездеходной техники. Целью проводимого исследования является определение критериев качества для обеспечения более точного сравнения различных теоретических моделей и натуральных образцов транспортно-технологических машин (ТТМ), а также выявление рациональных режимов использования транспортных средств (ТС).

*Ключевые слова:* критерий качества изделия, проходимость, эффективность, конкурентоспособность, подвижность, автотракторная техника, транспортно-технологические машины, транспортные средства, многокритериальная оценка качества, движитель.

### Введение

Транспортные средства оцениваются большим числом критериев: функциональными, технологическими, экономическими, антропологическими и многими другими. Но не все они способны в полной мере составить объективную картину о качестве машины, не представляется возможным с высокой точностью сравнить их различные модификации и выявить наилучший вариант. Поэтому необходимо определять ряд критериев в зависимости от типа и назначения ТС. Для вездеходной техники наиболее рациональным с точки зрения оценки качества являются частные критерии проходимости, подвижности, эффективности и конкурентоспособности.

Объединив все частные критерии, приходим к многокритериальной оценке автотракторной техники, которая позволяет нам определить уровень качества изделия. В соответствии с ГОСТ 154467-79 (Управление качеством продукции) *качество – это совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением.*

### Многокритериальная оценка автотракторной техники

Анализ и синтез сложных систем практически любой природы, в том числе и автотракторной техники, связаны с решением проблемы многокритериальности оценки их качества [1-8].

Действительно, во многих случаях объект характеризуется не одним критерием, а несколькими. При оценке конкурентоспособности число таких критериев может достигать ста и более [1]. Для проведения сравнения качества автотракторной техники и других технических изделий существует широкий спектр разнообразных критериев, приведенных в табл. 1.

Таблица 1

Критерии оценки автотракторной техники

Критерий 1	Расчетная зависимость 2	Обозначения 3	Автор, источник 4
Интегральный показатель оценки качества легковых автомобилей, $n_{\text{сум}}$	$n_{\text{сум}} = K_{\text{Д}}\Pi_{\text{Д}} + K_{\text{К}}\Pi_{\text{К}} + K_{\text{Б}}\Pi_{\text{Б}} + K_{\text{Э}}\Pi_{\text{Э}} + K_{\text{Н}}\Pi_{\text{Н}}$	$\Pi_{\text{Д}}$ – динамики автомобиля; $\Pi_{\text{К}}$ – комфортабельности; $\Pi_{\text{Б}}$ – безопасности; $\Pi_{\text{Э}}$ – эксплуатационных затрат на топливо, ТО и ремонт; $\Pi_{\text{Н}}$ – надежности; $K_{\text{Д}}$ , $K_{\text{К}}$ , $K_{\text{Б}}$ , $K_{\text{Э}}$ , $K_{\text{Н}}$ – коэффициенты весомости соответствующих комплексных показателей.	Фиттерман Б.М. [9]
	$K_j^k = K_j^{\text{э}} \sum_{i=1}^n K_{ij} C_i$ коэффициент сохранения эффективности $K_j$ -го объекта	где $K_j^k$ – относительный показатель $i$ -го свойства $j$ -го объекта; $C_i$ – коэффициент важности $i$ -го свойства.	Азгальдов Г.Г. [10]
	$K_i = \frac{X_i - X_{\text{min}}}{d} + 1$	$d = \frac{X_{\text{max}} - X_{\text{min}}}{K - 1}$ $K_i$ – количественное значение $i$ -го признака; $X_{\text{max}}$ , $X_{\text{min}}$ – соответственно максимальное и минимальное значения признаков среди сравниваемых изделий;	Красильников В.В. [10]
Частный показатель оценки топливной экономичности и тягово-динамических возможностей автомобиля коэффициент эффективности, $K_{\text{ЭФ}}$	$K_{\text{ЭФ}} = V_{\text{T}} / (Q / 100)$	$V_{\text{T}}$ – скорость движения ТС; $Q$ – расход топлива, л;	Будалин С.В. [10]
Обобщенный показатель качества, $V$	$V = \prod_{j=1}^n \left[ \prod_{i=1}^k \left( \frac{P_j}{P_{j\text{б}}} \right)^{m_{ij}} \right]^{m_j}$	$P_j, P_{j\text{б}}$ – значения $i$ -го показателя качества новой и базовой моделей; $m_{ij}$ – коэффициент весомости $i$ -го показателя качества $j$ -й группы; $m_j$ – коэффициент весомости показателя качества $j$ -й группы.	Плиев И.А. [11]
	$m_j = \sum_{i=1}^r a_{ij} / \sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^r a_{ij}$	$a_{ij}$ – ранги $i$ -го показателя качества $j$ -го эксперта; $n$ – количество принятых для анализа показателей качества; $r$ – количество экспертов.	Сероштан М.В. [10]
	$m_i = \frac{f(i)}{\sum_{i=1}^n f(i)} = 2^{(1-i)} / \sum_{i=1}^n 2^{(1-i)}$	$i$ – порядковый номер показателя при ранжировании.	Титов Е.Ф. [14]

Продолжение табл. 1

1	2	3	4
Метод измерения конкурентоспособности на основе Функция желательности, $f$	$f = 1/(e)^{1/e}$	$e$ – основание натурального логарифма; $x$ – приведенное значение исследуемого параметра объекта.	Харрингтон Е.С. [12]
Конкурентоспособность однопараметрических объектов, $K$	$K = \left(\frac{E_{ao}}{E_{lo}}\right) K_1 K_2 \dots K_n$	$E_{ao}$ , $E_{lo}$ – эффективность анализируемого и лучшего на данном рынке образца соответственно, единица полезного эффекта (денежная единица); $K_1, K_2, \dots K_n$ – коэффициенты, учитывающие конкурентные преимущества.	Фатхутдинов Р.А. [15]
Формула расчета эффективности объектов, $E$	$E = P_c / Z_c$	$P_c$ – полезный эффект объекта за нормативный срок его службы в условиях конкретного рынка, единица полезного эффекта; $Z_c$ – совокупные затраты за жизненный цикл объекта в условиях конкретного рынка, руб.	Будалин С.В. [10]
	$P_c = \sum_{t=1}^T P_{ct} \Phi_{ct} K_1 K_2 K_3 K_n$	$T$ – нормативный срок службы, лет; $P_{ct}$ – часовая паспортная производительность; $\Phi_{ct}$ – годовой плановый фонд времени работы; $K_1, \dots, K_n$ – коэффициенты, характеризующие несоответствие показателей качества объекта требованиям потребителя, невыгодность их выполнения, низкую организацию эксплуатации и ремонта.	
Интегральный показатель уровня конкурентоспособности (ИПУК)	$\text{ИПУК} = I_{\text{нп}} I_{\text{тп}} / E_{\text{эп}} \geq 1;$ $I_{\text{нп}} = \prod_{i=1}^n q_i;$ $I_{\text{тп}} = \sum_{i=1}^n (d_{\text{нi}} / d_{\text{эi}}) a_i;$ $E_{\text{эп}} = C_{\text{па}} / C_{\text{пк}}$	$q_i$ – частный показатель по $i$ -му нормативному параметру; $d_{\text{нi}}$ , $d_{\text{эi}}$ – величина $i$ -го параметра анализируемого и эталонного объекта соответственно; $a_i$ – удельный вес $i$ -го параметра из их общего числа $n$ ; $C_{\text{па}}$ , $C_{\text{пк}}$ – цена потребления, включающая единовременные и текущие расходы за жизненный цикл анализируемого и конкурентного изделия соответственно.	

Продолжение табл. 1

<p>Оценка конкурентоспособности на основе сравнения сводных индексов потребительских свойств объектов, <math>I_p</math></p>	$I_p = \sum_{i=1}^n \left( \frac{P_{Hi}}{P_{эi}} \right) a_i$	<p><math>P_{Hi}</math>, <math>P_{эi}</math> – значения <math>i</math>-го параметра оцениваемого и эталонного товара.</p>	<p>Спиридонов И.А. [16]</p>
<p>Коэффициент полезного действия (КПД)</p>	$n_a = \left[ mgH = m \sum (V_{ki}^2 - \frac{V_{oi}^2}{25.92}) \right] 100 / (S_y Q H_y)$	<p><math>g</math> – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  <math>H</math> – сумма приращения высот на всех подъемах маршрута, м;  <math>V_{oi}</math>, <math>V_{ki}</math> – начальная и конечные скорости на <math>i</math>-м участке разгона, км/ч;  <math>S</math> – длина маршрута, км.</p>	<p>Наркевич Э.И. [13]</p>
<p>Определение интегрального показателя конкурентоспособности, <math>K_u</math></p>	$K_u = \frac{I_{HP} I_{TP}}{I_{ЭП}}$ $I_{HP} = \prod_{i=1}^n q_{Hi}$ $I_{TP} = \sum_{i=1}^n (q_{mi} a_i)$ $q_{mi} = \frac{P_i}{P_{io}} 100\%$ $I_{ЭП} = C / C_o$	<p><math>I_{HP}</math>, <math>I_{TP}</math>, <math>I_{ЭП}</math> – групповые показатели соответственно по нормативным, техническим и экономическим параметрам. <math>q_{mi}</math> – единичный показатель по <math>i</math>-му нормативному параметру;  <math>n</math> – число нормативных параметров, подлежащих рассмотрению, <math>P_i</math> и <math>P_{io}</math> – <math>i</math>-й параметр соответственно анализируемого товара и образца. <math>C</math> – полные затраты потребителя на приобретение и потребление анализируемого товара;  <math>C_o</math> – полные затраты для товара-образца.</p>	<p>Абалонин С.М. [17]</p>
<p>Интегральный показатель комплексной оценки грузового автомобиля, <math>K_a</math></p>	$K_a = A / C_{сум}$	<p><math>A</math> – работа, произведенная автомобилем, т-км;  <math>C_{сум}</math> – приведенные расходы на создание, изготовление, эксплуатацию и ремонт автомобиля, руб.</p>	<p>Григорьев М.А. [10]</p>
<p>Интегральный показатель качества автотранспортных средств, <math>Q</math></p>	$Q = K_v K_o K_{эКВ} K_{СП} / S$	<p><math>K_v</math> – коэффициент совершенства по средней скорости;  <math>K_o</math> – комплексный показатель надежности;  <math>K_{эКВ}</math> – эквивалентный показатель оценки условий труда водителя;  <math>K_{СП}</math> – коэффициент учета специфических свойств машины;  <math>S</math> – суммарные затраты на достижение результата использования автомобиля.</p>	<p>Будалин С.В. [18]</p>

Продолжение табл. 1

Оценочный показатель (приведенные удельные затраты $Z_{уд}$ )	$Z_{уд} = \frac{C + E_H K}{K_B \Pi_T}$	$K_B$ – коэффициент использования объекта по времени; $\Pi_T$ – часовая производительность объекта.	Баловнев В.И. [19]
Технико-экономический показатель, $K_{тэ}$	$K_{тэ} = \frac{P}{3}$	$P$ – отношение полезного эффекта, $3$ – суммарные затраты за срок службы автомобиля	Будалин С.В. [10]
Показатель потребительской привлекательности, $K_{пп}$	$K_{пп} = C_p / ЭЦ$	$C_p$ – цена реализации автомобиля; $ЭЦ$ – эквивалентная цена, которая обеспечивает потребителю одинаковые экономические затраты на единицу транспортной работы в сравнении с ценой автомобиля, принятого за эталон.	Дажин В.Г. [10]
Обобщающего показателя – приведенных затрат, $3_i$	$3_i = S_i + E_H K_i \rightarrow \min$	$S_i$ – текущие затраты (себестоимость) по $i$ -му варианту, руб./год; $K_i$ – капитальные вложения по $i$ -му варианту, руб.	Хачатуров Т.С. [20]
Эффективность автомобиля, характеризующаяся себестоимостью перевозок	$S = \frac{C_{пер.ч} + C_{пост.ч}}{W_p}$	$C_{пер.ч}$ , $C_{пост.ч}$ – соответственно переменные и постоянные расходы за 1 ч работы, руб.; $W_p$ – часовая производительность автомобиля, т-км/ч.	Ванчукевич В.Ф.[21]
Приведенные затраты на перевозки, $3_n$	$3_n = C_э = \frac{E_H (K - C_n) 100}{W_T}$	$C_э$ – эксплуатационные расходы на перевозку, руб./т-км; $K$ – капиталовложения, необходимые для использования автомобиля или автопоезда, руб.; $C_n$ – ликвидационная стоимость автомобиля, руб.; $W_T$ – среднегодовая производительность транспортного средства, т-км.	Великанов Д.П. [22]
Масса народнохозяйственной чистой прибыли, $M_i$	$M_i = C_i - (C_i + E_H K_i) \Rightarrow \max$	$C_i, C_i, K_i$ – соответственно годовой доход, годовые затраты и капиталовложения по $i$ -му варианту.	Великанов Д.П. [10]
Эффективность эксплуатации автомобиля, $K_э$	$K_э = T / T_n$	$T$ – время функционирования автомобиля при выполнении транспортной задачи; $T_n$ – необходимое (целевое) время функционирования автомобиля для выполнения задачи.	Аксенов П.В. [10]

Продолжение табл. 1

1	2	3	4
Среднечасовая производительность труда $\Pi_{\text{ч}}$	$\Pi_{\text{ч}} = \frac{W_{\text{г}}}{T_{\text{в}} + T_{\text{н-р}} + T_{\text{а-у}} + T_{\text{тор}}}$	<p><math>T_{\text{в}}</math>, <math>T_{\text{н-р}}</math>, <math>T_{\text{а-у}}</math> – количество часов работы за год соответственно водителей, рабочих, выполняющих погрузочно-разгрузочные работы, и административно-управленческого персонала, ч;  <math>T_{\text{тор}}</math> – полная трудоемкость ТО и ремонта транспортного средства за год, чел-ч.</p>	Великанов Д.П. [10]
Энергоемкость перевозок, $\mathcal{E}$	$\mathcal{E} = \frac{100Q\delta\lambda}{W}$	<p><math>Q</math> – количество автомобильного топлива, расходуемого на перевозки за год, л;  <math>\delta</math> – плотность топлива, г/см<sup>3</sup>;  <math>\lambda</math> – теплотворная способность (калорийность) топлива; в среднем для бензинов = 10600 ккал/кг, для дизельного топлива = 10460 ккал/кг.</p>	
Металлоемкость перевозок, $M$	$M = \frac{1000(G - G_3 - G_{\text{н}} + K_{\text{д}}G_3)}{W_{\text{г}}T_{\text{а}}\eta}$	<p><math>G</math> – вес автомобиля в снаряженном виде, кг;  <math>G_3</math> – вес заправки, кг; 42  <math>G_{\text{н}}</math> – вес неметаллических частей, кг;  <math>G_3</math> – вес агрегатов, запасных частей и металла, расходуемого в процессе эксплуатации за срок службы автомобиля или автопоезда, кг;  <math>K_{\text{д}}</math> – коэффициент дорожных условий эксплуатации;  <math>T_{\text{а}}</math> – амортизационный срок службы автомобиля или автопоезда, лет;  <math>\eta</math> – коэффициент использования материала в производстве, являющийся отношением веса материала в товарном виде к весу в исходном (сырье), может быть принят для грузовых автомобилей, седельных тягачей, полуприцепов и прицепов равным 0,78.</p>	

Окончание табл. 1

1	2	3	4
Шиноемкость автомобиля, $M_{ш}$	$M_{ш} = \frac{1000n_{ш}G_{ш}}{L_{ш}q_{н}\gamma\beta}$	$n_{ш}$ – количество шин на автомобиле (без запасных), шт.; $G_{ш}$ – вес одной шины в комплекте с камерой и ободной лентой, кг; $L_{ш}$ – средний пробег шин, км; $q_{н}$ – номинальная грузоподъемность автомобиля, т.	

Если рассматривать многокритериальное оценивание при принятии какого-либо решения, то, прежде всего, необходимо определить связь, существующую между критериями и целью.

При оценке качественного уровня подвижности автотракторной техники с целью ее повышения в зависимости от конструкционных параметров и характеристик местности следует ввести некий критерий, который будет отражать подвижность рассматриваемого автотракторного объекта в количественном виде. Интегральный критерий, используемый для оценки качества объекта экспертизы, называют скалярным, а совокупность частных критериев, характеризующих дифференциальные качества объекта экспертизы – векторным критерием [1].

Согласно [3] в преобладающем большинстве отраслей, за редким исключением [4], оптимизация по векторному критерию практически не используется. Обычно большинство авторов ограничиваются однокритериальной оптимизацией без надлежащего ранжирования критериев и минимизации размерности критериального пространства [5]. Практически не используются и известные формализованные методы решения задач с ограничениями (в частности, метод последовательных уступок). Однако нередки случаи применения оценки по сложному интегральному критерию однопараметрического обобщенного аргумента, как весовой и нормированной совокупности частных аргументов дифференциальных критериев [2].

В работе [3] указывается, что «заклучение об эффективности функционирования сложных систем невозможно сделать на основании регистрации какого-либо одного показателя. Оценка, как правило, является многокритериальной и не сводится к стандартной оценке качества по одному критерию. Задания всей совокупности критериев часто недостаточно для выделения важнейшего: необходима дополнительная информация об относительной важности каждого из них».

Поскольку для оценки степени достижения каждой частной цели используется соответствующий ей критерий, то для представления системы критериев, предназначенных для оценки объекта, целесообразно использовать дерево критериев, отражающее структуру их иерархической подчиненности. Для того чтобы рассчитать для оцениваемого объекта значения критериев более высокого иерархического уровня, необходимо предварительно рассчитать значения критериев более низкого иерархического уровня.

Способы расчета значения критерия по значениям критериев более низкого иерархического уровня в настоящее время достаточно хорошо разработаны, и представлены, в частности, в работе [2].

Согласно [1] набор критериев, предназначенный для оценки объекта экспертизы, должен обладать рядом свойств, делающих его использование оправданным. В литературе (см. библиографию в работе [2]) по принятию управленческих решений они хорошо известны.

**Полнота.** Критерии, входящие в набор, должны обеспечивать адекватную оценку объекта экспертизы либо оценку степени достижения цели, стоящей перед лицом, принимающим решение (ЛПР). Другими словами, в наборе критериев *должны быть представлены критерии, характеризующие все основные аспекты оценки объекта экспертизы* либо степени достижения стоящей перед ЛПР цели. Получив значения оценок эксперта по каждому из критериев, входящих в состав набора интегрального критерия, необходимо иметь возможность определить требуемую оценку объекта экспертизы.

**Действенность** (операционность). Поскольку критерии предназначены для оценок объектов при принятии решений, они должны быть однозначно понимаемы как экспертами, так и ЛПР и способствовать выработке и принятию *эффективных решений*, то есть *характеризовать основные аспекты анализируемой ситуации и быть доступными для получения оценок по ним.*

**Разложимость.** Принцип разложимости отражает тот факт, что эксперту либо лицу принимающему решение удобнее работать с небольшим числом критериев. Если анализируемая ситуация такова, что она должна оцениваться с помощью слишком большого числа критериев, а, по оценке некоторых авторов [1], критериев должно быть не более 7, *то целесообразно разбить их (разложить) на более мелкие группы* для удобства одновременной работы с ними.

**Отсутствие избыточности.** Критерии должны быть не избыточными, чтобы *избежать дублирования при оценке анализируемой ситуации.* Бывает, что избыточность возникает за счет одновременного рассмотрения как критериев, характеризующих получаемые результаты, так и средств их достижения, либо одновременного рассмотрения как входных характеристик системы, так и выходных.

**Минимальная размерность.** Этот принцип также направлен на то, чтобы процедура многокритериального оценивания не была без необходимости слишком громоздкой и неадекватной. В набор критериев для оценки анализируемой ситуации *целесообразно включать лишь те критерии, без которых такая оценка невозможна, и произвести их нормировку к безразмерному виду.*

Для оценки по одному, определенному параметру необходимо перейти от интегральных критериев к частным, представляющих собой систему, в которой они могут быть рассмотрены как изолированные составляющие. Такие критерии как проходимость, эффективность и подвижность тесно связаны между собой и являются составляющими более общей системы - конкурентоспособности, но для оценки решений частных задач необходимо рассматривать их в частном порядке.

### **Критерии проходимости автотракторной и вездеходной техники**

Пройодимость – свойство машины, относящееся одновременно к среде и к машине, к их взаимодействию. Это характеристика комплексная, она включает в себя ряд факторов, среди которых основными являются: физико-механические свойства полотна пути, конструкционные параметры движителя машины, её технические характеристики. Проходимость рассматривается как одно из свойств подвижности, характеризующее способность машины преодолевать заданное расстояние кратчайшим путем, т.е. считается, что произошла потеря проходимости, если машина остановилась.

Для оценки проходимости машин по грунтам с низкой несущей способностью используются различные показатели, основные из которых приведены в табл. 2 [27].

Указанные показатели по своему физическому смыслу характеризуют: запас удельных сил тяги, неравномерность распределения давления, использования несущей способности грунта и погружение машины.

Таблица 2

## Критерии проходимости

Расчетная зависимость	Принятые обозначения	Автор
1	2	3
$\kappa_{\text{СЦ}}\varphi > f_r + (1 + \kappa_{\text{СЦ}})f_m + f_k + f_{\delta} + tg\alpha$	$\kappa_{\text{СЦ}}$ – коэффициент сцепного веса; $\varphi$ – коэффициент сцепления; $\alpha$ – угол подъема; $f_{fm}$ – коэффициент сопротивления грунта, шины качению колеса; $f_{\delta}$ – коэффициент бульдозерного сопротивления; $f_k$ – коэффициент сопротивления движения	Агейкин Я.С. [23]
$\Pi = \varphi - f;$ $\lambda_C = V/V_P;$ $\lambda_T = G_{ГР}/G_{ГР P};$ $\lambda_{\text{Э}} = Q/Q_P;$ $\lambda_P = N/N_P$	$\Pi$ – показатель проходимости; $\lambda_{\text{С,Т,Э,Р}}$ – коэффициенты скорости, грузоподъемности, экономичности, работоспособности; $V$ – скорость движения машины $V_P$ – расчетная скорость движения машины по дорогам с усовершенствованным покрытием	. Бабков В.Ф [24]
$K_{\text{ПОГР}} = h_k / H$	$h_k$ – глубина колеи $K_{\text{погр}}$ – коэффициент погружения $H$ – глубина болота, снега	Вараксин Ю.Н., Гмошинский В.Г. [25]
$\Pi = (1 - \sigma) / \psi;$ $\psi = f_{\delta} / f_{ГР}$	$\sigma$ – коэффициент буксования; $f_{\delta}$ $f_{ГР}$ – коэффициенты сопротивления движению по бетону и грунту	Софиян А.П. [26]
$\alpha = p_{\text{max}} / p$	$p_{\text{max}}$ – максимальное давление; $p$ – среднее давление	Гмошинский В.Г. [25]
$I = P_k / G$ $E = P_k V_0 / N$ $M = W_P V / N$	$I; E; M$ – коэффициенты удельной силы тяги, тягового к.п.д, грузоподъемности; $G$ – вес машины; $V_0$ – скорость машины $N$ – мощность ДВС $W_P$ – полезная нагрузка $V$ – скорость движения	Диксон В. [27]
$\Pi = (M_{\varphi} - M_f) / M_{\varphi}$	$M_f$ – момент сцепления колес с дорогой $M_{\varphi}$ – момент сопротивления движению	Кнороз В.И. Шарикян Ю.Э. [28]
$\Pi = 1 - f / \varphi$	$f$ – коэффициент сопротивления дороги $\varphi$ – коэффициент сцепления	Крагельский И.В. [29]
$H = \sqrt{\frac{h_1 P_1 / C + (h_1 - k)^3 P_2 \varepsilon}{G \cos \alpha}}$	$H$ – максимальная толщина снежного покрова, который может преодолеть машина; $h_1$ – величина погружения гусениц в снег; $P_1$ – площадь гусениц; $P_2$ – площадь днища машин; $k$ – клиренс; $C, \varepsilon$ – коэффициенты; $G$ – вес машины; $\alpha$ – угол наклона пути к горизонту	Крживицкий А.А. [30]

Окончание табл. 2

1	2	3
$K_{IP} = \varphi_{kmax} / \varphi_{kmax\Delta}$	$\varphi_{kmax}$ – коэффициент испытуемого автомобиля; $\varphi_{kmax\Delta}$ – коэффициент эталонного автомобиля	Платонов В.Ф. Чистов М.П. Аксенов А.И. [31]
Гусеница на опорных катках с пневматическими шинами: $MMP = 0,5W / 2n_r b \sqrt{D\delta_t}$	$W$ – вес машины; $n_r$ – число катков по борту; $b$ – ширина гусеницы; $D$ – диаметр катка; $t$ – шаг гусеницы;	Д. Роланд
Гусеница с жесткими опорными катками $MMP = 12,6W / 2n_r A_t b \sqrt{Dt}$	$\delta_t$ – радиальная деформация пневматической шины под нагрузкой; $A_t$ – площадь трака	
$K \geq h_{КОЛ}$	$K$ – дорожный просвет $h_{кол}$ – глубина колеи	Рукавишников С.В. [32]
$K_H = p_{max} / p_{CP}$	$K_H$ – коэффициент неравномерности распределения давления; $p_{нес}$ – несущая способность гусениц;	Скотников В.А. [33] Тетеркин А.Е.
$p_{нес} = A_0 + B_0 \Pi / S$	$\Pi$ – периметр и площадь гусениц $A_0; B_0$ – коэффициенты, характеризующие прочность торфяной залежи; $L$ – длина преодолеваемого участка;	
$T = L / V$	$V$ – средняя скорость движения	
$m = q / p$ $n = H / h$ $S = T_{ц} / W$	$m$ – показатель проходимости; $q$ – несущая способность постели; $P$ – наибольшее нормальное напряжение; $n$ – показатель погружаемости; $H$ – дорожный просвет; $h$ – глубина погружения; $S$ – показатель сцепляемости; $T_{ц}$ – предельное сцепление с грунтом; $W$ – сопротивление движению	Яржемский С.И. [34]

Использование запаса удельной силы тяги в качестве показателя проходимости машин по грунтам с низкой несущей способностью отвечает физической картине взаимодействия системы «местность – машина». Однако этот показатель весьма статичен, удобен только для сравнения проходимости нескольких машин в одинаковых условиях, кроме того, предполагает экспериментальное определение коэффициентов сцепления и сопротивления движению.

Неравномерность распределения давления и максимальное значение давления движителя на грунт являются очень важными параметрами, которые во многом определяют образование колеи, сопротивление движению и проходимость машины. В то же время использование их в качестве показателя проходимости является очень неудобным. Во-первых, они не обладают наглядностью и не дают прямую оценку проходимости, т.е. из информации о величине  $\alpha$  или  $P_{max}$ , например  $\alpha=2,3$  или  $P_{max}=150 \dots 200$  КПа, совершенно не ясно – машина проходит данный участок или нет. Во-вторых, из  $\alpha_1=\alpha_2$ , или  $P_{max1}=P_{max2}$  совсем не следует, что проходимость первой и второй машин одинаковая, также и из  $\alpha_1 < \alpha_2$  или  $P_{max1} < P_{max2}$  далеко не всегда следует, что проходимость первой машины выше, чем второй.

Интересный критерий предложен в работе [35]. Сравнительную оценку опорной проходимости предлагается проводить в паре с эталонным автомобилем, т. е. автомобилем, проходимость которого признана достаточно высокой.

Погружение машины является наиболее заметным внешним признаком при движении по снежной целине, поэтому оно часто использовалось в качестве оценочного параметра проходимости машин. При этом в качестве условия потери проходимости применялось неравенство [32, 36]:

$$h_{\text{кол}} \leq k, \quad (1)$$

где  $h_{\text{кол}}$  – глубина колеи;  $k$  – дорожный просвет.

Однако если снежное полотно пути имеет небольшую плотность, а движитель – высокие сцепные качества, то нарушение условия (1) не приведет к потере проходимости машины. На практике этот случай, по нашим наблюдениям, встречается достаточно часто. При этом машина деформирует снежный покров днищем, соответственно увеличивается сопротивление движению, но реакция снега, реализуемая в контакте движителя с полотном пути, достаточна для преодоления этого сопротивления. Поэтому условие (1) является заниженным при оценке проходимости машин по снегу.

В целом, проведенный анализ критериев проходимости машин по грунтам с низкой несущей способностью показал, что, определяя проходимость машин, для ее оценки стремились использовать какой-то простейший коэффициент или группу коэффициентов, которые не обладают наглядностью и не дают прямую либо дают заниженную оценку проходимости. При этом часто остается в стороне вопрос теоретического определения этих коэффициентов. Это в свою очередь не позволяет, с одной стороны, расчетным путем оценить проходимость существующих и проектируемых машин, с другой – наметить пути повышения их проходимости.

Наиболее рациональным критерием оценки проходимости наземных транспортных средств по снегу является, на наш взгляд, критерий, предложенный Л. В. Барахтановым [37].

Проходимость машин по снегу предлагается оценивать непосредственно по зависимостям силы тяги  $P_T$  (по сцеплению), силы сопротивления  $P_f$  и запаса силы тяги  $\Delta P$  от высоты снежного покрова (рис. 1), причем построение графиков целесообразно вести и в область отрицательных значений запаса силы тяги, что позволит в первом приближении определить, в какой степени надо изменить силу тяги и силу сопротивления движению, чтобы обеспечить проходимость машины в данных условиях.

При этом условием проходимости машины является наличие запаса силы тяги ( $\Delta P > 0$ ), а показателем проходимости – преодолеваемая высота данного снежного покрова  $H_{\text{пр}}$ . Предлагаемая оценка проходимости позволяет прогнозировать проходимость различных машин, и проводить их сравнение, оценивать проходимость машины при проектировании новых и модернизации существующих конструкций, определять влияние параметров машины на проходимость и наметить пути ее повышения. Вместе с тем, автор при выборе критерия, априори полагает, что сила тяги, которая может быть реализована в контакте со снежным полотном пути, меньше силы тяги, обеспечиваемой двигателем, т.е. раньше наступит полное буксование движителя, чем двигатель заглохнет.

Анализ тягово-динамических характеристик машин показывает, что это утверждение не всегда верно. Поэтому Аникин А.А. и Донато И.О. [38] предложили модернизировать данный критерий.

Известно, что потеря проходимости при движении машин по снегу может происходить по следующим причинам: сопротивление движению больше, чем сила тяги по двигателю  $P_d$  (проходимость по двигателю); сопротивление движению машины больше, чем сила тяги, реализуемая в контакте движителя со снежным полотном пути (проходимость по сцеплению). При этом возможны три варианта (рис. 2.):

- 1)  $P_d \geq P_T$ , для любых  $H$ , расчет проходимости ведется по силе тяги по сцеплению;
  - 2)  $P_d < P_T$ ;  $H < H_0$ , расчет проходимости ведется по силе тяги по двигателю;
  - 3)  $P_d \geq P_T$ ;  $H \geq H_0$ , расчет проходимости ведется по силе тяги по сцеплению;
- 3)  $P_d < P_T$ , для любых  $H$ , расчет проходимости ведется по силе тяги по двигателю.

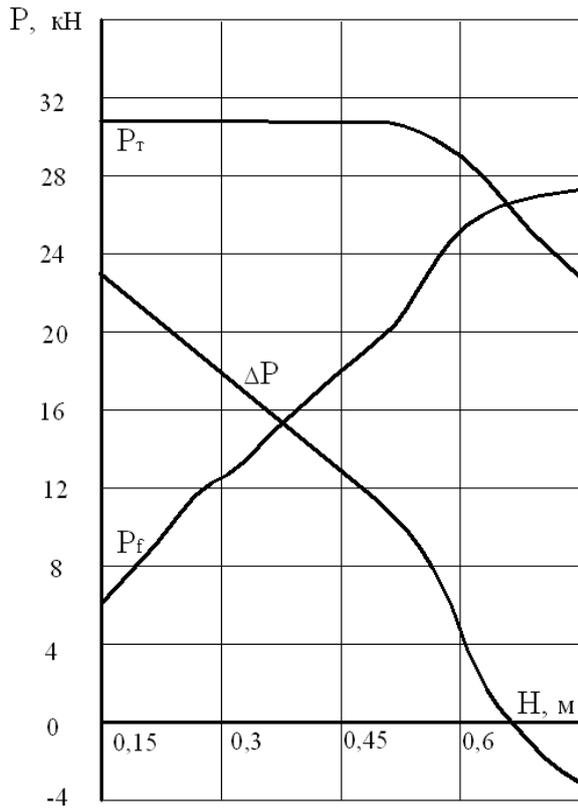


Рис. 1. Зависимости силы тяги, силы сопротивления и запаса силы тяги от высоты снега

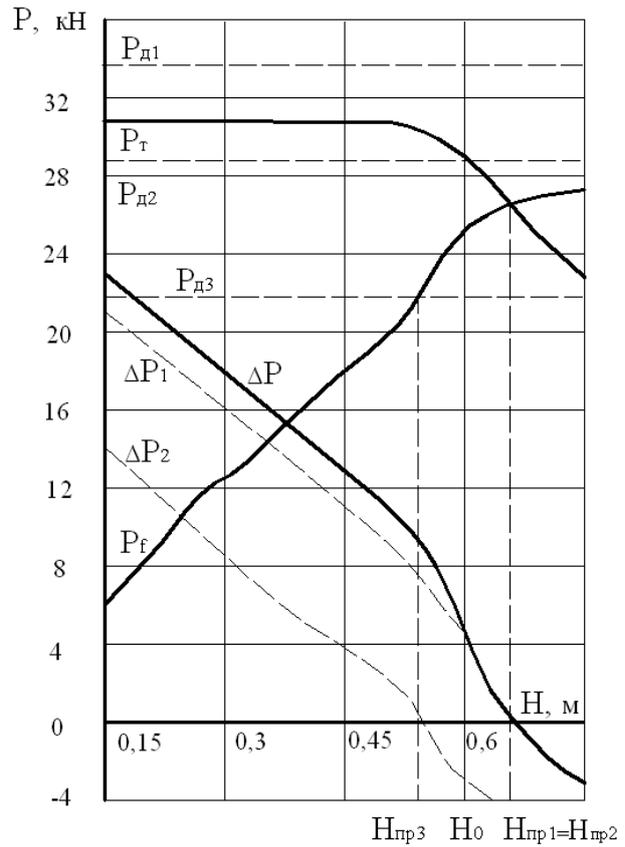


Рис. 2. Зависимости сил тяги, силы сопротивления и запаса силы тяги от высоты снега

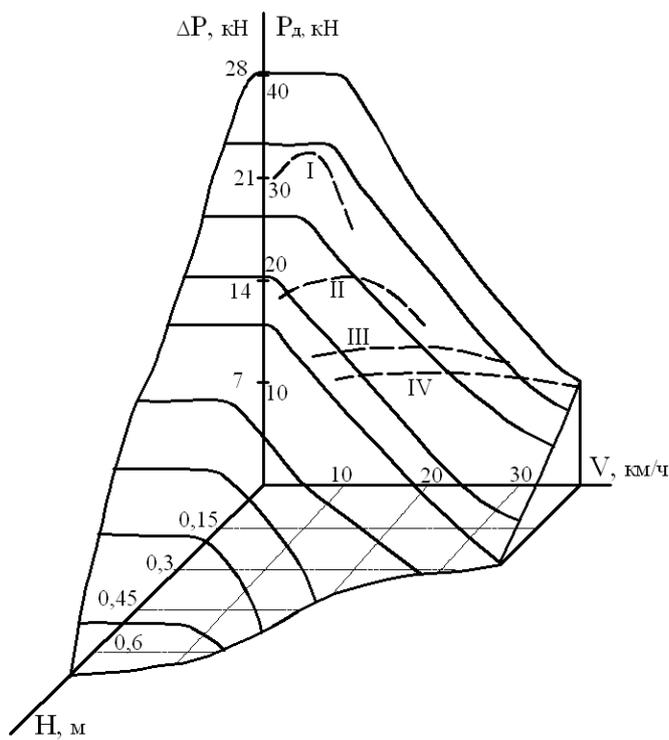


Рис. 3. Зависимость запаса силы тяги от высоты снега

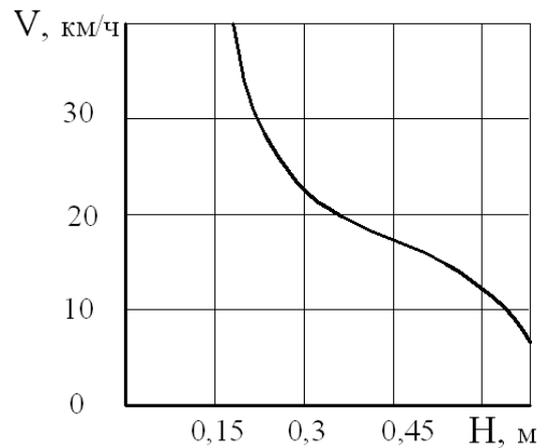


Рис. 4. Зависимость скорости движения от высоты снега

Тогда можно совместно рассмотреть зависимость запаса силы тяги  $\Delta P$  от высоты снега и тяговую характеристику машины  $P_d = f(V)$  и построить поверхность проходимости в зависимости от высоты снега  $H$  и скорости движения машины  $V$  (рис. 3). Совместное рассмотрение указанных закономерностей дает возможность рассчитывать подвижность машины, т.е. определять скорости движения в зависимости от высоты снега (рис. 4).

Таким образом, данный критерий позволяет оценивать проходимость и подвижность машины с учетом физико-механических свойств снега.

Современный уровень теории движения позволяет спроектировать ТС с большим запасом по проходимости, однако возникает вопрос об эффективности такой техники, так как материальные средства, затраченные на ее использование, могут превышать полученные, что приводит к отрицательному экономическому эффекту – снижению качества изделия.

### Критерии эффективности автотракторной и вездеходной техники

С развитием науки и техники растет значение постоянного совершенствования процесса разработки новой техники. В общем смысле под эффективностью следует понимать степень соответствия машины ожидаемым требованиям потребителей.

В работе [39] отмечается, что, несмотря на широкое использование, термин «эффективность» не имеет однозначной трактовки. Эффективность наиболее полно можно характеризовать сравнением результатов деятельности с затратами на их получение. Эффективность как бы является вектором деятельности, показывает ее направление, а величину этого вектора можно обозначить как эффект.

Следует различать экономическую, научно-техническую, социальную, экологическую, техническую эффективность и т.д. Необходимо особенно подчеркнуть, что стратегическим ориентиром инновационной политики РФ является энергетическая эффективность.

В контексте норм федерального закона «об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности» (23 ноября 2009 года N 261-Федеральный Закон) термин энергетическая эффективность определяется как характеристики, отражающие отношение полезного эффекта от использования энергетических ресурсов к затратам энергетических ресурсов, произведенным в целях получения такого эффекта.

Тематика проводимого в рамках данной работы исследования соответствует пункту Перечня критических технологий Российской Федерации «Технологии создания энергоэффективных двигателей и движителей для транспортных систем». К транспортным средствам предъявляются требования эффективно выполнять транспортную работу, то есть совершать грузовые или пассажирские перевозки в сложных дорожных условиях в максимально короткие сроки и с минимальными эксплуатационными затратами. В зависимости от функциональных требований применяются различные критерии оценки характеристик эффективности работы внедорожных транспортных средств. В их числе оценочные показатели, предложенные Бабковым В.Ф. [40-41]:

$$\Pi = \varphi - f, \quad (2)$$

$$\lambda_C = \frac{V}{V_p}, \quad (3)$$

$$\lambda_T = \frac{G_{TP}}{G_{TRP}}, \quad (4)$$

$$\lambda_{\mathcal{E}} = \frac{Q}{Q_p}, \quad (5)$$

$$\lambda_P = \frac{N}{N_p}, \quad (6)$$

где  $\Pi$  – показатель проходимости;  $\varphi$  – коэффициент сцепления;  $f_k$  – коэффициент сопротивления движению;  $\lambda_{C,T,\mathcal{E},P}$  – коэффициенты скорости, грузоподъемности, экономичности, работоспособности;  $V, G, Q, N$  – скорость движения машины, грузоподъемность, расход

топлива при движении по участку местности, пропускная способность; индекс «р» обозначает движение по дорогам с усовершенствованным покрытием.

Четыре перечисленных показателя позволяют оценить, в какой мере сохраняются показатели эксплуатационных свойств автомобиля при его использовании вне дорог по сравнению с условиями работы на усовершенствованных дорогах. Данные показатели дают удовлетворительный результат при сравнительной оценке проходимости одного автомобиля, движущегося по различным опорным поверхностям. Если использовать эти показатели для сравнения различных автомобилей в одних и тех же условиях движения, то у автомобилей, имеющих одинаковые параметры  $v_m$ ,  $m_{гм}$ ,  $Q_m$  на определенных поверхностях движения, показатели проходимости ниже у автомобилей, имеющих более высокие значения  $v$ ,  $m_r$ ,  $Q$  на дорогах с усовершенствованным покрытием. По этой причине показатели  $\lambda_c$ ,  $\lambda_r$ ,  $\lambda_s$  дорожных неполноприводных автомобилей всегда занижены по сравнению с полноприводными автомобилями.

Для оценки проходимости машин Диксон В. [42] вводит три коэффициента:

$$I = P_k/G, \quad (7)$$

$$E = P_k V_o/N, \quad (8)$$

$$M = W_p V/N, \quad (9)$$

где  $I$ ,  $E$ ,  $M$  – коэффициенты удельной силы тяги, тягового к.п.д., грузоподъемности;  $G$  – вес машины;  $V_o$  – скорость машины;  $N$  – мощность ДВС;  $W$  – полезная нагрузка;  $V$  – скорость движения.

Бронштейн Я.И. предложил оценивать эффективность функционирования транспортных средств с помощью фактора проходимости:

$$\Pi = \frac{G_m}{G_0} V_m, \quad (10)$$

где  $G_m$  – максимальная грузоподъемность колесной машины, а  $G_0$  – собственный вес автомобиля,  $V_m$  – величина фактической средней скорости движения по маршруту.

Бронштейн Я.И. [43], а позже Безбородова Г.Б. [44] предложили более сложные (комплексные) показатели проходимости для оценки эффективности использования автомобиля вне дорог. Ими предложено в качестве оценки проходимости автомобиля рассматривать отношение фактической производительности автомобиля в данных тяжелых дорожных условиях к его максимальной конструктивной производительности в хороших дорожных условиях. Бронштейн этот критерий именуется «коэффициентом ограничения проходимости», а Безбородова – «критерием проходимости»:

$$C = \frac{G_{оэп} V_{оэп}}{G_{зр} V_a}, \quad (11)$$

где  $G_{зр}$ ,  $V_a$ ,  $G_{оэп}$ ,  $V_{оэп}$  – соответственно номинальная грузоподъемность и максимальная скорость движения машины по дорогам с усовершенствованным покрытием, и грузоподъемность и скорость в данных дорожных условиях.

Гребенщиков В.И. [45] предложил оценивать проходимость следующим коэффициентом – обобщенный эксплуатационный показатель:

$$A = G_{зр} S/tQ, \quad (12)$$

где  $G_{зр}$  – грузоподъемность;  $t$  – время движения;  $S$  – пройденный путь;  $Q$  – расход топлива за пробег.

В качестве обобщающего (комплексного) показателя проходимости автомобиля в научно-исследовательском автомобильном и автомоторном институте (НАМИ) был предложен «фактор проходимости»  $\Pi$ , определяемый по формуле [46]:

$$\Pi = (m_m S_m / t_m Q_m) / (m_{иу} S_{иу} / t_{иу} Q_{иу}), \quad (13)$$

где  $m$  – масса перевозимого груза;  $S$  – длина преодолеваемого участка;  $t$  – время движения по этому участку;  $Q$  – масса израсходованного на этом участке топлива; индексы «м» и «иу» обозначают соответственно движение по участку местности и по эталонной дороге.

Выражение в правой части, по сути, представляет собой два обобщенных эксплуатационных показателя В.И. Гребенщикова, где первый показатель характеризует движение колесной машины в данных дорожных условиях, а второй – при движении по эталонной дороге. То есть, это выражение показывает, насколько снижается средняя скорость, полезная нагрузка и экономичность колесной машины, эксплуатирующейся в данных дорожных условиях по сравнению с эталонным маршрутом.

Так же, как и показатели проходимости, комплексные факторы проходимости могут быть применены для сравнительной оценки эффективности использования конкретного автомобиля на различных участках местности, расположенных вне дорог [47].

Беккер М.Г. предложил оценивать проходимость колесных машин коэффициентом эффективности [48, 49]:

$$\eta_{or} = \frac{W_p V}{u_h l}, \quad (14)$$

где  $W_p$  – полезная нагрузка,  $V$  – скорость колесной машины в данных дорожных условиях,  $u_h$  – часовой расход топлива,  $l$  – оперативный запас хода. Если из этого выражения убрать оперативный запас хода, то оно преобразуется в выражение В.И. Гребенщикова.

Аналогичным является показатель полезной производительности, предложенный В.Ф. Платоновым (только без учета расхода топлива)[50]:

$$\Pi = \frac{G_m S}{t} \text{ или } \Pi = G_m V_m. \quad (15)$$

Для характеристики эффективности внедорожного транспортного средства по реализации мощности двигателя в мощность на крюке Дж. Вонг [51] предложил использовать коэффициент тяговой эффективности. Он определяется как отношение мощности на крюке  $P_d$  к соответствующей мощности  $P$ , вырабатываемой двигателем:

$$\eta_d = \frac{P_d}{P} = \frac{F_d V}{P}, \quad (16)$$

где  $V_n V_t$  – действительная и теоретическая скорости машины соответственно,  $F$  – тяговая сила,  $\sum R$  – результирующая сила сопротивления движению,  $i$  – коэффициент буксования. Теоретическая скорость — это скорость машины при отсутствии пробуксовки, определяемая частотой вращения коленчатого вала двигателя, передаточным отношением трансмиссии и радиусом колеса.

Мацкерле Ю. и Вонг Дж. [51] ввели удельную транспортную эффективность, которая определяется как отношение транспортной производительности к соответствующей входной мощности системы:

$$\eta_{tr} = \frac{W_p V}{P}, \quad (17)$$

где  $W_p$  – полезная нагрузка,  $P$  – мощность двигателя колесной машины.

Последние формулы более удобны для сравнения колесных машин, так как в них отсутствует трудноопределимый показатель  $Q$ .

В работе [52] приводится КПД, оценивающий эффективность перевозочной работы  $h_{na}$ . Функционирование автомобиля целесообразно оценивать с помощью «КПД транспортного процесса» («КПД по перемещению полезного груза»), характеризующего уровень эффективности перевозочного процесса.

В работе [53] приводится следующий коэффициент эффективности:

$$P_{эф} = V_{cp} / Q_{SK}, \quad (18)$$

где  $Q_{SK}$  – контрольный расход топлива, л/100 км;  $P_{эф}$  – коэффициент эффективности, км<sup>2</sup>/(ч·л).

Для сравнительной оценки автомобилей, отличающихся по грузоподъемности, рекомендуется [54] комплексный показатель – удельная производительность:

$$W_{y\partial} = (m_n V_{cp}) / Q_s [m \cdot км^2 / ч \cdot л], \tag{19}$$

где  $m_n$  – масса перевозимого груза, т.

В этой же работе отмечается, что этот показатель характеризует эффективность работы автомобиля с учетом его грузоподъемности, скорости движения и соответствующего расхода топлива.

В работе [55] в качестве критерия технико-эксплуатационной эффективности принимается условная удельная производительность:

$$W_{y\partial} = (m_a V_{cp}) / Q_s [m \cdot км^2 / ч \cdot л], \tag{20}$$

где  $m_a$  – полная масса автомобиля, т.

В работе [54] вводится коэффициент эффективности работы автомобиля:

$$\eta_{эф} = ((m_n V_{cp}^2) / (Q_s \gamma_m)) C, \tag{21}$$

где  $C$  – постоянный коэффициент  $C=1/115000$ ;  $\gamma_m$  – удельный вес топлива.

Данный коэффициент эффективности работы автомобиля характеризует эффективность превращения тепловой энергии топлива в кинетическую энергию полезной нагрузки. Чем выше  $\eta_{эф}$ , тем эффективнее работа автомобиля.

В работе [56] для оценки и формирования технико-экономической эффективности ТС – критерий технико-экономической эффективности  $K_{m-ээ}$ , (тк·м/л):

$$K_{m-ээ} = (m_a V_{cp}) / G_{mcp}. \tag{22}$$

В данной формуле:  $G_{mcp}$  – средний часовой расход топлива (л/ч), соответствующий средней скорости движения  $V_{cp}$ .

Основные из рассмотренных критериев оценки эффективности использования транспортных средств сведены в табл. 3 [81].

Таблица 3

Критерии оценки эффективности использования колесных машин

Критерий	Расчетная зависимость	Автор
1	2	3
Коэффициент эффективности $\eta_{0r}$	$\eta_{0r} = \frac{W_p V}{U_h L}$	Беккер М.Г. [48]
Удельная транспортная эффективность $\eta_{tr}$	$\eta_{tr} = \frac{W_p V}{P_e}$	Вонг Дж. [51]
Коэффициент полезной мощности силовой установки $f_{pe, cy}$	$f_{pe, cy} = \frac{P_e}{(m_a g) V}$	Ларин В.В. [57]
Удельная производительность машины $W_{y\partial}$	$W_{y\partial} = (m_r V) / Q_s$	Токарев А.А. [47]
Коэффициент удельной грузоподъемности $M$	$M = \frac{(W_p V)}{P_e}$	Диксон В. [27]
Обобщенный эксплуатационный показатель $A$	$A = (m_s S) / (t Q_s)$	Гребенщиков В.И. [45]
Тяговый к.п.д. Машины; Коэффициент тяговой эффективности $\eta_d$	$\eta_d = \frac{F_{KP} V}{P_e}$	Панов В.И., Вонг Дж. [51]

Окончание табл. 3

1	2	3
Критерий технико-экономической эффективности $K_{m-э}$	$K_{m-э} = (m_a V) / U_h$	Трембовельский Л.Г. [56]
Показатель энергетической эффективности колесной машины	$\frac{A_{ПОЛ}}{A_{СОВ}} = \frac{\int R_X \cdot V dt}{\int M_{ТР} \cdot \omega_K dt}$	Горелов В.А. [46]
<p><math>m_e</math> – масса перевозимого груза; <math>w_p</math> – полезная нагрузка; <math>q_s</math> – путевой расход топлива; <math>v</math> – скорость движения машины; <math>p_e</math> – потребляемая мощность двигателя; <math>t</math> – время движения; <math>s</math> – пройденный путь; <math>u_h</math> – часовой расход топлива; <math>l</math> – оперативный запас хода; <math>m_a</math> – полная масса машины; <math>f_{кр}</math> – сила тяги на крюке машины; <math>A_{ПОЛ} = \int R_X \cdot V dt</math> – «полезная» работа силы тяги на колесах; <math>A_{СОВ} = \int M_{ТР} \cdot \omega_K dt</math> – «совершенная» работа подводимого к колесам крутящего момента.</p>		

Для оценки энергетической эффективности колесной машины при движении по снегу в работах [58, 59] предлагается использовать следующий показатель, равный отношению «полезной» работы силы тяги на колесах  $A_{ПОЛ} = \int R_X \cdot V dt$  к «совершенной» работе подводимого к колесам крутящего момента  $A_{СОВ} = \int M_{ТР} \cdot \omega_K dt$ .

$$\frac{A_{ПОЛ}}{A_{СОВ}} = \frac{\int R_X \cdot V dt}{\int M_{ТР} \cdot \omega_K dt}. \quad (22)$$

Также оценку эффективности возможно проводить посредством использования следующих показателей [58, 59]:

- отношение «совершенной» работы  $A_{СОВ}$  к пройденному пути  $X$ ;
- значения соотношений работы  $A_{СОВ}$  к пройденному пути  $X$  и  $A_{ПОЛ}$  к пройденному пути  $X$ .

Для выбора рациональных параметров движителя транспортного средства с точки зрения энергетической эффективности в работах [60-63] предложен следующий метод. Основными показателями взаимодействия компонентов системы «местность-машина» являются тяговое усилие и крутящий момент. В то время как тяговое усилие определяет проходимость машины, крутящий момент непосредственно связан с потреблением энергии [60-63]:

$$\begin{aligned} T &= \left(\frac{D}{2}\right)^2 b \int_{\theta_1}^{\theta_2} \tau(\theta) d\theta, \\ P &= T\omega, \\ E &= \int_{t_0}^{t_f} T(t)\omega(t) dt. \end{aligned} \quad (23)$$

Таким образом, (при постоянной скорости) необходимо стремиться к максимизации тягового усилия и сведению к минимуму крутящего момента, необходимого для реализации этого тягового усилия. Рассматриваемые силовые факторы определяются размерами колесного движителя.

Разнообразие транспортно-технологических машин на базе автотракторной техники, используемых человеком в своей ежедневной экономическо-производственной и социально-политической деятельности, привело к созданию множества оценочных комплексов их эффективности.

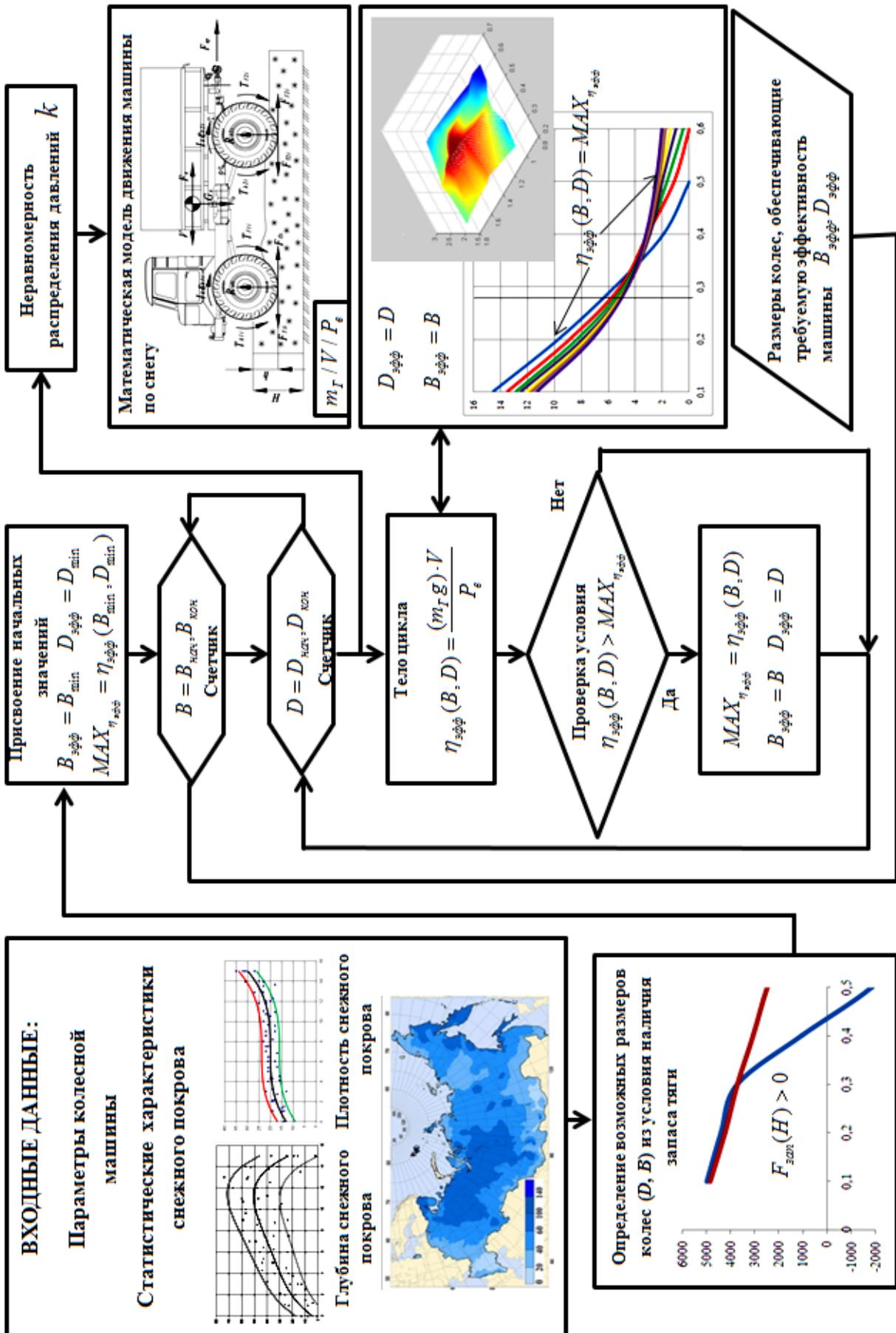


Рис.5. Методика расчета эффективности транспортно-технологической машины

При разработке транспортно-технологических машин (ТТМ) для бездорожья и в том числе для заснеженной местности (как наиболее сложной для движения), проектировщик задается вопросом обеспечения необходимого уровня проходимости машины. Незученным моментом при проектировании колесных машин является расчет эффективности их движения на местности. При этом, если машины обладают достаточной проходимостью на местности, это еще не означает, что во всех случаях это достигается рациональным образом по эффективности. Под эффективностью понимается обобщающий показатель, характеризующий отношение результатов деятельности к затратам на их получение.

Повышение эффективности ТТМ при движении может быть достигнуто за счет усовершенствования конструкции как самой машины, так и её движителя. Также при оценке эффективности движения ТТМ необходимо учитывать степень ее соответствия условиям эксплуатации. Проходимость и эффективность должны быть сопоставлены с меняющимися в течение года погодными условиями.

Наиболее рациональным критерием оценки эффективности ТТМ при движении является показатель, определяемый как отношение транспортной производительности к соответствующей входной мощности системы (потребной мощности двигателя):

$$\eta_{\text{эфф}} = \frac{(m_T g) \cdot V}{P_e}, \quad (24)$$

где  $m_T$  – масса перевозимого груза;  $V$  – скорость транспортного средства;  $P_e$  – потребная мощность двигателя машины.

На рис. 5 представлена блок-схема методики выбора конструкционных параметров движителей ТТМ на основе расчетной оценки эффективности движения машин по бездорожью, в частности по снегу. В предложенной методике используется цикл со счётчиком (перебор), в котором базовые геометрические размеры движителя изменяют своё значение от заданного начального значения до конечного значения с некоторым шагом, и для каждого соотношения размеров тело цикла выполняется один раз. Начальные значения параметров движителя определяются из условия проходимости (наличия запаса силы тяги), а рациональные с точки зрения эффективности – в результате решения задачи «поиска максимального элемента массива». В качестве элементов массива данных выступают значения эффективности транспортно-технологической машины при движении по бездорожью (снегу), а в качестве индексов этих элементов – параметры конструкционных элементов движителя из заданного диапазона, существующих и возможных для использования.

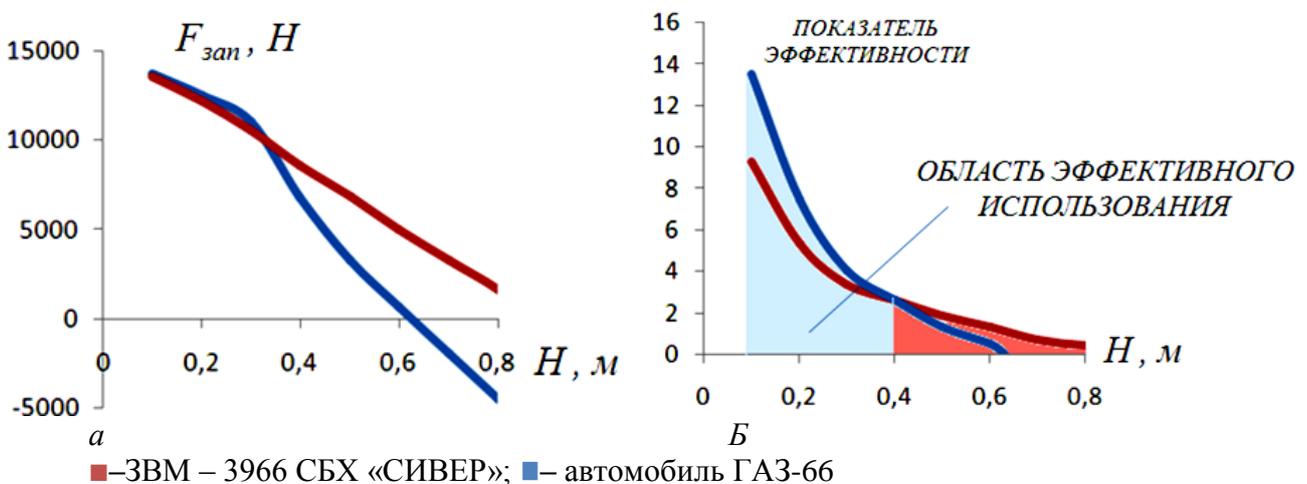


Рис. 6. Зависимости:

*а* – запасов силы тяги сравниваемых машин от высоты снега;  
*б* – показателей эффективности сравниваемых машин от высоты снега

На рис. 6 приведен пример результатов расчетных исследований проходимости и эффективности для автомобилей ГАЗ 66 на шинах КИ-115А 12.00 R18 (рис. 6, а) и ЗВМ – 3966 СБХ «СИБЕР» на шинах ИЯВ-79 (21,3-24) 1400x540 (рис. 6, б). Полные массы автомобилей близки и находятся в пределах 5800 – 6150 кг. Представленные графики демонстрируют следующее: при выборе конфигурации движителя необходимо учитывать, что при обладании колесными машинами проходимость в заданных условиях их эффективность может быть различной.

Данные графики иллюстрируют то, что при глубинах снега менее 0,4 м эффективнее для выполнения транспортно-технологических операций использовать стандартный автомобиль, а для больших глубин модифицированную колесную машину.

Критерии эффективности и проходимости являются обособленными и абсолютно не коррелируют друг с другом, поэтому необходимо ввести интегрирующий критерий, которым является критерий оценки подвижности.

### Критерии оценки подвижности автотракторной техники

Обзор работ по подвижности автотракторной техники проведен в работе [64]. Авторы данной работы в публикациях [65-89] позиционируют подвижность как интегральное эксплуатационное свойство транспортно-технологических машин (ТТМ), определяющее её способность выполнять поставленную задачу с оптимальной адаптивностью к условиям эксплуатации и техническому состоянию самой машины, то есть возможность машины противостоять внешним и внутренним факторам, препятствующим выполнению поставленной задачи. Таким образом, процесс поддержания подвижности является ключевым в решении проблемы обеспечения устойчивого и безопасного функционирования мобильных наземных транспортных машин и транспортно-технологических комплексов.

На рис. 7 в соответствии с изложенной в работах [90, 91] типологизацией систем управления транспортно-технологическими машинами по классификационному признаку (решаемая задача управления) представлена четырехуровневая взаимопоглощающая конструкция управления ТТМ. Как видно из схемы, управление подвижностью мобильных наземных транспортных машин и транспортно-технологических комплексов замкнуто в процессе поддержания устойчивой работы и обеспечивает эксплуатационную и конструкционную подвижность.

*Эксплуатационная подвижность* (ЭП) определяет возможность выполнения поставленной задачи по условиям эксплуатации, включающим в себя как характеристики местности, так и режимы нагружения машины.

*Конструкционная подвижность* (КП) связана с техническими характеристиками машины, которые в ходе эксплуатации могут существенно изменяться и приводить как к частичной потере подвижности, так и к ее полной потере. Изменения конструкционной подвижности связаны, с одной стороны, с износом узлов, систем и деталей машины, что приводит к отказам функционирования, а с другой стороны, с разрушениями конструкции, обусловленными «агрессивностью» внешней среды. Агрессивность внешней среды может проявляться весьма в разнообразных формах, однако чаще всего это механические воздействия: износные и ударные. Износы определяют отказную надежность машины, а ударные механические взаимодействия – могут носить как естественный характер вследствие контакта с местностью, так и искусственный при столкновениях с другими машинами и/или объектами внешней среды, а также повреждения, полученные в ходе боевых действий и террористических актов от воздействия средств поражения со стороны противника.

Подвижность (П) машины есть обобщенная функция эксплуатационной и конструкционной подвижностей.

$$П = f(ЭП; КП). \quad (25)$$

С позиции подвижности машины сложно ввести разграничения на активную и пассивную безопасности, так как эти понятия охватывают широкий круг задач, связанных с поддержанием устойчивого и безопасного движения, и не имеют четких границ разделения.

Более приемлемым является выделение подвижности по мобильности и живучести, которые дополняются задачей устранения критических ситуаций – динамической адаптивностью наземных транспортных машин и транспортно-технологических комплексов к текущему состоянию машины и местности.



Рис. 7. Иерархия задач управления ТТМ [84]

Подвижность по мобильности (мобильность – от лат. mobilis – подвижный) - способность машины к быстрому передвижению, действию. По существу, этот термин относится к

понятию «движение» или более широко определяет «готовность к быстрой реакции, быстрому включению в деятельность». Это может быть, буквально, физическое движение или движение через некоторые «сферы», которые могут быть природные, климатические, дорожно-транспортные, технические, социальные. Термин «мобильность» обычно используется с уточняющими определениями. Например, тягово-скоростная мобильность, курсовая и траекторная мобильность. Все эти понятия объединяются в способность к движению в каких-либо условиях и решаются в трех основных задачах управления машиной: поддержание скорости движения, обеспечение курсовой ориентации, устранение критических ситуаций. Последняя задача управления осуществляет динамическую адаптивность машины к условиям эксплуатации и к собственному техническому состоянию. В англоязычной интерпретации теории подвижности этой задачи в соответствие ставится термин – agility (быстрота, ловкость, живость, резвость, проворство, сообразительность).

Оценка мобильности и построение алгоритмов управления автотракторной техникой выполняются на основе следующих критериев: 1) по запасу тягового усилия; 2) по балансу мощности; 3) по курсовой ориентации (управляемости и маневренности). При этом имеют место следующие решения задачи поддержания подвижности по мобильности: 1) концепция управления движением ( $\lambda_p = \text{var}$ ,  $\lambda_k = \text{const}$ ,  $\lambda_s = \text{const}$ ) – для заданных условий эксплуатации и данной конструкционной конфигурации машины определяются оптимальные режимы управления движением; 2) концепция конструкции машины ( $\lambda_k = \text{var}$ ,  $\lambda_p = \text{const}$ ,  $\lambda_s = \text{const}$ ) – для заданных условий эксплуатации и выбранных режимов управления движением определяется рациональная конструкционная конфигурация машины; 3) концепция условий эксплуатации ( $\lambda_s = \text{var}$ ,  $\lambda_k = \text{const}$ ,  $\lambda_p = \text{const}$ ) – для данной конструкционной конфигурации машины и выбранных режимов управления движением определяются критические характеристики условий эксплуатации. Здесь  $\lambda_k$  – параметры машины, включая параметры двигателя;  $\lambda_s$  – характеристики эксплуатационных условий, включая свойства и параметры полотна пути;  $\lambda_p$  – параметры, характеризующие режимы движения как кинематические, так и силовые. Причем эти параметры могут рассматриваться как по отдельности, так и в виде каких-либо комплексных характеристик  $\lambda \equiv \xi(\lambda_k, \lambda_s, \lambda_p)$ .

Подвижность по живучести (жизнестойкость) – обеспечение управления состоянием машины, направленным на поддержание работоспособности наземных транспортных систем и транспортно-технологических комплексов к текущему состоянию машины и местности. При этом следует различать частичную и полную потерю работоспособности.

Жизнестойкость машин можно разделить на отказную, связанную с износами, и эксплуатационную, которая определяется функционированием машины в природно-климатической среде и социально-технической сфере деятельности. Таким образом, жизнестойкость может быть связана не только со свойствами местности, но с воздействиями от деятельности человека, например, техногенные катастрофы, военные действия, дорожно-транспортные происшествия, сверхтяжелые (ненормированные) режимы работы.

Жизнестойкость может быть разделена на структурную и функциональную составляющие. Если исследование структурной составляющей живучести в основном сводится к выявлению уязвимых мест в топологии системы и определению степени их влияния на целостность системы, то исследование функциональной составляющей живучести сводится к определению способности системы решать стоящие перед ней задачи при изменяющихся возможностях ее элементов.

Оценка жизнестойкости машины по отказной надежности проводится по критерию вероятности безотказной работы, а по эксплуатационной надежности – вероятности работоспособности в послеаварийном или пораженном состоянии.

Комплексная оценка подвижности наземных транспортных машин и транспортно-технологических комплексов производится на основе системы критериев и ограничивающих условий:

- по мобильности

$$\Delta P_{\varphi}(\Phi_{\varphi}, \Phi_f, \lambda) \rightarrow \max_{\lambda \in \Lambda} \text{ при } \Delta P_{\varphi}(\Phi_{\varphi}, \Phi_f, \lambda) \geq 0, \quad (26)$$

$$W_{\varphi}(\Phi_{\varphi}, \lambda) \rightarrow \min_{\lambda \in \Lambda} \text{ при } W_{\varphi}(\Phi_{\varphi}, \lambda) \geq [W_f(\Phi_f, \lambda) + \Delta W(\Phi_{\varphi}, \Phi_f, \lambda)], \quad (27)$$

$$\Phi_R(\Phi_{\varphi}, \Phi_f, \lambda) \rightarrow \min_{\lambda \in \Lambda} \text{ при } \Phi_R(\Phi_{\varphi}, \Phi_f, \lambda) \leq 0; \quad (28)$$

- по живучести

$$R_{\text{он}}(\Phi_{\varphi}, \Phi_f, \lambda, t) \rightarrow \max_{\lambda \in \Lambda} \text{ при } R_{\text{он}}(\Phi_{\varphi}, \Phi_f, \lambda, t) \geq R_{\eta}(\Phi_{\varphi}, \Phi_f, \lambda, t); \quad (29)$$

$$R_{\text{эн}}(\Phi_{\text{ив}}, \lambda, t) \rightarrow \max_{\lambda \in \Lambda} \text{ при } R_{\text{эн}}(\Phi_{\text{ив}}, \lambda, t) \geq R_{\gamma}(\Phi_{\text{ив}}, \lambda, t). \quad (30)$$

Критерии построены в зависимости от параметров взаимодействия движителя с полотном пути  $\Phi_{\varphi}$ ,  $\Phi_f$  и с учетом других характеристик  $\lambda \equiv \xi(\lambda_k; \lambda_s; \lambda_p)$ . Здесь  $\Delta P_{\varphi}$  – запас силы тяги,  $W_{\varphi}$  – мощность реализуемая движителем по сцеплению,  $\Delta W = W_{\text{эу}} - W_f$  – запас мощности по двигателю,  $W_{\text{эу}}$  – мощность энергетической установки,  $W_f$  – мощность сопротивлений,  $\Phi_R$  – обобщенная функция радиуса кривизны траектории движения,  $R_{\text{он}}$  – вероятность безотказной работы,  $R_{\eta}$  – предельная вероятность безотказной работы техники в оптимальных (заданных для расчета) условиях работы и технологии изготовления машины;  $R_{\text{эн}}$  – вероятности работоспособности в послеаварийном или пораженном состоянии,  $\Phi_{\text{ив}}$  – обобщенная функция интенсивности аварийного или поражающего воздействия,  $R_{\gamma}$  – предельная вероятность работоспособности техники после заданной (в расчетах) интенсивности аварийного или поражающего воздействия,  $t$  – время работы или воздействия в соответствии с рассматриваемым типом надежности.

Представленную систему критериев (48)-(52) с ограничивающими условиями можно свести к более обоснованной системе целевых функций:

$$\Phi_{\varphi}(\lambda) \rightarrow \max_{\lambda \in \Lambda}, \quad (31.a)$$

$$\Phi_f(\lambda) \rightarrow \min_{\lambda \in \Lambda}, \quad (31.б)$$

$$v(\lambda) \rightarrow \max_{\lambda \in \Lambda}, \quad (31.в)$$

$$\rho(\lambda) \rightarrow \min_{\lambda \in \Lambda}, \quad (31.г)$$

$$R(\lambda) \rightarrow \max_{\lambda \in \Lambda}. \quad (31.д)$$

Здесь  $\Phi_{\varphi}$  – обобщенная функция сцепления движителя машины с материалом опорного основания;  $\Phi_f$  – обобщенная функция сопротивления движению машины;  $v$  – скорость движения машины;  $\rho = R_{\text{п}} / B$  – относительный радиус поворота, где  $B$  – колея машины,  $R$  – вероятность безотказной работоспособности машины, как функция  $R(R_{\text{он}}; R_{\text{эн}})$  отказной и эксплуатационной надежности;  $\lambda$  – конструкционные ( $\lambda_k$ ), эксплуатационные ( $\lambda_s$ ) и режимные ( $\lambda_p$ ) параметры и характеристики машины и процесса ее движения.

Решение задачи многокритериальной оптимизации представленной системой уравнений (31) подробно изложено в работе [2].

Для решения данной задачи, носящей многокритериальный характер, используем ме-

тод свертывания векторного критерия, учитывающего относительную важность частных критериев оптимальности с помощью построения скалярной функции (поливектора нулевого ранга)  $F$ , являющейся обобщенным критерием оптимальности. Рассмотрим функцию  $F$  с аддитивным критерием оптимальности [2]

$$F(w, \tilde{Q}) = \sum_{i=1}^5 w_i \tilde{Q}_i, \quad (32)$$

где  $\tilde{Q} = \{\tilde{Q}_1, \tilde{Q}_2, \tilde{Q}_3, \tilde{Q}_4, \tilde{Q}_5\}$  – вектор частных критериев,  $w = \{w_1, w_2, w_3, w_4, w_5\}$  – весовые коэффициенты относительной важности частных критериев, которым при решении предлагается дать точные численные оценки, причем  $\sum_{i=1}^5 w_i = 1$ .

Поставим в соответствие  $\tilde{Q}_1$  нормированную функцию сцепления движителя с материалом опорного основания  $(N_\phi(\lambda_k, \lambda_s, \lambda_p))$ ,  $\tilde{Q}_2$  – нормированную функцию сопротивления движению машины  $(N_f(\lambda_k, \lambda_s, \lambda_p))$ ,  $\tilde{Q}_3$  – нормированную скорость движения машины  $(N_v(\lambda_k, \lambda_s, \lambda_p))$ ,  $\tilde{Q}_4$  – нормированный относительный радиус поворота  $(N_p(\lambda_k, \lambda_s, \lambda_p))$ ,  $\tilde{Q}_5$  – нормированную вероятность безотказной работы машины  $(N_R(\lambda_k, \lambda_s, \lambda_p))$ . Здесь, как и ранее,  $\lambda_k$  – параметры машины, включая и параметры движителя,  $\lambda_s$  – характеристики эксплуатационных условий, включая свойства и параметры полотна пути,  $\lambda_p$  – параметры, характеризующие режимы движения как кинематические, так и силовые.

При постановке проблемы подвижности автотракторной техники в работе [2] были представлены три решения задачи ее поддержания:

- 1) концепция управления движением ( $\lambda_k = \text{const}, \lambda_s = \text{const}, \lambda_p = \text{var}$ );
- 2) концепция конструкции машины ( $\lambda_k = \text{var}, \lambda_s = \text{const}, \lambda_p = \text{const}$ );
- 3) концепция условий эксплуатации ( $\lambda_k = \text{const}, \lambda_s = \text{var}, \lambda_p = \text{const}$ ).

Решения имеют непосредственное отношение лишь к ограниченным задачам поддержания подвижности автотракторной техники и созданных на ее основе транспортно-технологических машин. Однако имеют место и другие варианты решения проблемы поддержания подвижности, которые определяются функцией «var-const» по отношению к параметрам  $\lambda_k, \lambda_s, \lambda_p$ . При этом наиболее интересным является комплексное решение задачи подвижности, когда  $\lambda_k = \text{var}, \lambda_s = \text{var}, \lambda_p = \text{var}$ , то есть оценка конкурентоспособности существующей, модифицируемой или вновь создаваемой автотракторной техники. Такая постановка задачи многокритериальной оптимизации и методы ее решения рассматриваются в третьей главе книги [2] и разделе данной статьи, посвященной оценке конкурентоспособности автотракторной техники.

Все структурные единицы представленной на рис. 7 иерархии включают в себя общую задачу – устранение критических ситуаций. Примерами критических ситуаций при движении автомобиля могут служить следующие: потеря управляемости и устойчивости; опрокидывание по критической скорости в повороте; потеря проходимости машины. В рамках данной статьи наибольший интерес представляет рассмотрение задачи поддержания проходимости транспортно-технологической машины.

Одним из наиболее тяжелых режимов работы транспортных средств является передвижение по снегу [95]. Управление вездеходными транспортными средствами в условиях их передвижения по заснеженной местности имеет ряд характерных особенностей: снег – поверхность движения с очень низкой несущей способностью; в условиях снежного бездорожья постоянно встречаются препятствия, превышающие высоту просвета машины; слабый грунт на спусках; большое количество крутых уклонов, повышающих вероятность опрокидывания [96].

Значительную часть способности машины выполнять поставленную задачу независимо от условий движения можно обеспечить за счет рациональной конструкции машины (выбора двигателя, трансмиссии, двигателя и т.д.).

Однако для передвижения по труднопроходимой местности при резком изменении условий движения обеспечить подвижность машины можно только путем своевременного изменения основных режимов работы отдельных агрегатов и систем мобильного шасси. Таким образом, достижение высокой мобильности транспортных средств, при передвижении в условиях бездорожья обеспечивают системы поддержания динамической адаптивной подвижности, базовый перечень которых представлен на рис. 7 в задаче устранения критических ситуаций.

Способность машины двигаться по слабым грунтам зависит от разности между силой тяги и сопротивлением движению. Системы адаптивной подвижности поддерживают буксование колес в режиме тяги на уровне, обеспечивающем максимальное значение коэффициента сцепления в продольном направлении. На основании сигналов датчиков определяются следующие характеристики: скорость движения; величина буксования двигателей; величину осадки и интенсивность погружения ТТМ; значения углов крена и дифферента шасси.

Спидометр как прибор, кинематически связанный с трансмиссией, обладает низкой точностью измерений действительной скорости перемещения ТТМ при движении вне дорог, так как не учитываются эластичность колес, их пробуксовка и отрыв от опорной поверхности. Спутниковые системы позиционирования также не дают желаемой точности. Наиболее распространенными средствами определения скорости ТТМ являются инерциальные навигационные системы на основе акселерометров или гироскопов. Перспективными считаются измерители, в основу которых положен доплеровский эффект, и системы, использующие информацию не об окружающей среде, а о динамике колебательных процессов самого транспортного средства (корреляционно-экстремальные системы). Для определения величины буксования также определяются угловые скорости колес, снимаемые индуктивными датчиками.

Для определения осадки используются приборы, регистрирующие изменение частоты радиосигнала, отраженного от опорной поверхности движения – доплеровские радары; и системы, использующие совокупность акселерометров на корпусе и колесах ТТМ. В ряде случаев можно использовать контактные датчики, выходной сигнал которых формируется в результате прямого взаимодействия с поверхностью движения.

На основании полученной информации системы адаптивной подвижности нужным образом регулируют крутящий момент на колесах. Регулирование крутящего момента на колесах может осуществляться подтормаживанием колес или регулированием крутящего момента двигателя. Для обеспечения равномерного распределения динамической нагрузки на колеса при необходимости корректируются значения углов крена и дифферента шасси ТТМ путем изменения дорожного просвета и жесткости отдельных упругих элементов.

Хорошо зарекомендовала себя централизованная система регулирования давления воздуха в шинах. В настоящее время она широко применяется как средство повышения опорной проходимости. К недостаткам данной системы можно отнести низкую скорость работы, в связи с чем автоматизированное управление системой неэффективно.

Традиционным способом повышения проходимости ТТМ в самых тяжелых условиях эксплуатации является блокировка дифференциальных механизмов трансмиссии – как межосевых, так и межколесных. Данный способ является трудносовместимым со способами, предложенными ранее (кроме системы регулирования давления в шинах). Например, в случае совмещения полностью блокируемой трансмиссии с автоматической системой распределения тормозных усилий возникает значительная циркуляция мощности, отрицательно сказывающаяся на ресурсе агрегатов трансмиссии. Однако в ряде случаев блокировка межосевого дифференциала является оправданной, так как существенно упрощает конструкцию исполнительных устройств системы устранения критических ситуаций.

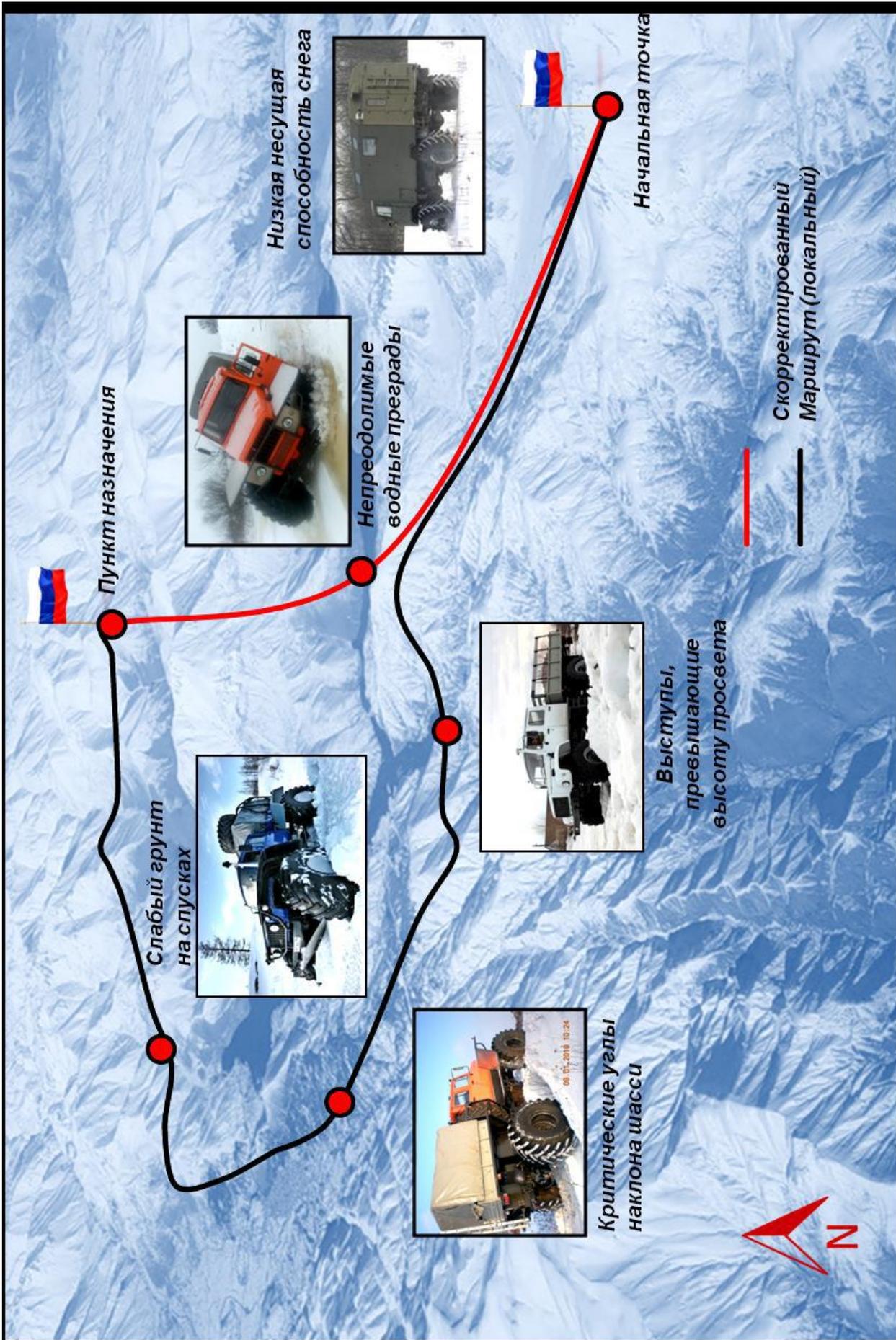


Рис. 8. Особенности движения транспортных средств в условиях заснеженной местности

Главная особенность функционирования внедорожных машин заключается в том, что последовательность их действий, необходимых для достижения цели, как правило, не может быть заранее определена, поскольку информация о будущих состояниях среды априорно недоступна. Формирование траекторий движения осуществляется следующим образом: анализ карт подвижности [90] позволяет предварительно выделить запрещенные для движения участки и наметить оптимальный для данного рельефа глобальный маршрут из исходной точки в конечную (рис. 8).

Но даже идеально проложенный маршрут бесполезен, если машина не способна определить свое местоположение и направление дальнейшего движения. Навигационная система ТТМ получает сигналы от космических аппаратов глобальной навигационной спутниковой системы, которые позволяют его электронному блоку управления вычислять точное местоположение. При блокировании сигналов навигационной системы положение машины определяется собственными средствами отслеживания положения (инерциальные навигационные системы и т.д.). Намеченную по картам глобальную траекторию можно считать оптимальной только условно, поскольку на трассе движения могут встретиться отдельные непреодолимые препятствия. Таким образом, при управлении вездеходным транспортным средством приходится решать редко встречающуюся в управлении мобильными системами задачу по идентификации и объезду непреодолимых препятствий и участков местности. Поэтому для машин, передвигающихся в условиях заснеженной местности, перспективной является разработка и создание акустических систем прогнозирования конфигурации рельефа подстилающего слоя перед машиной, а также бесконтактного определения физико-механических свойств и толщины снежного покрова.

Рассмотренный критерий подвижности, а также критерии проходимости и эффективности способен объединить критерий конкурентоспособности.

#### **Критерии оценки конкурентоспособности автотракторной и вездеходной техники**

Существует достаточно много методов для оценки конкурентоспособности изделий табл.4. Но для качественной и количественной оценки конкурентоспособности, в том числе и подвижности автотракторной техники можно предложить ряд методов: построения экспертной системы, нахождения регрессии, квалиметрии и многокритериальной оптимизации [2]. При этом последний метод направлен не столько на оценку качества существующей конструкции, сколько на выбор рациональных технических, технологических, эксплуатационных и потребительских параметров проектируемой машины. Этот метод в отличие от первых трех может быть совмещен с системой автоматического проектирования, а оценку качества существующей машины от других можно производить как отклонение их от оптимального эталона, что в целом также делается в других методах. Однако другие методы не позволяют производить математически точный выбор рациональных параметров проектируемой автотракторной техники.

Под конкурентоспособностью автотракторной техники понимается такое комплексное свойство конкретной машины, определяющее ее качество в соответствии с фактическими значениями технических, технологических, эксплуатационных и потребительских показателей, которое характеризует ее способность конкурировать с аналогичными образцами машин, выпускаемых (разрабатываемых) конкурирующими фирмами.

Методика оценки конкурентоспособности наземных транспортно-технологических машин (ТТМ) сводится к следующему: 1) раздробить оценочные характеристики до числовых показателей; 2) выразить оценочные показатели в безразмерной форме; 3) принять условие, что рост показателя определяет повышение эффективности, вследствие чего ряд показателей должен быть либо взят как обратная величина, либо как результат от вычитания из единицы; 4) повторяющиеся величины должны учитываться столько раз, сколько они встречаются, что определит их ранжировку (весовую значимость); 5) все оценки должны браться по модулю; 6) число оценочных характеристик для сравниваемых различных типов ТТМ

должно быть одинаково. Наибольшую трудность вызывает оценка эстетических показателей. Она может быть проведена на основе вероятностных оценок по результатам опросов потребителя или экспертов. Вероятностные оценки могут быть положены в основу бальной характеристики эстетичности машины. Однако нельзя пренебрегать общеизвестным утверждением, что «на вкус и цвет товарищей нет», и это самая сложная задача. С этой точки зрения наиболее подходящим для оценки конкурентоспособности автотракторной техники является метод построения экспертных систем.

Таблица 4

## Методы оценки конкурентоспособности [93]

Признак классификации методов оценки конкурентоспособности	Группировка методов оценки конкурентоспособности
1. Номенклатура критериев	1. Прямые методы 2. Косвенные методы
2. Цель и стадия оценки (исходя из жизненного цикла продукции)	1. Методы, применяемые на стадиях проектирования и изготовления продукции 2. Методы, применяемые на стадиях реализации и эксплуатации
3. Форма представления данных	1. Графические методы 2. Матричные методы 3. Расчетные методы 4. Комбинированные методы - расчетно-матричные, расчетно-графические

Методы оценки конкурентоспособности автотракторной техники (построения экспертной системы, нахождения регрессии, квалиметрия) обладают множеством недостатков, которые снижают практическую ценность их использования. К наиболее существенным можно отнести следующие: во-первых, метод нахождения регрессии не позволяет оценить раздельно влияния тех или иных факторов на качество машины по конкурентоспособности; во-вторых, метод квалиметрии абсолютно субъективен; в-третьих, имея даже мощную персональную вычислительную машину и используя программный язык высокого уровня, легко написать программу, которая будет проявлять основные черты, присущие экспертным системам, правда в так называемом «демонстрационном варианте» и при ограниченной базе данных никогда не сможет заменить искусного специалиста в области оценки конкурентоспособности автотракторной техники; в-четвертых, все методы требуют сбора статистических данных и проведения расчетов по определению количественной оценки эталонной машины. В связи с изложенным применение многокритериальной оптимизации по определению характеристик конкурентоспособной машины может оказаться наиболее целесообразным. В отличие от рассмотренных методов данный подход обладает рядом преимуществ и, в первую очередь, позволяет в динамическом диалоге «конструктор – проектируемый объект» определять рациональные характеристики автотракторной техники, тогда как методы отыскания регрессии и квалиметрии позволяют изучать лишь конкретно заданную конструкцию машины. При этом многокритериальная оценка качества автотракторной техники санкционирует выход на совершенно новый уровень методологического решения данной проблемы, который состоит в отыскании точки бифуркации, где конкурентоспособность рассматриваемой машины становится равновероятностной при различных сочетаниях входных параметров  $\lambda$ . Это как нельзя лучше отвечает *субъективной потребительской оценке* качества автотракторной техники, то есть «в глазах» разных по социальным и психофизиологическим качествам людей разные по классу, назначению и конструкции машины становятся конкурентоспособными.

Все показатели конкурентоспособности автотракторной техники, как и в задаче оценки ее подвижности, зависят от конструкционных параметров машины  $\lambda_k$ , режимных характеристик ее работы  $\lambda_p$  и обобщенных функций взаимодействия ( $\Phi_\phi$ ,  $\Phi_f$ ) двигателя и рабочих органов машины с местностью, которые определим как совокупность  $\lambda_\varepsilon$ . В дополнение к названным входным величинам необходимо ввести показатели, определяющие оценочные характеристики по технологичности изготовления, обслуживания и ремонта автотракторной техники –  $\lambda_t$ , а также систему, характеризующую индивидуальные социальные и психофизиологические свойства потребителя –  $\lambda_\pi$ . При этом  $\lambda = \xi(\lambda_k, \lambda_\varepsilon, \lambda_p, \lambda_t, \lambda_\pi)$ , а задача многокритериальной оценки конкурентоспособности автотракторной техники, то есть поиск  $\lambda^{\text{opt}}$ , имеет смысл лишь в случае, когда  $\lambda_k = \text{var}$ ;  $\lambda_\varepsilon = \text{var}$ ;  $\lambda_p = \text{var}$ ;  $\lambda_t = \text{var}$ ;  $\lambda_\pi = \text{var}$ . Величины  $\lambda_k$ ,  $\lambda_p$ ,  $\lambda_\varepsilon$ ,  $\lambda_t$ ,  $\lambda_\pi$  являются поливекторами первого ранга:  $\lambda_k = \lambda_k \{ \lambda_{k1}, \lambda_{k2}, \dots, \lambda_{kq} \}$ ;  $\lambda_p = \lambda_p \{ \lambda_{p1}, \lambda_{p2}, \dots, \lambda_{pr} \}$ ;  $\lambda_\varepsilon = \lambda_\varepsilon \{ \lambda_{\varepsilon1}, \lambda_{\varepsilon2}, \dots, \lambda_{\varepsilon t} \}$ ;  $\lambda_t = \lambda_t \{ \lambda_{t1}, \lambda_{t2}, \dots, \lambda_{tu} \}$ ;  $\lambda_\pi = \lambda_\pi \{ \lambda_{\pi1}, \lambda_{\pi2}, \dots, \lambda_{\pi s} \}$ .

В связи с чем множество допустимых значений  $\lambda$  может быть представлено как поливектор второго ранга  $\Lambda$  с компонентами  $\Lambda_{ij}$ , где  $i = k, p, \varepsilon, t, \pi$  или  $i = 1, 2, \dots, 5$ , тогда как  $j = 1, 2, \dots, g$ . При этом должны выполняться некоторые условия формирования матрицы числовых значений компонент поливектора второго ранга  $\Lambda$ , а точнее, например, если при  $i = k$  индекс  $j = 1, 2, \dots, q, q+1, \dots, g-1, g$  и  $q < g$ , то элементы  $\Lambda_{kj} = 0$  для  $j = q+1, q+2, \dots, g-1, g$ . Аналогично и при других значениях индекса  $i$  ( $p, \varepsilon, t, \pi$ ) в случаях, когда  $r < g$ ,  $t < g$ ,  $u < g$  и  $s < g$  соответственно.

Все подмножество оценочных показателей  $A(|A|=m) \subset V(|V|=n)$  можно разделить на ряд дополнительных подмножеств, которые далее будем именовать *группами элементарных оценочных показателей*. Из множества  $A(|A|=m)$  выделим четыре подмножества определяющих группы оценочных показателей:

$$\text{группа 1 – } \text{технические} \quad A1(A1 \subset A, |A1|=m_1); \quad (33, \text{ а})$$

$$\text{группа 2 – } \text{технологические} \quad A2(A2 \subset A, |A2|=m_2); \quad (33, \text{ б})$$

$$\text{группа 3 – } \text{эксплуатационные} \quad A3(A3 \subset A, |A3|=m_3); \quad (33, \text{ в})$$

$$\text{группа 4 – } \text{экономические (стоимостные)} \quad A4(A4 \subset A, |A4|=m_4). \quad (33, \text{ г})$$

Здесь  $m = m_1 + m_2 + m_3 + m_4$ .

Поставим в соответствие каждой точке  $a1_i \in A1$  множества  $A1(|A1|=m_1)$  *технические оценки* качества машины  $\{ \Phi_{A1}(a1_i) \}_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m_1$ ); точкам  $a2_j \in A2$  множества  $A2(|A2|=m_2)$  – *технологические оценки* качества машины  $\{ \Phi_{A2}(a2_j) \}_j$  ( $j = 1, 2, \dots, m_2$ ); точкам  $a3_k \in A3$  множества  $A3(|A3|=m_3)$  – *эксплуатационные оценки* качества машины  $\{ \Phi_{A3}(a3_k) \}_k$  ( $k = 1, 2, \dots, m_3$ ); точкам  $a4_l \in A4$  множества  $A4(|A4|=m_4)$  – *экономические (стоимостные) оценки* качества машины  $\{ \Phi_{A4}(a4_l) \}_l$  ( $l = 1, 2, \dots, m_4$ ). Здесь  $a1_i = \varsigma_i(\lambda)$ ,  $a2_j = \vartheta_j(\lambda)$ ,  $a3_k = \eta_k(\lambda)$ ,  $a4_l = \zeta_l(\lambda)$ , причем  $\lambda = \xi(\lambda_k, \lambda_\varepsilon, \lambda_p, \lambda_t, \lambda_\pi)$  при  $\lambda_k = \text{var}$ ;  $\lambda_\varepsilon = \text{var}$ ;  $\lambda_p = \text{var}$ ;  $\lambda_t = \text{var}$ ;  $\lambda_\pi = \text{var}$ .

Многокритериальная задача оценки конкурентоспособности автотракторной техники по квазипростым (элементарным) показателям с учетом индивидуальных предпочтений и недостатка информации в области оценки качества субъективных характеристик заключается в отыскании такого поливектора первого ранга  $\lambda^{(0)} \in \Lambda$  и соответствующих значений  $\{\Phi_A [a_i^{(0)}(\lambda^{(0)})]\}_i^{(0)}$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ), для которых при всех  $\lambda \in \Lambda$  имеет место

$$\{\Phi_A [a_i^{(0)}(\lambda^{(0)})]\}_i^{(0)} = \text{extr}_{\lambda \in \Lambda} \{\Phi_A [a_i(\lambda)]\}_i, \quad (i = 1, 2, \dots, m). \quad (34)$$

При этом  $\lambda^{(0)} \equiv \lambda^{\text{opt}}$  – есть оптимальное решение из множества допустимых решений  $\Lambda$ , а значения  $\{\Phi_A [a_i^{(0)}(\lambda^{(0)})]\}_i^{(0)}$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) – оптимумы оценочных показателей конкурентоспособности автотракторной техники.

Для упрощения записи постановки задачи введем систему переобозначений, в которой обозначениям оценочных показателей  $\{\Phi_A [a_i(\lambda)]\}_i$  поставим в соответствие обозначения точек  $a_i$  множества  $A$  ( $|A| = m$ ) как функций параметров  $\lambda = \xi(\lambda_k, \lambda_3, \lambda_p, \lambda_T, \lambda_{\Pi})$ , то есть

$$\{\Phi_A [a_i(\lambda)]\}_i \equiv a_i(\lambda), \quad (35)$$

Обеспечивая конкретизацию постановки задачи оптимизации параметров конкурентоспособности автотракторной техники, разобьем множество  $A$  ( $|A| = m$ ), включающее в себя оценочные группы по техническим, технологическим, эксплуатационным и экономическим показателям, на два подмножества  $B$  ( $B \subset A, |B| = k$ ),  $C$  ( $C \subset A, |C| = l$ ) при условии, что  $k + l = m$ , таким образом, чтобы первое подмножество содержало в себе все оценки качества, которые необходимо максимизировать, а второе - которые минимизировать. Оценочные показатели, объединенные в подмножествах  $B$  и  $C$ , определим как

$$b_q(\lambda) \in A, \quad (q = 1, 2, \dots, k); \quad (36, \text{а})$$

$$c_p(\lambda) \in A, \quad (p = k + 1, k + 2, \dots, m). \quad (36, \text{б})$$

Тогда математическая постановка задачи оптимизации оценочных параметров конкурентоспособности автотракторной техники будет иметь вид:

$$a_i(\lambda) \rightarrow \text{extr}_{\lambda \in \Lambda}, \quad (i = 1, 2, \dots, m) \text{ или } \begin{cases} b_q(\lambda) \rightarrow \max_{\lambda \in \Lambda}, & (q = 1, 2, \dots, k), \\ c_p(\lambda) \rightarrow \min_{\lambda \in \Lambda}, & (p = k + 1, k + 2, \dots, m). \end{cases} \quad (37)$$

Здесь  $a_i(\lambda) \in A$ ;  $\lambda = \xi(\lambda_k, \lambda_3, \lambda_p, \lambda_T, \lambda_{\Pi})$  при  $\lambda_k = \text{var}$ ;  $\lambda_3 = \text{var}$ ;  $\lambda_p = \text{var}$ ;  $\lambda_T = \text{var}$ ;  $\lambda_{\Pi} = \text{var}$ . При этом как максимизируемое  $b_q(\lambda)$ , так и минимизируемое  $c_p(\lambda)$ , подмножества содержат достаточно большое количество величин, а все стоимостные экономические показатели относятся к подмножеству  $c_p(\lambda)$ .

Для решения данной задачи используется метод свертывания векторного критерия [68], учитывающий относительную важность частных критериев оптимальности с помощью построения скалярной функции (поливектора нулевого ранга)  $F$ . Рассмотрим функцию  $F$  с аддитивным критерием оптимальности:

$$F(w, \tilde{Q}) = \sum_{i=1}^m w_i \tilde{Q}_i, \quad (38)$$

где  $\tilde{Q} = \{\tilde{Q}_1, \dots, \tilde{Q}_m\}$  – вектор частных критериев;  $\tilde{Q}_1$  – нормированная функция  $a_1(\lambda)$ , ...;  $\tilde{Q}_m$  – нормированная функция  $a_m(\lambda)$ .

Здесь  $W = \{w_1, \dots, w_m\}$  – весовые коэффициенты относительной важности частных

критериев, причем  $\sum_{i=1}^m w_i = 1$ . При малом количестве критериев оптимальности весовые коэффициенты имеют вполне удобную для расчетов величину. Однако с увеличением их числа значимость весовых коэффициентов будет уменьшаться, что становится особо неудобным при компьютерных операциях округления. В этих случаях целесообразно  $\sum_{i=1}^m w_i = K$ , где  $K$  – параметр масштабирования весовых коэффициентов, который может принимать значения в зависимости от числа частных критериев  $m$ .

Пусть весовые коэффициенты вычисляются как  $w_i = w_i \{K \Phi_w\}$ , ( $i=1,2,\dots,m$ ), где  $K \Phi_w = \Phi_w \{K a_i^+(\lambda^+), K a_i^-(\lambda^-), K a_i(\lambda_j), m\}$ . Методики их расчета подробно изложены в первой главе книги [68]. Здесь  $a_i^+(\lambda^+) = \max_{\lambda_j \in \Lambda} a_i(\lambda)$ ,  $a_i^-(\lambda^-) = \min_{\lambda_j \in \Lambda} a_i(\lambda)$ , где  $\lambda_j$  – текущее значение вектора  $\lambda$ ;  $\Lambda$  – множество значений вектора  $\lambda$ ;  $\lambda^+$  – значение вектора  $\lambda$ , при котором  $a_i(\lambda)$  имеет максимальное значение;  $\lambda^-$  – значение вектора  $\lambda$ , при котором  $a_i(\lambda)$  имеет минимальное значение. Тогда можно предложить методику выбора параметра масштабирования. Если  $m < 10$ , то  $K=1$ . В случае  $10 \leq m < 50$ , то  $K=10$ . При  $50 \leq m \leq 100$ ,  $K=100$ , а если  $m > 100$ , то  $K=1000$ .

Для нормирования частных критериев примем шкалу измерения  $[\alpha, \beta]$ , причем, учитывая вышепредложенную математическую постановку задачи оптимизации оценочных параметров конкурентоспособности автотракторной техники, для  $b_q(\lambda)$ , ( $q=1,2,\dots,k$ ):  $[\alpha, \beta] = [1, 2]$ , а для  $c_p(\lambda)$ , ( $p=k+1, k+2,\dots,m$ ):  $[\alpha, \beta] = [2, 1]$ .

В результате нормирования  $b_q(\lambda)$ , ( $q=1,2,\dots,k$ ) получаем следующую формулу:

$$N_{b_q}(\lambda_j) = \frac{b_q(\lambda_j) - b_q^-(\lambda^-)}{b_q^+(\lambda^+) - b_q^-(\lambda^-)} (\beta - \alpha) + \alpha, \quad (39)$$

где  $N_{b_q}(\lambda_j)$  – нормированное значение функции  $b_q(\lambda)$ , ( $q=1,2,\dots,k$ ). При этом функции  $b_q^+(\lambda^+)$  и  $b_q^-(\lambda^-)$  имеют следующий смысл:

$$b_q^+(\lambda^+) = \max_{\lambda_j \in \Lambda} b_q(\lambda), \quad (q=1,2,\dots,k); \quad (40, a)$$

$$b_q^-(\lambda^-) = \min_{\lambda_j \in \Lambda} b_q(\lambda), \quad (q=1,2,\dots,k), \quad (40, б)$$

где  $\lambda_j$  – текущее значение вектора  $\lambda$ ;  $\Lambda$  – множество значений вектора  $\lambda$ ;  $\lambda^+$  – значение вектора  $\lambda$ , при котором  $b_q(\lambda)$  имеет максимальное значение;  $\lambda^-$  – значение вектора  $\lambda$ , при котором  $b_q(\lambda)$  имеет минимальное значение.

Для нормирования  $c_p(\lambda)$ , ( $p=k+1, k+2,\dots,m$ ) получаем следующую формулу:

$$N_{c_p}(\lambda_j) = \frac{c_p(\lambda_j) - c_p^-(\lambda^-)}{c_p^+(\lambda^+) - c_p^-(\lambda^-)} (\beta - \alpha) + \alpha, \quad (41)$$

где  $N_{c_p}(\lambda_j)$  – нормированное значение функции  $c_p(\lambda)$ , ( $p=k+1, k+2,\dots,m$ ). При этом функции  $c_p^+(\lambda^+)$  и  $c_p^-(\lambda^-)$  имеют следующий смысл:

$$c_p^+(\lambda^+) = \max_{\lambda_j \in \Lambda} c_p(\lambda), \quad (p=k+1, k+2,\dots,m); \quad (42, a)$$

$$c_p^-(\lambda^-) = \min_{\lambda_j \in \Lambda} c_p(\lambda), \quad (p=k+1, k+2,\dots,m), \quad (42, б)$$

где  $\lambda^+$  – значение вектора  $\lambda$ , при котором  $c_p(\lambda)$  имеет максимальное значение;  $\lambda^-$  – значение вектора  $\lambda$ , при котором  $c_p(\lambda)$  имеет минимальное значение.

В результате задача сводится к решению однокритериальной задачи оптимизации:

$$F(w, \lambda^{opt}) = \max_{\lambda_j \in \Lambda} F(w, \lambda_j) = \max_{\lambda_j \in \Lambda} \left\{ \sum_{q=1}^k w_q N_{bq}(\lambda_j) + \sum_{p=k+1}^m w_p N_{cp}(\lambda_j) \right\}. \quad (43)$$

Следует вспомнить, что  $\lambda = \xi(\lambda_k, \lambda_3, \lambda_p, \lambda_T, \lambda_{II})$ , поэтому оптимизацию с помощью обобщенного критерия оптимальности можно производить либо по любому из компонент вектора  $\lambda$  (например,  $\lambda_k = \text{var}$ ;  $\lambda_3 = \text{const}$ ;  $\lambda_p = \text{const}$ ;  $\lambda_T = \text{const}$ ;  $\lambda_{II} = \text{const}$ ), либо по всем компонентам сразу ( $\lambda_k = \text{var}$ ;  $\lambda_3 = \text{var}$ ;  $\lambda_p = \text{var}$ ;  $\lambda_T = \text{var}$ ;  $\lambda_{II} = \text{var}$ ).

Решение данной задачи многокритериальной оценки транспортно-технологических машин на базе автотракторной техники более подробно с примерами излагается в работе [2].

Задача многокритериальной оценки конкурентоспособности автотракторной техники есть поиск  $\lambda^{opt}$ , который имеет смысл лишь в случае, когда  $\lambda_k = \text{var}$ ;  $\lambda_3 = \text{var}$ ;  $\lambda_p = \text{var}$ ;  $\lambda_T = \text{var}$ ;  $\lambda_{II} = \text{var}$ . При этом определяются и рациональные значения компонент поливектора первого ранга  $\lambda^{opt} = \xi^*(\lambda_k^{rac}, \lambda_p^{rac}, \lambda_3^{rac}, \lambda_T^{rac}, \lambda_{II}^{rac})$ . Компоненты этого поливектора определяют непосредственную связь между конкурентоспособностью и концепцией автотракторной техники. Ключом к созданию конкурентоспособного образца автотракторной техники является правильно определенная (разработанная) концепция машины.

На рис. 9 показана структурно-функциональная модель автотракторного средства, а на рис. 10 – дерево оценок конкурентоспособности транспортно-технологических машин. Используя схемы, представленную на рис. 9, и уравнение (37) как исходную предпосылку для построения экспресс-модели конкурентоспособности, можно записать систему целевых функций для каждого блока машины, определить ее конкурентоспособность.

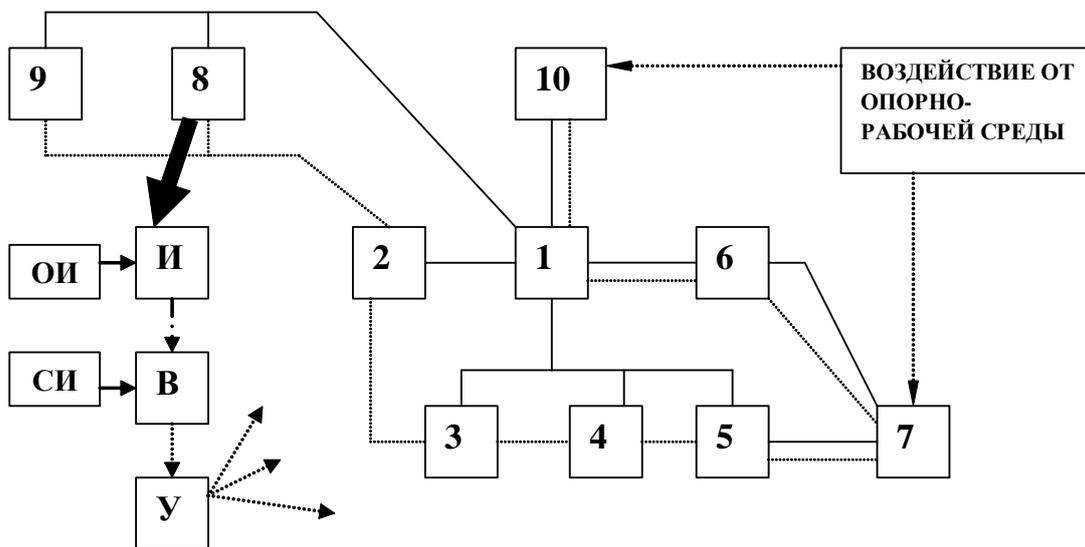


Рис. 9. Функциональная схема автотракторной техники:

ОИ – объективная информация; СИ – субъективная информация; И – система обработки и отображения информации; В – водитель-оператор; У – устройства управления (входят в различные системы); сплошная линия – конструкционные связи, пунктирная линия – энергетические и силовые связи; 1 – остов, 2 – энергетическая установка, 3 – силовая преобразующе-передающая система, 4 – тормозная система, 5 – система управления курсовым движением, 6 – система подвески, 7 – движитель, 8 – электрическое и электронное оборудование, 9 – система безопасности и комфорта, 10 – система технологического и вспомогательного оборудования

## ОЦЕНКИ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН НА БАЗЕ АВТОТРАКТОРНОЙ ТЕХНИКИ

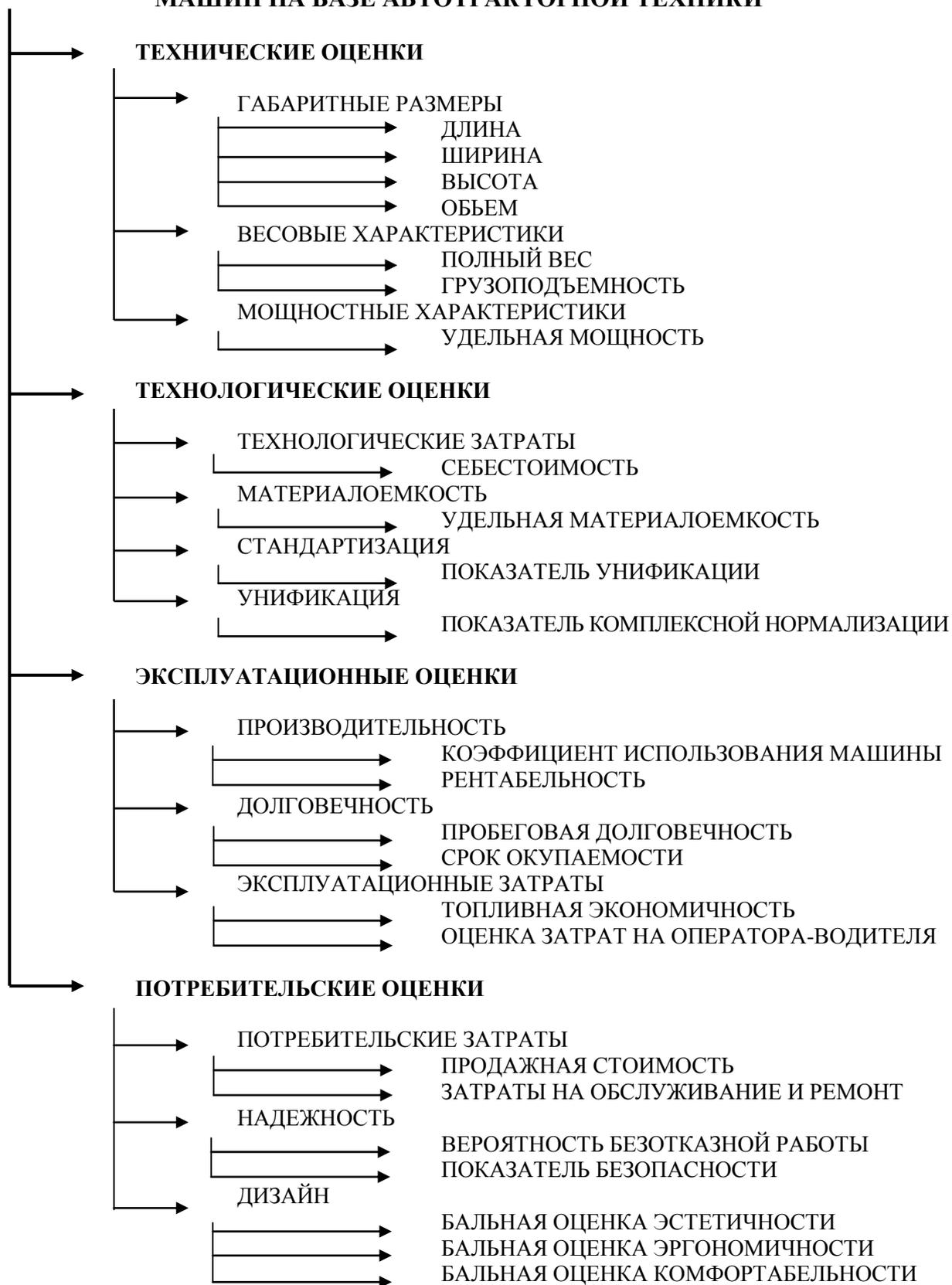


Рис. 10. Дерево оценок конкурентоспособности транспортно-технологических машин

Для записи таких функций необходимо из дерева оценочных показателей (рис.10) выбрать наиболее важные характеристики для данного конструкционного блока машины, которые характеризуют конструкцию, эксплуатацию, режим работы, технологичность и потребительские свойства ( $R$  – надежность;  $C$  – себестоимость;  $\Xi$  – экономичность: производительность и рентабельность;  $\Pi$  – психофизиологические показатели).

Тогда экспресс-модель конкурентоспособности машины с разбивкой по конструкционным блокам в общем виде может быть представлена следующей системой уравнений:

$$a_{ki}(\lambda) \rightarrow \text{extr}; \quad (44, \text{а})$$

$$a_{\varepsilon i}(\lambda) \rightarrow \text{extr}; \quad (44, \text{б})$$

$$a_{pi}(\lambda) \rightarrow \text{extr}; \quad (44, \text{в})$$

$$a_{Ti}(\lambda) \rightarrow \text{extr}; \quad (44, \text{г})$$

$$a_{Ri}(\lambda) \rightarrow \text{max}; \quad (44, \text{д})$$

$$a_{Ci}(\lambda) \rightarrow \text{min}; \quad (44, \text{е})$$

$$\Delta P_{\varphi}(\lambda) \rightarrow \text{max}; \quad (44, \text{ж})$$

$$v(\lambda) \rightarrow \text{max}; \quad (44, \text{з})$$

$$\Xi(\lambda) \rightarrow \text{extr}; \quad (44, \text{и})$$

$$\Pi(\lambda) \rightarrow \text{extr}. \quad (44, \text{к})$$

Здесь  $a_i(\lambda) \in A$ , ( $i=1,2,\dots,11$ );  $\lambda = \xi(\lambda_k, \lambda_{\varepsilon}, \lambda_p, \lambda_T, \lambda_{\Pi})$  при  $\lambda_k = \text{var}$ ,  $\lambda_{\varepsilon} = \text{var}$ ,  $\lambda_p = \text{var}$ ,  $\lambda_T = \text{var}$ ,  $\lambda_{\Pi} = \text{var}$ . Целевые функции (44.ж)–(44.к) относятся к машине в целом.

Обобщенная целевая функция многокритериальной оптимизации, представляется в виде аддитивного критерия с весовыми коэффициентами и нормированными функциями частных критериев:

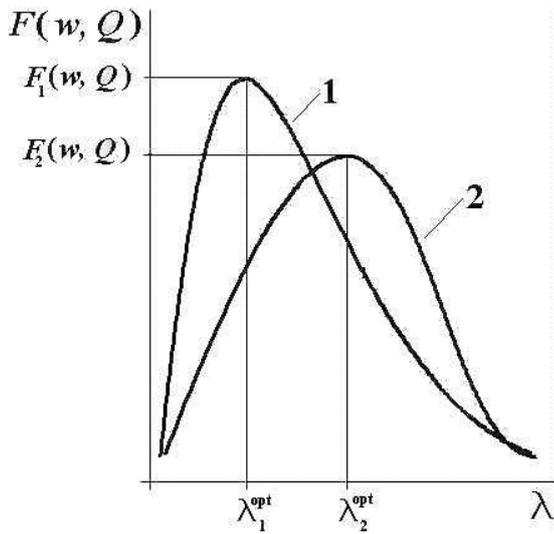
$$F(w, Q) = \text{extr}_{\lambda \in \Lambda} \left\{ w_1 N_{\varphi}(\lambda) + w_2 N_v(\lambda) + w_3 N_p(\lambda) + w_4 N_{\Xi}(\lambda) + \sum_{i=1}^{11} [w_{ki} N_{ki}(\lambda) + w_{\varepsilon i} N_{\varepsilon i}(\lambda) + w_{pi} N_{pi}(\lambda) + w_{Ti} N_{Ti}(\lambda) + w_{Ri} N_{Ri}(\lambda) + w_{Ci} N_{Ci}(\lambda)] \right\}. \quad (45)$$

Условная сравнительная концептуальная характеристика для двух машин, выполненная на основе многокритериальной оптимизации, представлена на рис. 11.

Из рис. 11 видно, что наилучшей является первая машина, у которой  $F_1(w, Q) > F_2(w, Q)$  и, следовательно, характеристики, объединенные в совокупности  $\lambda_1^{\text{opt}}$ , предпочтительней чем  $\lambda_2^{\text{opt}}$ . Однако данные зависимости не могут дать четкого представления, какие же факторы повлияли на качество разрабатываемой концепции. Таким образом, целесообразно построить изменение данных зависимостей от совокупностей  $\lambda_k, \lambda_{\varepsilon}, \lambda_p, \lambda_T, \lambda_{\Pi}$ , а далее от конкретных элементарных параметров  $\lambda_{ki}, \lambda_{\varepsilon i}, \lambda_{pi}, \lambda_{Ti}, \lambda_{\Pi i}$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ).

Рассматриваемые показатели конкурентоспособности можно применить не только к комплектному транспортному средству, но и к отдельным его составным частям, например, к движителю. Поэтому применим параметры  $\lambda_k, \lambda_{\varepsilon}, \lambda_p, \lambda_T$  к колесному движителю. Первым из факторов, влияющих на конкурентоспособность, является его конструкция, так же, как и с комплектным ТС, обозначим его  $\lambda_{к.кд}$ . Режимные характеристики работы  $\lambda_{р.кд}$  и значения

обобщенных функций взаимодействия колеса ( $\Phi_\phi$ ,  $\Phi_f$ ) по аналогии обозначим  $\lambda_3$ . Колесный движитель также можно оценивать с помощью характеристик по технологичности изготовления, обслуживания и ремонта -  $\lambda_{т.кд.}$ . При этом  $\lambda = \xi(\lambda_k, \lambda_3, \lambda_p, \lambda_T)$ , а задача многокритериальной оценки конкурентоспособности колесного движителя, то есть поиск  $\lambda^{opt}$ , имеет смысл лишь в случае, когда  $\lambda_k = var$ ;  $\lambda_3 = var$ ;  $\lambda_p = var$ ;  $\lambda_T = var$ .

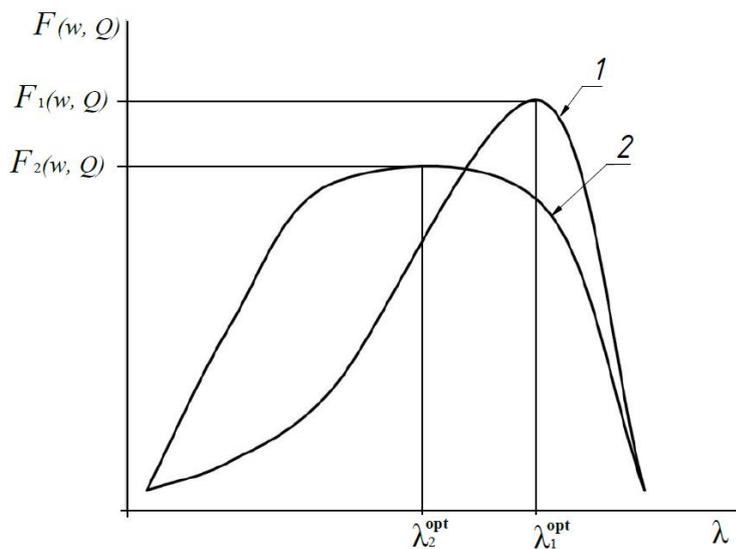


Машина 1



Машина 2

Рис. 11. Условная сравнительная концептуальная характеристика для двух машин, выполненная на основе многокритериальной оптимизации



Безвоздушная шина (1)

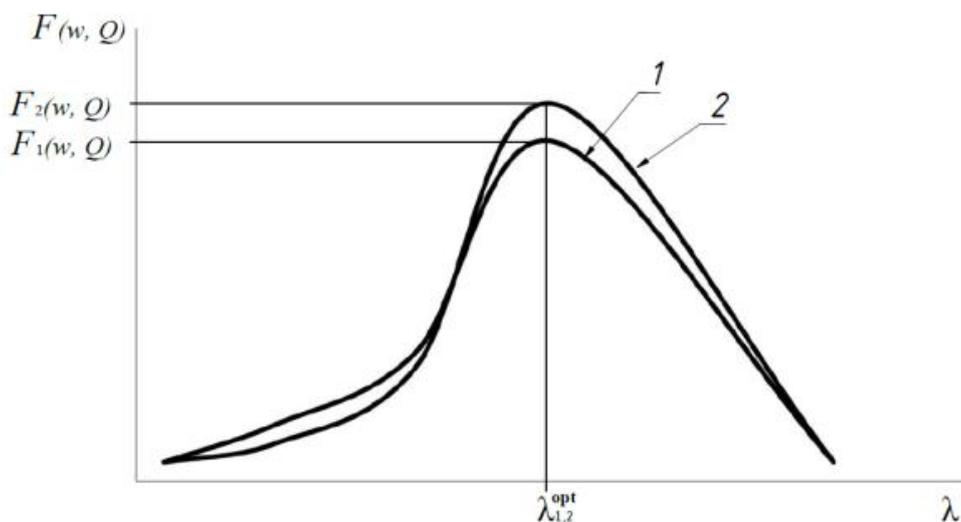


Пневматическая шина (2)

Рис. 12. Условная сравнительная концептуальная характеристика для двух типов колесных движителей

При сравнении конструкций шин, представленных на рис. 12, видно, что у конструкции (1) значение обобщенной функции в задаче многокритериальной оптимизации достигает большего значения по сравнению с конструкцией (2). Отсюда можно сделать вывод, что при оптимальных показателях конкурентоспособности для ряда конструкций безвоздушная шина является более предпочтительным вариантом.

С целью дальнейшего поиска качественного колесного движителя следует воспользоваться функцией многокритериальной оптимизации и сравнить две распространенные конструкции безвоздушных шин. Из графиков функции видно, что шина с раздвоенными спицами превосходит свой аналог с ячеистой структурой практически при любом соотношении  $\lambda = \xi(\lambda_k, \lambda_\varepsilon, \lambda_p, \lambda_T)$ .



Безвоздушная шина с ячеистой структурой (1)



Безвоздушная шина с раздвоенными спицами (2)

**Рис. 13. Условная сравнительная концептуальная характеристика для двух типов упругого элемента безвоздушной шины**

### Заключение

Рассмотренные критерии оценки качества транспортно-технологических машин, как частные, так и обобщенные, являются важными составляющими процесса контроля показателей жизненного цикла (ЖЦ) изделия и способны в полной мере отразить объективную картину о техническом, технологическом и эксплуатационном состояниях объектов проектирования и наблюдения на всех этапах ЖЦ.

Наиболее рациональными являются частные критерии проходимости, подвижности, эффективности транспортно-технологических машин, объединенные различными методами в многокритериальную (интегральную) оценку конкурентоспособности автотракторной техники, вездеходов, мобильных роботов, планетоходов и других функциональных типов ТТМ.

Вездеходная техника эксплуатируется в тяжелых условиях, осложненных геоклима-

тическими факторами, слабой несущей способностью поверхности движения, сложностью рельефа местности и сезонностью изменения интенсивности осадков, поэтому наиболее значимым критерием для ее оценки является проходимость.

Вместе с тем, превосходства одной машины над другой по критерию проходимости достичь не так сложно, как добиться того же, но по критерию эффективности. Одинаковый уровень проходимости ТТМ может быть реализован различными компоновочными и конструктивными вариантами, а эффективность этих машин при эксплуатации может существенно отличаться. Поэтому оценка качества машины по проходимости становится недостаточной и следует использовать интегральный показатель оценки по подвижности или ввести многокритериальный показатель проходимости – эффективность.

Для более объективной обобщенной оценки качества ТТМ является критерий конкурентоспособности, так как он включает в себя широкий круг показателей. Характеристики конкурентоспособности, рассмотренные в работе [2], охватывают непосредственно всю ТТМ. Однако при помощи данного критерия можно сравнить не только всю машину в целом, но и отдельные узлы и агрегаты как самостоятельные изделия, в частности движитель. Это может позволить осуществить рациональный выбор конструктивных параметров узлов и агрегатов в зависимости от условий эксплуатации.

#### Библиографический список

1. Многокритериальные оценки, требования к системам критериев [URL:http://www.bbest.ru/razryprresh/mnogokritmetod/mnogocentrksis](http://www.bbest.ru/razryprresh/mnogokritmetod/mnogocentrksis) (дата доступа 18.09.2016).
2. **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.
3. **Будылина, Е. А.** Подходы к многокритериальности сложных систем / Будылина Е. А., Гарькина И. А., Данилов А. М., Пылайкин С. А. // Молодой ученый. – 2013. – №6. – С. 40–43.
4. **Гарькина, И.А.** Управление в сложных технических системах: методологические принципы управления / И. А. Гарькина, А. М. Данилов // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – № 1 (12). – С. 39–43.
5. **Данилов, А. М.** Анализ показателей лакокрасочных покрытий методом главных компонент / А. М. Данилов, В. И. Логанина, В. А.Смирнов // Известия КазГАСУ. – 2009. – № 1 (11). – С. 243–246.
6. **Гарькина, И. А.** Управление качеством материалов со специальными свойствами / И. А. Гарькина, А. М. Данилов // Проблемы управления. – 2008. – № 6. – С. 67–74.
7. **Ногин, В.Д.** Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход / В.Д.Ногин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 176 с.
8. **Ларичев, О.И.** Объективные модели и субъективные решения/ О.И.Ларичев. – М.: Изд-во «Наука», 1987. – 480 с.
9. **Фиттерман, Б.М.** Методика оценки конкуренто-способности легковых автомобилей / Б.М. Фиттерман, С.К. Леоничева // Автомоб. пром-сть. – 1979. – № 10. – С. 20–23.
10. **Будалин, С.В.** Оценка эффективности лесовозных автопоездов на этапах выбора и эксплуатации: учеб. пособие / С.В. Будалин. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2014. – 215 с.
11. Плиев И.А., Вержбицкий А.Н. Методика оценки технического уровня АТС многоцелевого назначения // Автомоб. пром-сть. 1999. № 11. С. 34–36.
12. **Harrington, E.C. Jr.** The Desibiliti Function-Industry Qualiti Control // Pulp and Pap Can.1985. – № 10. – Т. 21. – Р. 494–498.
13. **Наркевич, Э.И.** Определение среднего коэффициента полезного действия автомобиля на маршруте // Автомоб. пром-сть. – 1998. – № 10. – С. 20–23.
14. **Титов, Е.Ф.** О методах определения технического уровня АТС, их агрегатов и узлов // Автомоб. пром-сть. – 2000. – № 1. – С. 27–29.
15. **Фатхутдинов, Р.А.** Управление конкурентоспособностью организации / Р.А. Фатхутдинов. – М.: Изд-во ЭКСМО, 2004. – 544 с.
16. **Спиридонов, И.А.** Международная конкуренция и пути повышения конкурентоспособности экономики России / И.А. Спиридонов. – М.:ИНФРА-М, 1997. – 170 с.

17. **Абалонин, С.М.** Конкурентоспособность транспортных услуг: учеб. пособие / С.М. Абалонин. М.: ИКЦ Академкнига, 2004. 172 с.
18. **Будалин, С.В.** Анализ качественных показателей эксплуатации лесовозных автопоездов / С.В. Будалин, С.В. Ляхов // Естественные и технические науки: науч.-техн. жур. – 2010. – № 2(52). – С. 481–485.
19. **Баловнев, В.И.** Система показателей оценки эффективности дорожно-строительных машин // Строительные и дорожные машины. – 2000. – № 11. – С. 17–20.
20. **Хачатуров, Т.С.** Эффективность капитальных вложений / Т.С. Хачатуров. – М.: Экономика, 1979. – 582 с.
21. **Ванчукевич, В.Ф.** Грузовые авто-мобильные перевозки: учеб. пособие / В.Ф. Ванчукевич, В.Н. Седюкевич, В.С. Холупов. – Минск: Высш. шк., 1989. – 272 с.
22. **Великанов, Д.П.** Эффективность автомобиля / Д.П. Великанов. – М.: Транспорт, 1969. – 240 с.
23. **Агейкин, Я.С.** Вездеходные колесные и комбинированные движители. Теория и расчет / Я.С. Агейкин. – М.: Машиностроение, 1972. – 184 с.
24. **Бабков, В.Ф.** Проходимость колесных машин по грунту / В.Ф. Бабков, А.К. Бируля В.М. Сиденко. – М.: Автотрансиздат, 1959. – 189 с.
25. **Гмошинский, В.Г.** Проходимость зимних дорог автотранспортом // Труды совещания по проходимости колесных и гусеничных машин по целине и грунтовым дорогам. – М.: Изд-во АН СССР, 1950. – С. 175–194.
26. **Софиян, А.П.** Об удельном давлении гусеничного движителя / А.П. Софиян, Е.И. Максименко // Тракторы и сельхозмашины. – 1962. – №7. – С. 13–15.
27. **Барахтанов, Л.В.** Проходимость автомобиля / Л.В. Барахтанов, В.В. Беляков, В.Н. Кравец. – Н. Новгород: НГТУ, 1996. – 200 с.
28. **Кнороз, В.И.** Проходимость автомобиля и его оценка / В.И. Кнороз, Ю.В. Шарикян // Автомобильная промышленность. – 1958. – №3. – С. 8–12.
29. **Крагельский, И.В.** Об оценке проходимости // Труды совещания по проходимости колесных и гусеничных машин по целине и грунтовым дорогам. – М.: Изд-во АН СССР, 1950. – С. 7–14.
30. **Крживицкий, А.А.** Снегоходные машины / А.А. Крживицкий. – М.: Машгиз, 1949. – 236 с.
31. **Платонов, В.Ф.** Оценка проходимости полноприводных автомобилей / В.Ф. Платонов, М.П.Чистов, А.И. Аксенов // Автомобильная промышленность. – 1980. – №3. – С. 10–13.
32. **Рукавишников, С.В.** Особенности взаимодействия гусеничного движителя снегоходных машин с полотном пути / С.В.Рукавишников. – Горький: ГПИ, 1979. - 95 с.
33. **Скотников, В.А.** Проходимость машин / В.А. Скотников, А.В. Пономарев, А.В. Климанов. – Минск: Наука и техника, 1982. – 328 с.
34. **Яржемский, С.И.** Критерий проходимости гусеничных машин // Труды совещания по проходимости колесных и гусеничных машин по целине и грунтовым дорогам. – М.: Изд-во АН СССР, 1950. – С. 301–322.
35. **Платонов, В.Ф.** Оценка проходимости полноприводных автомобилей / В.Ф. Платонов, М.П.Чистов, А.И. Аксенов // Автомобильная промышленность. – 1980. – №3. – С. 10–13.
36. **Крживицкий, А.А.** Снегоходные машины / А.А. Крживицкий. – М.: Машгиз, 1949. – 236 с.
37. **Барахтанов, Л.В.** Повышение проходимости гусеничных машин по снегу: дисс... докт. техн. наук: 05.05.03. – Горький, 1988 г. – 352 с.
38. **Аникин, А.А.** Теория передвижения колесных машин по снегу / А.А. Аникин, В.В. Беляков, И.О.Донато. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 240 с.
39. **Костин, И.М.** Обеспечение конкурентоспособности грузовых автомобилей на этапе разработки / И.М. Костин, Х.А. Фасхиев. – Набережные Челны: Изд-во КамПИ, 2001. – 349 с.
40. **Бабков, В.Ф.** Проходимость колесных машин по грунту / В.Ф. Бабков, А.К. Бируля, В.М. Сиденко. – М.: Автотрансиздат, 1959. – 189 с.
41. **Бабков, В.Ф.** Образование колеи при движении автомобиля // Труды совещания по проходимости колесных и гусеничных машин по целине и грунтовым дорогам. – М.: Изд-во АН СССР, 1950. – С. 94–115.
42. **Барахтанов, Л.В.** Проходимость автомобиля / Л.В. Барахтанов, В.В.Беляков, В.Н.Кравец; НГТУ. – Н. Новгород, 1996. – 200 с.
43. Проходимость автомобиля / Н.А. Бухарин, Я.Б. Бронштейн, В.М. Буянов и др. – Воен. изд-во МО СССР, 1959. –310 с.

44. **Безбородова, Г.Б.** О направлениях научных исследований проходимости автомобилей // Изв. вузов. Машиностроение. – 1965. – №5. – С. 145–148.
45. **Гребенщиков, В.И.** Исследование проходимости автомобиля по мягким грунтам // Автомобильная промышленность. – 1956. – №10. – С. 12-15
46. **Токарев, А.А.** Топливная экономичность автомобилей и автопоездов / А.А. Токарев. – М.: Машиностроение, 1982. – 240 с.
47. **Барахтанов, Л.В.** Влияние на эксплуатационные свойства автомобилей конструкционных параметров колесного шасси при движении по снежной целине / Л.В. Барахтанов, В.В. Беляков // Повышение эффективности проектирования, испытаний и эксплуатации автомобилей: тез. докл. и сообщ. международ. науч.-техн. конф. – Н. Новгород, 1994. – С. 12.
48. **Беккер, М.Г.** Введение в теорию систем местность-машина: [пер. с англ.] / М.Г. Беккер; под ред. В.В. Гуськова. – М.: Машиностроение, 1973. – 520 с.
49. **Bekker, M.** Theory of land locomotion. – University of Michigan, Press – 1960 – 520 p.
50. **Платонов, В.Ф.** Полноприводные автомобили / В.Ф. Платонов. – М.: Машиностроение, 1989. – 312 с.
51. **Вонг, Дж.** Теория наземных транспортных средств / Дж. Вонг. – М.: Машиностроение, 1982. – 284 с.
52. **Евсеев, П.П.** Некоторые вопросы энергетики автомобиля (сборник научно-технических разработок). – Киев, 2006. – 232 с.
53. **Костин, И.М.** Обеспечение конкурентоспособности грузовых автомобилей на этапе разработки / И.М. Костин, Х.А. Фасхиев. – Набережные Челны: Изд-во КамПИ, 2001. – 349 с.
54. **Токарев, А.А.** Топливная экономичность и тягово-скоростные качества автомобиля / А.А.Токарев. – М.: Машиностроение, 1982. – 222 с.
55. **Фаробин, Я.Е.** Трехзвенные автопоезда / Я.Е. Фаробин, А.М. Якобашвили, А.М. Иванов и др. – М.: Машиностроение, 1993. – 222 с.
56. **Трембовельский, Л.Г.** Комплексная оценка эффективности автотранспортных средств / Л.Г. Трембовельский, Р.П. Кушвид // Журнал Автомобильных инженеров: журнал ААИ. – 2011. – № 1. – С. 23–25.
57. **Ларин, В.В.** Прогнозирования параметров опорной проходимости многоосных колесных / В.В. Ларин. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 224 с.
58. **Горелов, В.А.** Научные методы повышения безопасности и энергоэффективности движения многоосных колесных транспортных комплексов: дисс. ... докт. техн. наук: 05.05.03. – М., 2012. – 33 с.
59. **Чижов, Д.А.** Разработка комплексного метода повышения энергоэффективности полноприводной колесной машины: Автореферат дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03. – М., 2012. – 18 с.
60. **Guidetti, Jean.** “Pneumatic Wheel for Travel on All Types of Terrain.” United States Patent 3957100, filed 6 February 1975, published 18 May 1976
61. **Burt, Ian T. and Papanikolopoulos, Nikolaos P.** “Adjustable diameter wheel assembly, and methods and vehicles using same.” United States Patent 6860346, filed 16 April 2003, published 1 March 2005.
62. **Buehler, Martin, Saunders, Aaron, and Grimmenger, Felix.** “Reconfigurable Robot Drive.” United States Patent 20070114075, filed 30 August 2005, published 24 May 2007.
63. **Jacobsen Stephen C; Olivier Marc X; Mccullough John; Smith Fraser M** «Robotic mobile low-profile transport vehicle» United States Patent WO2012125903 (A2) - 2012-09-20
64. **Беляков, В.В.** Концепция подвижности наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков, А.М. Беляев, М.Е. Бушуева, У.Ш. Вахидов, К.О. Гончаров, Д.В. Зезюлин, В.Е. Колотилин, К.Я. Лелиовский, В.С. Макаров, А.В. Папунин, А.В. Тумасов, А.В. Федоренко // Труды НГТУ. – 2013. – № 3 (100). – С. 145–175.
65. **Барахтанов, Л.В.** Экспериментально-теоретические исследования опорной проходимости многоосных колесных машин / Л.В. Барахтанов, В.В. Беляков, Д.А. Галкин, А.С. Зайцев, Д.В. Зезюлин, В.С. Макаров // Труды НГТУ им. П.Е.Алексеева. – 2012. – №3 – С. 162–170.
66. **Барахтанов, Л.В.** Экспериментальные исследования поворота многоосных колесных машин / Л.В. Барахтанов, В.В. Беляков, Д.А. Галкин, А.С. Зайцев, Д.В. Зезюлин, В.С. Макаров // Труды НГТУ им. П.Е.Алексеева. – 2012. – №4. – С. 175–181.
67. **Беляков, В.В.** Взаимодействие со снежным покровом эластичных движителей специальных транспортных средств: дисс. ... докт. тех. наук: 05.05.03. Нижний Новгород 1999. – 485 с.
68. **Беляков, В.В.** Оценка эффективности специальных транспортных средств при движении по снегу / В.В. Беляков, Д.А.Галкин, А.С.Зайцев, Д.В.Зезюлин, Е.М. Кудряшов, В.С. Макаров // Труды НГТУ им. П.Е.Алексеева. – 2012. № 2 (95).– С. 156–166.

69. **Беляков, В.В.** Подвижность специальных транспортных средств по дорогам типа «stone-road» / В.В. Беляков, У.Ш. Вахидов, Д.А. Галкин, А.С. Зайцев, Е.М. Кудряшов, В.С. Макаров // Труды НГТУ им. Р.Е.Алексеева. – 2012. – №1. – С. 143–151.
70. **Вахидов, У.Ш.** Моделирование трасс движения транспортных средств, характерных для территории Северного Кавказа / У.Ш. Вахидов, В.В. Беляков, В.С. Макаров // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2011. – №7. – С. 24–26.
71. **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; URL: [www.science-education.ru/103-6376](http://www.science-education.ru/103-6376) (дата обращения: 05.06.2012).
72. **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. 82–87.
73. **Галкин, Д.А.** Влияние параметров шин на подвижность многоосных колесных машин / Д.А. Галкин, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 6; URL: [www.science-education.ru/106-7882](http://www.science-education.ru/106-7882) (дата обращения: 24.12.2012).
74. **Галкин, Д.А.** Математическая модель преодоления разрушаемого уступа многоосной колесной машиной / Д.А. Галкин, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Леса России и хозяйство в них. – 2012. – Т. 1-2. – № 42–43. – С. 28–29.
75. **Гончаров, К.О.** Влияние экскавационно-бульдозерных эффектов возникающих при криволинейном движении колеса на сопротивление качению / К.О. Гончаров, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. – 2010. – № 6. – С. 3–3.
76. **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.
77. **Гончаров, К.О.** Оценка влияния экскавационно-бульдозерных эффектов на проходимость многоосных колесных машин при криволинейном движении по снегу: Дисс... канд. техн. наук: 05.05.03. – Н. Новгород, 2011 г. – 263 с.
78. **Гончаров, К.О.** Экспериментальные исследования многоосной колесной машины / К.О. Гончаров, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. – 2010. – № 12. – С. 10–10.
79. **Зайцев, А.С.** Математическая модель преодоления рва многоосной колесной машиной / А.С. Зайцев, Д.А. Галкин, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Леса России и хозяйство в них. – 2012. – Т. 1-2. – № 42–43. – С. 39–40.
80. **Зезюлин, Д.В.** Влияние параметров движителей на показатели эффективности колесных машин при движении по снегу / Д.В. Зезюлин, У.Ш. Вахидов, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 5; URL: [www.science-education.ru/105-6927](http://www.science-education.ru/105-6927) (дата обращения: 17.09.2012).
81. **Зезюлин, Д.В.** Разработка методики выбора конструкционных параметров движителей, обеспечивающих эффективность движения колесных машин по снегу: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03. – Н. Новгород, 2013. – 218 с.
82. **Зезюлин, Д.В.** Расчетный анализ влияния параметров движителей на показатели эффективности колесных машин при движении по снежному полотну пути / Д.В. Зезюлин, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Леса России и хозяйство в них. – 2012. – Т. 1-2. – № 42–43. – С. 41–42.
83. **Макаров, В.С.** Методика расчета и оценка проходимости колесных машин при криволинейном движении по снегу: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03. – Н. Новгород, 2009. – 161 с.
84. **Беляков, В.В.** Концепция подвижности наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков, А.М. Беляев, М.Е. Бушуева, У.Ш. Вахидов, К.О. Гончаров, Д.В. Зезюлин, В.Е. Колотилин, К.Я. Лелиовский, В.С. Макаров, А.В. Папунин, А.В. Тумасов, А.В. Федоренко // Труды НГТУ. – 2013. – №3. – С. 145–174.
85. **Макаров, В.С.** Определение характеристик микропрофиля дорог, предназначенных для движения транспортно-технологических машин / В.С. Макаров, К.О. Гончаров, В.В. Беляков, Д.В. Зезюлин, А.М. Беляев, А.В. Папунин, А.В. Редкозубов // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 5. <http://www.science-education.ru/105-7111> (дата обращения: 05.10.2012).
86. **Макаров, В.С.** Статистический анализ характеристик снежного покрова / Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 1; URL: <http://www.science-education.ru/107-8289> (дата обращения: 05.02.2013).

87. **Макаров, В.С.** Оценка эффективности движения колесных машин на основании статистических характеристик снежного покрова / В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, К.О. Гончаров, А.В. Федоренко, В.В. Беляков // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – №1 – С. 150–157.
88. **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.
89. **Галкин, А.А.** Математическая модель преодоления разрушаемого рва многоосной колесной машиной/ Д.А. Галкин, А.С. Зайцев, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Журнал автомобильных инженеров. – 2012. – № 6. – С. 40–42.
90. **Макаров, В.С.** Формирование снежного покрова в зависимости от ландшафта местности и оценка подвижности транспортно-технологических машин в течение зимнего периода / В.В. Беляков, Д.В. Зезюлин, А.М. Беляев, А.В. Папунин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – №1 – С. 155–160.
91. Вездеходные транспортно-технологические машины. Основы теории движения: монография / под общ. ред. В.В. Белякова и А.П. Куляшова. – Н. Новгород: ТАЛАН, 2004. – 961 с.
92. Методы оценки конкурентоспособности изделий URL:<http://works.doklad.ru/view/umvch8bqawA/3.html> (дата доступа 18.09.2016).
93. **Зезюлин, Д.В.** Влияние параметров движителей на показатели эффективности колесных машин при движении по снегу / Д.В. Зезюлин, У.Ш. Вахидов, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 5. – С. 84–84.
94. **Макаров, В.С.** Характер изменения снежного покрова как полотна пути с учетом неравномерности его залегания на местности / В.С. Макаров, А.В. Папунин, Д.В. Зезюлин, В.В. Беляков // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 4. – С. 33.
95. **Макаров, В.С.** Формирование снежного покрова в зависимости от ландшафта местности и оценка подвижности транспортно-технологических машин в течение зимнего периода / В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, А.М. Беляев, А.В. Папунин, В.В. Беляков // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – № 2 (99). – С. 155–160.
96. **Михеев, А.В.** Оценка деформации колеса, оснащенного непневматической шиной при компьютерном моделировании вертикального статического нагружения / Михеев А.В., Беляков В.В., Макаров В.С., Зезюлин Д.В., Кострова З.А. // Труды НГТУ. – 2015. №2. – С. 162–169.

*Дата поступления  
в редакцию 19.10.2016*

**V.V. Belyakov, A.M. Belyaev, P.O. Beresnev, M.E. Bushueva, D.V. Zezyulin,  
V.E. Kolotilin, V.E. Klubnichkin, E.E. Klubnichkin, Z.A. Kostrova, V.S. Makarov,  
A.V. Miheev, D.M. Porubov, V.I. Filatov**

## **ASSESSMENT CRITERIA QUALITY OF TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL MACHINES**

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

This article deals with common approaches to multicriteria evaluation of quality machines. Presents historical and bibliographic reviews of various assessing criteria of possibility, motility, efficiency and competitiveness of the automotive and off-road vehicles. The purpose of the study is to identify the quality criteria for a more accurate comparison of different models and full-scale models of transport and technological machines (TTM), as well as the identification of rational modes of vehicle use (CU).

*Key words:* criterion of quality products, possibility, efficiency, competitiveness, motility, automotive mechanisms, transport and technological machines, vehicles, multi-criteria assessment of the quality, mover.

УДК 630\*375.4

В.Е. Клубничкин<sup>1</sup>, Е.Е. Клубничкин<sup>1</sup>, В.С. Макаров<sup>2</sup>, Д.В. Зезюлин<sup>2</sup>, В.В. Беляков<sup>2</sup>**О ПРОХОДИМОСТИ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ МАШИН НА ГУСЕНИЧНОМ ХОДУ И АГРЕГАТНЫХ МАШИН НА ИХ БАЗЕ**

Мытищинский филиал ФГБОУ ВО

«Московский государственный технический университет им Н.Э. Баумана»<sup>1</sup>,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>2</sup>

Рассматривается актуальность проблемы повышения проходимости лесозаготовительных машин, исследуемой с учетом механики грунтов. Представлены характеристики почвенно-грунтовых условий, а также зависимости от уклона местности на лесопокрытых территориях Российской Федерации. Приведены основные конструктивные параметры гусеничных лесозаготовительных машин, влияющие на их проходимость. Статья содержит вывод о необходимости работы по комплексной программе, включающей решение следующих вопросов: повышение проходимости серийных и модернизированных гусеничных лесозаготовительных машин; модернизация серийно выпускаемых машин; научно-исследовательские работы по повышению проходимости гусеничных лесозаготовительных машин; создание стендов предназначенных для проведения испытаний на проходимость лесозаготовительных машин. В статье использованы методы комплексного анализа. Представлены критерии производительности и топливной экономичности гусеничных машин.

*Ключевые слова:* гусеничная лесозаготовительная машина, гусеничный движитель, проходимость, почвенно-грунтовые условия.

Применение новой прогрессивной техники обеспечивает рост производительности труда на трелевке леса. В настоящее время на лесозаготовительные предприятия поступают лесные машины, позволяющие исключить ручной труд человека. Однако эксплуатационная масса новых машин увеличивается из-за оснащения тяжелым технологическим оборудованием [10, 12, 24]. Это приводит к тому, что лесозаготовительные машины оставляют глубокие колеи при движении по снегу и переувлажненным грунтам, в результате чего учащается потеря их подвижности соответственно и проходимости [2, 3, 15, 26-30].

В связи с уменьшением лесосырьевых баз, расположенных на равнинной местности с грунтами, характеризующимися хорошей несущей способностью, отрицательное влияние этого фактора на эффективность лесозаготовительного процесса возрастает. Лесозаготовки смещаются в районы с более тяжелыми почвенно-грунтовыми условиями (заболоченная местность, низины и др.). Поэтому на сегодняшний день остро стоит вопрос о повышении проходимости гусеничных лесозаготовительных машин на базе лесопромышленных тракторов ТТ-4М, ЛЗ-4, Онежец-320 и Онежец-330.

Проблема проходимости очень сложна, и до настоящего времени нет единого критерия, позволяющего достаточно полно оценить по проходимости лесозаготовительную машину или агрегатную машину на её базе [4]. Данная проблема рассматривается на стыке двух наук: а механики грунтов и механики машин.

В зависимости от почвенно-грунтовых условий лесопокрытые площади России подразделяют на четыре категории.

К первой категории грунтов относят песчаные и каменистые почвы, позволяющие работать лесозаготовительным машинам в течение всего года с двухнедельным перерывом в весенний период.

Ко второй категории грунтов относят супесчаные почвы, мелкие суглинки. Эти почвы выдерживают многократный проход машин по одному следу. В периоды весенней и осенней распутицы и в дождливые летние месяцы несущая способность их падает и работа лесозаготовительных машин в эти периоды наносит вред растительному слою, образуя колею.

К третьей категории грунтов относят глинистые почвы, супеси с глиняными прослойками. Грунты третьей категории имеют повышенную влажность в течение всего теплого периода года. Трелевочные тракторы, в особенности колесные, быстро разрушают растительный слой на волоках, образуя глубокие колеи. Для обеспечения работы трелевочных машин волока приходится выстилать сучьями и древесиной, что приводит к дополнительным затратам при трелевке леса. В дождливые годы волоки превращаются в плывуны, вызывая сильную загрязненность древесины.

К четвертой категории грунтов относят торфянисто-болотные и перегнойно-глеевые почвы. Леса, произрастающие на таких почвах, имеют низкий бонитет, малый эксплуатационный запас древесины на 1 га. Эксплуатация таких лесов возможна в зимний период, когда почва промерзнет на глубину, достаточную для прохождения лесозаготовительной техники.

Процентное соотношение лесных насаждений по категориям грунтов и высота снежного покрова представлены в табл. 1.

С учетом того, что основное лесозаготовительное значение имеют лесонасаждения, произрастающие на почво-грунтах I, II и III лесозаготовительных категорий, а также возможность разработки лесосек с почво-грунтами IV категории в зимний период или механизированными методами с помощью гусеничной техники область применения колесных погрузочно-транспортных машин ограничена почво-грунтами I, II и III лесозаготовительных категорий.

На основании данных табл. 1 наибольшая высота снежного покрова, преодолеваемого машинами, принята равной 1 м, что практически полностью обеспечивает возможность работы машин по снегу на всей лесопокрытой территории.

Распределение лесопокрытых площадей по крутизне склонов представлено в таблице 2, откуда следует, что лесопокрытые площади с крутизной склонов более 15 градусов сосредоточены в основном в Сибирском и Дальневосточном Федеральных округах, в том числе в Иркутской области, республике Бурятия, в Хабаровском крае и Амурской области. В целом по федеральным округам, представленным в табл. 2, лесопокрытые площади с крутизной склонов более 15 градусов занимают не более 3,3% от всей лесопокрытой площади.

В результате проблема повышения проходимости лесозаготовительных машин, исследуемая с учетом механики грунтов, является актуальной. Проводится модернизация базовых гусеничных лесозаготовительных машин с учетом механики трактора, в первую очередь, с целью повышения надежности машин, улучшения ремонтпригодности, приспособленности к техническим уходам и снижения затрат на них, а также их эргономических качеств. При этом, как правило, неуклонно возрастает масса машин, что приводит к снижению проходимости. К примеру, в результате модернизации масса базовых тракторов Онежец-330 и ТТ-4М увеличилась соответственно на 1250 кг и 1600 кг.

Проведение научно-исследовательских работ дали возможность наметить пути улучшения проходимости гусеничных лесозаготовительных машин [1, 5, 7, 9, 11, 13, 16, 19, 22, 23, 25]. Однако в полном объеме практическое внедрение данных рекомендаций возможно только в разработках новых конструкций лесозаготовительных машин (агрегатов на их базе), требующих больших капитальных вложений.

Проходимость – это комплексное эксплуатационное качество, которое характеризует приспособленность машины для работы в условиях бездорожья, определяет в значительной степени технический уровень и экономическую эффективность в этих условиях и объединяет следующие свойства [20, 21, 31-33]:

- тягово-сцепные, оцениваемые коэффициентом сцепления гусениц с грунтом и сопротивлению качению машины, а также буксованием;
- опорные, оцениваемые несущей способностью гусениц и определяемые средним удельным давлением на грунт, коэффициентом смещения центра давления и отношением шага гусеницы к шагу катков;
- конструктивно-высотные, характеризующие способность трактора двигаться по сла-

бым грунтам без создания "бульдозерного эффекта" и оцениваемые отношением конструктивного дорожного просвета к расчетной глубине колеи, а также профилем днища межгусеничного пространства;

- поворотные, которые оцениваются радиусом горизонтального поворота, при этом не происходит потери проходимости и существенного ухудшения тягово-сцепных свойств.

Таблица 1

## Распределение лесных насаждений в % по категориям грунтов и высоте снежных покровов

	Категории грунтов				Высота снежного покрова, см	
	I	II	III	IV	Средняя	Максимальная
<i>Центральный ФО</i>						
Костромская область	1	45	35	19		
<i>Северо-Западный ФО</i>						
Архангельская обл.	3	27	30	40	75	107
Вологодская обл.	1	32	34	33		
Республика Коми	4	30	18	48	55	82
Республика Карелия	8	32	38	22	87	118
Ленинградская обл.	6	52	10	32	41	62
Новгородская обл.	3	44	20	33	55	86
<i>Приволжский ФО</i>						
Кировская обл.	1	37	28	34		
Нижегородская обл.	3	49	29	19	68	85
Пермский край	10	44	28	18		
Республика Башкирия	15	55	30	2		
Республика Удмуртия	1	38	47	14		
<i>Уральский ФО</i>						
Свердловская обл.	1	27	39	33	49	69
Тюменская обл.	6	15	19	60	81	97
<i>Сибирский ФО</i>						
Томская обл.	3	24	43	25		
Кемеровская обл.	2	47	46	5		
Красноярский край	6	39	52	3	35	57
Иркутская область	4	44	34	18		
Республика Бурятия	4	64	29	3		
<i>Дальневосточный ФО</i>						
Хабаровский край	12	41	30	17	38	60
Амурская область	6	11	62	21		

Таблица 2

## Распределение лесопокрытых площадей по крутизне склонов, %.

Наименование Федеральных округов и областей	Площадь, покрытая лесом млн га		Крутизна склонов		
	всего	пригодной для экспл.	До 15 <sup>0</sup>	16-25 <sup>0</sup>	26 <sup>0</sup> и более
1	2	3	4	5	6
<b>Центральный ФО</b>	16,4	9,6			
Костромская область	3,7	3,1	100	-	-
<b>Северо-Западный ФО</b>	110,1	55,5			
Архангельская обл.	27,1	15,1	100	-	-
Вологодская обл.	8,7	6,2	100	-	-
Республика Коми	38,7	17,8	99,8	0,2	-
Республика Карелия	14,8	7,7	100	-	-
Ленинградская обл.	7,7	2,6	100	-	-
Новгородская обл.	4,7	2,7	100	-	-
<b>Приволжский ФО</b>	34,5	24,1			
Кировская обл.	6,3	5,3	100	-	-
Нижегородская обл.	3,1	2,3	100	-	-
Пермский край	10,4	7,9	96,5	3	0,5
Республика Башкирия	5,7	3,8	92	7	1
Республика Удмуртия	1,6	1,18	100	-	-
<b>Уральский ФО</b>	110,3	38,3			
Свердловская обл.	13,7	7,9	98,9	0,9	0,2
Тюменская обл.	10,2	4,48	100	-	-
<b>Сибирский ФО</b>	355,5	98,0			
Томская обл.	26,7	12,3	100	-	-
Кемеровская обл.	4,2		75	17	8
Красноярский край	59,1	22,7	98	1,4	0,6
Иркутская область	68,2	24,4	78	17	5
Республика Бурятия	27,9	6,1	62	28	10
<b>Дальневосточный ФО</b>	501,5	102,4			
Хабаровский край	75,2	20,5	77	16	7
Амурская область	30,7	17,76	81	17	2

В табл. 3 приведены основные конструктивные параметры гусеничных лесозаготовительных машин, влияющие на проходимость.

Поскольку основным критерием оценки работы любой, в том числе и гусеничной лесозаготовительной машины, является её производительность, предлагается показатель  $\Pi$  для сравнительной оценки проходимости, характеризующий снижение производительности машины на грунтах с низкой несущей способностью или снежной целине по сравнению с производительностью на плотных грунтах или укатанной снежной дороге.

$$\Pi = \frac{Q_{P_1} \cdot V_1}{Q_{P_2} \cdot V_2}, \quad (1)$$

где  $Q_{P_1}$  и  $Q_{P_2}$  - рейсовая нагрузка на машину при движении по грунту с низкой несущей способностью или снежной целине и соответственно плотному грунту или укатанной снежной дороге, ( $\text{м}^3$ ),  $V_1$  и  $V_2$  - максимально возможная средняя скорость гусеничной лесозаготовительной машины соответственно в таких же условиях, ( $\text{км/ч}$ ). Более обобщающим показателем проходимости  $\Pi_0$  можно считать критерий, отражающий топливную экономичность машины:

$$\Pi_0 = \frac{Q_{P_1} \cdot V_1}{G_{T_1}} : \frac{Q_{P_2} \cdot V_2}{G_{T_2}}, \quad (2)$$

где  $G_{T_1}$  и  $G_{T_2}$  - расход топлива на единицу пройденного пути соответственно в указанных условиях ( $\text{г/км}$ ).

Таблица 3

### Основные конструктивные параметры исследуемых гусеничных лесозаготовительных машин

№ п/п	Показатели	Марка лесозаготовительной машины				
		ТТ-4М	ЛП-18А	ЛЗ-4	Онежец-320	Онежец-330
1	Эксплуатационная масса, кг	14460	16600	15900	12100	13700
2	Мощность двигателя, кВт	96	81	95,6	88,2	88,2
3	Число опорных катков	5	5	6	4	4
4	Длина опорной поверхности гусеницы, мм	2880	2720	3322	2310	2310
5	Ширина гусеницы, мм	550	500	550	600	600
6	Площадь опоры гусениц, $\text{м}^2$	3,17	2,72	3,65	2,77	2,77
7	Отношение опорной поверхности длины гусеницы к ширине	5,24	5,44	6,04	3,85	3,85
8	Дорожный просвет, мм	537	537	535	550	550
9	Среднее удельное давление на грунт, кПа	42	55,8	46	30	35
10	Угол наклона лобового участка гусеницы, град	26	22	27	26	26

С целью наиболее объективной оценки проходимости гусеничной лесозаготовительной машины необходимо исключить влияние мастерства управления оператором, которое имеет важное значение.

При проведении испытаний гусеничных тракторов и лесозаготовительных машин на их базе признано целесообразным оценивать также их проходимость по грунтам с низкой несущей способностью и снежной целине [6, 8, 14, 17, 18].

В решении проблемы проходимости важным шагом является работа по комплексной программе, включающей решение следующих вопросов: повышение проходимости серийных и модернизированных гусеничных лесозаготовительных машин; модернизация серийно выпускаемых машин; научно-исследовательские работы по повышению проходимости гусеничных лесозаготовительных машин; создание стендов предназначенных для проведения испытаний на проходимость лесозаготовительных машин.

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации проект № 1547.*

### Библиографический список

1. **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.
2. **Борисов, В.А.** Глубина колеи и потеря подвижности в результате буксования гусеничной лесозаготовительной машины / В.А. Борисов, Н.И. Казначеева, Д.В. Акинин // Национальная Ассоциация Ученых. – 2015. – № 10-1 (16). – С. 11-14.
3. **Клубничкин, В.Е.** Моделирование движения гусеничных машин по лесным дорогам /

- В.Е. Клубничкин, Е.Е. Клубничкин, В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, А.В. Редкозубов, В.В. Беляков // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. – 2016. – № 1. – С. 171–176.
4. **Миркин, С.Н.** Влияние микропрофиля на буксование гусеничного движителя / С.Н. Миркин, С.А. Черябриков // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2006. – № 3. – С. 32–33.
  5. **Клубничкин, Е.Е.** Конечно-элементное моделирование ходовой системы гусеничной лесозаготовительной машины // Автомобильная промышленность. – 2009. – № 2. – С. 29–30.
  6. **Котович, С.В.** Методика упрощенного определения некоторых тягово-динамических свойств транспортных средств и ее применение на ранних стадиях проектирования. Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2004. № 3. – С. 27–33.
  7. **Клубничкин, В.Е.** Модель взаимодействия элементов опорной поверхности гусениц лесозаготовительной машины с грунтом / В.Е. Клубничкин, Е.Е. Клубничкин, В.И. Запруднов, Л.Д. Бухтояров, Д.Ю. Дручинин, С.В. Малюков // Лесотехнический журнал. – 2014. – Т. 4. – №4 (16). – С. 191–200.
  8. **Janarthanan, V.** Longitudinal dynamics of a tracked vehicle: Simulation and experiment / V. Janarthanan, S. Padmanabhan, C. Sujatha // Journal of Terramechanics. – 2012. – № 49. – P. 63–72.
  9. **Клубничкин, Е.Е.** Анализ процесса качения гусеничного движителя / Е.Е. Клубничкин, В.Е. Клубничкин // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2014. – Т. 2. – №3-4 (8-4). – С. 226–230.
  10. **Воскобойников, И.В.** Обоснование выбора системы гусеничных лесозаготовительных машин для совершенствования технологических процессов лесосечных работ / И.В. Воскобойников, Д.В. Кондратюк // Технология колесных и гусеничных машин. – 2015. – № 5. – С. 55–64.
  11. **Клубничкин, В.Е.** Современное программное обеспечение для проведения исследований по нагрузкам, устойчивости и проходимости машин / В.Е. Клубничкин, Е.Е. Клубничкин // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – Т. 3. – №5-1 (16-1). – С. 209–214.
  12. **Гоberman, В.А.** Колесные и гусеничные машины. Математическое моделирование и анализ технико-эксплуатационных свойств: учеб. пособие / В.А. Гоberman, Л.А. Гоberman. – М.: МГУЛ, 2002. – 322 с.
  13. **Klubnichkin, V.E.** Model to calculate loading of transmission elements at controlled curvilinear motion of the tracked timber harvesting machine / V.E. Klubnichkin, E.E. Klubnichkin, V.I. Zaprudnov, L.D. Bukhtoyarov, S.V. Malyukov, D.Yu. Druchinin // Лесотехнический журнал. – 2015. – Т. 5. – №2 (18). – С. 166–176.
  14. **Макаров, В.С.** Характер изменения снежного покрова как полотна пути с учетом неравномерности его залегания на местности / В.С. Макаров, А.В. Папунин, Д.В. Зезюлин, В.В. Беляков // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – №4. – С. 33.
  15. **Клубничкин, Е.Е.** Моделирование дорожных условий гусеничной лесозаготовительной машины. Естественные и технические науки. – 2005. – №6. – С. 237–243.
  16. **Макаров, В.С.** Формирование снежного покрова в зависимости от ландшафта местности и оценка подвижности транспортно-технологических машин в течении зимнего периода / В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, А.М. Беляев, А.В. Папунин, В.В. Беляков // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. – 2013. – №2(99). – С. 155–160.
  17. **Gigler, J.K.** Design of a simulation model for the prediction of the ground pressure distribution under tracked vehicles. Internal Report, Agricultural & Food Engineering Dept., University College, Dublin (1992)
  18. **Wong, J.Y.** Development of high-mobility tracked vehicles for over snow operations. Journal of Terramechanics. – 2009. – № 46(4). – P. 141–155.
  19. **Редкозубов, А.В.** Математическая модель поверхности движения лесных дорог / А.В. Редкозубов, Д.В. Зезюлин, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. – 2014. – № 4 (106). – С. 348–352.
  20. **Беляков, В.В.** Концепция подвижности наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков, А.М. Беляев, М.Е. Бушуева, У.Ш. Вахидов, К.О. Гончаров, Д.В. Зезюлин, В.Е. Колотилин, К.Я. Лелиовский, В.С. Макаров, А.В. Папунин, А.В. Тумасов, А.В. Федоренко // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. – 2013. – №3(100). – С. 145–174.
  21. **Беккер, М.Г.** Введение в теорию систем местность-машина: [пер. с англ.] / М.Г. Беккер; под ред. В.В. Гуськова. – М.: Машиностроение, 1973. – 520 с.

22. **Mezyk, A.** Modelling and Investigation of Dynamic Parameters of Tracked Vehicles / A. Mezyk, E. Switoski, S. Kciuk, W. Klein // *Mechanics and Mechanical Engineering*. – 2011. – Vol. 15. – № 4. – P. 115–130.
23. **Клубничкин, Е.Е.** Повышение долговечности ходовых систем гусеничных лесозаготовительных машин // *Техника и технология*. – 2005. – №5. – С. 58–62.
24. **Котиков, В.М.** Лесозаготовительные и трелевочные машины / В.М. Котиков, Н.С. Еремеев, А.В. Ерхов. – М. : Лесная промышленность, 2004. – 336 с.
25. **Клубничкин, Е.Е.** Анализ путей повышения качества систем поддрессоривания гусеничных лесозаготовительных машин. – 2005. – №5. – С. 157–161.
26. **Котиков, В.М.** Воздействие лесозаготовительных машин на лесные почвы: дисс. ... д-ра техн. наук. – М.: МЛТИ, 1995. – 214 с.
27. **Зезюлин, Д.В.** Влияние параметров движителей на показатели эффективности колесных машин при движении по снегу / Д.В. Зезюлин, У.Ш.Вахидов, В.С. Макаров, В.В. Беляков // *Современные проблемы науки и образования*. – 2012. – № 5. – С. 84.
28. **Беляков, В.В.** Подвижность специальных транспортных средств по дорогам типа «stone-road» / В.В.Беляков, У.Ш. Вахидов, Д.А.Галкин, А.С.Зайцев, Е.М.Кудряшов, В.С. Макаров // *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева*. – 2012. – № 1 (94). – С. 143–151.
29. **Беляков, В.В.** К вопросу выбора экспериментальных данных для составления статистических моделей снежного покрова как полотна пути для транспортно-технологических машин / В.В.Беляков, Д.В. Зезюлин, В.Е.Колотилин, В.С.Макаров, А.В. Федоренко // *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева*. –2014. – № 1 (102). – С. 136–141.
30. **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.
31. **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.
32. **Вахидов, У.Ш.** Моделирование трасс движения транспортных средств, характерных для территории Северного Кавказа / У.Ш. Вахидов, В.В. Беляков, В.С. Макаров // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. – 2011. – № 7. – С. 24–26.
33. **Гончаров, К.О.** Экспериментальные исследования многоосной колесной машины / К.О. Гончаров, В.С.Макаров, В.В. Беляков // *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*. – 2010. – № 12. – С. 10.

*Дата поступления  
в редакцию 28.10.2016*

**Е.Е. Klubnichkin<sup>1</sup>, V.E. Klubnichkin<sup>1</sup>, V.S. Makarov<sup>2</sup>, D.V. Zeziulin<sup>2</sup>, V.V. Belyakov<sup>2</sup>**

#### **ABOUT TRAFFICABILITY OF TRACKED TIMBER HARVESTING MACHINES AND AGGREGATION MACHINES BASED ON THEM**

Moscow State Technical University. n.a. N.E. Bauman (Mytishchi branch)<sup>1</sup>,  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeyev<sup>2</sup>

The article discusses the relevance of the problem of increasing of trafficability of timber harvesting machines, which is investigated in view of soil mechanics. Characteristics of soil conditions and data on terrain slopes of wooded areas of the Russian Federation are presented. Design parameters of timber harvesting machines, influencing their trafficability, are shown. The article concludes about the necessity of work on a comprehensive program, including the following issues: increasing of trafficability of serially produced and modernized tracked forest machines; modernization of serially produced machines; research and development to improve the trafficability of tracked timber harvesting machines; creation of test-benches, intended for evaluation of trafficability of forest machines. There are used methods of complex analysis in the article. Criteria for performance and fuel economy of tracked vehicles are presented.

*Key words:* tracked timber harvesting machines, tracked mover, trafficability, soil conditions.

УДК 630\*375.4

Е.Е. Клубничкин<sup>1</sup>, В.Е. Клубничкин<sup>1</sup>, В.С. Макаров<sup>2</sup>, Д.В. Зезюлин<sup>2</sup>, В.В. Беляков<sup>2</sup>

## ОЦЕНОЧНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ ПРОХОДИМОСТИ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ МАШИН

Мытищинский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный  
технический университет им Н.Э. Баумана»<sup>1</sup>,  
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>2</sup>

Целью работы является исследование влияния типа трансмиссии на проходимость лесозаготовительных машин. Описываются испытания лесозаготовительных машин с различными трансмиссиями. Проведено сравнение полученных данных при испытаниях. Выполнен анализ результатов, который показывает, что полный коэффициент неравномерности удельных нормальных давлений рассматриваемых машин уменьшается при движущейся машине, следовательно, и воздействие нормальных давлений снижается. Применение комплексного гидропривода с гидростатической трансмиссией в лесозаготовительных машинах повышает их маневренность и проходимость в лесных условиях. Приведенные исследования позволяют дать рекомендации по выбору трансмиссии лесозаготовительных машин, выбрать рациональную развесовку, повышающую равномерность удельных давлений и, как следствие, повышающую экологичность.

*Ключевые слова:* гусеничная машина, трансмиссия, проходимость, движитель.

Важнейшим эксплуатационным качеством лесозаготовительных машин является их проходимость, характеризующаяся совокупностью тягово-сцепных, опорно-временных, конструктивно-дорожных и лесотехнических свойств, а также маневренностью [8, 22, 25].

Оценочный показатель проходимости лесозаготовительных машин по тягово-сцепным свойствам определяется степенью реализации касательной силы тяги по двигателю физико-механических свойств лесного грунта и зависит от конструкции движителя и типа трансмиссии [2, 6, 12, 28, 30].

Большинство зарубежных лесозаготовительных машин оснащены гидростатической или гидродинамической трансмиссиями с мощной системой гидроприводов технологического оборудования [5, 15, 19]. Гидротрансмиссии транспортных средств широко применяются в связи с наличием таких положительных качеств, как автоматическое и плавное изменение крутящего момента; полное использование мощности двигателя и сцепных свойств опорной поверхности движения в сравнении с механической трансмиссией; снижение динамических нагрузок в трансмиссии и достаточная надежность [11, 13, 17, 24, 26, 29].

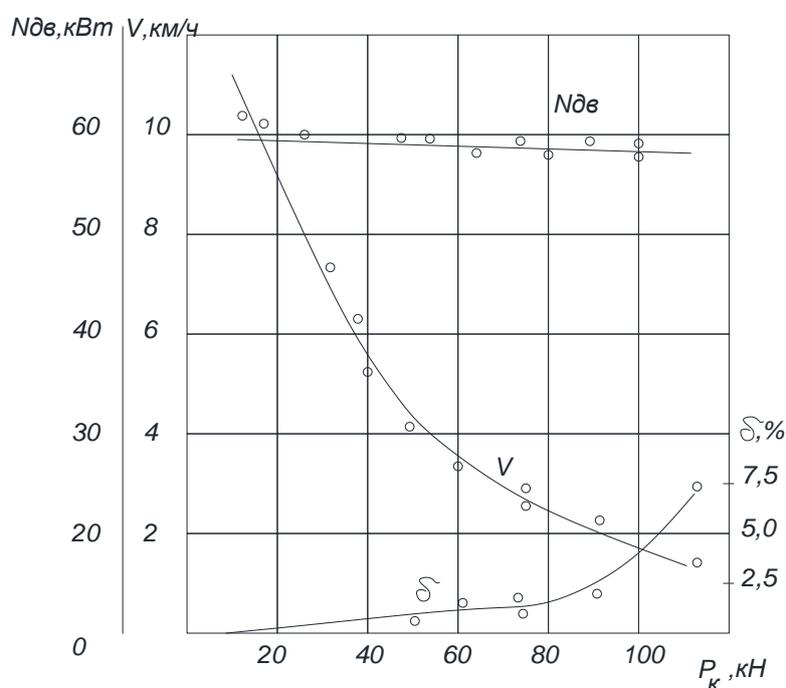
Учитывая опыт использования гидротрансмиссий в отечественной и зарубежной практике и для определения целесообразности применения их в лесозаготовительных машинах, ЧЕТРА ФОРЕСТ совместно с Сибирь-Техника провели комплекс работ, состоящий из двух этапов.

1 этап - применение и испытание однопоточной гидропередачи на трелевочной машине ТЛП-4М-034 для привода трансмиссии ходовой системы и гидропривода механизма технологического оборудования. Было изготовлено два образца ТЛП-4М-034: один с раздельным гидронасосом, установленным на раздаточной коробке, и гидромотором, смонтированным на коробке перемены передач; другой с моноблочным исполнением гидропередачи в общем корпусе с промежуточным редуктором, установленным на заднем мосту машины.

2 этап - создание и испытание макетных образцов трелевочных гусеничных машин ТЛП-4М-034с двухпоточной гидростатической трансмиссией и изготовленных на их базе трелевочной машины ТЛП-4М-034Г и валочно-сучкорезно-раскряжёвочной машины ЧЕТРА ФОРЕСТ ВПМ 130 с комплексным гидроприводом технологического оборудования с питанием от насосов трансмиссии.

Испытания лесозаготовительной машины с однопоточной гидростатической трансмиссией проводились с целью определения скоростей перемещения на холостом и грузовом ходу снятием тяговых характеристик на снежном укатанном и суглинистом влажном волоках, а также на бетонированном твердом глинистом участках.

Как показали испытания, при регулировании скорости перемещения машины на холостом ходу как гидромотором, так и гидронасосом, скорость машины ТЛП-4М-034 обеспечивается до 12 км/ч; при этом в диапазоне 3...12 км/ч полностью используется мощность двигателя. В связи с этим введение коробки перемены передач при использовании гидротрансмиссии с регулируемым насосом и гидромотором нецелесообразно. При использовании гидротрансмиссии с регулируемым гидронасосом и нерегулируемым гидромотором машина ТЛП-4М-034 на I передаче развивает скорость движения до 6 км/ч и в диапазоне 3...7 км/ч полностью используется мощность двигателя. На IV передаче скорость машины ТЛП-4М-034 реализуется до 11,4 км/ч, а полное использование мощности двигателя достигается в диапазоне движения 5... 11,4 км/ч. Следовательно для обеспечения заданного диапазона скоростей движения машины с гидротрансмиссией, состоящей из регулируемого гидронасоса и нерегулируемого гидромотора, необходима двухступенчатая коробка перемены передач.

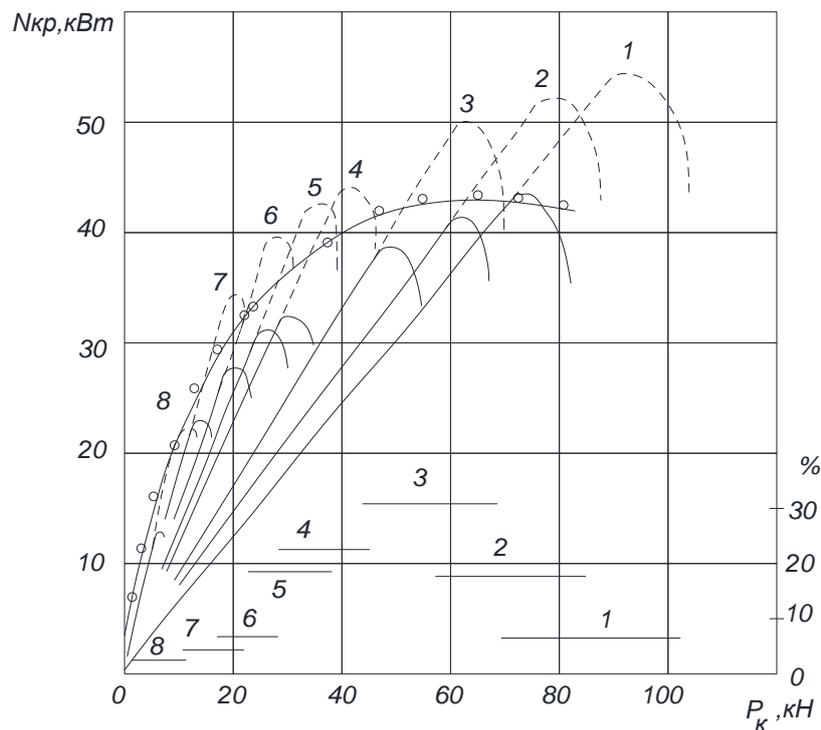


**Рис. 1. Тяговые показатели трелевочной машины ТЛП-4М-034 с гидростатической трансмиссией на бетонированном участке с полезной нагрузкой  $Q = 45$  кН**

На рис. 1 представлены результаты испытаний по определению тяговой характеристики машины ТЛП-4М-034 с полезной нагрузкой массой 4500 кг на бетонированном участке дороги, а на рис. 2 - результаты тяговых сравнительных испытаний машин ТЛП-4М-034 с механической и гидростатической трансмиссиями. Согласно приведенным результатам испытаний, мощность двигателя машины с гидростатической трансмиссией, затрачиваемая на перемещение ТЛП-4М-034, остается практически постоянной (рис. 1), а используемая тяговая мощность двигателя машины с механической трансмиссией располагается ниже кривой мощности машины с гидростатической трансмиссией (рис. 2).

Испытания лесозаготовительной машины с двухпоточной гидростатической трансмиссией проводились на валочно-сучкорезно-раскряжевочной машине ЧЕТРА ФОРЕСТ ВПМ 130 в зимний период на малоснежном участке с мерзлым грунтовым основанием. Ана-

лиз графиков (рис. 3) определяет, что тяговые показатели машины ЧЕТРА ФОРЕСТ ВПМ 130 в диапазоне скоростей движения 0,3...1,0 км/ч наиболее высокие в границе значений буксования  $b = 10...20\%$ . Из-за недостаточного сцепления движителя машины на мерзлом, твердом грунтовом основании мощность двигателя была реализована частично, вследствие чего условный тяговый КПД  $n_{\text{тяг}} = 0,41$ . На твердых глинистых дорожных основаниях можно с полной достоверностью ожидать повышением тягового КПД машины ЧЕТРА ФОРЕСТ ВПМ 130, так как при загрузочных режимах мощность двигателя колебалась незначительно в пределах от 2% до 5% [7, 14, 16, 20]. Максимальная касательная сила тяги движителя машины ЧЕТРА ФОРЕСТ ВПМ 130 с нагрузкой 22,26 кН и 0 кН составила соответственно 103,5 кН и 94,3 кН при  $f = 0,083$  и  $\varphi = 0,40$ . При этом максимальное значение крюковой мощности на 1 диапазоне гидротрансмиссии составило 35 кВт (см. рис. 3).



**Рис. 2. Тяговые сравнительные показатели трелевочной машины ТЛП-4М-034 с гидростатической и механической трансмиссиями на твердом глинистом участке:**

- фактическая величина  $N_{кр}$  механической трансмиссии;
- потенциальная величина  $N_{кр}$  механической трансмиссии;
- ○ ○ ○ ○ - фактическая величина  $N_{кр}$  гидростатической трансмиссии;
- процент распределения по использованию передач КПМ механической трансмиссии

Лесозаготовительные машины не способны устойчиво выполнять свое назначение в лесозаготовительном процессе при отсутствии или низком значении одного из показателей проходимости. Наиболее важным из них является показатель опорной проходимости, характеризующийся средним удельным нормальным давлением  $P_{ср}$ , максимальным удельным нормальным давлением  $P_{max}$ , периодом взаимодействия  $T$  движителя с грунтом, коэффициентом смещения центра давлений  $\nu$  и коэффициентом неравномерности средних удельных нормальных давлений  $\xi$  [9, 21, 23].

С учетом определения показателей опорной проходимости машины ЧЕТРА ФОРЕСТ ВПМ 130 перед испытаниями были проведены замеры по распределению нагрузок рамы машины по опорным каткам ходовой системы при различных режимах нагружения и положениях гидроманипулятора (табл. 1). Результаты исследований показали, что при приведенных в данной таблице режимах нагружения машины ЧЕТРА ФОРЕСТ ВПМ 130 нагрузки по кат-

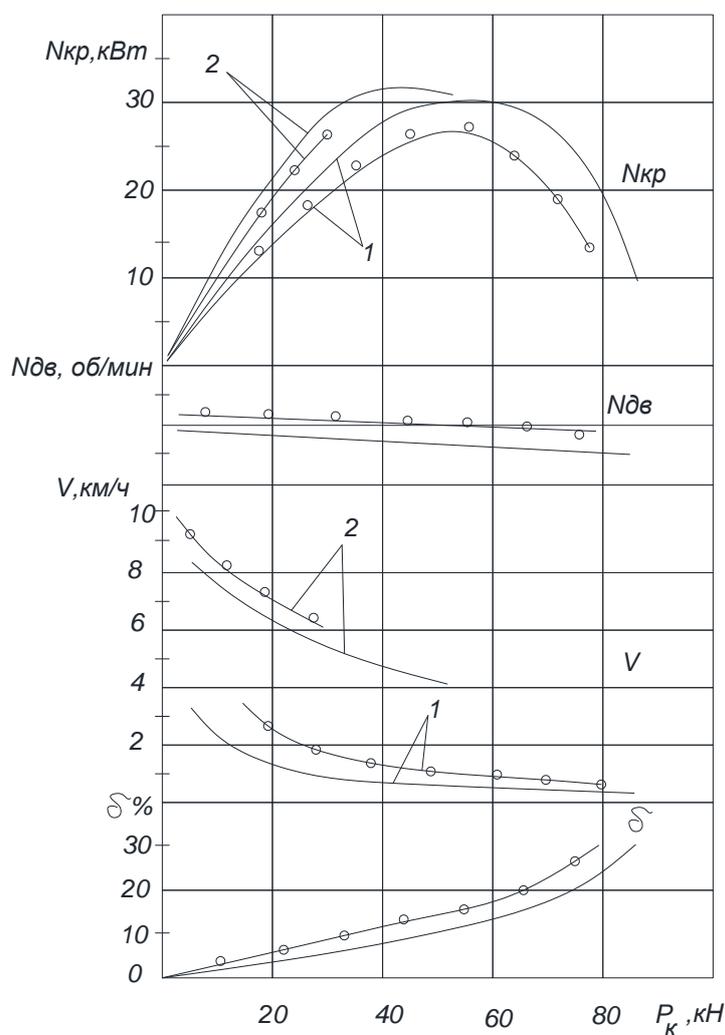
кам ее ходовой системы не превышают нагрузок, воспринимаемых ходовой системой валочно-пакетирующей машиной ЛП-19 [4, 10, 18].

Известно, что неравномерность средних удельных нормальных давлений частотное воздействие пиковых нормальных давлений  $P_{max}$  и смещение центра давлений транспортного средства в сторону запаздывания по времени увеличивают колееобразование машин [3]. При этом проходимость зависит не столько от величины  $P_{cp}$ , сколько от  $P_{max}$  и  $\xi$ . Следовательно, чем равномернее эпюра удельных нормальных давлений движителя транспортного средства, тем выше его проходимость.

Коэффициент  $\xi$ , равный отношению  $P_{max}$  к  $P_{cp}$ , недостаточно полно характеризует совершенство гусеничного движителя, так как не выявляет максимальную величину воздействия удельного нормального давления движителя лесозаготовительной машины на лесной грунт, поэтому предлагается полный коэффициент неравномерности удельных нормальных давлений

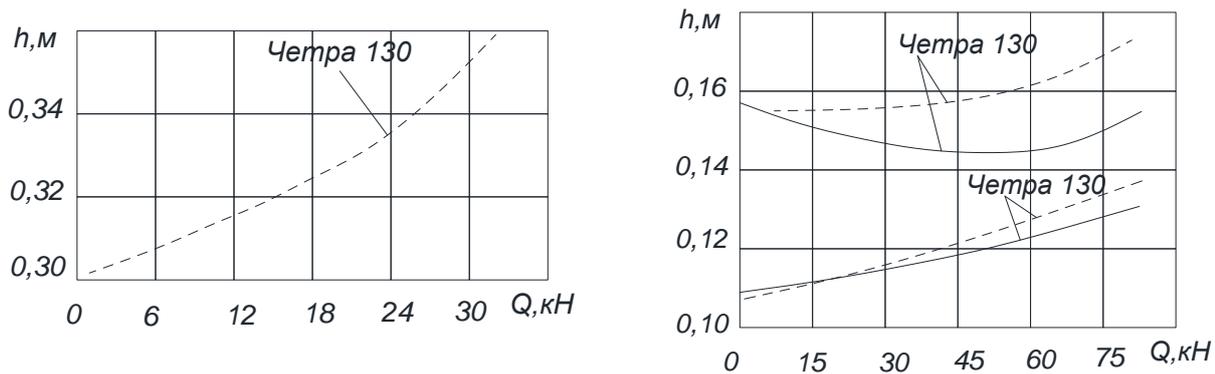
$$\xi_{\Pi} = \frac{P_{max}}{P_{min}}$$

где  $P_{min}$  - наименьшая величина удельных нормальных давлений под катком гусеничного движителя, кПа.



**Рис. 3. Тяговые показатели машины ЧЕТРА ФОРЕСТ ВПМ 130 на снежном участке с мерзлым грунтовым основанием:**

— С полезной нагрузкой  $Q = 0$  кН; -o-o-o-o- полезной нагрузкой  $Q = 22,26$  кН;  
1 - I диапазон; 2 - II диапазон



**Рис. 4. Влияние полезной нагрузки и скорости движения лесозаготовительных гусеничных машин на их колесобразование:**

скорость движения - - - - -  $v = 2,5$  км/ч; скорость движения —  $v = 5,0$  км/ч

**Таблица 1**

**Распределение нормальных нагрузок по каткам ходовой системы и нормальных давлений движителя машины ЧЕТРА ФОРЕСТ ВПМ 130**

Номер катка, средние показатели НДС и коэффициенты неравномерности	Режим нагружения									
	Транспортное положение манипулятора				Манипулятор расположен перпендикулярно продольной оси машины, вылет 5 м, нагрузка на манипуляторе 15 кН			Протаскивание дерева – осина: $d = 0,46$ $L=23$ м		
	Коэффициент динамичности $K_d$	Нагрузка на каток, кН	$P_{cp}$ , кПа ( $v=0$ )	$P_{cp}$ , кПа ( $v=3,6$ км/ч)	Нагрузка на каток, кН	$P_{cp}$ , кПа ( $v=0$ )	$P_{cp}$ , кПа ( $v=3,6$ км/ч)	Нагрузка на каток, кН	$P_{cp}$ , кПа ( $v=0$ )	$P_{cp}$ , кПа ( $v=3,6$ км/ч)
1	1,81	9	36,7	82,9	30,2	127,8	217,6	9,9	50,9	84,3
2	1,13	11	51,8	85,8	31,5	125,9	216,8	10,7	51,3	84,1
3	1,86	9	50,5	84,7	30,9	129,8	219,9	12,2	51,4	87,4
4	1,77	16	57,7	88,9	34,5	128,7	220,0	16,6	52,1	87,1
5	1,53	14	54,7	96,7	33,3	131,8	219,2	15,9	51,4	88,1
6	1,52	16	54,9	85,7	28,6	127,7	218,6	10,7	50,9	86,3
$\Sigma$ сумма	9,62	75,0	306,3	524,7	189,0	771,7	1312,1	76,0	310,3	517,3
$\Sigma_{cp}$	1,92	15,0	61,26	104,94	37,8	154,3	262,4	15,2	62,1	114,3
$\xi = P_{max}/P_{cp}$	1,43	1,73	1,65	1,85	1,75	1,75	1,1	1,84	1,84	1,75
$\xi_{II} = P_{max}/P_{min}$	2,57	4,33	4,33	2,57	3,47	3,47	1,35	4,0	4,0	4,17

Для определения опорной проходимости машины ЧЕТРА ФОРЕСТ ВПМ 130 на мягких лесных грунтах были сопоставлены результаты экспериментальных исследований по влиянию составляющих нагрузок по каткам ходовых систем машин ТЛП-4М-034 и ТЛП-4М-034Г на их колесобразование [1].

В табл. 1 и табл. 2 приведены результаты по распределению нагрузок и удельных нормальных давлений под катками гусеничного движителя машины ЧЕТРА ФОРЕСТ ВПМ 130 и тракторов ТЛП-4М-034, ТЛП-4М-034Г в статике и в движении со скоростью  $v = 3,8$  км/ч с полезной нагрузкой на щите. При этом определена средневзвешенная величина длины опорно-

активных участков движителя  $l_{оay} = 0,48$  м [27]. С учетом изменения величины удельных нормальных давлений под каждым катком движителя от скорости движения введен экспериментальный коэффициент динамичности  $Kл$  для каждого трактора и машины ЧЕТРА ФОРЕСТ ВПМ 130 (табл. 1).

Таблица 2

**Распределение нормальных нагрузок по каткам ходовой системы и нормальных давлений движителя машин ТЛП-4М-034 и ТЛП-4М-034Г на грунт**

Машина	Номер катка, показатель	Коэффициент динамичности $Kд$	Нагрузка на щит $Q = 0$ кН			Нагрузка на щит $Q = 30$ кН			Нагрузка на щит $Q = 78,5$ кН		
			Нагрузка на каток, кН	$P_{cp}$ , кПа ( $v=0$ )	$P_{cp}$ , кПа ( $v=3,6$ км/ч)	Нагрузка на каток, кН	$P_{cp}$ , кПа ( $v=0$ )	$P_{cp}$ , кПа ( $v=3,6$ км/ч)	Нагрузка на каток, кН	$P_{cp}$ , кПа ( $v=0$ )	$P_{cp}$ , кПа ( $v=3,6$ км/ч)
ТЛП-4М-034	1	1,55	14,8	60,4	93,6	15,5	63,3	98,1	12,7	52,9	82,0
	2	1,78	12,2	49,8	88,6	12,9	52,7	93,8	14,3	59,6	106,0
	3	4,45	4,2	17,2	76,5	4,4	18,0	80,1	7,0	29,0	129,0
	4	1,77	10,0	40,8	72,2	11,0	44,9	79,5	17,5	72,9	129,0
	5	1,35	11,0	44,9	60,6	14,2	58,0	78,3	27,7	115,6	156,0
	$\sum P_{cp}$	10,90	52,2	213,1	391,5	58,0	236,9	429,8	79,2	330,0	602,0
	$P_{cp}$	2,18	10,44	42,6	78,3	11,6	47,4	86,0	15,84	66,0	120,4
	$\bar{E}$	2,04	1,42	1,42	1,20	1,34	1,34	1,14	1,75	1,75	1,30
	$\xi_{п}$	3,30	3,52	3,52	1,52	3,52	3,52	1,25	3,96	3,96	1,90
ТЛП-4М-034Г	1	2,04	12,0	49,0	100,0	12,8	52,3	113,0	16,0	66,7	136,0
	2	1,07	26,0	106,2	113,6	29,0	118,4	127,0	36,0	147,0	157,0
	3	2,75	6,0	24,5	67,4	9,4	39,3	108,0	15,5	64,7	178,0
	4	2,13	10,0	40,8	86,9	11,7	48,8	104,0	19,0	77,6	166,0
	5	1,63	11,0	44,9	73,2	18,1	75,5	123,0	21,8	90,8	148,0
	$\sum P_{cp}$	9,62	65,0	265,4	441,1	81,0	334,3	575,0	108,3	446,8	785,0
	$P_{cp}$	1,43	13,0	53,1	88,2	16,2	66,9	115,0	21,7	89,4	157,0
	$\bar{E}$	1,43	2,0	2,0	1,29	1,79	1,77	1,10	1,66	1,65	1,13
	$\xi_{п}$	2,57	4,33	4,33	1,69	3,1	3,0	1,22	2,32	2,27	1,30

Анализ результатов показывает, что полный коэффициент неравномерности удельных нормальных давлений рассматриваемых машин уменьшается при движущейся машине, следовательно, и воздействия нормальных давлений снижается (рис. 4). Движение машин ЧЕТРА ФОРЕСТ ВПМ 130 и ТЛП-4М-034 на увлажненных лесных грунтах сопровождается повышенным колееобразованием, что свидетельствует о возросших значениях удельных нормальных давлений их движителей на грунт. Но при этом интенсивность колееобразования машины ТЛП-4М-034 на 12...15% ниже аналогичного показателя машин ЧЕТРА ФОРЕСТ ВПМ 130.

Известно, что величина интенсивности колееобразования характеризует оптимальную развесовку движителя машины. Данное положение подтверждается экспериментальными исследованиями (табл. 2). Машина ТЛП-4М-034Г имеет наименьшие значения коэффициента  $\xi_{п}$  (1,69...1,22) по сравнению с машиной ЧЕТРА ФОРЕСТ ВПМ 130 (4,17...2,57) и машины ТЛП-4М-034 (1,90...1,55), а следовательно, и высокую проходимость.

**Выводы**

1. Применение комплексного гидропривода с гидростатической трансмиссией в лесозаготовительных машинах повышает их маневренность и проходимость в лесных условиях с реализацией сцепных свойств лесного грунта.
2. Для повышения показателей проходимости лесозаготовительных гусеничных ма-

шин необходимо реализовать в конструкции их движителей значения развесовки при  $\xi_{п} = 1,1-1,3$ .

3. С учетом требований экологической применимости лесозаготовительных машин необходимо провести комплекс конструктивных мероприятий по созданию гусеничного движителя с нормальными удельными давлениями до 40 кПа.

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации проект № 1547.*

#### Библиографический список

1. **Клубничкин, В.Е.** Моделирование движения гусеничных машин по лесным дорогам / В.Е. Клубничкин [и др.] // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. – 2016. – № 1. – С. 171–176.
2. **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.
3. **Клубничкин, Е.Е.** К обоснованию удельного давления гусеничного лесопромышленного трактора / Е.Е. Клубничкин, В.Е. Клубничкин, В.М. Крылов, Д.В. Кондратюк // Лесной вестник. – №8. – 2012. – С. 48–51.
4. **Клубничкин, В.Е.** Современное программное обеспечение для проведения исследований по нагрузкам, устойчивости и проходимости машин / В.Е. Клубничкин, Е.Е. Клубничкин // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – Т. 3. – №5-1 (16-1). – С. 209–214.
5. **Гоберман, В.А.** Колесные и гусеничные машины. Математическое моделирование и анализ технико-эксплуатационных свойств: учеб. пособие / В.А. Гоберман, Л.А. Гоберман. – М.: МГУЛ, 2002. – 322 с.
6. **Klubnichkin, V.E.** Model to calculate loading of transmission elements at controlled curvilinear motion of the tracked timber harvesting machine / V.E. Klubnichkin, E.E. Klubnichkin, V.I. Zaprudnov, L.D. Bukhtoyarov, S.V. Malyukov, D.Yu. Druchinin // Лесотехнический журнал. – 2015. – Т. 5. – №2 (18). – С. 166–176.
7. **Макаров, В.С.** Характер изменения снежного покрова как полотна пути с учетом неравномерности его залегания на местности / В.С. Макаров, А.В. Папунин, Д.В. Зезюлин, В.В. Беляков // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – №4. – С. 33.
8. Клубничкин Е.Е. Моделирование дорожных условий гусеничной лесозаготовительной машины. Естественные и технические науки. – 2005. – №6. – С. 237–243.
9. **Макаров, В.С.** Формирование снежного покрова в зависимости от ландшафта местности и оценка подвижности транспортнотехнологических машин в течении зимнего периода / В.С. Макаров [и др.] // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2013. №2(99). – С. 155–160.
10. **Клубничкин, Е.Е.** Конечно-элементное моделирование ходовой системы гусеничной лесозаготовительной машины / Е.Е. Клубничкин // Автомобильная промышленность. – 2009. – № 2. – С. 29–30.
11. **Котович, С.В.** Методика упрощенного определения некоторых тягово-динамических свойств транспортных средств и ее применение на ранних стадиях проектирования. Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2004. – № 3. – С. 27–33.
12. **Клубничкин, В.Е.** Модель взаимодействия элементов опорной поверхности гусениц лесозаготовительной машины с грунтом / В.Е. Клубничкин [и др.] // Лесотехнический журнал. – 2014. – Т. 4. – №4 (16). – С. 191–200.
13. **Janarthanan, V.** Longitudinal dynamics of a tracked vehicle: Simulation and experiment / V. Janarthanan, S. Padmanabhan, C. Sujatha // Journal of Terramechanics. – 2012. – № 49. – P. 63–72.
14. **Клубничкин, Е.Е.** Анализ процесса качения гусеничного движителя / Е.Е. Клубничкин, В.Е. Клубничкин // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2014. – Т. 2. – №3-4 (8-4). – С. 226–230.
15. **Воскобойников, И.В.** Обоснование выбора системы гусеничных лесозаготовительных машин для совершенствования технологических процессов лесосечных работ / И.В. Воскобойников, Д.В. Кондратюк // Технология колесных и гусеничных машин. – 2015. – № 5. – С. 55–64.
16. **Gigler, J.K.** Design of a simulation model for the prediction of the ground pressure distribution under tracked vehicles. Internal Report, Agricultural & Food Engineering Dept., University College, Dublin (1992).
17. **Wong, J.Y.** Development of high-mobility tracked vehicles for over snow operations. Journal of Terramechanics. – 2009. – № 46(4). – P. 141–155.

18. **Клубничкин, Е.Е.** Повышение долговечности ходовых систем гусеничных лесозаготовительных машин // Техника и технология. – 2005. – №5. – С. 58–62.
19. **Котиков, В.М.** Лесозаготовительные и трелевочные машины / В.М. Котиков, Н.С. Еремеев, А.В. Ерхов. – М.: Лесная промышленность, 2004. – 336 с.
20. **Миркин, С.Н.** Влияние микропрофиля на буксование гусеничного движителя / С.Н. Миркин, С.А. Черябриков // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2006. – № 3. – С. 32–33.
21. **Клубничкин, Е.Е.** Анализ путей повышения качества систем поддрессирования гусеничных лесозаготовительных машин. – 2005. – №5. – С. 157–161.
22. **Котиков, В.М.** Воздействие лесозаготовительных машин на лесные почвы / В.М. Котиков // Диссертация доктора технических наук. – М.: МЛТИ, 1995. – 214 с.
23. **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.
24. **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.
25. **Беккер, М.Г.** Введение в теорию систем местность-машина: [пер. с англ.] / М.Г. Беккер; под ред. В.В. Гуськова. – М.: Машиностроение, 1973. – 520 с.
26. **Mezyk, A.** Modelling and Investigation of Dynamic Parameters of Tracked Vehicles / A. Mezyk, E. Switoski, S. Ksciuk, W. Klein // Mechanics and Mechanical Engineering. 2011. – Vol. 15. – № 4. – P. 115–130.
27. **Клубничкин, Е.Е.** Изменение длины опорно-активных участков движителя гусеничной лесозаготовительной машины с учетом режимов нагружения / Е.Е. Клубничкин, В.Е. Клубничкин, Ю.В. Башкирцев, В.М. Крылов // Лесной вестник. – №2 (94). – 2013. – С. 119–120.
28. **Зезюлин, Д.В.** Влияние параметров движителей на показатели эффективности колесных машин при движении по снегу / Д.В. Зезюлин, У.Ш.Вахидов, В.С. Макаров, В.В. Беляков //Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 5. – С. 84.
29. **Беляков, В.В.** Подвижность специальных транспортных средств по дорогам типа «stone-road» / В.В. Беляков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2012. – № 1 (94). – С. 143–151.
30. **Гончаров, К.О.** Экспериментальные исследования многоосной колесной машины / К.О. Гончаров, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2010. – № 12. – С. 10.

*Дата поступления  
в редакцию 28.10.2016*

**Е.Е. Klubnichkin<sup>1</sup>, V.E. Klubnichkin<sup>1</sup>, V.S. Makarov<sup>2</sup>, D.V. Zeziulin<sup>2</sup>, V.V. Belyakov<sup>2</sup>**

### **EVALUATION INDICATOR OF TRAFFICABILITY OF TIMBER HARVESTING MACHINES**

Moscow State Technical University. n.a. N.E. Bauman (Mytishchi branch)<sup>1</sup>,  
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeyev<sup>2</sup>

The purpose is to study the influence of the type of transmission on the trafficability of forest machines. Tests of forest machines with different transmissions are described. The comparison of the data obtained in the tests is carried out. Analysis of the results, which shows that the total ratio of non-uniformity of normal pressure of the specific machines decreases when machine is moving, is made. Consequently, the effect of normal pressures on the ground is reduced. Application of the hydraulic drive with hydrostatic transmission in timber harvesting machines increases their flexibility and trafficability in forest conditions. These studies allow giving recommendations on the choice of transmission of forest machines and choosing the rational weight distribution that improves the uniformity of the specific pressures and thus enhances environmental safety.

*Key words:* tracked vehicle, transmission, trafficability, mover.

УДК 658:669.131.7:338.512

И.О. Леушин<sup>1</sup>, Д.Г. Чистяков<sup>2</sup>, А.В. Нищёнков<sup>1</sup>

## АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТЕКЛОФОРМУЮЩЕЙ ОСНАСТКИ НА ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
ОП ООО "Инженерно-технологический центр РУСАЛ", г. Санкт-Петербург<sup>2</sup>

Рассмотрены детали стеклоформирующей оснастки – стеклоформы, применяемые для массового выпуска стеклянной тары. Проанализирована зависимость себестоимости производства формовых комплектов от технологии их изготовления. Доказана возможность производства готовых деталей (на отечественных заводах) с ресурсом эксплуатации на уровне мировых аналогов – 700...1000 тыс. циклов. Рассчитана точка безубыточности производства в условиях процесса импортозамещения деталей стеклоформ.

*Ключевые слова:* стеклотара, стеклоформа, заготовка, оснастка, формовой комплект, чугун, стоимость, эффективность.

### Введение

Конкуренция в сбыте стеклоформирующей оснастки (рис. 1) на территории страны в основном осуществляется между иностранными производителями, а отечественные изготовители (как по технологическим, так и экономическим причинам) не имеют весомой доли на рынке (менее 15% в денежном эквиваленте). Основным сдерживающим производственным фактором является неэффективная технология производства изделий и, как следствие, высокие издержки и низкий ресурс готовой формовой оснастки. Действующие мощности, потенциал рабочей силы и имеющиеся научные разработки позволяют отечественным производителям обеспечить рост производительности при повышении экономической эффективности изготовления деталей стеклоформ.



Рис. 1. Стеклоформирующая оснастка

### Обзор состояния вопроса

Основными способами поддержания существования на рынке полноценных производителей (заготовка – полуфабрикат – готовое изделие) стеклоформирующей оснастки являются:

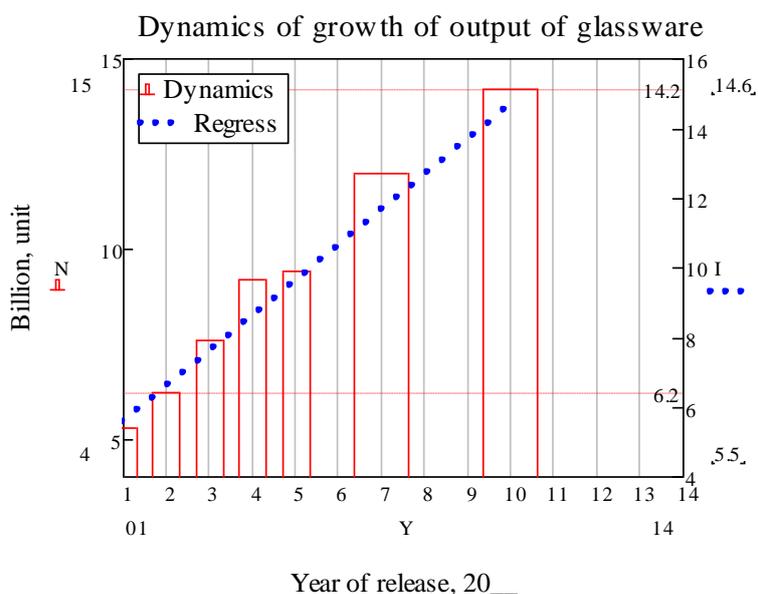
- сокращение издержек – сокращение неэффективных производственных мощностей и передача отдельных производственных операций (термическая обработка, механическая обработка, сборка и т.д.) обособленным подразделениям предприятия или другим производителям;
- изготовление продукции с максимальной добавленной стоимостью (производство формо-

вых комплектов для динамично развивающихся отраслей (косметическая, химическая и т.д.), где спрос растет наиболее быстрыми темпами, стеклоупаковка имеет оригинальную конфигурацию, а формовой комплект обладает повышенной сложностью изготовления);

- устранение низкорентабельных активов – выделение активов с низкой отдачей от инвестиций в производство новых комплектов в отдельные бизнес-единицы (повышение привлекательности основных производственных мощностей).

Ведение конкурентной борьбы за рынки сбыта стеклоформирующей оснастки обеспечило на территории России преимущество иностранным импортерам: доля оборудования, зависящего от деталей исключительно зарубежного производства, увеличилась до 87% [1]. Важным фактором при этом является уровень локализации производства зарубежных изготовителей, который остается низким, и это пока позволяет отечественным предприятиям бороться с высокими издержками (доля энергозатрат в себестоимости продукции в РФ на 20...30% выше зарубежных аналогов) [2]. Это в свою очередь – после изменения паритета покупательной способности (отечественных и иностранных) формовых комплектов при имеющейся курсовой разнице<sup>1</sup> – привело к падению спроса на иностранную продукцию, проведению операций ремонта и переработки стеклоформирующей оснастки отечественными заводами, обратному росту производственных мощностей.

Стеклотарные заводы, выпускающие продукцию большими объемами (100...500 млн шт), заинтересованы в стабильной бесперебойной эксплуатации формовых комплектов. Об этом свидетельствует и статистика: в 2000...2010 гг. наметился интенсивный рост объемов собственного производства стеклянной тары – с 5,6 млрд до 14,2 млрд штук [2]. Данные по приросту производительности стеклотары в РФ представлены на рис. 2.



**Рис. 2. Динамика изменения выпуска стеклянной тары с 2002 по 2014 гг<sup>2</sup>, млрд шт.:**  
 N – количество выпущенной тары; I – регрессия МНК; Y – год выпуска

<sup>1</sup> Стеклотарные заводы – потребители стеклоформирующей оснастки зарубежного производства, осуществляющие сбыт тары на территории России, вынуждены приобретать детали у поставщиков за валюту по текущему обменному курсу. В связи с установившейся курсовой разницей стоимость покупаемой оснастки значительно возросла (за исключением существующего демпинга некоторых производителей), заводы вынуждены искать более выгодные варианты приобретения деталей стеклоформ. В этих условиях ведущие отечественные предприятия-изготовители формовой оснастки (ООО "MouldTech", ЗАО "Завод "Флакс", ОАО "Тверьстекло" и др.) имеют преимущества в отпускной цене продукции, а ведущие российские стеклотарные заводы (ЗАО "ОСТ", ЗАО "Веда-Пак", Saint Gobain, ЗАО "Свет", АПС "РусьСтекло" и др.) – в наращивании рынка сбыта стеклотары (росту производительности) за счет импортозамещения стеклотары из-за рубежа [3].

<sup>2</sup> статистические данные "Стеклосоюз России", Международной конференции "Стекло и современные технологии – XXI", прогнозные значения

При этом конкурентоспособность стеклотарных предприятий по направлениям продвижения новой продукции, снижения издержек и, как следствие, отпускной цены находится на низком уровне [4].

### Особенности производства деталей стеклоформ

Выбор технологии (варианта) изготовления стеклоформирующей оснастки определяется на основе комплексного подхода технологической, организационной и экономической целесообразности производства.

Технико-экономический анализ текущих процессов изготовления формовой оснастки показал, что минимальной стоимостью обладают формы, ресурс которых составляет 200...400 тыс. термоциклов (теплосмен, смыканий рабочих кромок). Это связано с тем, что они изготавливаются из невысококачественного материала – экономнолегированного и немодифицированного чугуна<sup>3</sup>. Термической обработкой таких заготовок является щадящий отжиг, включающий в себя нагрев до 750...930 °С и выдержке в течение 4..10 часов (в зависимости от степени полученного литьем отбела). Формовые комплекты из чугуна, рабочие кромки которых дополнительно упрочняются (например, нанесением износостойкого покрытия), выдерживают уже до 400...550 тыс. теплосмен. Однако их отпускная цена – согласно данным заводов – повышается на 20...30%. По статистике стоимость формовых комплектов, изготовленных из легированного чугуна со специальным химическим составом и специальной конфигурации полости, выше на ~50%, а формовые комплекты, не заменяемые для больших тиражей стеклянной тары, но эксплуатирующиеся длительное время для выпуска малыми партиями, стоят в 2...3 раза дороже форм, рассчитанных на 200...400 тыс. термоциклов.

На изготовление чугунных литевых форм приходится существенная часть от стоимости всего технологического процесса [5, 6] – себестоимость готового расплава чугуна зависит линейно от его химического состава [7]. Подсчитано, что от того, насколько качественно выполнено литье пресс-форм, практически наполовину зависит качество конечного результата – стойкость формовых комплектов на производственной линии [8].

Установлено, что на себестоимость изготовления формовых комплектов оказывают влияние:

1. Выбор материала: нержавеющая сталь, низколегированный чугун, нирезист и т.д. От химического состава материала зависит его макро- и микроструктура (рис. 3, а, б), соответственно, физические (теплопроводность) и механические свойства (прочность, твердость ударных поверхностей) пресс-форм.

2. Конфигурация и компоновка формы: вид стеклоформирующего оборудования (роторные и карусельные автоматы); габариты – количество полостей (будущих стеклоизделий) в формовом комплекте; наличие поднутрений, "фигуристых" частей – технологическая сложность выполнения полости и т.д.

3. Способ изготовления литых заготовок:

– технология литья: кокиль, песчаная форма;

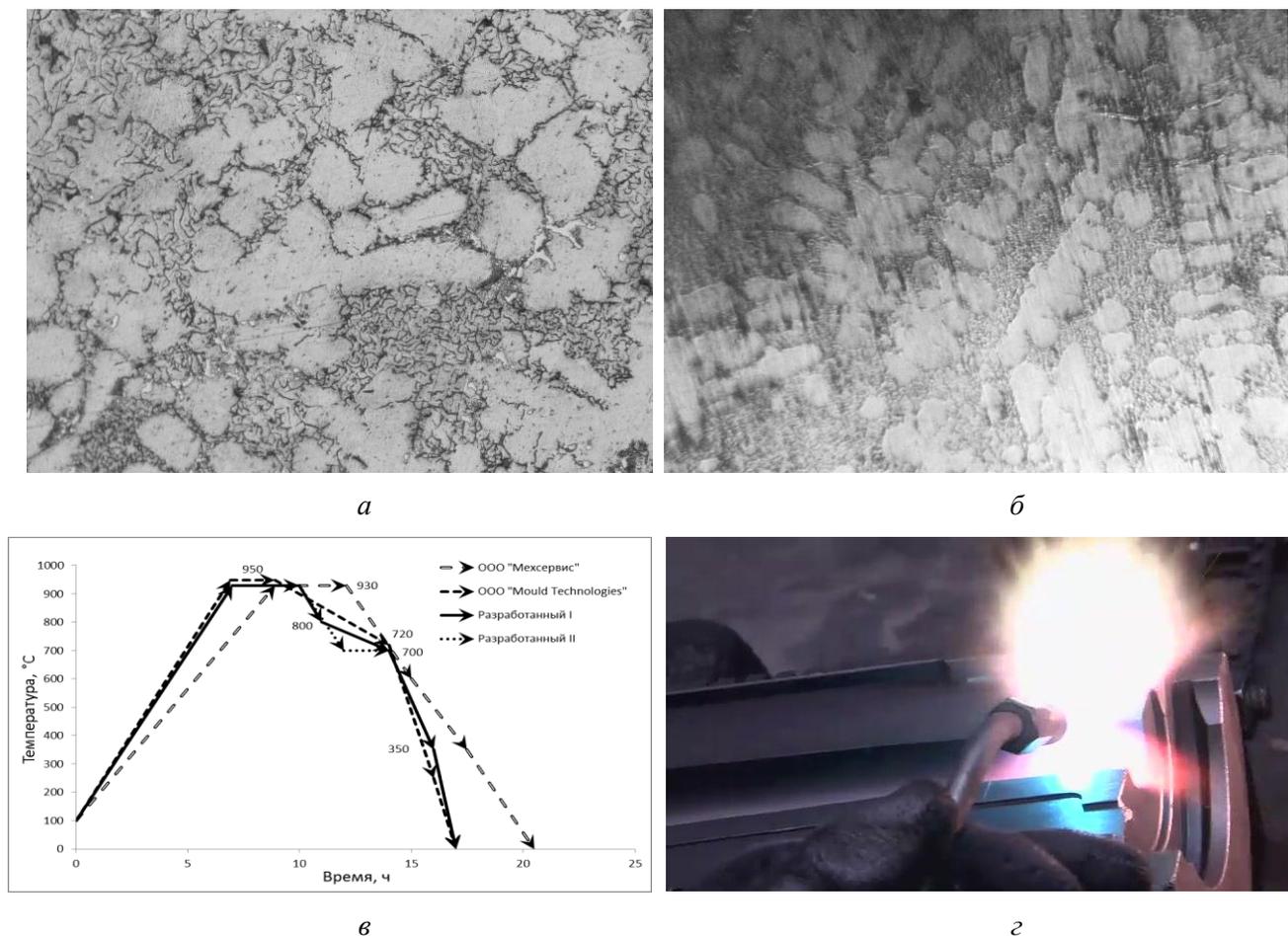
– технологии термической обработки отливок (рис. 3, в): высокотемпературный или графитизирующий отжиг, объемная или точечная закалка и т.д.;

– технология механической обработки (резаньем или электроэрозией, ротационный или фрезерный станок и т.д.), зависящая от конфигурации полости и габаритных размеров пресс-форм<sup>4</sup>.

<sup>3</sup> Исследования проводились на формовой оснастке для стеклоформирующих автоматов типов: AL-1110, BB-7, S-7 (ОАО "Красное Эхо" – ООО "Мехсервис"), U-8 M (ОАО "Свет" – ООО "Mould Tech").

<sup>4</sup> Пресс-формы для бутылок, все элементы которых имеют цилиндрическую форму, можно произвести на ротационном станке, обеспечивающем низкие затраты на передел. Для изготовления пресс-форм для бутылок несимметричной и нецилиндрической форм (квадратные, шестигранные, овальные) потребуется применение фрезерного станка, что повышает себестоимость производства [7].

4. Применение методов дополнительного упрочнения рабочих поверхностей и кромок (рис. 4, з).



**Рис. 3. Технология изготовления стеклоформ:**

*а, б* – микроструктуры серых чугунов с разным химическим составом,  $\times 100$  [травлено ниталом];  
*в* – режимы термической обработки заготовок;  
*з* – нанесение износостойкой никелевой наплавки

Авторами опробованы следующие низкзатратные способы совершенствования структуры чугуна, позволяющего повысить эксплуатационный ресурс формовых комплектов до 800...1000 тыс. теплосмен без повышения себестоимости изготовления заготовок:

- самоотжиг с "литейного нагрева" для интенсификации процесса формирования ферритной/аустенитной основы чугуна [9];
- внесение в расплав (присадкой ферросплавов, лигатур, модификаторов) относительно недорогих элементов (например, Si и Al), благоприятствующих графитизации и ферритизации чугуна [10];
- модифицирование с целью измельчения как макро- и микрзерна, так и изменения форм графитовых зерен и фазовых составляющих эвтектик [11].

#### **Экономические перспективы изготовления стеклоформирующих комплектов**

С целью неразглашения конфиденциальной информации о структуре себестоимости продукции на предприятиях-изготовителях оснастки был проведен CVP-анализ (Cost – Volume – Profit) по средним показателям заводов-изготовителей формовых комплектов с учетом новых условий. Расчет точки безубыточности производства (ТБП) связан с программой выпуска завода: как правило, стеклотарные заводы предпочитают иметь собственные подразделения для изготовления литых заготовок, термической и механической обработки.

Однако в связи с интенсивным сокращением неэффективных производственных мощностей в 2008...2010 гг. [2] образовались отдельные обособленные предприятия, в которых цена отпускаемой продукции и программа выпуска играют ключевую роль. Поэтому важным критерием оценки эффективности производства является расчет ТБП по причине наметившейся тенденции импортозамещения стеклоформирующей оснастки.

Себестоимость одной тонны заготовок из чугуна, легированного кремнием, хромом, и никелем, рассчитывалась исходя из распределения затрат по статьям на условно-переменные (УПр) и условно-постоянные (УПс) (табл. 1) с учетом минимальной программы выпуска продукции – 100 т.

Проведенные расчеты по средним показателям установили, что маржинальный доход (MR) составит 8 369 031 руб, а ТБП в денежном эквиваленте – 9 293 564 руб., в натуральном – 55.87 т высококачественных формовых комплектов. Таким образом, запас прочности предприятия ( $\Delta$ ) составит 44.17 т. График расчета ТБП представлен на рис. 4.

Таблица 1

## Результаты расчета себестоимости тонны заготовок стеклоформ

Статья затрат	руб./т	
	УПр	УПс
Сырье и материалы	17 512.53	
	17 512.53	0
Электроэнергия и природный газ	1 011.23	
	1 011.23	0
Оплата труда с начислением	2 822.86	
	1 129.15	1 693.72
Амортизационные отчисления	1 800.10	
	720.04	1 080.06
Цеховые расходы	959.60	
	767.68	191.92
Общезаводские расходы	2 380.77	
	0	2 380.77
Всего	26 487.09	
	21 140.62	5 346.47

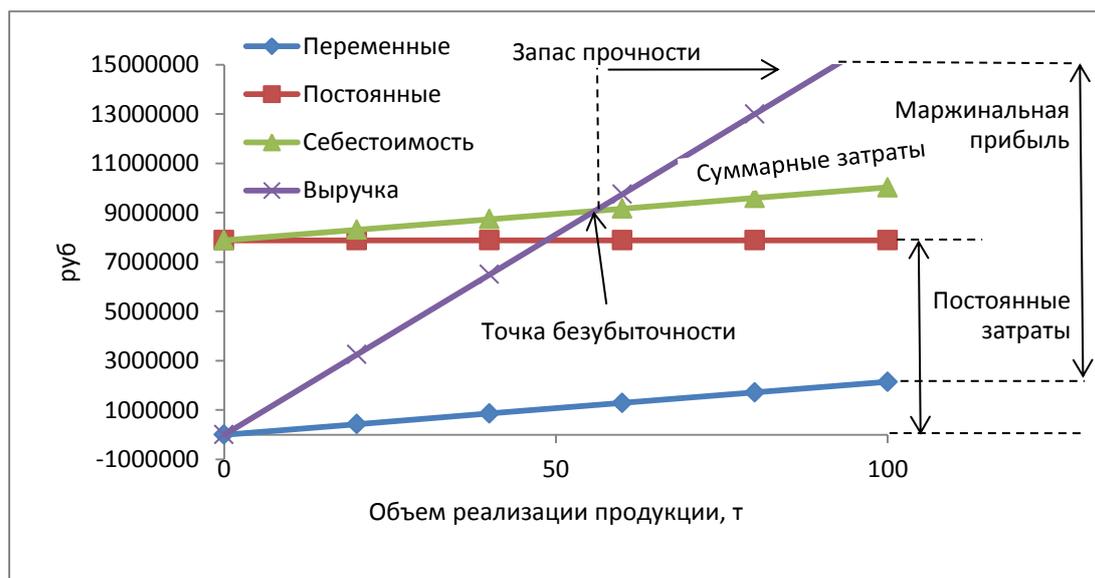


Рис. 4. График расчета точки безубыточности производства с учетом годовой программы выпуска продукции предприятием

Ранее проведенные исследования и расчеты [12] позволили установить, что наиболее востребованными технологиями изготовления заготовок стеклоформирующей оснастки являются:

- способ изготовления комплектов из серых чугунов с пластинчатой формой графита (ISO 185/JL/250...300, ISO R945 – тип I, ASTM A247 – типы VII и VIIA др.) и с процедурой последующего упрочнения рабочих кромок форм никелевой наплавкой (способ 1);
- способ изготовления комплектов из низколегированных чугунов с вермикулярной или квазипластинчатой (quasi-flake) формами графита: ISO 16112/JV/400...500/S, ASTM A247, типы II и IV, и др. (способ 2);
- способ изготовления комплектов из чугуна с дифференцированной по форме графита структурой (способ 3).

Однако эффективность внедрения этих технологий (в зависимости от целевого показателя) различна, а сравнить данные способы по показателям себестоимости изготовления тонны годного чугуна или капиталоемкости производства не представляется возможным, например, в виду технологической сложности приготовления отдельных марок сплавов из-за низкого качества отечественных шихтовых материалов (импорт которых на данный момент ограничен). При этом сравнение технологий представляется возможным провести методом принятия решения на множестве альтернатив по множеству сравниваемых показателей.

Известно, что для каждого измеряемого параметра оптимизации можно построить ранговый аналог. На основе рангового подхода (ранжирования) по пятибалльной шкале (0...4), то есть дискретной ограниченной области определения показателей, была проведена оценка действующих технологий изготовления формовых комплектов путем введения системы предпочтений на множестве значений, выполняя следующий алгоритм:

- отбор оптимального количества критериев (11 шт.);
- ранжирование критериев по степени их значимости (в порядке уменьшения значимости);
- определение весовых коэффициентов каждого значения критерия и нормирование полученных результатов;
- ранжирование вариантов технологии в соответствии с экспертной оценкой по каждому критерию;
- определение весовых коэффициентов сравниваемых технологий по каждому критерию и нормирование полученных результатов;
- обобщение результатов и принятие решения о выборе технологии по критерию максимального результата.

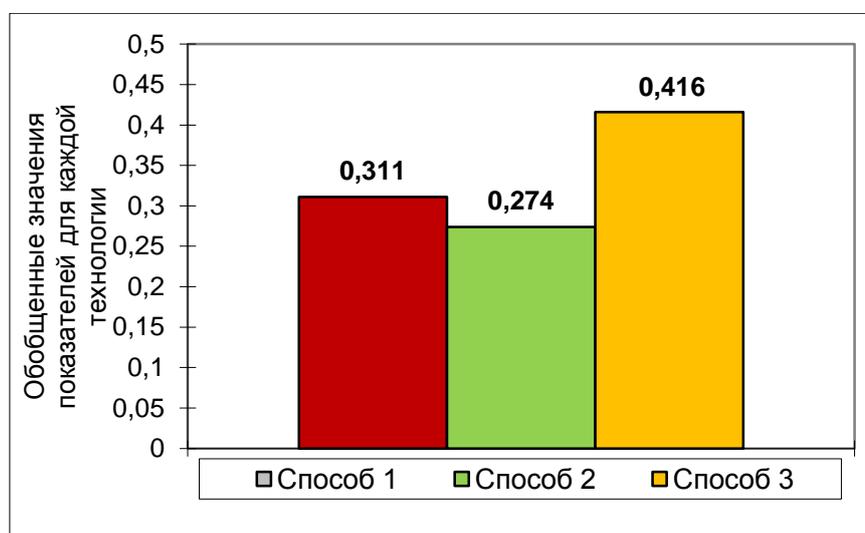


Рис. 5. Результаты расчета

Сравнивались следующие показатели: инвестиционные затраты, потребность в обслуживающем персонале, безопасность процесса, занимаемая площадь, дополнительное упрочнение рабочих кромок, качество шихтовых материалов (сырья), время изготовления литой детали, применение дополнительного оборудования, стоимость шихтовых материалов (сырья), дефектность получаемых деталей, эксплуатационный ресурс получаемых литых деталей.

По результатам расчетов методом принятия решения на множестве альтернатив по множеству сравниваемых показателей для разных способов производства деталей стеклоформ авторами установлено [13]: изготовление литых заготовок с дифференцированным расположением графитовых включений чугуна по сечению стеклоформы является наиболее экономически эффективным (способ 3). На рис. 5 представлены обобщенные значения сравниваемых показателей для разных способов производства стеклоформ.

### Заключение

Производство стеклянной тары ведется более чем на 70 заводах стекольной промышленности [14], а производство формовой оснастки – более чем на 100. Основные мощности сосредоточены в Центральном регионе – 44%.

Стекольная промышленность вносит весомый вклад в экономику ряда регионов и в течение последних 10 лет характеризуется значительным ростом [15], но при этом динамика развития стекольной промышленности нестабильна по причине высокой конкуренции мирового рынка стекла – импорт превышает экспорт. Возможности импортозамещения позволяют занять нишу европейских и американских компаний, поставляющих как формовую оснастку для изготовления стеклотары и саму стеклотару, так и шихтовые компоненты для их получения. Резкое повышение стоимости импортной продукции за счет изменения паритета покупательной способности отечественных и иностранных металлоформ позволяет наращивать производственные мощности, а интенсивный рост потребления стеклянной тары (в первую очередь бутылочной – 87,80% от всей тары) формирует спрос на высококачественную формовую оснастку, способную эксплуатироваться на линии до 700..1000 тыс. съемов при низких затратах на ее изготовление. Оптимальным вариантом – согласно расчетам авторов – является изготовление деталей стеклоформ с дифференцированной по форме графита структурой чугуна при минимальной программе производства в 55.87 т годных формовых комплектов в год.

### Библиографический список

1. **Грибков, А.А.** Федеральный образовательный портал "Экономический портал Institutiones.Com". Конкурентоспособность станкостроения России [Электронный ресурс] / А.А. Грибков, Д.В. Захарченко, А.А. Корниенко. – Электрон. текстовые дан. – М.: [б.и.], 2014. – Режим доступа: <http://institutiones.com/general/2219-konkurentosposobnost-stankostroeniya-rossii.html> (дата обращения: 15.02.2016).
2. **Осипов, В.И.** Основные тенденции развития стекольной промышленности в сложных экономических условиях // Тезисы доклада на Международной конференции "Стекло и современные технологии – XXI" (19 ноября 2014 г., г. Москва). – М., 2014. URL: [http://www.steklosouz.ru/docs/SIST19\\_11\\_2014/Osipov.V.I..pdf](http://www.steklosouz.ru/docs/SIST19_11_2014/Osipov.V.I..pdf) (Дата обращения: 11.12.2015).
3. Обзор рынка сбыта тарного стекла для пищевой промышленности в России. – М.: Info Mine (Маркетинговые исследования в области минеральных ресурсов, металлургии и химической промышленности), 2007. – 158 с.
4. **Щетинина, Е.Д.** Системный подход к управлению конкурентной активностью промышленного предприятия / Е.Д. Щетинина, А.А. Архипенко // Фундаментальные исследования. – № 3–2. – 2012. – С. 489–494.
5. **Морозов, В.В.** Исследование износостойкости упрочненных лазерным излучением кромок деталей формовых комплектов для литья стеклотары / В.В. Морозов, В.И. Югов, А.Н. Шлегель // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. – №7 (31). – С. 52–56.
6. **Пат. 2276694 С1 РФ.** Способ изготовления чугунных литьевых форм / Журавель В.М., Буханова И.Ф., Дивинский В.В. и др. Бюл. № 14. 20.05.2006.

7. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 280 с.
8. Медяник, Н.Л. Производство стекла и стеклянной тары / Н.Л. Медяник [и др.]. – Магнитогорск: МГТУ, 2007. – 205 с.
9. Леушин, И.О. Оптимизация технологии производства чугунных литых заготовок стеклоформ с целью повышения эксплуатационного ресурса изделий / И.О. Леушин, Д.Г. Чистяков // Технология металлов. – 2014. – №1. – С. 38–43.
10. Леушин, И.О. Формирование термоокалиностойкой структуры посредством интенсификации процессов феррито- и графитообразования на примере отливок стеклоформ / И.О. Леушин, Д.Г. Чистяков // Литейные процессы: Межрегиональный сборник научных трудов под редакцией В.М. Колокольцева. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорского гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. – С. 18–28.
11. Леушин, И.О. Упрочняющие фазы чугунных деталей стеклоформ с градиентной структурой литья / И.О. Леушин, Ю.А. Зиновьев, Д.Г. Чистяков // Литье и металлургия. – 2014. – №1 (74). – С. 62–68.
12. Леушин, И.О. Оценка целесообразности совершенствования технологии изготовления деталей чугунных стеклоформ методами многокритериальной экспертной оценки / И.О. Леушин, А.В. Нищенко, Д.Г. Чистяков // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2014. – №2(46). – С. 63–68.
13. Быстров, О.Ф. Управление инвестиционной деятельностью в регионах Российской Федерации / О.Ф. Быстров [и др.]. – М.: ИНФРА-М, 2008. – 358 с.
14. Волков, А.А. Российский рынок пищевой и стеклянной тары: особенности и тенденции развития // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2006. – №10(25). – С. 11–15.
15. Лебедев, В.Е. Особенности реализации резервов развития на предприятии стекольной промышленности: автореф. ... дис. канд. экон. наук. – Н. Новгород, 2011. – 24 с.

*Дата поступления  
в редакцию 31.10.2016*

**I.O. Leushin 1, D.G. Chistyakov, A.V. Nischenkov 1**

## **THE ANALYSIS OF THE PRODUCTION TECHNOLOGY OF GLASS-PRESS-MOLDING EQUIPMENT AT THE DOMESTIC ENTERPRISES**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeyev<sup>1</sup>,  
Department of Math Modeling and Automation of Alumina Refineries,  
Ltd. "Engineering & Technology Center RUSAL" in St. Petersburg<sup>2</sup>

**Purpose:** Review and analyzing of glass-press-molding equipment (glass-press-molds), which using to mass release of glass containers.

**Approach:** Analyzing of dependence "cost of molding sets production" & "manufacturing process", using of method "Cost – Volume – Profit".

**Finding:** Possibility of production details (at domestic plants), which has an operation resource up to the world analogs (700...1000 thousand cycles), is proved.

**Research implications:** Research results will help to solve of optimization`s problem of glass-mold`s production as dependence "cost of production of molding sets" & "manufacturing process".

**Value:** The breakeven point in the conditions of process of import substitution of glass-molds is calculated.

*Key words:* glassware, glass-press-mold, preparation, equipment, molding set, cast iron, cost, efficiency.

---

## НАШИ АВТОРЫ

### ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

**Борисов Геннадий Валерьевич** – старший преподаватель НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
436-43-83, kafedraat@gmail.com

**Галкина Екатерина Дмитриевна** – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
vm@nntu.nnov.ru.

**Гребенщиков Виктор Иванович** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
greben@mts-nn.ru

**Гойхман Михаил Борисович** – м.н.с. Института Прикладной Физики РАН;  
416 46 35, goihman@appl.sci-nnov.ru

**Громов Александр Викторович** – м.н.с. Института Прикладной Физики РАН;  
8(831) 416 46 35, gromov@appl.sci-nnov.ru

**Грошева Екатерина Альбертовна** – ведущий инженер-исследователь НИГ 3102 ФГУП «ФНПЦ Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова;  
469-57-09, tkm@nntu.nnov.ru

**Гусев Игорь Владимирович** – заместитель главного конструктора ФГУП «Российский федеральный ядерный центр- Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»; tkm@nntu.nnov.ru

**Дмитриев Владимир Николаевич** – ведущий специалист НИГ 3102 ФГУП «ФНПЦ Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова;  
469-57-09, tkm@nntu.nnov.ru

**Ильичев Кирилл Владимирович** – студент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
Kirill989ilichev@gmail.com

**Ерофеева Лариса Николаевна** – канд. физ.-мат. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
257-86-91, vm@nntu.nnov.ru

**Кисиленко Кирилл Игоревич** – аспирант, ассистент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
436-82-33.

**Ковалев Николай Федорович** – д-р физ.-мат. наук, зав. лаб. Института Прикладной Физики РАН;  
436 78 10, kovalev@appl.sci-nnov.ru

**Куликов Сергей Валентинович** – заместитель главного конструктора, начальник ДР АСУ и ВУ ФГУП «ФНПЦ Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова;  
436-16-03, tkm@nntu.nnov.ru

**Лабаев Алексей Михайлович** – начальник управления информатизации, аспирант НГТУ имени Р.Е. Алексеева;  
436-83-45, labaev@nntu.nnov.ru.

**Лещева Светлана Викторовна** – канд. физ.-мат. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
257-86-91, vm@nntu.nnov.ru

**Малахов Василий Алексеевич** – д-р техн. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
436-82-33.

**Манцеров Сергей Александрович** – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
mca\_9@nntu.nnov.ru

**Охотников Иван Дмитриевич** – студент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
436-78-40, okhotaiivan5@gmail.com

**Панов Алексей Юрьевич** – д-р техн. наук, профессор, директор ИПТМ НГТУ им. Р.Е. Алексеева НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
fam@nntu.nnov.ru

**Палицин Алексей Валентинович** – канд. физ.-мат. наук, н.с. Института Прикладной Физики РАН;  
pal@appl.sci-nnov.ru

**Прядилов Александр Вячеславович** – инженер АО «Федеральный научно-производственный центр „Нижегородский научно-исследовательский институт радиотехники“»; 465-00-69

**Степаненко Мария Анатольевна** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
436-82-33, Stepanenkoma@mail.ru

**Тимофеев Евгений Петрович** – канд. техн. наук, профессор, с.н.с. НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
436-82-33, physics@nntu.nnov.ru

**Узлов Виктор Александрович** – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; 436-82-33

**Фунтиков Егор Андреевич** – магистрант НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
jora5852@mail.ru

**Хранилов Валерий Павлович** – д-р. техн. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева; 436-93-47, hranilov@nntu.nnov.ru

**Чивенков Александр Иванович** – канд. техн. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева; chyvenkov@mail.ru

**Щербаков Владимир Викторович** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; physics@nntu.nnov.ru

## **ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ**

**Блохин Александр Николаевич** - канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; a.n.blokhin@gmail.com

**Дмитриев Сергей Михайлович** – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой, ректор НГТУ им. Р.Е. Алексеева; 436-23-25, rectorat@nntu.nnov.ru

**Добров Александр Алексеевич** – ассистент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; 436-80-17, a.a.dobrov@yandex.ru

**Мешков Анатолий Николаевич** – д-р техн. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева; 89036083368

**Тихомиров Владимир Анатольевич** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; vat45.tikhomirov@yandex.ru

**Охотников Максим Николаевич** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; thermae@mail.ru

**Плехов Александр Сергеевич** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; arplehov@mail.ru

**Серебряков Артем Владимирович** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; serebryakov@ardman.ru

**Легчанов Максим Александрович** – канд. техн. наук, доцент, зам. директора ИЭиТФ НГТУ им. Р.Е. Алексеева; 436-63-53, legchanov@mail.ru

**Хробостов Александр Евгеньевич** – канд. техн. наук, доцент, директор ИЯЭиТФ НГТУ им. Р.Е. Алексеева; 436-63-53: khrobostov@nntu.nnov.ru

**Хорьков Сергей Васильевич** – канд. физ.-мат. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; Sv.Khorkov@yandex.ru

**Яшина Алла Николаевна** – канд. физ.-мат. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; 89103985051

## **МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО**

**Беляков Владимир Викторович** – д-р техн. наук, профессор, начальник УНИИИР НГТУ им. Р.Е. Алексеева; nauka@nntu.nnov.ru

**Беляев Александр Михайлович** – ст. преподаватель НГТУ им. Р.Е. Алексеева, инженер ООО «Автол»; myhome2010@mail.ru

**Береснев Павел Олегович** – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; Nord13@mail.ru

**Бушуева Марина Евгеньевна** – канд. техн. наук, доцент, декан ФДП и ДОУ НГТУ им. Р.Е. Алексеева; bme@nntu.nnov.ru

**Зезюлин Денис Владимирович** – канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; balakhnaman@gmail.com

**Зуев Валерий Андреевич** – д-р техн. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева; ship@nntu.nnov.ru

**Грамузов Евгений Михайлович** – д-р техн. наук, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева; ship@nntu.nnov.ru

**Колотилин Владимир Евгеньевич** – почетный работник науки и техники РФ, канд. техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева; transfer@nntu.nnov.ru

**Кострова Зоя Александровна** – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева; zzz2015@yandex.ru

**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

---

**Крюков Олег Викторович** – д-р. техн. наук,  
доцент, главный специалист ОТД и НТИ АО  
«Гипрогазцентр» (г. Нижний Новгород);  
428-25-84, o.kryukov@ggc.nnov.ru

**Леушин Игорь Олегович** – д-р техн. наук,  
профессор,  
зав. кафедрой НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
igoleu@mail.ru

**Макаров Владимир Сергеевич** – канд.  
техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
Makvl2010@gmail.com

**Михеев Артур Владимирович** – аспирант,  
инженер НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
micheev-av@mail.ru

**Нищёнков Александр Владимирович** –  
канд. техн. наук,  
доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
goz@nntu.nnov.ru

**Порубов Дмитрий Михайлович** – маги-  
странт НГТУ им. Р.Е. Алексеева, инженер-  
техник АО ЦНИИ «Буревестник»;  
Dporubov@gmail.com

**Смоленский Станислав Юрьевич** – канд.  
техн. наук, доцент НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
selinal947@yandex.ru

**Филатов Валерий Игоревич** – аспирант  
НГТУ им. Р.Е. Алексеева;  
filatov.v.ngtu@ya.ru

**Чистяков Дмитрий Геннадьевич** – канд.  
техн. наук, ведущий инженер ООО "РУСАЛ  
Инженерно-технологический центр"  
(г. Санкт-Петербург);  
dmitriy.chistyakov@rusal.com

**Якимов Роман Игоревич** – магистр НГТУ  
им. Р.Е. Алексеева;  
ya-r@ro.ru

## РЕКОМЕНДАЦИИ ПО НАПИСАНИЮ АВТОРСКИХ РЕЗЮМЕ

(АННОТАЦИЙ, РЕФЕРАТОВ К СТАТЬЯМ)

Авторский реферат на английском языке должен быть понятен без ссылки на саму статью. Это краткое точное изложение содержания документа, включающее основные фактические сведения и выводы описываемой работы. Объем не менее 10 строк (100–250 слов – 850 знаков). Реферат включает: 1) предмет, тему, цель работы; 2) метод или методологию проведения работы; 3) результаты и область их применения; 4) выводы. Таблицы, формулы, рисунки (нумерация в реферате может не совпадать с текстом статьи) включаются, если раскрывают основное содержание документа и позволяют сократить объем реферата.

Реферат можно начать с изложения результатов работы и выводов. Сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте реферата. Следует применять терминологию, характерную для иностранных специальных текстов, избегать терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных слов. Текст должен быть связным с использованием слов «следовательно», «более того», «например», «в результате» (consequently, moreover, for example, the benefits of this study, as a result). Необходимо использовать активный, а не пассивный залог, т.е. «The study tested», но не «It was tested in the study».

Авторское резюме из International Journal of Operations & Production Management. V.22.N 8

**B. Meijboom, M. Houtepens**

### STRUCTURING INTERNATIONAL SERVICE OPERATIONS: A THEORETICAL FRAMEWORK AND A CASE STUDY IN THE IT-SECTOR

#### The name of organization

**Purpose:** The specific challenges with which companies pursuing international manufacturing strategies are faced, if their output also contains a service dimension, are addressed.

**Design/methodology/approach:** A theoretical framework is proposed based on three virtually complementary perspectives by integrating international production, demand, and contemporary ICT-based theory. Subsequently, an exploratory case study in a pure service environment is described that illustrates the value of the framework.

**Findings:** It is possible, for example, to apply the theoretical framework to case studies in internationally-operating companies delivering a mix of goods and services.

**Research limitations/implications:** The present study provides a starting-point for further research in the international manufacturing sector.

**Originality/value:** Moreover, the framework has proven to be useful in improving the European structure of the case company. This is a notable and promising side-effect of the exploratory study, at least from a managerial point of view.

*Key words:* multinationals, service operations, location, decision making, case studies.

**ПРИНИМАЕМ В ПЕЧАТЬ НАУЧНЫЕ СТАТЬИ В ЖУРНАЛ  
«ТРУДЫ НГТУ им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»**

*Адрес редакции: 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24  
Телефон: 8(920)00-37-877  
E-mail: rsl@nntu.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, подрисовочная 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**

**№ 4 (115)**

Редакторы: **Н.Н. Максимова, О.В. Пугина**  
Технический редактор **Т.П. Новикова**

*Редакция:*

603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.  
rsl@nntu.nnov.ru

Подписано в печать 05.12.2016. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага офсетная.

Печать трафаретная. Усл. печ. л. 26,75. 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 44757**  
**Объединенный каталог «Пресса России»**

**Свидетельство о регистрации**  
**периодического печатного издания**  
**ПИ № ФС 77-56417 от 11 декабря 2013**