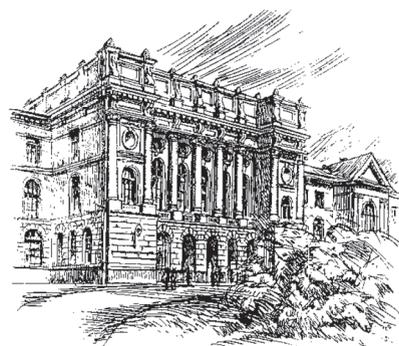


Том 24, № 1, 2018



Санкт-Петербург. Издательство Политехнического университета

# Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки

Министерство образования и науки РФ

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбПУ. ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ИНЖЕНЕРНЫЕ НАУКИ  
ST. PETERSBURG POLYTECHNIC UNIVERSITY  
JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES AND TECHNOLOGY

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

*Васильев Ю.С.*, главный редактор, научный руководитель  
СПбПУ, академик РАН;

*Алфёров Ж.И.*, академик РАН

*Згуровский М.З.*, ин. член РАН, академик НАН Украины

*Костюк В.В.*, академик РАН

*Лагарьков А.Н.*, академик РАН

*Окрепилов В.В.*, академик РАН

*Патон Б.Е.*, академик НАН Украины и РАН

*Рудской А.И.*, академик РАН

*Тендлер М.Б.*, ин. член РАН (Швеция)

*Федоров М.П.*, академик РАН

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

*Васильев Ю.С.*, главный редактор, научный руководитель  
СПбПУ, академик РАН

*Кондратьев С.Ю.*, зам. главного редактора, д-р техн. наук,  
профессор СПбПУ

*Аксёнов Л.Б.*, д-р техн. наук, профессор СПбПУ

*Башкарёв А.Я.*, д-р техн. наук, профессор СПбПУ

*Гордеев С.К.*, д-р техн. наук, ст. научн. сотр. ЦНИИМ

*Гуменюк В.И.*, д-р техн. наук, профессор СПбПУ

*Забойн В. Н.*, д-р техн. наук, профессор СПбПУ

*Кириллов А.И.*, д-р техн. наук, профессор СПбПУ

*Коровкин Н.В.*, д-р техн. наук, профессор СПбПУ

*Митяков А.В.*, д-р техн. наук, профессор

*Михайлов В.Г.*, д-р техн. наук, профессор  
Бранденбургского ТУ (Германия)

*Сергеев В.В.*, д-р техн. наук, профессор, проректор СПбПУ  
чл.-корр РАН,

*Титков В.В.*, д-р техн. наук, профессор СПбПУ

*Толочко О.В.*, д-р техн. наук, профессор СПбПУ

*Фокин Г.А.*, д.т.н., Генеральный директор  
ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург»

*Цеменко В.Н.*, д-р техн. наук, зав. каф. СПбПУ

EDITORIAL COUNCIL

*Vasiliev Yu.S.* — head of the editorial council, full member of the Russian Academy of Sciences, Scientific director of the Peter the Great St. Petersburg polytechnic university;

*Alferov Zh.I.* — full member of the Russian Academy of Sciences

*Zgurovskiy M.Z.* — foreign member of the Russian Academy of Sciences, full member of the National Academy of Sciences of Ukraine

*Kostiuk V.V.* — full member of the Russian Academy of Sciences

*Lagar'kov A.N.* — full member of the Russian Academy of Sciences

*Okrepilov V.A.* — full member of the Russian Academy of Sciences

*Paton B.E.* — full member of the Russian Academy of Sciences and the National Academy of Sciences of Ukraine

*Rudskoy A.I.* — full member of the Russian Academy of Sciences

*Tendler M.B.* — foreign member of the Russian Academy of Sciences (Sweden)

*Fedorov M.P.* — full member of the Russian Academy of Sciences

JOURNAL EDITORIAL BOARD

*Vasiliev Yu.S.* — editor-in-chief, full member of the Russian Academy of Sciences, Scientific director of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

*Kondrat'ev S.Yu.* — deputy editor-in-chief, Dr.Sc. (tech.), prof. SPbPU

*Aksyonov L.B.* — Dr.Sc. (tech.), prof. SPbPU

*Bashkarev A.Ya.* — Dr.Sc. (tech.), prof. SPbPU

*Gordeev S.K.* — Dr.Sc. (tech.), prof. CNIIM

*Gumenyuk V.I.* — Dr.Sc. (tech.)profSPbPU

*Zaboin B.N.* — Dr.Sc. (tech.), prof. SPbPU

*Kirillov A.I.* — Dr.Sc. (tech.)profSPbPU

*Korovkin N.V.* — Dr.Sc. (tech.), prof. SPbPU

*Mityakov A.V.* — Dr.Sc. (tech.), prof. SPbPU

*Michailov V.G.* — Dr.Sc. (tech.), prof. BTU (Germania)

*Sergeev V.V.* — Dr.Sc. (tech.), prof. SPbPU, corresponding member of the RAS

*Titkov V.V.* — Dr.Sc. (tech.), prof. SPbPU

*Tolochko O.V.* — Dr.Sc. (tech.), prof. SPbPU

*Fokin G.A.* — Dr.Sc. (tech.) General Director of LLC «Gazprom Transgaz St. Petersburg»

*Tsemenko V.N.* — Dr.Sc. (tech.) Head of Chair SPbPU

Журнал с 1995 года издается под научно-методическим руководством Российской академии наук.

Журнал с 2002 года входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

Сведения о публикациях представлены в Реферативном журнале ВИНТИ РАН, в международной справочной системе «Ulrich's Periodical Directory».

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия (свидетельство ПИ № ФС77-69285 от 6 апреля 2017 г.)

Подписной индекс **18390** в объединенном каталоге «Пресса России».

С 2005 года журнал включен в базу данных «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ), размещенную на платформе Научной электронной библиотеки на сайте <http://www.elibrary.ru>

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

Адрес редакции и издательства: Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.  
Тел. редакции (812) 294-47-72.

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2018

## Содержание

### Энергетика и электротехника

<b>Владимиров Я.А., Зысин Л.В.</b> Методические вопросы энергетического использования твёрдых коммунальных отходов и продуктов их газификации .....	5
<b>Попов М.Г.</b> Дифференциальная защита межсистемных линий электропередачи с компенсацией зарядной мощности .....	17
<b>Титков В.В., Лубков А.Н., Тукаев П.Д.</b> Тепловые процессы в трехфазной кабельной линии в сети с изолированной нейтралью при однофазных дуговых замыканиях на землю .....	27
<b>Хисматуллин А.С., Баширов М.Г., Солдатова Е.Г., Мавлекаев Е.Ю.</b> Повышение эффективности охлаждения маслонаполненных трансформаторов .....	38
<b>Плотников А.П., Емельянов О.А., Белько В.О., Курьяков Р.А.</b> Исследование импульсной электрической прочности современных чип-конденсаторов: I. Основные экспериментальные результаты .....	50
<b>Люлина М.А., Першиков Г.А., Смирнов А.А., Беляев А.Н., Смоловик С.В.</b> Аналитическое исследование режимов работы протяженных линий электропередачи с устройствами продольной емкостной компенсации .....	60
<b>Журавлева Н.М., Кизеветтер Д.В., Резник А.С., Смирнова Е.Г., Хрипунов А.К.</b> Электрофизические характеристики бумажно-пропитанной изоляции при модификации целлюлозной основы биополимером .....	75

### Металлургия и материаловедение

<b>Галевский Г.В., Руднева В.В., Ефимова К.А.</b> Исследование окисленности и термоокислительной устойчивости нанокристаллического диборида титана .....	87
<b>Котов С.А., Батурова Л.П., Бурлова А.Н., Зверева Е.Д.</b> Влияние метода модифицирования поверхности на электрохимические свойства титана .....	95
<b>Кононов А.А., Матвеев М.А.</b> Формирование структуры при горячей прокатке электротехнической анизотропной стали .....	104

### Машиностроение

<b>Хрусталева И.Н., Любомудров С.А., Романов П.И.</b> Автоматизация технологической подготовки единичного и мелкосерийного производства .....	113
<b>Бабанин Н.В.</b> Динамико-амортизационная гидравлическая система подвески .....	122
<b>Арсентьева К.С., Мамутов В.С.</b> Динамическая кривая деформационного упрочнения при расчетах электрогидроимпульсной вытяжки-формовки в комплексе LS-DYNA® .....	130
<b>Худорожков С.И., Поршнев Г.П., Захлебаев Е.А.</b> Моделирование крутильных колебаний в трансмиссиях колесных и гусеничных машин с использованием среды MATHWORKS SIMSCAPE .....	141
<b>Артюх В.Г., Никитченко А.А., Мазур В.О., Чигарева И.Н., Чернышева Н.В.</b> Испытания самозатягивающихся гаек узлов крепления рельсовых стыков .....	154

## Contents

### Power engineering and Electrical engineering

<b>Vladimirov Ya.A., Zyssin L.V.</b> <i>Methodological aspects of energy utilization of municipal solid waste and its gasification products</i> .....	5
<b>Popov M.G.</b> <i>Differential protection of inter-system transmission lines with charge capacity compensation</i> .....	17
<b>Titkov V.V., Lubkov A.N., Tukeev P.D.</b> <i>Thermal processes in a three-phase cable line in a grid with isolated neutral under one-phase arcing ground fault</i> .....	27
<b>Khismatullin A.S., Bashirov M.G., Soldatova E.G., Mavlekaev E.Yu.</b> <i>Increasing the efficiency of cooling in oil transformers</i> .....	38
<b>Plotnikov A.P., Emelyanov O.A., Belko V.O., Kuryakov R.A.</b> <i>Study of short-pulse dielectric strength of chip capacitors. Part I: the main experimental results</i> .....	50
<b>Lyulina M.A., Pershikov G.A., Smirnov A.A., Belyaev A.N., Smolovik S.V.</b> <i>Analytical study of operating conditions of long-distance power transmission lines with series compensation devices</i> .....	60
<b>Zhuravleva N.M., Kiesewetter D.V., Reznik A.S., Smirnova E.G., Khripunov A.K.</b> <i>Electrophysical characteristics of paper-impregnated insulation by modifying the cellulose base with a biopolymer</i> .....	75

### Metallurgy and Materials technology

<b>Galevsky G.V., Rudneva V.V., Efimova K.A.</b> <i>Study of oxidation and thermooxidative stability of nanocrystalline titanium diboride</i> .....	87
<b>Kotov S.A., Baturova L.P., Burlova A.N., Zvereva E.D.</b> <i>Influence of the method of surface modification on the electrochemical properties of titanium</i> .....	95
<b>Kononov A.A., Matveev M.A.</b> <i>Formation of the structure of grain-oriented silicon steel during hot rolling</i> .....	104

### Mechanical engineering

<b>Khrustaleva I.N., Lyubomudrow S.A., Romanov P.I.</b> <i>Automation of technological preparation of production in single-unit and small-batch manufacturing</i> .....	113
<b>Babanin N.V.</b> <i>Dynamic-damping hydraulic suspension system</i> .....	122
<b>Arsentyeva X.S., Mamutov V.S.</b> <i>Dynamic strain hardening curve in simulation of electro-hydraulic sheet metal forming using LS-DYNA®</i> .....	130
<b>Hodorozhkov S.I., Porshnev G.P., Zachlebaev E.A.</b> <i>Simulation of torsion oscillations in the transmissions of wheel and crawler machines using the MATHWORKS SIMSCAPE environment</i> .....	141
<b>Artiukh V.G., Nikitchenko A.A., Mazur V.O., Chigareva I.N., Chernysheva N.V.</b> <i>Tests of self-tightening nuts in rail joint fastening knots</i> .....	154

DOI: 10.18721/JEST.240101  
УДК 697.341

*Я.А. Владимиров<sup>1</sup>, Л.В. Зысин<sup>2</sup>*

1 – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

2 – Институт интегративных исследований, Хайфа, Израиль

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТВЁРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ И ПРОДУКТОВ ИХ ГАЗИФИКАЦИИ**

Описываются основные способы энергетической утилизации твердых коммунальных отходов. Приводится динамика изменения морфологического состава твердых коммунальных отходов Санкт-Петербурга начиная с 1975 года. Рассматриваются сводные результаты анализа теплотехнических характеристик и компонентного состава топливных газов, получаемых из твердых коммунальных отходов на основе различных вариантов современных технологий биоконверсии и термолиза. Описывается методика получения основных топливных характеристик этих газов и обсуждаются вопросы их сжигания в топочных устройствах и тепловых двигателях. Сделан вывод, что генераторный газ, как и биогаз, может применяться в различных топочных устройствах как промышленного, так и бытового назначения без их реконструкции. Определены направления дальнейшего использования топливных газов в энергетике и коммунальном хозяйстве.

БИОКОНВЕРСИЯ; ТЕРМОЛИЗ; КОММУНАЛЬНЫЕ ОТХОДЫ; ГОРЕЛКИ; СВАЛОЧНЫЙ ГАЗ; БИОГАЗ; ГАЗОГЕНЕРАТОРЫ.

*Ссылка при цитировании:*

Я.А. Владимиров, Л.В. Зысин. Методические вопросы энергетического использования твердых коммунальных отходов и продуктов их газификации // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 1. С. 5–16. DOI: 10.18721/JEST.240101.

*Ya.A. Vladimirov<sup>1</sup>, L.V. Zyssin<sup>2</sup>*

1 – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

2 – Integrative research institute, Haifa, Israel

## **METHODOLOGICAL ASPECTS OF ENERGY UTILIZATION OF MUNICIPAL SOLID WASTE AND ITS GASIFICATION PRODUCTS**

We have described the main methods for energy utilization of municipal solid waste. The article contains the dynamics of morphological composition of municipal solid waste in St. Petersburg since 1975. We have summarized the results of the analysis of thermal characteristics of fuel gases obtained from municipal solid waste by different versions of modern technologies of bioconversion and thermolysis. We have described a method for

obtaining the basic fuel characteristics of these gases. Moreover, the study covers the main aspects of fuel gas combustion in boilers and heat engines. As a result, we have proved that fuel gases can be used in industrial and civil boilers without their reconstruction.

BIOCONVERSION; THERMOLYSIS; MUNICIPAL WASTE; TORCHES; GASIFIERS; LANDFILL GAS.

*Citation:*

Ya.A. Vladimirov, L.V. Zyssin, Methodological aspects of energy utilization of municipal solid waste and its gasification products, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 24(01)(2018) 5–16, DOI: 10.18721/JEST.240101.

### Введение

В последней четверти XX века проблема утилизации городских отходов — будем называть их твёрдыми коммунальными отходами (ТКО)<sup>1</sup> — превратилась в экологическую и социальную задачу, от успешного решения которой в значительной степени зависит возможность развития и дальнейшего существования современных мегаполисов. Удельное количество отходов, образующееся на одного жителя, в настоящее время оценивается от 250 до 1000 кг в год и неуклонно растёт на 3–5 % ежегодно. В развитых странах имеются давние традиции и опыт сортировки отходов, технологии их переработки, которые непрерывно совершенствуются. Лидерами в области переработки ТКО являются Япония, где перерабатывается 75 % ТКО, США — 46 %, Швейцария — 53 % [1], Дания — 46,3 %, Нидерланды — 51,7 %, Германия — 66,1 %, Швеция — 48 %, Франция — 39,5 % [2]. Среди существующих методов переработки ТКО находят применение комплексная переработка с компостированием и складирование на полигонах с последующей земляной засыпкой. Однако господствующим является энергетическое использование; доля его в европейских странах приближается к 50 % и постепенно увеличивается по мере совершенствования технологий сжигания.

<sup>1</sup> Термин ТКО введён в 2014 г. федеральным законом №458-ФЗ от 29.12.2014 и, в отличие от ранее существовавшего понятия ТБО, включает отходы, образующиеся в нежилых помещениях и сходные по составу с образующимися в жилых помещениях.

В противоположность этому в России перерабатывается только около 1 % ТКО, остальные поступают на официальные и — по большей части — несанкционированные свалки, гниют, загрязняют почву и атмосферу выбросами CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S и др. Достаточно указать, что в регионе Санкт-Петербурга и Ленинградской области, где доля перерабатываемых ТКО едва превышает 25 %, наряду с шестьюдесятью санкционированными полигонами ТКО (иначе — свалками) существует несколько сотен несанкционированных. Создание развитой системы сбора, переработки и использования ТКО в нашей стране пока только ждёт своего решения. В этой связи рассмотрение вопросов рационального сжигания ТКО приобретает актуальность для теплоэнергетики.

**Цель представленной работы** — рассмотрение некоторых методических вопросов, связанных с оценкой перспектив использования твердых коммунальных отходов и продуктов их газификации в теплоэнергетике.

### Исходные данные и методика работы

Для расчета свойств продуктов газификации ТКО необходимо изучить морфологический состав отходов, который имеет сезонные колебания и несколько различается по регионам. Однако достаточно объективное представление о нём дают данные по Санкт-Петербургу. Современный морфологический состав ТКО Санкт-Петербурга показан на рис. 1, а в табл. 1 приведены данные о динамике изменения морфологического состава ТКО за период с 1975 года.

Таблица 1

Динамика изменения морфологического состава, % (по массе), ТКО Санкт-Петербурга [3, 4]

Table 1

Dynamics of changes in Saint-Petersburg morphological composition of solid municipal waste (mass share) [3, 4]

Год	Бу-мага	Пище-вые отходы	Древе-сина	Ме-талл	Тек-стиль	Кожа, резина	Кости	Стекло	Камни, кера-мика	Пласт-масса	Прочее	Отсев менее 15 мм	Влажность	
													абсол.	относ.
1975	30	28,1	3,9	4,7	4,4	1,6	2,1	7,4	2,2	0,8	3	11,8	—	—
1986	22,5	23,3	5,2	3	7,7	4,2	2,3	6,8	3,6	5,3	3,7	12,4	25	51,7
1996	19,9	37	1,7	4,4	2,8	4,8	0,8	8,1	2,9	6,1	1,4	10,1	21,5	50,2
2000	15,6	34,9	0,8	4,6	3,8	1	—	13,7	4,6	11,3	0,5	9,2	21	48,6
2011	21,5	27,4	2,5	4,6	—	4,3	—	8,9	12,8	15,2	2,8	—	20,4	46,9

Теплоту сгорания, МДж/кг, сжигаемых компонент ТКО характеризуют следующие данные:

Бумага .....	20,3–14,5
Пищевые отходы .....	4,5–4,0
Древесина .....	20,2–14,5
Текстиль .....	19,8–14,0
Кожа, резина .....	31,1–25,9

Для определения потенциала использования ТКО в теплоэнергетике необходима предварительная оценка доли спроса на тепловую энергию, которая может быть удовлетворена за счет энергетической утилизации ТКО. Для проведения оценки использовались открытые данные об образовании ТКО из соответствующих утвержденных территориальных схем обращения с отходами, в том числе с ТКО. Сведения о потребности в тепловой энергии были получены из опубликованных схем теплоснабжения поселений.

По технологическим признакам сжигания способы энергетического использования ТКО можно разделить на две большие группы:

*одностадийное сжигание*, предусматривающее создание специальных топок, рассчитанных на использование несортированных ТКО и снабжённых устройствами для подавления вредных выбросов и сортировки негорючей части отходов. Такой способ, как правило, применяется в составе крупных мусоросжигательных заводов с целью утилизации ТКО и комбинированной выработки

тепловой и электрической энергии. Одностадийное сжигание применяется к сортированным либо неподготовленным отходам;

*двухстадийное сжигание*, предусматривающее на первой стадии преобразование органической части ТКО в смесь горючих газов, а на второй стадии – использование этих газов в различных типах энергетических устройств.

Технологии двухстадийного сжигания могут применяться как к несортированным ТКО, так и к предварительно обработанным, т. е. с удалением минеральных включений, и фракционированным (гранулы, брикеты, пеллеты и т. п.), что мало сказывается на качестве образующихся газов.

Значительно более важной является технология газификации; здесь можно выделить три основных процесса:

*метанное сбраживание (метанизация)* с помощью специальных культур микроорганизмов, которое наиболее успешно осуществляется на разнообразных органических отходах животного и растительного происхождения с влажностью не менее 75 %; в стадии разработки находится технология биоконверсии биомассы с влажностью менее 75 % – твердофазная метанизация осадков сточных вод и твердых бытовых отходов [5]. Конечный продукт здесь – биометан  $\text{CH}_4$ , использование которого в промышленных и бытовых энергетических устройствах не отличается от использования природного газа;

*термохимическая конверсия* (газогенерация, пиролиз), которая может быть реализована на натуральных ТКО, если минеральная доля в них не превышает 20–25 %; однако эта технология более эффективна на фракционированных ТКО. Существует ряд основных конструктивных типов газогенераторов: слоевые (прямой и обратный процесс); кипящего слоя (КС); циркулирующего кипящего слоя (ЦКС). Во всех случаях горючей составляющей *генераторного газа* является смесь  $H_2$  и  $CO$  (и незначительного количества газов углеводородного ряда) [5]. Вопросы очистки генераторного газа решаются значительно проще, чем при прямом сжигании ТКО. В зависимости от режимных параметров процесса (давление, температура), вида окислителя (воздух, пар и их смесь), способа подвода тепла (внутренний, через стенку) меняется соотношение горючих составляющих и балластных газов. В результате теплота сгорания генераторного газа варьируется в очень широких пределах: от 4,5 до 21 МДж/м<sup>3</sup>;

*анаэробное сбраживание* натуральных ТКО на полигонах, специально оборудованных для сбора *биогаза*. Механизм биоконверсии близок к вышеуказанной метанизации, только в данном случае необходимые для сбраживания микроорганизмы возникают естественным путём. Такой процесс является многолетним, он длится до 100 лет, причем наибольшее количество биогаза выделяется в первый год процесса и затем убывает по экспоненциальному закону. При этом состав биогаза нестабилен, что иллюстрирует табл. 2, заимствованная нами из автореферата диссертации А.В. Черемисина.\*

Из таблицы видно, что горючей составляющей биогаза с полигона является метан  $CH_4$ , только в данном случае в нём содержится определённое количество балласта

\* Черемисин А.В. Методика расчёта теплового режима искусственных геосистем на примере полигонов твёрдых бытовых отходов): Автореф. ... канд. дисс-ции. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2004. 16 с.

( $CO_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2S$ ), среди которого, к сожалению, есть вредные и токсичные вещества.

В дальнейшем анализе под биогазом будет подразумеваться газовая смесь, в состав которой входят:

*горючая составляющая* – метан ( $CH_4$ ) в количестве от 40 до 70 %;

*инертный газ* – двуокись углерода ( $CO_2$ ) в количестве от 60 до 30 %;

*примеси* – количество их незначительно, но в примесях имеется сероводород  $H_2S$ ;

*водяной пар* – максимальное содержание которого в смеси может составлять 7 %.

Для проведения тепловых расчетов и выбора энергетического оборудования необходимо знать: низшую теплоту сгорания  $Q_H^p$ ; плотность  $\rho$ ; теплоемкости при постоянном давлении ( $c_p$ ) и постоянном объёме ( $c_v$ ); показатель адиабаты  $k$ ; температуры сгорания сухого ( $T_{гор}$ ) и влажного ( $T_{гор}$ ) газа. Методическая основа расчёта указанных выше теплофизических параметров формулируется на основании [6, 7].

Определение высшей  $Q_B$  и низшей  $Q_H^p$  теплоты сгорания топлива осуществляется по формуле Д.И. Менделеева. При этом используются получаемые из эксперимента значения объёмных долей  $V$  (в %) соответствующих газов:  $CO_2$ ,  $H_2$ ;  $CH_4$ ;  $C_2H_4$ ;  $C_2H_6$ ;  $C_3H_8$ ;  $C_4H_{10}$  и др.

Средняя теплоемкость биогаза определяется по формуле

$$c_{см} = 0,01(c_{CH_4}V_{CH_4} + c_{CO_2}V_{CO_2} + c_{H_2O}V_{H_2O}).$$

Тогда температура горения смеси

$$T_{гор} = \frac{Q_{HВ}^p}{V_{см}c'_{см}},$$

где  $V_{см}$  – объём смеси, м<sup>3</sup>.

Теоретически необходимый расход воздуха для сжигания смеси, объёмы продуктов сгорания, водяных паров и избыточного воздуха определяются по известным зависимостям [7].

В расчетах принималась величина коэффициента избытка воздуха  $\alpha = 1,05$ .

Таблица 2

## Компонентный состав биогаза

Table 2

## Compositional analysis of biogas

Компоненты биогаза (хим. формулы)	Процентный состав (объёмные %)		Динамическая вязкость, мкП ( $10^{-7}$ кг/м·с)	Плотность компонентов, кг/м <sup>3</sup>
	Граничные значения	Наиболее характерные значения		
CH <sub>4</sub>	45–65	56	103	0,71682
CO <sub>2</sub>	25–45	35	138	1,97693
N <sub>2</sub>	0,3–19	8	166	1,25059
O <sub>2</sub>	0,1–4	0,8	192	1,42897
H <sub>2</sub>	0,01–2	0,1	84	0,089882
H <sub>2</sub> S	0,01–2	0,1	116,6	1,53843
Итого для биогаза	–	100	120,99(6)	1,20645

\* Динамические вязкости и плотности компонентов биогаза даны для  $t = 0$  °С.

При использовании газификации в качестве метода переработки отходов состав газа будет отличаться от получаемого при анаэробном сбраживании. Состав газа зависит от вида топлива и организации процесса газификации и, следовательно, может изменяться. Поэтому для каждого конкретного случая проводится свой расчет.

Например, средний состав, %, генераторного газа, получаемого в обратном процессе газификации при воздушном дутье: H<sub>2</sub> – 13,6; CO – 18,3; CH<sub>4</sub> – 1,2; CO<sub>2</sub> – 7,7; O<sub>2</sub> – 0,1; N<sub>2</sub> – 34,1; H<sub>2</sub>O – 25; смола – менее 0,5; H<sub>2</sub>S – менее 0,5; концентрация пыли – 1,5.

Следовательно, по сухой массе после очистки от смолы, H<sub>2</sub>S и пыли состав газа будет, %: H<sub>2</sub> – 18,1; CO – 24,4; CH<sub>4</sub> – 1,6; CO<sub>2</sub> – 10,3; O<sub>2</sub> – 0,2; N<sub>2</sub> – 45,4.

При другой конечной влажности состав генераторного газа рассчитывается по формуле

$$a = a_c \frac{100 - W}{100},$$

где  $a$  – концентрация данного компонента в генераторном газе, %;  $a_c$  – концентрация данного компонента в сухом генераторном газе, %;  $W$  – влажность генераторного газа, %.

Теоретический расход кислорода для полного сгорания 1 м<sup>3</sup> генераторного газа составит  $V_{0\text{O}_2} = 0,24$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>; воздуха, содержащего 21 % кислорода, –  $V_{0\text{в}} = 1,14$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

При изменении состава газа и состава дутья теоретический расход дутья для полного сжигания 1 м<sup>3</sup> газа рассчитывается по формуле

$$V_{0\text{д}} = \frac{100}{K} V_{0\text{O}_2},$$

где  $K$  – содержание кислорода в дутье, %.  $K = 21$  % при воздушном дутье;

$$V_{0\text{O}_2} = 0,5(V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{CO}}) + 1,5V_{\text{H}_2\text{S}} + \Sigma((n + m) V_{\text{C}_n\text{H}_m} - V_{\text{O}_2})0,01,$$

$V_{\text{H}_2\text{O}}$ ,  $V_{\text{CO}}$ ,  $V_{\text{H}_2\text{S}}$ ,  $V_{\text{C}_n\text{H}_m}$ ,  $V_{\text{O}_2}$  – процентное содержание индивидуальных газов в составе генераторного газа, об. %.

Плотность генераторного газа принятого среднего состава при нормальных условиях  $\rho_0 = 1,09$  кг/м<sup>3</sup>.

Низшая и высшая теплота сгорания генераторного газа определялась по формуле

$$Q_{\text{н(в)}} = 0,01(Q_{\text{н(в)H}_2} V_{\text{H}_2} + Q_{\text{н(в)CO}} V_{\text{CO}} + Q_{\text{н(в)H}_2\text{S}} V_{\text{H}_2\text{S}} + \Sigma Q_{\text{н(в)C}_n\text{H}_m} V_{\text{C}_n\text{H}_m}),$$

где  $Q_{\text{н(в)}}$  – низшая (высшая) теплота сгорания компонент, составляющих генераторный

газ, МДж/м<sup>3</sup>;  $V_{H_2}$ ,  $V_{CO}$ ,  $V_{H_2S}$ ,  $V_{C_{nH_m}}$  – содержание компонент генераторного газа, % [10].

Важной характеристикой процесса сжигания газообразного топлива является скорость  $u$  распространения пламени. Различают нормальную (ламинарную) скорость распространения пламени  $u_n$ , которая зависит от молекулярных характеристик смеси, и турбулентную скорость распространения пламени  $u_t$ , определяемую гидродинамическими характеристиками потока, т. е. в конечном счете конструкцией горелки. В технической литературе, например [8], имеются рекомендации по вычислению величины  $u_n$  для газовых смесей с содержанием инертных газов не более 5 %, а также рекомендации по учету влияния на  $u_n$  температуры и давления. При этом повышение начальной температуры газозооной смеси ведет к увеличению  $u_n$ , а увеличение давления – к снижению  $u_n$ . Увеличение давления сужает также пределы воспламеняемости смеси газов.

Влияние присутствия в смеси инертного газа  $CO_2$  на величину  $u_n$  может быть приближенно оценено с помощью эмпирической зависимости

$$u_{n6} = u_n (1 - 0,012 V_{CO_2}).$$

Однако в целом для определения оптимальных условий сжигания свалочного и генераторного газов целесообразна экспериментальная проверка указанных выше характеристик. Такие исследования относительно просто можно осуществить в лабораторных условиях, например на смеси природного газа с  $CO_2$ .

Практическое сжигание топлива осуществляется, как правило, при развитом турбулентном режиме течения газового потока [13] (исключение составляют только бытовые газовые горелки атмосферного типа). О сложном влиянии турбулентности на распространение пламени пока нет единого мнения. Исходя из разных моделей процесса величину турбулентной скорости распространения пламени  $u_t$  предлагается определять формулами

$$u_t / u_n = (1 + lw/a)^{1/2},$$

или

$$u_t / u_n = 1 + B(w/u_n)^{1/2},$$

где  $l$  – масштаб турбулентности;  $w$  – пульсационная скорость;  $a$  – коэффициент температуропроводности;  $B$  – константа, зависящая от физико-химических свойств топлива.

### Результаты расчётов и задачи экспериментального исследования

Расчеты по описанным выше методикам позволили получить следующие результаты.

По предварительной оценке за счет термической переработки ТКО можно удовлетворить от 2 до 7 % спроса населенного пункта на тепловую энергию. За счет термической утилизации ТКО могут быть решены не только задачи энергосбережения, но и экологические проблемы размещения отходов. Результаты оценки максимально возможной доли тепловой энергии, полученной при сжигании ТКО, в тепловом балансе ряда типичных населенных пунктов приведены в табл. 3.

Сводные результаты расчётов теплофизических свойств биогаза с указанным в табл. 2 диапазоном параметров представлены в табл. 4.

Обращает на себя внимание то обстоятельство, что наши результаты несколько расходятся с данными публикации [8], указывающими, что при сжигании в воздухе смеси  $2CH_4 + CO_2$  температура пламени составляет 1752 °С (процент горючего – 13,8). Вероятно, для подтверждения результатов потребуется экспериментальная проверка.

Важной характеристикой топлива служат концентрационные пределы его воспламеняемости. Концентрационные пределы воспламенения метана (горючая составляющая биогаза) в смеси с  $CO_2$  находятся в пределах от 6 до 30 % [9]. Сходные результаты дает аналогичная зависимость для смеси метана с инертным газом ( $N_2$ ): для такой смеси концентрационные пределы шире и составляют 6–42 % [8]. Таким образом можно полагать, что во всем принятом диапазоне изменения концентраций компонентов биогаза он будет воспламеняться.

Таблица 3

**Потенциал использования ТКО в качестве источника тепловой энергии  
в различных населенных пунктах России**

Table 3

**The potential of using solid municipal waste as a heatpower resource in different Russian settlements**

Наименование населенного пункта, %	Оценочная масса ТКО, т/год	Потенциальное количество теплоты ТКО, Гкал	Доля тепловой энергии, полученной из ТКО, в тепловой балансе, %
Петрозаводск	79387	53856	2,3
Екатеринбург	979238	664315	3,9
Няндама (Архангельская обл.)	6123	4154	3,3
Кировск (Ленинградская обл.)	12340	8371	4,3
Саратов	384682	260968	6,8
Санкт-Петербург	2062193	1398991	3,2

Таблица 4

**Теплофизические свойства биогаза**

Table 4

**Thermophysical properties of biogas**

Состав газовой смеси, об. %	Теплофизические параметры					
	$Q_H^p$ , кДж/м <sup>3</sup>	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_p$ , кДж/(кг·К)	$c_v$ , кДж/(кг·К)	$k$	$T_{гор}$ , °С
CH <sub>4</sub> – 40, CO <sub>2</sub> – 60	14 344	1,476	1,073	0,8257	1,3	2225
CH <sub>4</sub> – 70, CO <sub>2</sub> – 30	25 102	1,098	1,4313	0,0954	1,3	2560
CH <sub>4</sub> – 33, CO <sub>2</sub> – 60, H <sub>2</sub> O – 7	11 834	1,48	1,067	0,8203	1,3	1702
CH <sub>4</sub> – 63, CO <sub>2</sub> – 30, H <sub>2</sub> O – 7	22 592	1,10	1,4245	1,0891	1,3	1968

Достоверные сведения о конкретной форме зависимости скорости распространения пламени при турбулентном режиме течения газового потока от скорости распространения пламени при ламинарном режиме течения газового потока  $u_T = f(u_{л0})$  в литературе отсутствуют. Поскольку режим турбулентного горения в конечном счете определяется формой топочного устройства и соотношением расходов первичного и вторичного воздуха, отработку оптимальных условий для сжигания биогаза целесообразно выполнять экспериментально на конкретных моделях. В ходе экспериментов следует установить оптимальные условия, обеспечивающие полное сгорание биогаза и приемлемый профиль температур на выходе из топочного устройства. Определение кинетических констант реакции горения, лучеиспускательной способности пламени и ряда других характеристик можно отложить на более поздний период.

В качестве примера реализации топочного устройства для биогаза считаем возможным ориентироваться на топки циклонного типа и прямоточные теплогенераторы с инжекционными горелками полного предварительного смешения. Преимущество последних заключается в том, что они могут работать без принудительной подачи воздуха с малыми коэффициентами избытка воздуха ( $\alpha = 1,02-1,08$ ) благодаря хорошему предварительному перемешиванию газа с воздухом. Промышленность выпускает инжекционные горелки нескольких типов, в том числе типа *B*, предназначенные для сжигания природного и коксового газов при работе на холодном воздухе, и типа *H*, предназначенные для работы на низкокалорийном газе также без подогрева воздуха. Давление газа, подаваемого к горелкам типа *B*, должно находиться в диапазоне 9,8–137,2 кПа, для горелки типа *H* – в диапазоне 1,96–17,64 кПа. Можно

также рассматривать применение ряда других типов горелочных устройств: без принудительной подачи воздуха и с принудительной подачей воздуха, со стационарными и вращающимися насадками и др.

Относительно низкая скорость горения биогаза, безусловно, вызовет удлинение факела и выход его за пределы топочного устройства. Как следствие, желательна (но, скорее всего, не обязательно) увеличение длины топки. Важно то, что проходные сечения топки при переводе её на биогаз могут быть сохранены без изменения. Последнее связано с тем обстоятельством, что (не будем вдаваться здесь в причины) расход дымовых газов с изменением теплоты сгорания топлива ( $Q_p$ ) при постоянном избытке воздуха ( $\alpha$ ) практически не меняется. Последнее иллюстрирует табл. 5, где приведены результаты расчетов для разных топлив при  $\alpha = 1,2$ . Из приведенных данных видно, что расход дымовых газов мало зависит от  $Q_p$ .

### Обсуждение результатов

Следует ожидать, что продукты сгорания генераторного газа и биогаза в экологическом отношении чище, чем продукты сгорания природного газа, благодаря следующим обстоятельствам:

при относительно более низкой температуре сгорания генераторного газа и биогаза будет образовываться меньше вредных окислов азота  $NO_2$ , дополнительное количество которых возникает при температурах выше  $1500\text{ }^\circ\text{C}$ ,

углекислый газ  $CO_2$  в продуктах сгорания биомассы согласно международной конвенции не участвует в изменении баланса углерода в земной атмосфере,

образование окислов серы  $SO_x$  можно исключить путем предварительной очистки генераторного газа и биогаза от сероводорода  $H_2S$ .

Наличие  $SO_x$  в продуктах сгорания нежелательно также в теплотехническом отношении, так как препятствует глубокой утилизации теплоты продуктов сгорания. При охлаждении продуктов сгорания ниже точки росы из окислов серы образуется серная кислота  $H_2SO_4$ , обуславливающая интенсивную коррозию конвективных поверхностей (скорость которой может достигать 1 мм в год). Поэтому в случае энергетического использования биогаза его целесообразно очистить от  $H_2S$ . Очистка от сероводорода природного газа, нефтепромысловых и доменных газов широко практикуется. Наибольшее распространение получил комбинированный способ, основанный на применении жидких и твердых поглотителей (метанол, амины, активированные угли, окись алюминия и др.). Если содержание  $H_2S$  в газе велико, то улавливающие его установки дополняют секциями для получения элементарной серы и серной кислоты. Однако при малых количествах  $H_2S$  такое производство оказывается нерентабельным. В целом можно констатировать, что по сравнению с прямым сжиганием газификация снижает суммарный объем вредных выбросов в атмосферу.

Таблица 5

Количество дымовых газов, образующихся при сгорании топлив с разной теплотой сгорания, при  $\alpha = 1,2$

Table 5

The amount of smoke fumes produced by combustion of fuels with different heat value ( $\alpha = 1,2$ )

Топливо	Теплота сгорания, МДж/кг	Расход, м <sup>3</sup> /с		
		топливо	воздух	дымовые газы
Природный газ	35,3	0,283	7,218	7,845
Мазут	40,6	0,0003	7,061	7,397
Генераторный газ	4,96	7,2	5,155	7,800

За счет уменьшения размера санитарно-защитной зоны установки термохимической конверсии ТКО могут быть расположены ближе к селитебным территориям – непосредственно к источнику образования ТКО и потребителю тепловой энергии. Таким образом, очевидна экономия на транспорте ТКО и тепловой энергии. Потребление тепловой энергии зависит от температуры наружного воздуха, соответственно для работы источника тепловой энергии на ТКО на выделенную обособленную зону необходимо создавать запас ТКО, хранящийся на территории источника. Возможен вариант организации работы на единую тепловую сеть с источником выработки тепловой энергии, работающим на традиционном то-

пливе [14]. Такое схемное решение позволит загружать источник термохимической конверсии ТКО по мере образования отходов, а пики потребления компенсировать за счет «традиционной» генерации. Как отмечалось выше (см. табл. 3), за счет энергетической утилизации ТКО возможно компенсировать от 2,5 до 7 % потребности города в тепловой энергии.

В табл. 6 приведено сопоставление состава и теплотехнических характеристик биометана, генераторного газа и биогаза с рядом наиболее распространенных газов, применяемых в качестве топлива. При этом для биогаза даны максимальная и минимальная калорийности согласно значениям, приведенным в табл. 2.

Таблица 6

## Сравнительные теплотехнические характеристики топливных газов

Table 6

## The comparison of biogas' thermophysical properties

Газ	Состав газа, объёмный, %							$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$Q_n^p$ , МДж/м <sup>3</sup>
	Горючие газы				Инертные газы		O <sub>2</sub>		
	H <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>			
Биометан [12]	–	–	95	3	–	1,5	–	–	36
Биогаз:									
высококалорийный	–	–	70	33	–	30	–	1,0981,48	25,10211,834
низкокалорийный	–	–	–	–	–	60	–	–	–
Полукоксовый [6]	23,5	6,5	51,5	4,5	7,0	5,5	1,5	0,764	24,65
Коксовый [6]	57	6,0	24,0	3,0	3,0	7,0	–	0,324	17,6
Сланцевый [6]	24,7	10,0	16,2	5,0	16,4	26,8	0,7	1,040	13,85
Генераторный газ*	18,1	24,4	1,6	–	10,3	45,4	0,2	1,09	4,5
Генераторный газ**	13,0	27,6	0,6	–	6,0	53,2	0,2	1,141	5,15
Генераторный газ***	37,6	39,2	–	–	3,02	19,9	–	0,52	8,25
Доменный [6]	3,0	30	–	–	9,0	58,0	–	1,283	4,10
Природный [6] (Коробовский)	–	–	81,5	14,8	–	3,2	0,5	0,901	41,45
Природный [6] (Игримский)	–	–	95,7	2,8	–	1,3	0,2	0,741	36,47

\* обращённый процесс газификации при воздушном дутье [10];

\*\* прямой процесс газификации при паровоздушном дутье [10];

\*\*\* аллотермический процесс газификации [12]

Приведенные данные показывают, что биогаз достаточно хорошо вписывается в группу среднекалорийных газов, таких, как полукоксовый, коксовый, сланцевый, широко применяемых в промышленной энергетике. По топливной составляющей биогаз наиболее близок к природному газу. По количеству инертного газа биогаз сопоставим с генераторным, получаемым на воздушном дутье.

Однако инертные составляющие в биогазе и генераторном газе разные. В первом случае двуокись углерода ( $\text{CO}_2$ ), во втором – азот ( $\text{N}_2$ ). Разбавление горючих газов инертными (балластными) газами ухудшает их воспламеняемость. Вид инертного газа может существенно влиять на пределы воспламеняемости, причем для случая  $\text{CO}_2$  это влияние значительно сильнее, чем для  $\text{N}_2$  [9]. При минимально возможной концентрации в биогазе  $\text{CH}_4$  воспламенение биогаза проблематично, так как он находится в очень узком диапазоне концентраций воздуха. В подобных случаях достаточно распространенным в технике приемом, позволяющим улучшить воспламеняемость, является присадка высококалорийного газа от постороннего источника (природный газ, пропан, бутан и др.).

Приведенные в табл. 5 данные позволяют сделать вывод о том, что генераторный газ, как и биогаз, может применяться в различных топочных устройствах как промышленного (паровые и водогрейные котлы, технологические печи, сушильные установки, теплогенераторы, обогревательные устройства и др.), так и бытового (отопительные печи, водогрейные устройства и т. п.) назначения без их реконструкции. Для эффективного и надежного сжигания генераторного газа и оптимизации топочных устройств целесообразно провести исследования скорости распространения фронта горения, длины факела и полноты сгорания в горелках различного типа при различных значениях состава биогаза и расхода дутьевого воздуха. Применение газа в быту по условиям техники безопасности требует одорации (придания запаха).

## Выводы

На основании приведенного выше анализа могут быть сделаны следующие выводы:

1. Энергетическое использование ТКО в настоящее время в экономически развитых странах рассматривается как один из наиболее эффективных в экономическом отношении путей утилизации ТКО.

2. Среди технологий энергетического использования ТКО возможны как прямое сжигание в котлах со специально оборудованными топочными устройствами, так и двухстадийная переработка с промежуточной стадией получения из ТКО горючих газов с последующим их использованием в традиционных энергетических установках.

3. Технология прямого сжигания предпочтительна для крупных энергетических комплексов, типа ТЭЦ или ТЭС, и может успешно реализовываться как на натуральных отходах, так и на прошедших предварительную обработку.

4. Существует ряд технологий, в разной степени освоенных, для получения из ТКО горючих газов. Теплотехнические свойства указанных газов допускают их эффективное использование в топках и камерах сгорания традиционных энергетических устройств при минимальной реконструкции горелочных устройств.

5. Устройства термохимической конверсии ТКО могут иметь относительно малую мощность и располагаться близко к местам их образования. В этой связи возможно и целесообразно использование ТКО в системах централизованного теплоснабжения в качестве дополнительного энергетического ресурса.

6. Использование ТКО в системах централизованного теплоснабжения позволяет компенсировать от 2,5 до 7 % потребности населенного пункта в тепловой энергии.

7. Энергетические установки, использующие ТКО, целесообразно рассматривать при сравнительном анализе вариантов модернизации систем централизованного теплоснабжения и разработке планов перспективного развития подобных систем.



8. Важным фактором, определяющим успехи энергетически выгодной утилизации ТКО, должно стать решение комплекса организационных, правовых, со-

циальных и экономических вопросов, связанных с отдельным сбором отходов, т. е. с сортировкой их на стадии образования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Малышевский А.Ф.** Обоснование выбора оптимального способа обезвреживания твердых бытовых отходов жилого фонда в городах России [Электр. ресурс]. М., 2012, 47 с. URL: [http://rpn.gov.ru/sites/all/files/users/rpnglavred/filebrowser/docs/doklad\\_po\\_tbo.pdf](http://rpn.gov.ru/sites/all/files/users/rpnglavred/filebrowser/docs/doklad_po_tbo.pdf). (дата обращения 25.10.2017).
2. База данных Eurostat [Электр. ресурс]. URL: <http://ec.europa.eu/eurostat/data/database> (дата обращения 25.10.2017).
3. **Козлов Г.В., Ивахнюк Г.К.** Морфологический состав твердых коммунальных отходов по регионам мира в XX и начале XXI века (обзор) // Известия СПбТИ(ТУ). 2014. № 24. С. 58–66.
4. **Колычев Н.А.** Анализ динамики объема твердых коммунальных отходов и их компонентный состав // Рециклинг отходов. 2015. № 5–6 (50–60). С. 73–79.
5. Биомасса как источник энергии / Под ред. С. Соуфера, О. Заборски / Пер. с англ. М.: Мир, 1985. 376 с.
6. **Соколов Б.А.** Газовое топливо и газовое оборудование котельных. М.: Академия, 2007. 64 с.
7. **Канторович Б.В.** Основы теории горения и газификации твердого топлива. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 601 с.
8. **Иссерлин А.С.** Основы сжигания газового топлива. Л.: Недра, 1987. 356 с.
9. **Льюис Б., Эльбе Г.** Горение, пламя и взрывы в газах. М.: Изд-во иностр. литературы, 1948. 446 с.
10. **Сергеев В.В.** Газификация растительной биомассы. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. 242 с.
11. **Панцхава Е.С., Пожарнов В.А., Зысин Л.В. [и др.].** Преобразование энергии биомассы. Опыт России // Теплоэнергетика. 1996. № 5. С. 33–38.
12. **Brattsev A.N., Kuznetsov V.A., Popov V.E., Ufimcev A.A.** Arc Gasification of Biomass: Example of Wood Residue // High temperature. 2011. Vol. 49. No 2. P. 244–248.
13. **Sergeev V.V., Vladimirov Y.A., Kalinina K.S., Kozhukar E.V.** Gasification and plasma gasification as type of the thermal waste utilization // Construction of unique buildings and structures. 2016. No 12. P. 85–93.
14. **Плахута А.Д.** Современный подход к выбору оптимального источника теплоснабжения // Энергосбережение и водоподготовка. 2015. № 2. С. 33–38.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ВЛАДИМИРОВ Ярослав Александрович** — заместитель заведующего лабораторией Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: [vladimirov@nil-teplo.ru](mailto:vladimirov@nil-teplo.ru)

**ЗЫСИН Леонид Владимирович** — доктор технических наук научный сотрудник Института интегративных исследований, Хайфа, Израиль

E-mail: [lv\\_zyssin@mail.ru](mailto:lv_zyssin@mail.ru)

Дата поступления статьи в редакцию: 21.11.2017

#### REFERENCES

- [1] **Malyshevskii A.F.** Obosnovanie vybora optimal'nogo sposoba obezvrezhivaniia tverdykh bytovykh otkhodov zhilogo fonda v gorodakh Rossii [Elektr. resurs]. M., 2012. 47 s. URL: [http://rpn.gov.ru/sites/all/files/users/rpnglavred/filebrowser/docs/doklad\\_po\\_tbo.pdf](http://rpn.gov.ru/sites/all/files/users/rpnglavred/filebrowser/docs/doklad_po_tbo.pdf). (data obrashcheniia 25.10.2017). (rus.)
- [2] Baza dannykh Eurostat [Elektr. resurs]. URL: <http://ec.europa.eu/eurostat/data/database> (data obrashcheniia 25.10.2017).
- [3] **Kozlov G.V., Ivakhniuk G.K.** Morfologicheskii sostav tverdykh kommunal'nykh otkhodov po regionam mira v KhKh i nachale XXI veka (obzor). *Izvestiia SPbTI(TU)*. 2014. № 24. S. 58–66. (rus.)
- [4] **Kolychev N.A.** Analiz dinamiki ob"ema tverdykh kommunal'nykh otkhodov i ikh komponentnyi sostav. *Retcikling otkhodov*. 2015. № 5–6 (50–60). S. 73–79. (rus.)
- [5] Biomassa kak istochnik energii / Pod red. S. Coufera, O. Zaborski / Per. s angl. M.: Mir, 1985. 376 s. (rus.)

- [6] **Sokolov B.A.** Gazovoe toplivo i gazovoe oborudovanie kotel'nykh. M.: Akademiia, 2007. 64 s. (rus.)
- [7] **Kantorovich B.V.** Osnovy teorii gorenii i gazifikatsii tverdogo topliva. M.: Izd-vo AN SSSR, 1958. 601 s. (rus.)
- [8] **Isserlin A.S.** Osnovy szhiganiia gazovogo topliva. L.: Nedra, 1987. 356 s. (rus.)
- [9] **L'iuiss B., El'be G.** Gorenii, plamia i vzryvy v gazakh. M.: Izd-vo inostr. literatury, 1948. 446 s. (rus.)
- [10] **Sergeev V.V.** Gazifikatsiia rastitel'noi biomassy. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2016. 242 s. (rus.)
- [11] **Pantskhava E.S., Pozharnov V.A., Zysin L.V. [i dr.]**. Preobrazovanie energii biomassy. Opyt Rossii. *Teploenergetika*. 1996. № 5. S. 33–38. (rus.)
- [12] **Brattsev A.N., Kuznetsov V.A., Popov V.E., Ufimcev A.A.** Arc Gasification of Biomass: Example of Wood Residue. *High temperature*. 2011. Vol. 49. No 2. P. 244–248.
- [13] **Sergeev V.V., Vladimirov Y.A., Kalinina K.S., Kozhukar E.V.** Gasification and plasma gasification as type of the thermal waste utilization. *Construction of unique buildings and structures*. 2016. № 12. S. 85–93.
- [14] **Plakhuta A.D.** Sovremennyi podkhod k vyboru optimal'nogo istochnika teplosnabzheniia. *Energosberezhenie i vodopodgotovka*. 2015. № 2. S. 33–38. (rus.)

#### AUTHORS

**VLADIMIROV Yaroslav A.** – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: vladimirov@nil-teplo.ru

**ZYSSIN Leonid V.** – *Integrative research institute, Haifa, Izrael*

E-mail: lv\_zyssin@mail.ru

Received: 21.11.2017



DOI: 10.18721/JEST.240102  
УДК 621.311:621.316:621.317

*М.Г. Попов*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

## **ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА МЕЖСИСТЕМНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ЗАРЯДНОЙ МОЩНОСТИ**

Исследованы динамические свойства продольной дифференциальной защиты линии электропередачи с компенсацией зарядной мощности, разработаны рекомендации по повышению чувствительности защиты. В результате исследований установлено, что для обеспечения селективной работы минимальный ток срабатывания защиты недопустим по условию чувствительности в режимах включения ВЛ на холостой ход. Следовательно, для достижения требуемых показателей чувствительности и быстродействия необходимо увеличение основного сигнала торможения. Представлены результаты оценки эффективности предложенных ранее способов повышения эффективности защиты. Использование дополнительного торможения за счет компенсации токов небаланса, обусловленных распределенной емкостью ВЛ, позволяет в значительной мере повысить чувствительность защиты. Наиболее эффективно применение дополнительного торможения в объеме 80–100 % при пониженном уровне ( $k_r = 0,1-0,2$ ) основного тормозного сигнала.

ЛИНИЯ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ; ТРАНСФОРМАТОР ТОКА; ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА; ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА; ТОРМОЗНОЙ СИГНАЛ; КОРРЕКЦИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ.

*Ссылка при цитировании:*

М.Г. Попов. Дифференциальная защита межсистемных линий электропередачи с компенсацией зарядной мощности // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 1. С. 17–26. DOI: 10.18721/JEST.240102.

*M.G. Popov*

Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

## **DIFFERENTIAL PROTECTION OF INTER-SYSTEM TRANSMISSION LINES WITH CHARGE CAPACITY COMPENSATION**

The goal of the article was to investigate the dynamic properties of longitudinal differential protection of power lines with charge capacity compensation and to develop recommendations for increasing the sensitivity of protection. As a result of the study, it was established that the minimum tripping current of the protection is inadmissible for providing selective operation due to the condition of sensitivity in idle switching modes of the OL. Therefore, an increase in the main braking signal is necessary in order to achieve the required sensitivity and speed. The article presents the results of an evaluation of the effectiveness of the methods proposed earlier in [1] for improving the efficiency of protection. The use of additional braking due to compensation of unbalance currents caused by distributed capacitance of the OL allows to significantly increase the sensitivity of protection.

ELECTRIC TRANSMISSION LINE; CURRENT TRANSFORMER; DYNAMIC PROPERTIES; DIFFERENTIAL PROTECTION; RESTRICTED SIGNAL; CORRECTION OF SENSITIVITY.

*Citation:*

M.G. Popov. Differential protection of inter-system transmission lines with charge capacity compensation, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 24(01)(2018) 17–26, DOI: 10.18721/JEST.240102.

### Актуальность и постановка задачи исследований

Одна из основных защит воздушных линий (ВЛ) электропередачи – продольная токовая дифференциальная. Её микропроцессорные полуккомплекты устанавливаются на смежных подстанциях. Организация системы дифференциальной защиты (рис. 1) подразумевает использование коммуникационных интерфейсов для информационного обмена измеренными мгновенными значениями токов в фазах линий электропередачи (ЛЭП).

Несовершенство дифференциальных защит обусловлено в основном токами небаланса различной природы. Для ослабления их влияния в нестационарных режимах применяются сигналы торможения, которые пропорциональны фазным токам плеч дифференциальной защиты. Однако при внешних КЗ со значительной кратностью тормозной сигнал может быть существенно искажен (вплоть до полного его отсутствия) вследствие насыщения трансформаторов тока. Традиционное решение этой проблемы, применяемое всеми производителями – введение блокировки или глубокое торможение, что, в конечном счете, приводит к увеличению времени срабатывания и снижению чувствительности защиты. В связи с этим решение проблемы повышения чувствительности и быстродействия дифференциальной защиты линий чрезвычайно актуально.

Как уже отмечалось в [1], методика исследования нестационарных режимов измерительных цепей защиты основана на проведении численных экспериментов с цифровой записью (осциллографирование) переходных процессов линии электропередачи в наиболее характерных расчетных условиях. К ним прежде всего следует отнести режимы успешного и неуспешного опробования включения ЛЭП. При этом наибольшие амплитудные значения токов включения на холостой ход или короткое замыкание будут соответствовать нулевому углу напряжения коммутации.

С учетом изложенного целью статьи является исследование\* динамических свойств

продольной дифференциальной защиты линии электропередачи с компенсацией зарядной мощности и разработка рекомендаций по повышению чувствительности защиты.

### Исследование нестационарных режимов ЛЭП с шунтирующими реакторами и ее системы дифференциальной защиты

Для проведения расчетных исследований была разработана математическая модель межсистемной линии электропередачи сверхвысокого напряжения 500 кВ с усовершенствованной структурой дифференциальной защиты (рис. 2).

Математическое описание и решение системы дифференциальных уравнений переходных процессов воздушной линии сверхвысокого напряжения с грозозащитными тросами достаточно подробно выполнено в [1, 8–10] и имеет матричную форму записи:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dx} [U(t)]_m = [R]_m [I(t)]_m + \\ + [LM]_m \frac{d}{dt} [I(t)]_m; \\ \frac{d}{dx} [I(t)]_n = [G]_n [U(t)]_n + \\ + [CK]_n \frac{d}{dt} [U(t)]_n, \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $x$  – расстояние относительно подстанции SS1, км;  $[U(t)]$ ,  $[I(t)]$  – столбцы-векторы мгновенных напряжений и токов многопроводной линии, соответственно, В и А;  $[R]_m$  – матрица удельных активных сопротивлений  $m$ -го участка ВЛ, Ом/км;  $[LM]_m$  – матрица удельных индуктивностей  $m$ -го участка ВЛ, Гн/км;  $[G]_n$  – матрица удельных активных проводимостей  $n$ -го узла ВЛ, См/км;  $[CK]_n$  – матрица удельных ёмкостей  $n$ -го узла ВЛ, Ф/км.

Анализ динамических свойств типовых структур микропроцессорных дифференциальных защит достаточно подробно выполнен в [5–7, 10]. Описание вспомогательных микропроцессорных модулей (см. Доп. МП РЗА на рис. 2) и алгоритма формирования корректирующего тормозного сигнала изложено в [1].

\* Исследования проводились в рамках выполнения государственного задания по договору № 13.8886.2017/БЧ.

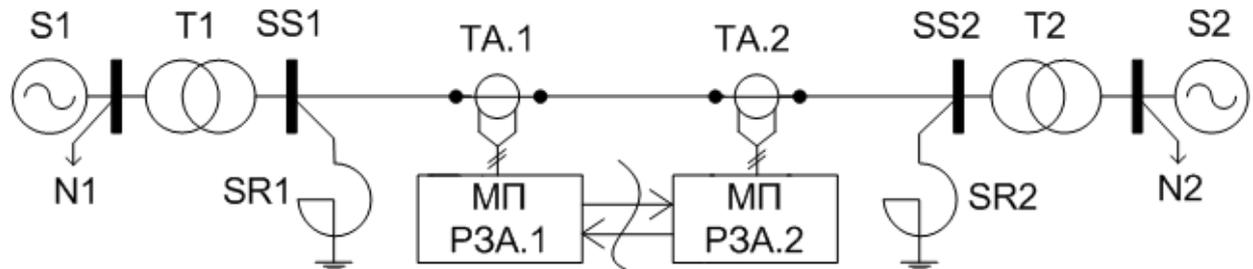


Рис. 1. Принципиальная схема подключения полукомплектов дифференциальной защиты воздушной линии с шунтирующими реакторами  
 Fig. 1. Principal diagram of overhead line with shunting reactors differential protection half-sets connection

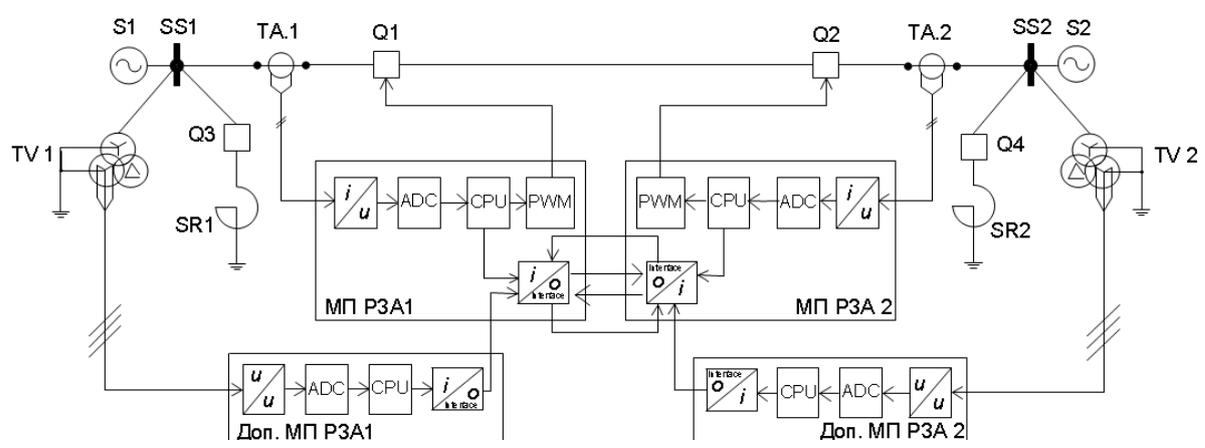


Рис. 2. Структурная схема микропроцессорной дифференциальной защиты воздушной ЛЭП с шунтирующими реакторами  
 Fig. 2. Structural diagram of microprocessor differential protection of overhead power supply line with shunting reactors

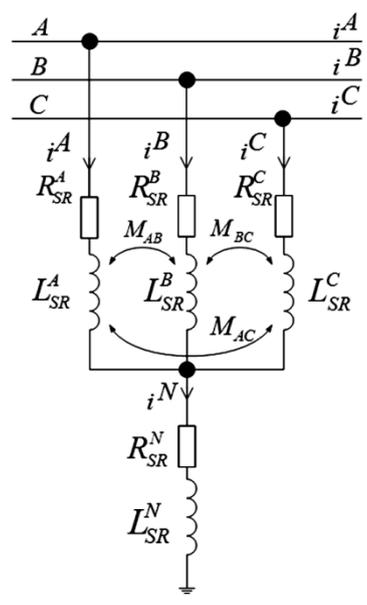


Рис. 3. Схема замещения ШР  
 Fig. 3. Diagram of shunting reactor

В свою очередь, подсистема уравнений переходных процессов в шунтирующих реакторах (ШР) (рис. 3) имеет вид

$$\begin{cases} u^A = (R_{SR}^A + R_{SR}^N) i^A + (L_{SR}^A + L_{SR}^N) \frac{di^A}{dt} + R_{SR}^N i^B + \\ + (M_{AB} + L_{SR}^N) \frac{di^B}{dt} + R_{SR}^N i^C + (M_{AC} + L_{SR}^N) \frac{di^C}{dt}; \\ u^B = (R_{SR}^B + R_{SR}^N) i^B + (L_{SR}^B + L_{SR}^N) \frac{di^B}{dt} + R_{SR}^N i^A + \\ + (M_{BA} + L_{SR}^N) \frac{di^A}{dt} + R_{SR}^N i^C + (M_{BC} + L_{SR}^N) \frac{di^C}{dt}; \\ u^C = (R_{SR}^C + R_{SR}^N) i^C + (L_{SR}^C + L_{SR}^N) \frac{di^C}{dt} + R_{SR}^N i^A + \\ + (M_{CA} + L_{SR}^N) \frac{di^A}{dt} + R_{SR}^N i^B + (M_{CB} + L_{SR}^N) \frac{di^B}{dt}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $R_{SR}^A$ ,  $R_{SR}^B$ ,  $R_{SR}^C$  – активные фазные сопротивления трехфазного шунтирующего реактора, Ом;  $R_{SR}^N$ ,  $L_{SR}^N$  – соответственно

активное сопротивление и индуктивность шунтирующего реактора, устанавливаемого в нейтрали, Ом и Гн;  $L_{SR}^A$ ,  $L_{SR}^B$ ,  $L_{SR}^C$  – фазные индуктивности трехфазного шунтирующего реактора, Гн;  $M_{AB}$ ,  $M_{BC}$ ,  $M_{CA}$  – соответствующие взаимные индуктивности трехфазного шунтирующего реактора, Гн.

При отсутствии реактора в нейтрали и однофазном исполнении линейных шунтирующих реакторов подсистема уравнений (2) преобразуется к виду

$$\begin{cases} u^A = R_{SR}^A i^A + L_{SR}^A \frac{di^A}{dt}; \\ u^B = R_{SR}^B i^B + L_{SR}^B \frac{di^B}{dt}; \\ u^C = R_{SR}^C i^C + L_{SR}^C \frac{di^C}{dt}. \end{cases} \quad (3)$$

Расчетные исследования переходных процессов линии электропередачи с шунтирующими реакторами и измерительных цепей её защиты выполнены применительно к следующим нестационарным режимам: включению на холостой ход со стороны подстанции SS1 (рис. 4–6, интервал времени  $t = 0,1–0,2$  с) и последующее короткое замыкание (рис. 7, 8, интервал времени  $t = 0,2–0,5$  с). Для оценки эффективности предлагаемого в [1] нового способа дополнительного торможения дифференциальной защиты производилось варьирование коэффициента торможения  $k_T$  от 0 до 1 и приведенного коэффициента компенсации ( $k_C = k_T k_{C_{\text{фазн}}}$ ).

**Анализ результатов исследований и разработка рекомендаций по повышению чувствительности и быстродействия защиты**

Расчетные осциллограммы переходных процессов в измерительных цепях защиты при неуспешном опробовании трехфазной линии электропередачи изображены на рис. 4–8. Из представленных на указанных рисунках расчетных осциллограмм нестационарных режимов измерительных органов защиты наиболее показательными являются дифференциальные токи поврежденных фаз в режиме КЗ на шинах противоположной подстанции и дифференциальный ток неповрежденной фазы С в режиме холостого хода (см. рис. 6, табл. 1).

Таблица 1

**Параметры срабатывания защиты фазы С при включении ВЛ**

Table 1

**The parameters of actuation of the protection for phase C of line switching**

$k_T$ , о.е.	$k_C$ , о.е.	$I_{c.з.}$ , о.е.	Примечания
0,1	$> 1$ ( $> 2$ )	0,1	рис. 6, а
	$\geq 0,8$ ( $> 1$ )	0,2	
	$\geq 0,5$ ( $\geq 0,85$ )	0,3	
	$\geq 0,15$ ( $\geq 0,8$ )	0,4	
	0	0,51 (0,7)	
0,2	$> 1$ ( $> 1,6$ )	0,1	рис. 6, б
	$\geq 0,64$ ( $> 1$ )	0,2	
	$\geq 0,4$ ( $\geq 0,9$ )	0,3	
	$\geq 0,1$ ( $\geq 0,6$ )	0,41	
	0	0,45 (0,63)	
0,5	$\geq 0,5$	0,1	рис. 6, в
	$\geq 0,21$	0,2	
	$\geq 0,08$	0,25	
	0	0,28 (0,39)	
	$-(\geq 0,3)$	0,3	

Примечание. В скобках указаны соответствующие параметры срабатывания защиты для ВЛ без поперечной компенсации.

Анализ представленных на рис. 4 расчетных осциллограмм показал, что для обеспечения селективной работы ДЗЛ необходима ее отстройка от тока включения 0,77 о.е. при отсутствии компенсации зарядной мощности (без ШР). Оснащение ВЛ с обеих сторон шунтирующими реакторами мощностью 180 МВА для компенсации емкостных токов позволяет несколько снизить минимальный ток срабатывания защиты до величины около 0,56 о.е. (см. рис. 4, фаза С при  $k_T = 0$ ). Однако это значение не удовлетворяет требованиям чувствительности, поскольку  $k_{\text{ч}} = 1,78$  о.е. (менее 2,0 о.е.). Приемлемым показателям чувствительности и быстродействия защиты ( $I_{c.з. \text{ min}} = 0,1–0,2$  о.е.) соответствует завышенный уровень основного торможения ( $k_T = 0,65–0,85$  о.е.).

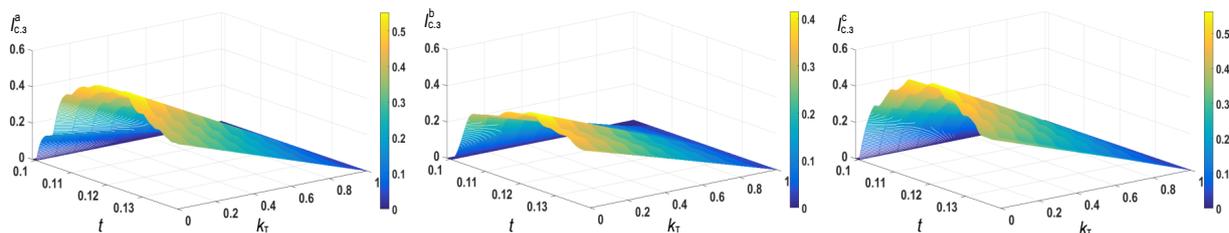


Рис. 4. Фазные токи срабатывания защиты при включении ВЛ на XX и наличии только основного торможения ( $k_T = 0-1$  о.е.,  $k_C = 0$ )

Fig. 4. Phase currents of protection actuation in case of line switching on under open-circuit conditions and presence only basic restriction ( $k_T = 0-1$  p.u.,  $k_C = 0$  p.u.)

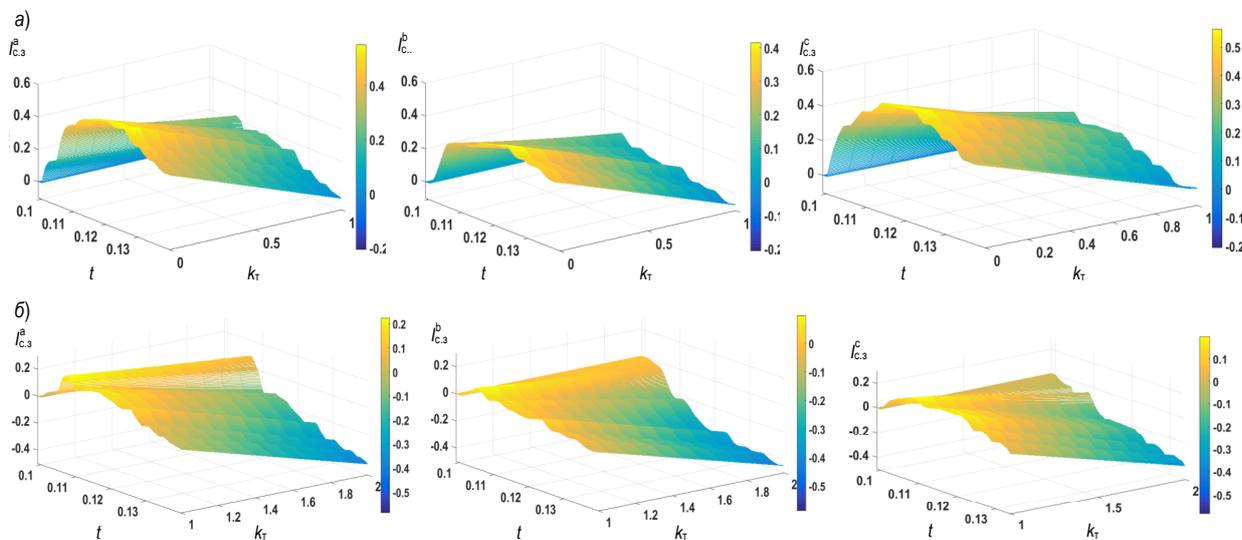


Рис. 5. Фазные токи срабатывания защиты при включении ВЛ на XX и наличии только дополнительного торможения ( $k_T = 0$ ): вариация дополнительного торможения в диапазоне  $k_C = 0-1$  о.е. (а) и вариация дополнительного торможения в диапазоне  $k_C = 1-2$  о.е. (б)

Fig. 5. Phase currents of protection actuation in case of line switching on under open-circuit conditions and only additional restriction ( $k_T = 0$ ): variable additional restriction  $k_C = 0-1$  p.u. (a) and variable additional restriction  $k_C = 1-2$  p.u. (b)

В случае некомпенсированной ВЛ (без ШР) указанные параметры селективной работы ДЗЛ еще хуже – требуется усиливать торможение защиты до 75–88 % ( $k_T = 0,75-0,88$  о.е.). Указанные уровни тормозных сигналов в обоих случаях недопустимы в условиях насыщения трансформаторов тока в одном из плеч дифференциальной защиты. В связи с этим введение коррекции тормозных сигналов по алгоритму, предложенному в [1], позволяет повысить быстродействие и чувствительность защиты.

С учетом сказанного далее изложены основные принципы выбора параметров срабатывания дифференциальной защиты, которые удовлетворяют требованиям ее селективности, чувствительности и быстродействия.

Использование дополнительных тормозных сигналов уровня 80–100 % (см. рис. 6, а, табл. 1,  $k_C = 0,8-1,0$  о.е.) позволяет достигнуть эффективных показателей чувствительности ( $I_{c.3 \min}^* = 0,2-0,24$  о.е.). Перекомпенсация на 90 % ( $k_C = 1,9$  о.е.) соответствует  $I_{c.3 \min} = 0,1$  о.е. Следует отметить, что для достижения коэффициента чувствительности  $k_{\text{ч}} = 10$  о.е. ( $I_{c.3 \min} = 0,1$  о.е.) в случае ДЗЛ без ШР перекомпенсация емкостных токов небаланса должна быть более 200 % ( $k_C > 2,5$  о.е.). Полная компенсация ( $k_C = 1$  о.е.) соответствует предельным значениям по чувствительности защиты:  $I_{c.3 \min} = 0,38$  о.е. ( $k_{\text{ч}} \approx 2,6$  о.е.).

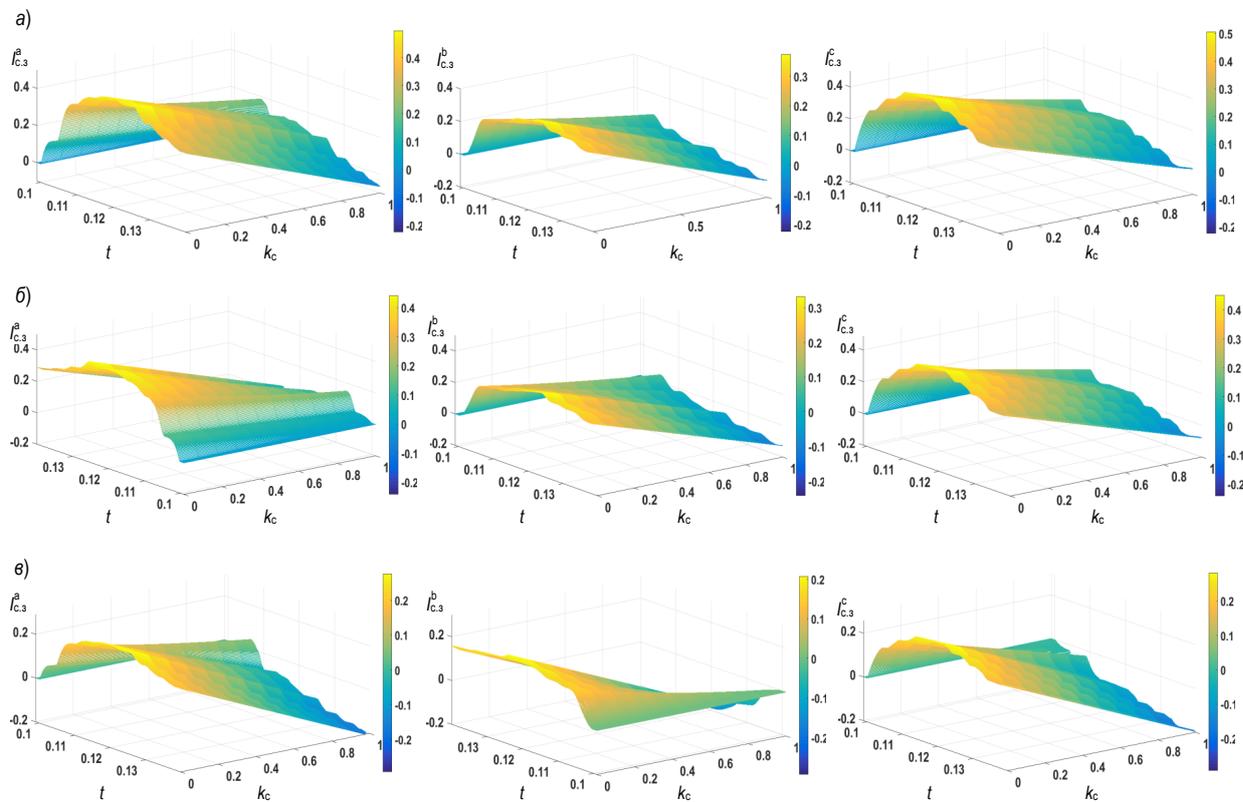


Рис. 6. Фазные токи срабатывания защиты при включении ВЛ на XX при наличии основного и вариации ( $k_c = 0-1$  о.е.) дополнительного торможения: уровень основного сигнала 10 (а), 20 (б) и 50 (в) % (соответственно  $k_T = 0,1; 0,2$  и  $0,5$  о.е.)

Fig. 6. Phase currents of protection actuation in case of line switching on under open-circuit conditions and presence basic and variable ( $k_c = 0-1$  p.u.) additional restriction: level basic restriction 10 (a), 20 (б) и 50 (в) ( $k_T = 0.1; 0.2$  and  $0.5$  p.u.)

Обобщая вышеизложенные результаты анализа динамических свойств ДЗЛ при включении (опробовании) ВЛ, необходимо подчеркнуть, что при выборе параметров срабатывания защиты требуется решить нетривиальную, многофакторную задачу с несколькими граничными условиями, характеризующими необходимые требования по селективности, чувствительности и быстродействию. Результатом этого решения являются области (диапазон) значений коэффициентов пропорциональности тормозных сигналов, формируемых по основному ( $k_T$ ) и дополнительному ( $k_C$ ) алгоритмам.

Обобщенная методика выбора коэффициентов торможения ( $k_T$ ) и компенсации включает в себя:

определение по расчетным осциллограммам включения ВЛ на XX коэффициентов  $k_T$  и  $k_C$  в окрестности требуемого по

условиям чувствительности диапазона срабатывания защиты (см. табл. 1);

проверку чувствительности и селективности работы защиты (см. табл. 2) в аварийных режимах «внутреннего КЗ» для наихудших условий (наименьший уровень токов).

Из совместного анализа данных табл. 1 и 2 следует, что для достижения приемлемых показателей чувствительности защиты (при  $I_{c.3 \min} = 0,2$  о.е., см. табл. 1) коэффициент компенсации должен составлять не менее 0,8 о.е. ( $> 1$  о.е. без ШП) при малом ( $k_T = 0,1$  о.е.) тормозном сигнале. Указанный достаточно высокий уровень (80–100 %) дополнительного тормозного сигнала характеризуется отрицательными значениями дифференциального тока неповрежденной фазы С (см. рис. 8, б), а его положительной величине соответствуют относительно малые коэффициенты компенсации ( $k_C = 0-0,2$  о.е.) (см. табл. 2).

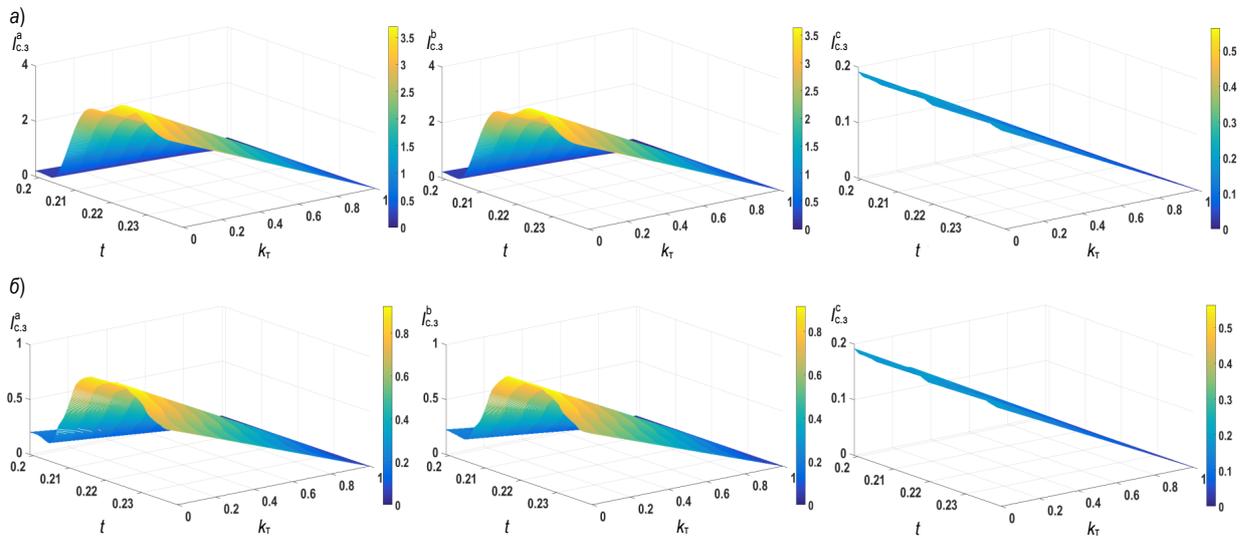


Рис. 7. Фазные токи срабатывания защиты в режиме междуфазного (AB) КЗ и наличии только основного торможения ( $k_T = 0-1$  о.е.,  $k_C = 0$  о.е.): повреждение на шинах подстанции SS1 (а) и SS2 (б)  
Fig. 7. Phase currents of protection actuation during phase-to-phase (AB) short circuit and with the presence of only basic restriction ( $k_T = 0-1$  p.u.,  $k_C = 0$  p.u.): short circuit on busbars of SS1 (a) and SS2 (b)

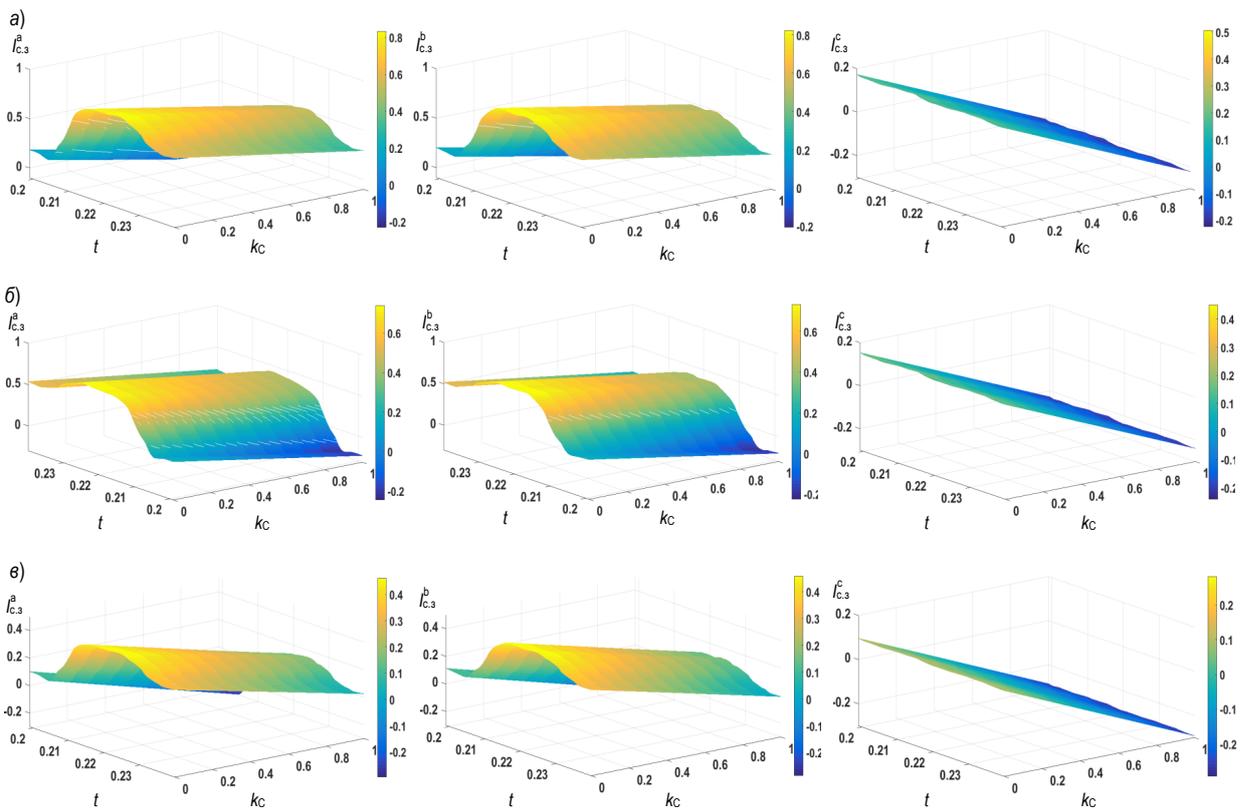


Рис. 8. Фазные токи срабатывания защиты в режиме междуфазного (AB) КЗ ВЛ вблизи подстанции SS2 при наличии основного и вариации ( $k_C = 0-1$  о.е.) дополнительного торможения: уровень основного тормозного сигнала 10 (а), 20 (б) и 50 (в) % (соответственно,  $k_T = 0,1; 0,2$  и  $0,5$  о.е.)  
Fig. 8. Phase currents of protection actuation during phase-to-phase (AB) short circuit near SS2 substation and with the presence of basic and variable ( $k_C = 0-1$  p.u.) additional restriction: level basic restriction 10 (a), 20 (b) and 50 (c) % ( $k_T = 0.1, 0.2$  and  $0.5$  p.u.)

Таблица 2  
Дифференциальный ток неповрежденной фазы С при двухфазном (АВ) КЗ вблизи шин ПС SS2

Table 2  
The differential current of the protection for phase C in case phase-to-phase (AB) short circuit near busbar of SS2 substation

$k_T$ , о.е.	$k_C$ , о.е.	$I_{c.3}$ , о.е.	Примечания
0,1	0,2 (0,82)	0,1	рис. 8, а
	0,065 (-)	0,15	
	0	0,18 (0,44)	
	-(0,57)	0,2	
0,2	0,15 (0,68)	0,1	рис. 8, б
	$\geq 0,02$	0,15	
	0	0,16 (0,39)	
	-(0,43)	0,2	
0,5	0	0,09 (0,24)	рис. 8, в
	-(0,33)	0,1	
	-(0,08)	0,2	

Примечание. В скобках указаны соответствующие параметры срабатывания защиты для ВЛ без поперечной компенсации.

Естественно, что усиление основного торможения ( $k_T = 0,2-0,5$  о.е., см. табл. 2) в режимах КЗ сопровождается необходимостью снижения уровня дополнительного сигнала торможения и, как уже отмечалось, невозможностью обеспечения селективной работы при включении (опробовании) ВЛ. При этом, аналогично рекомендациям, изложенным в [1], блокировка корректирующих тормозных сигналов не требуется.

С учетом вышеизложенного анализа результатов рекомендуется при введении дополнительного торможения в объеме 80–100 % снижать основной тормозной сигнал до уровня 10–20 % ( $k_T = 0,1-0,2$  о.е.). Дальнейшее совершенствование дифференциальной защиты с дополнительным торможением возможно при введении адаптивных (самонастраивающихся) алгоритмов компенсации.

Применение адаптивных тормозных сигналов в функции емкостных токов ( $k_C = var$ ) позволит достичь абсолютной чувствительности ДЗЛ с минимальным током срабатывания  $I_{c.3 min} \rightarrow 0$  и коэффици-

ентом торможения  $k_T \rightarrow 0$  при идеальном восстановлении (см. [2, 3]) первичных токов трансформаторов тока.

### Заключение

Выполнено исследование продольной дифференциальной защиты воздушной линии с шунтирующими реакторами. Показано, что при отсутствии дополнительного торможения ( $k_C = 0$  о.е.) рассчитанные по условиям селективности параметры срабатывания защиты не удовлетворяют нормативным требованиям ее чувствительности ( $I_{c.3 min}^* > 0,6$  о.с.,  $k_C < 2,0$  о.е.,  $k_T = 0,65-0,85$  о.е.), что говорит о малой эффективности основного алгоритма торможения. Отсутствие устройств компенсации зарядной мощности только усугубляет проблему эффективности применения основных тормозных сигналов ( $k_T = 0,75-0,88$  о.е.).

Применение коррекции тормозных сигналов в серийных полуккомплектах дифференциальной защиты позволяет в существенной мере улучшить чувствительность защиты ( $I_{c.3 min}^* = 0,2-0,24$  о.е.). Увеличением корректирующего сигнала торможения до 185 % можно добиться значительного повышения чувствительности защиты ( $k_C = 10,0$  о.е.).

Использование дополнительного торможения в объеме 80–100 % наиболее эффективно при пониженном уровне ( $k_T = 0,1-0,2$  о.е.) основного тормозного сигнала. Дальнейшее совершенствование дифференциальной защиты с коррекцией её характеристики срабатывания дополнительным торможением возможно при введении адаптивных (самонастраивающихся) алгоритмов дополнительного торможения.

Исследования проводились в рамках федеральной целевой программы «Совершенствование теории рабочих процессов производства, преобразования и транспорта энергии и разработка научных основ проектирования высокоэффективных теплосиловых установок, энергетических и транспортных машин, их систем и комплексов. № 13.8886.2017/БЧ».



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абоу Накира Ш.С., Попов М.Г. Повышение эффективности продольной дифференциальной защиты воздушных линий электропередачи // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Естественные и инженерные науки. 2017. Т. 23. № 1. С. 140–156. DOI: 10.18721/JEST.230114.
2. Ванин В.К., Попов М.Г., Попов С.О. Моделирование фильтров тока намагничивания и воспроизведения вторичных токов силовых трансформаторов // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы X всероссийской научно-технической конференции. 2016. С. 268–269.
3. Vanin V., Popov M., Popov S. Increasing the Reliability of the Measuring Circuits of Protection Relays // Power Technology and Engineering. 2016. Vol. 50. № 1. P. 87–92. Springer New York Consultants Bureau ISSN: 1570-145X, eISSN: 1570-1468.
4. Зарудский Г.К., Шипова И.А. Исследование пропускной способности воздушных линий компактного исполнения // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Материалы двадцать третьей международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. 2017. Т. 3. С. 327.
5. Sheskin E.V., Evdokunin G.A. Switching of high-voltage cable lines with shunt reactors. // Power Technology and Engineering. 2016. Vol. 50. No 1. P. 108–114. Springer New York Consultants Bureau ISSN: 1570-145X, eISSN: 1570-1468.
6. Ванин В.К., Бахлуев В.А. Исследование погрешности работы фильтра тока намагничивания и воспроизведения вторичного тока силовых трансформаторов // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем материалы XI Всероссийской научно-технической конференции. 2015. С. 339–340.
7. Ванин В.К., Бахлуев В.А. Фильтры тока намагничивания трансформаторов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2015. № 4(540). С. 59–62.
8. Glazyrin V.E., Litvinov I.I., Osintsev A.A. On methods of investigation of power generator differential protection behavior in automatic mode // Applied mechanics and materials ISSN: 1660-9336. 2015. Vol. 792. P. 237–242.
9. Куприенко В.В. Управление тормозным сигналом в дифференциальной защите // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: Сборник трудов восьмой международной научно-технической конференции / Отв. ред. Н.В. Савина. 2015. С. 421–423.
10. Левиуш А.И. Дифференциальная защита линий электропередач // Релейная защита и автоматизация. 2014. № 4. С. 30–34.
11. Кувшинов Г.Е., Соловьев Д.Б. Недостатки применения трансформаторов тока в дифференциальной токовой защите // Электротехнические комплексы и системы управления. 2012. № 4. С. 23–29.
12. Ванин В.К., Мокеев А.В. Разработка алгоритмов обработки сигналов для многофункциональных устройств релейной защиты. Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2006. № 5(47). Т 1. С. 93–98.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ПОПОВ Максим Георгиевич** — кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого  
E-mail: PopovMG@eef.spbstu.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 07.11.2017

## REFERENCES

- [1] Abounakera S.X., Popov M.G. Improving the efficiency of differential protection of overhead transmission lines, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 23(01)(2017) 140–156. DOI: 10.18721/JEST.230114. (rus)
- [2] Vanin V.K., Popov M.G., Popov S.O. Modelirovaniye filtrov toka namagnichivaniya i vosproizvedeniye vtorichnykh tokov silovykh transformatorov. *Informatsionnyye tekhnologii v elektrotekhnike i elektroenergetike: materialy X vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. 2016. S. 268–269. (rus)
- [3] Vanin V., Popov M., Popov S. Increasing the Reliability of the Measuring Circuits of Protection Relays. *Power Technology and Engineering*. 2016. Vol. 50. No 1. P. 87–92. Springer New York Consultants Bureau ISSN: 1570-145X, eISSN: 1570-1468.

[4] **Zarudskiy G.K., Shipova I.A.** Issledovaniye propusknoy sposobnosti vozdukhnykh liniy kompaktnogo ispolneniya. Radioelektronika, elektrotehnika i energetika. *Materialy dvadtsat tretyey mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov i aspirantov.* 2017. T. 3. S. 327. (rus)

[5] **Sheskin E.B., Evdokunin G.A.** Switching of high-voltage cable lines with shunt reactors. *Power Technology and Engineering.* 2016. Vol. 50. No 1. P. 108–114. Springer New York Consultants Bureau ISSN: 1570-145X, eISSN: 1570-1468.

[6] **Vanin V.K., Bakhlyuev V.A.** Issledovaniye pogreshnosti raboty filtra toka namagnichivaniya i vosproizvedeniya vtorichnogo toka silovykh transformatorov. *Dinamika nelineynykh diskretnykh elektrotekhnicheskikh i elektronnykh system: materialy XI Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii.* 2015. S. 339–340. (rus)

[7] **Vanin V.K., Bakhlyuev V.A.** Filtry toka namagnichivaniya transformatorov. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika.* 2015. № 4 (540). S. 59–62. (rus)

[8] **Glazyrin V.E., Litvinov I.I., Osintsev A.A.**

On methods of investigation of power generator differential protection behavior in automatic mode. *Applied mechanics and materials* ISSN: 1660-9336. 2015. Vol. 792. P. 237–242.

[9] **Kupriyenko V.V.** Upravleniye tormoznym signalom v differentsialnoy zashchite. *Energetika: upravleniye, kachestvo i effektivnost ispolzovaniya energoresursov. Sbornik trudov vosmoy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii / Otv. red. N.V. Savina.* 2015. S. 421–423. (rus)

[10] **Leviush A.I.** Differentsialnaya zashchita liniy elektroperedach. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya.* 2014. № 4. S. 30–34. (rus)

[11] **Kuvshinov G.Ye., Solovyev D.B.** Nedostatki primeneniya transformatorov toka v differentsialnoy tokovoy zashchite. *Elektrotekhnicheskiye komplekisy i sistemy upravleniya.* 2012. № 4. S. 23–29. (rus)

[12] **Vanin V.K., Mokeyev A.V.** Razrabotka algoritmov obrabotki signalov dlya mnogofunktsionalnykh ustroystv releynoy zashchity. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki.* 2006. № 5(47). T. 1. S. 93–98. (rus)

#### AUTHORS

**POPOV Maksim G.** – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university  
E-mail: PopovMG@eef.spbstu.ru

Received: 07.11.2017



DOI: 10.18721/JEST.240103  
УДК: 621.315.2.016.2

*В.В. Титков<sup>1</sup>, А.Н. Лубков<sup>2</sup>, П.Д. Тукаев<sup>1</sup>*

1 – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

2 – Научно-исследовательский институт по передаче электроэнергии постоянным током  
высокого напряжения, Санкт-Петербург, Россия

### **ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТРЕХФАЗНОЙ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ В СЕТИ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ ПРИ ОДНОФАЗНЫХ ДУГОВЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ**

В работе рассматривается тепловой режим кабельной линии, в которой существует однофазное замыкание на землю (ОЗЗ), и проводится оценка масштаба разрушения кабельной конструкции, вызываемой повышением температуры в зоне повреждения. На основании модели закрытого дугового разряда была составлена система уравнений, описывающая тепловой режим кабельной линии в условиях существования ОЗЗ во времени. При помощи численного решения данной системы была получена картина теплового поля исследуемой кабельной линии во времени. На основании полученных данных были сделаны выводы относительно влияния таких параметров, как класс напряжения кабельной линии, на сценарий развития тепловых процессов, а также характерные пространственные и временные масштабы этих процессов. Сформулирован ряд рекомендаций, направленных на уменьшения вероятности развития существенно-го теплового повреждения кабельной конструкции в условиях возникновения ОЗЗ, способного привести к двухфазным КЗ и другим серьезным авариям.

ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ; КАБЕЛЬ; КАБЕЛЬНАЯ ЛИНИЯ; ИЗОЛЯЦИЯ; ДУГОВОЙ РАЗРЯД; ОЗЗ; КЗ.

*Ссылка при цитировании:*

В.В. Титков, А.Н. Лубков, П.Д. Тукаев. Тепловые процессы в трехфазной кабельной линии в сети с изолированной нейтралью при однофазных дуговых замыканиях на землю // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 1. С. 27–37. DOI: 10.18721/JEST.240103.

*V.V. Titkov<sup>1</sup>, A.N. Lubkov<sup>2</sup>, P.D. Tukeev<sup>1</sup>*

1 – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

2 – NIIPТ, St. Petersburg, Russia

### **THERMAL PROCESSES IN A THREE-PHASE CABLE LINE IN A GRID WITH ISOLATED NEUTRAL UNDER ONE-PHASE ARCING GROUND FAULT**

The heating mode of a cable line under one-phase arcing ground fault is considered in this paper along with an assessment of the scale of cable insulation caused by a temperature increase in the fault location. Based on the enclosed arcing discharge model, we have constructed a system of equations describing the heating mode of a cable line during the evolution of one-phase arcing ground fault over time. We have obtained the time history of the temperature field of the considered cable line using finite-element analysis. Based on the obtained data, we were able to draw several conclusions about the influence of such parameters as the operating voltage on the behavior of the heating mode, along with typical time and

dimension scales of these processes. We have formulated a number of suggestions focused on decreasing the probability of the development of considerable thermal destruction of a cable line under one-phase arcing ground fault that could potentially cause two-phase fault.

HEATING MODE; CABLE; CABLE LINE; INSULATION; ARC DISCHARGE; BREAKDOWN; SINGLE-PHASE GROUND FAULT.

*Citation:*

V.V. Titkov, A.N. Lubkov, P.D. Tukeev. Thermal processes in a three-phase cable line in a grid with isolated neutral under one-phase arcing ground fault, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 24(01)(2018) 27–37, DOI: 10.18721/JEST.240103.

### Введение

Доля кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена в сетевом хозяйстве крупных городов продолжает увеличиваться [1] в силу потребности в высвобождении земельных площадей и роста потребляемой нагрузки. Пропускная способность кабельных линий высокого и сверхвысокого напряжений сильно зависит от температурного режима, на который влияет множество факторов: способ укладки кабелей, обустройство экранов и пр. [2]. Это приводит к тому, что главным фактором, определяющим пропускную способность кабельной линии 6–35 кВ, становится ее тепловой режим. Вопросы негативного влияния различного рода препятствий, таких, как пересечения кабельной линии с теплотрассами, автодорогами, ж/д путями и т.д., были рассмотрены в [3, 4]. Однако причиной возникновения локального максимума температуры также может служить однофазное замыкание на землю (ОЗЗ). В силовых высоковольтных кабельных линиях ток ОЗЗ определяется классом напряжения и емкостью кабельной линии на землю [5]. Особенность ОЗЗ в линиях с изолированной, а также с эффективно заземленной нейтралью заключается в том, что ток ОЗЗ в них ограничен величиной порядка десяти ампер и не вызывает срабатывания релейной защиты, вследствие чего ОЗЗ может существовать длительное время, измеряемое часами и сутками [6]. Вместе с тем тепловой режим кабеля в зоне прокола может привести к деструкции изоляции как аварийной, так и соседней фаз с последующим переходом однофазного короткого замыкания в двухфазное [7].

Таким образом, актуальность проблемы анализа теплового режима кабельных линий в условиях существования ОЗЗ в них очевидна.

Цели работы – исследовать изменение во времени теплового режим кабельной линии в условиях существования в ней ОЗЗ, попытаться оценить масштабы разрушения кабельной конструкции, вызванного повышением температуры в зоне повреждения, а также возможность диагностики ОЗЗ с малым током в процессе мониторинга КЛ оптоволоконными системами температурного контроля [8–12].

### Материал и методика работы

В качестве объектов исследования выступают две типичные трехфазные кабельные линии (10 и 35 кВ) в сетях с изолированной нейтралью. Линия на 10 кВ выполнена однофазным кабелем марки ПвКаВнг(А)-LS 1×240мк/50-10 (рис. 1) с медным проводящим экраном, алюминиевой броней и изоляцией из сшитого полиэтилена длиной 1 км. Эскиз сечения кабеля на 35 кВ приведен на рис. 3, г.

На рис. 1 обозначено:  $r_c = 9,75$  мм – радиус сечения жилы;  $r_{in1} = 13,75$  мм – радиус сечения внутренней изоляции;  $r_{sh} = 16$  мм – радиус сечения медного экрана;  $r_{in2} = 18,5$  мм – радиус сечения внешней изоляции;  $r_{ar} = 20,5$  мм – радиус сечения брони;  $r_{in3} = 24,5$  мм – радиус сечения внешней оболочки. Толщинами полупроводящих слоев пренебрегаем ввиду их малости.

Использовали численно-аналитическое моделирование с помощью программных пакетов Mathcad и Comsol.

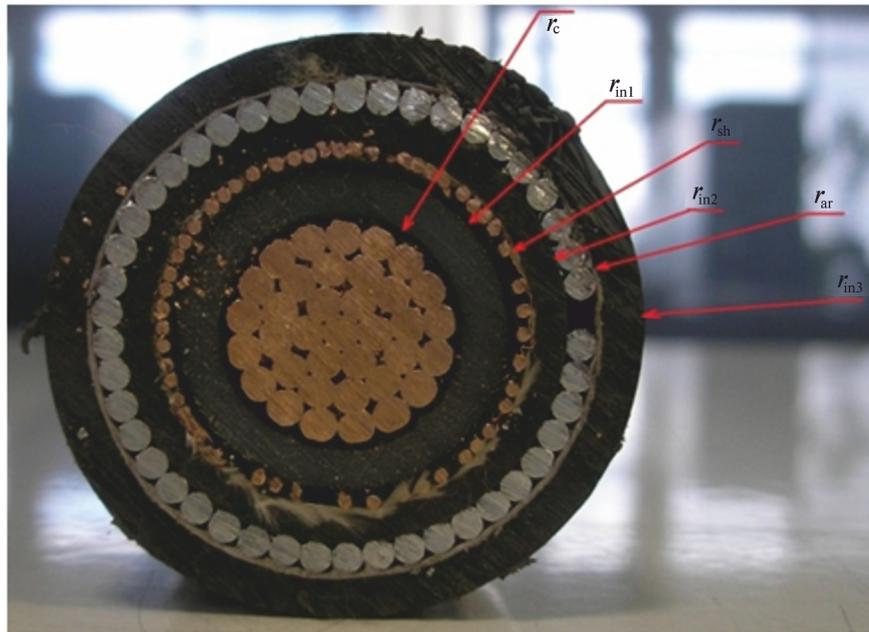


Рис. 1. Вид сечения кабеля ПвКаВнг(А)-LS  
Fig. 1. View of cable ПвКаВнг(А)-LS cross-section

### Расчетное исследование

Ранее в [7] тепловой режим в высоковольтной кабельной линии в зоне ОЗЗ длительностью 2 секунды с током 340 А был рассмотрен в рамках относительно простой модели. При этом масштаб и скорости термической деструкции кабельной системы вблизи замыкания оказались приводящими к быстрому развитию аварии. Вместе с тем, как было отмечено, режим ОЗЗ при токе замыкания, ограниченном десятками ампер, может длиться десятки часов, но термическое повреждение кабельной конструкции при этом может иметь незначительный масштаб и существовать длительное время, сохраняя, однако, потенциальную опасность возникновения аварии.

Если величина тока ОЗЗ определяется параметрами сети, в частности зарядной емкостью линии, то на тепловыделение, кроме величины тока, существенное влияние оказывает электрическое сопротивление канала разряда. Для оценки электросопротивления разрядного канала необходимо оценить параметры дуговой плазмы. С этой целью воспользуемся моделью закрытого дугового разряда [13–15].

В рамках используемой модели (рис. 2) в анализируемом случае относительно не-

большого тока дуги будем предполагать отсутствие массообмена разрядного канала с окружающей средой, т.е. существование разряда в закрытой форме.

В этом случае давление  $P$  газоразрядной плазмы в канале равно давлению  $P_w$  насыщенного пара материала стенки – полиэтилена. Последнее оценивается на основе универсального закона Трутона:

$$P_w = C_t \exp\left(-\frac{\Delta H}{R_0 T}\right),$$

где  $\Delta H$  – молярная теплота сублимации вещества (сшитый полиэтилен), для оценки которой используем энергию разрыва связи «углерод – углерод» в расчете на 1 моль вещества, равная  $2,625 \cdot 10^5$  Дж/моль;  $R_0$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – температура;  $C_t = 3,63 \cdot 10^9$  Па – постоянная Трутона. Считая плазму идеальным газом, давление которого при низкой степени ионизации приблизительно оценивается по стандартной формуле  $P = nkT$  ( $k$  – постоянная Больцмана), из уравнения  $P = P_w$  найдем концентрацию частиц в газе в канале разряда:

$$n = C_t \frac{e^{-\frac{\Delta H}{R_0 T}}}{kT}.$$

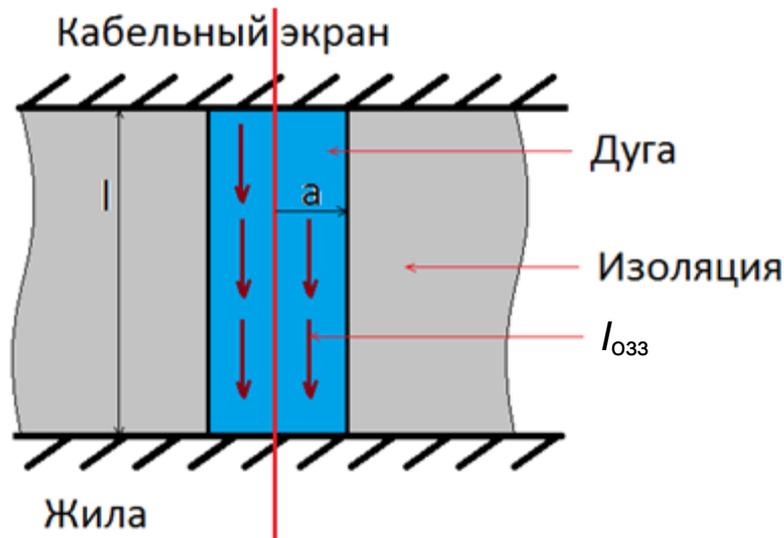


Рис. 2. К описанию дугового разряда в канале пробоя изоляции  
 Fig. 2. To the description of arc discharge in the insulation breakdown channel

Электропроводность плазмы найдем с помощью стандартной формулы

$$\gamma = \frac{x e_0^2}{\sqrt{3kT} ((1-x)\sigma_a + \sigma_i)},$$

где  $\sigma_a, \sigma_i$  – сечения столкновения электро-на соответственно с нейтралами и ионами;

$$\sigma_a = \pi r_a^2;$$

$r_a$  – табличное значение размера нейтрального атома;

$$\sigma_i = 6\pi b_0^2 \ln(\Lambda);$$

$$b_0 = \frac{e_0^2}{12\pi\epsilon_0 kT};$$

$$\Lambda = \frac{\rho_D}{b_0};$$

$$\rho_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 kT}{n_e e_0^2}};$$

$e_0, n_e = n(1-x)$  – заряд и концентрация электронов; степень ионизации  $x$  рассчитывается по формуле Саха в предположении водородной плазмы, т.к. наибольшая часть атомов, составляющих дуговой газ, образующийся в результате разложения полиэтилена ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ), – это водород.

Мощность тепловыделения в канале разряда при протекании тока  $I_{\text{ОЗЗ}}$  определяется падением напряжения вдоль канала разряда и приэлектродными падениями напряжения  $\Delta U$ :

$$\dot{Q} = \frac{I_{\text{ОЗЗ}}^2}{\pi a^2 \gamma} + 2\Delta U I_{\text{ОЗЗ}}, \quad (1)$$

где  $a$  и  $l$  радиус и длина разрядного канала (рис. 2).

Наиболее интенсивное тепловыделение имеет место при непрерывном протекании тока промышленной частоты по разрядному каналу. Однако, учитывая нестабильное механическое состояние среды вокруг разрядного канала, можно ожидать и периодическое погасание дуги в канале, что является причиной хорошо известного явления дуговых перенапряжений [16]. При этом мощность тепловыделения, осредненная по относительно длинному промежутку времени (секунды и более), может быть существенно меньше предельного значения, выражаемого формулой (1).

Первичная оценка образования и скорости распространения зоны повреждения изоляции и проводящих элементов конструкции кабеля, возникающей вблизи



канала пробоя, может быть выполнена в результате решения нестационарной задачи теплопроводности. Трудность решения обусловлена главным образом геометрическими особенностями расчетной области – весьма малым по сравнению с характерными размерами конструкции КЛ размером источника тепловыделения (канал разряда радиусом  $a = 0,1-0,5$  мм). Конфигурация теплового поля линии с дефектом в виде пробоя отличается от плоской, имеющей место в однородных КЛ большой длины. Это существенно затрудняет применение метода конечных элементов, широко используемого при расчете тепловых режимов кабельных линий. Размер ограниченной расчетной области определялся в численных экспериментах исходя из того, чтобы при увеличении расчетной области по отношению к принятой решение изменялось не более чем на 1 %.

Схематичное изображение расчетной области и граничных условий представлено на рис. 3. Здесь  $\alpha$ -коэффициент конвективной теплоотдачи с поверхности грунта принят равным  $5 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ , температура окружающей среды  $T_{\text{окр}} = 22 \text{ }^\circ\text{C}$ , а температура грунта  $T_{\text{гр}} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ . На прочих границах принято условие равенства теплового потока нулю. Ось  $z$  совпадает с осью отрезка кабеля.

Из (1) следует, что при заданном токе ОЗЗ мощность тепловыделения, наряду с геометрическими параметрами разрядного канала, определяется его температурой. При этом ток дуги определяется не сопротивлением канала разряда, а емкостным сопротивлением кабеля, которое, как следует из оценок, существенно выше первого. Примеры рассчитанных с помощью (1) зависимостей  $\dot{Q}(T)$  для канала радиусом  $0,1$  мм при различных толщинах изоляции и токах разряда показаны на рис. 4.

Область горения дуги моделируется поверхностью сферы радиусом  $0,002$  м, к

которой приложен тепловой поток, причем радиус выбран равным половине толщины изоляции между жилой и экраном кабеля.

Тепловой поток из области дуги определяется формулой

$$q_d = \frac{\dot{Q}}{4\pi r_d^2} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2},$$

где  $\dot{Q}$  находится из (1);  $a = 0,1$  мм;  $l_k = 4$  мм – радиус и длина плазменного канала дуги, равная толщине изоляции;  $I_{\text{ОЗЗ}}$  – ток ОЗЗ;  $\gamma$  – проводимость плазменного канала дуги;  $\Delta U = 20$  В – катодное падение напряжение для медного электрода;  $r_d$  – радиус сферы, к поверхности которой приложен поток  $q_d$ .

Тепловыделения в жилах и экранах фазных кабелей приняты для величин токов  $600$  А в кабеле  $10$  кВ и  $900$  А в кабеле  $35$  кВ. Такие значения токов были приняты как рабочие значения, при которых температуры в жилах не поднимаются выше  $70$  °С.

Учитывая наличие проводящих экранов и алюминиевой брони, можно пренебречь межфазными емкостями и принять емкость линии равной утроенной емкости одной фазы. Таким образом, величина тока ОЗЗ

$$I_{\text{ОЗЗ}} = \sqrt{3} \omega C_3 U = 5,8 \text{ А},$$

где  $C_3$  – емкость одного фазного кабеля;  $U = 10$  кВ – рабочее напряжение линии. Емкость одной фазы рассматриваемой линии – это емкость системы «жила – экран»:

$$C_3 = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_{XLPE}L_{\text{каб}}}{\ln\left(\frac{r_{\text{in1}}}{r_c}\right)} = 0,356 \text{ мкФ},$$

где  $\epsilon_{XLPE} = 2,3$  – относительная диэлектрическая проницаемость сшитого полиэтилена;  $\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума;  $L_{\text{каб}} = 1000$  м – длина рассматриваемой кабельной линии.

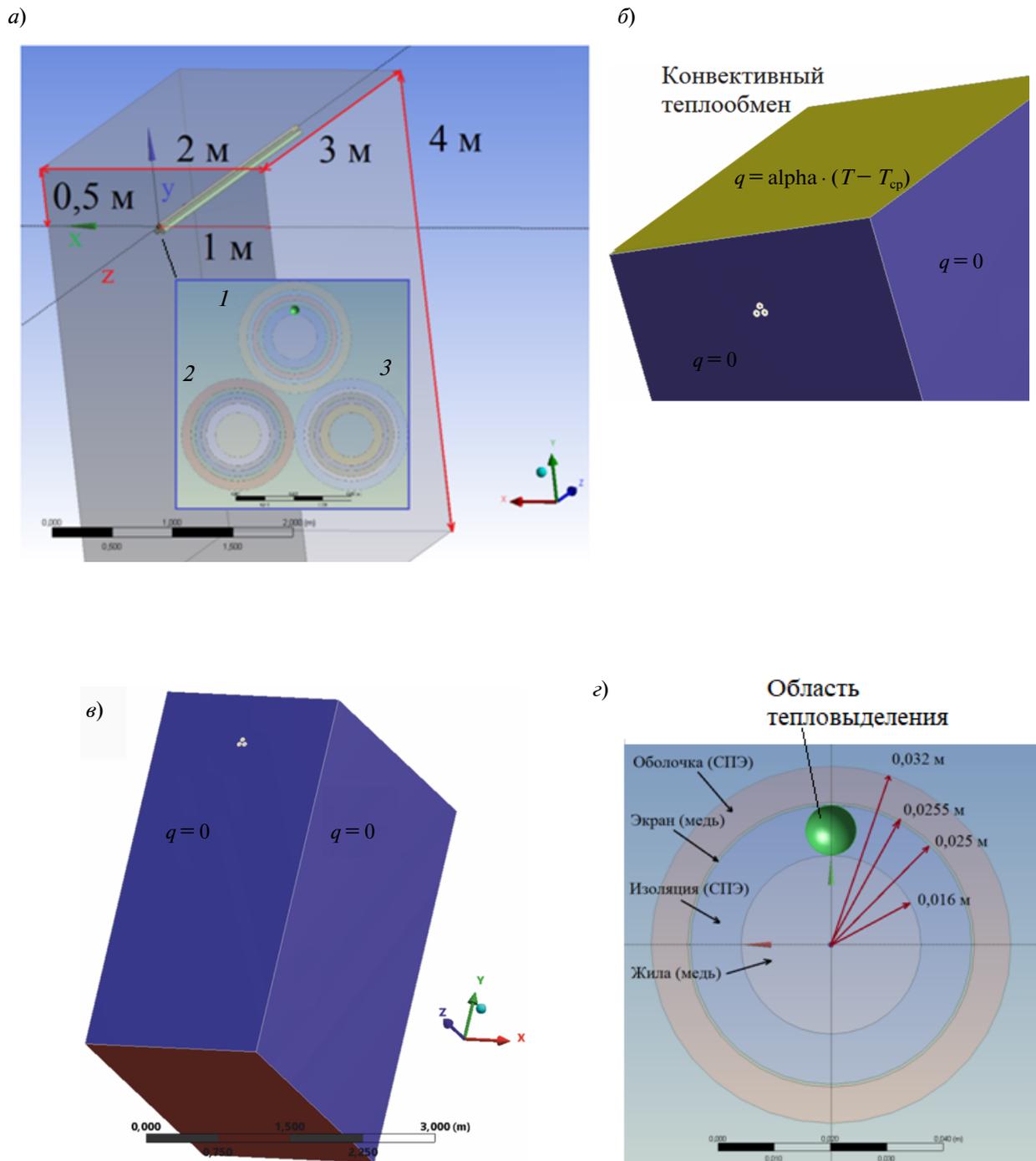


Рис. 3. Расчетная область (1 – фаза с ОЗЗ; 2, 3 – здоровые фазы) и граничные условия:  
 а – общий вид и размеры расчетной области; б–г – граничные условия  
 Fig. 3. Calculation field (1 – phase with single-phase ground fault; 2, 3 – normal phases)  
 and boundary conditions: а – general view and dimensions of calculation field; б–г – normal phases

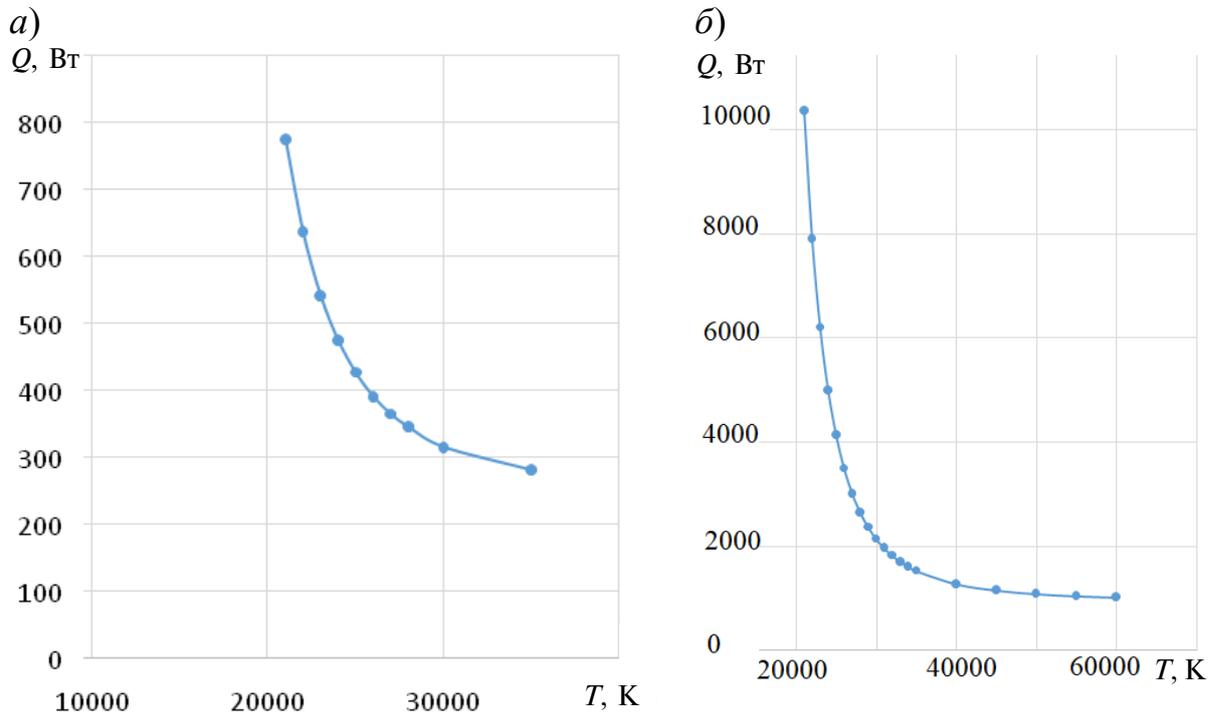


Рис. 4. Зависимости мощности тепловыделения в дуге от температуры в кабеле:  
*a* – в слое изоляции 4 мм при токе 5,8 А (кабель 10 кВ);  
*б* – в слое изоляции 9 мм при токе 16,4 А (кабель 35 кВ)  
 Fig. 4. The dependence of heat generation power of the arc from its temperature in cable:  
*a* – within of insulation 4 mm at current of 5.8 A (cable 10 kV);  
*б* – within of insulation 9 mm at current of 16.4 A (cable 35 kV)

Числовые характеристики физических свойств материалов, использованные в тепловом расчете приведены в таблице.

**Параметры материалов**  
**Material parameters**

Материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Теплоемкость, Дж·кг/К	Теплопроводность, Вт/м·К
Сшитый полиэтилен	930	2350	0,32
Грунт	2000	850	1
Медь	8700	385	400
Алюминий	2700	900	238

**Результаты расчетов и их обсуждение**

Распределения температуры на поверхности внешней изоляции кабельной линии с ОЗЗ на линии, параллельной оси кабеля, и зависимость от времени температуры оболочки кабеля над проколом приведены на рис. 5.

Из рис. 5 следует, что при достаточно длительном (часы) действии маломасштабного дугового разряда с небольшим током температура внешней оболочки поврежденной фазы в районе пробоя достигнет величины, позволяющей уверенно отличить локальный максимум температуры, вызванный пробоем изоляции между жилой и экраном, от другого локального максимума температуры, который может быть вызван пролегающей рядом теплотрассой или другой кабельной линией [4]. В то же время в описанном режиме ОЗЗ с током не более 10 А, характерном для кабельных линий класса 10 кВ, нельзя ожидать заметной термической деструкции изоляционной системы кабеля, поскольку характерная температура начала такого процесса составляет величину порядка 500 К. Поэтому можно предполагать, что данный дефект изоляции при умеренных токах ОЗЗ может существовать длительное время, не вызывая масштабных повреждений.

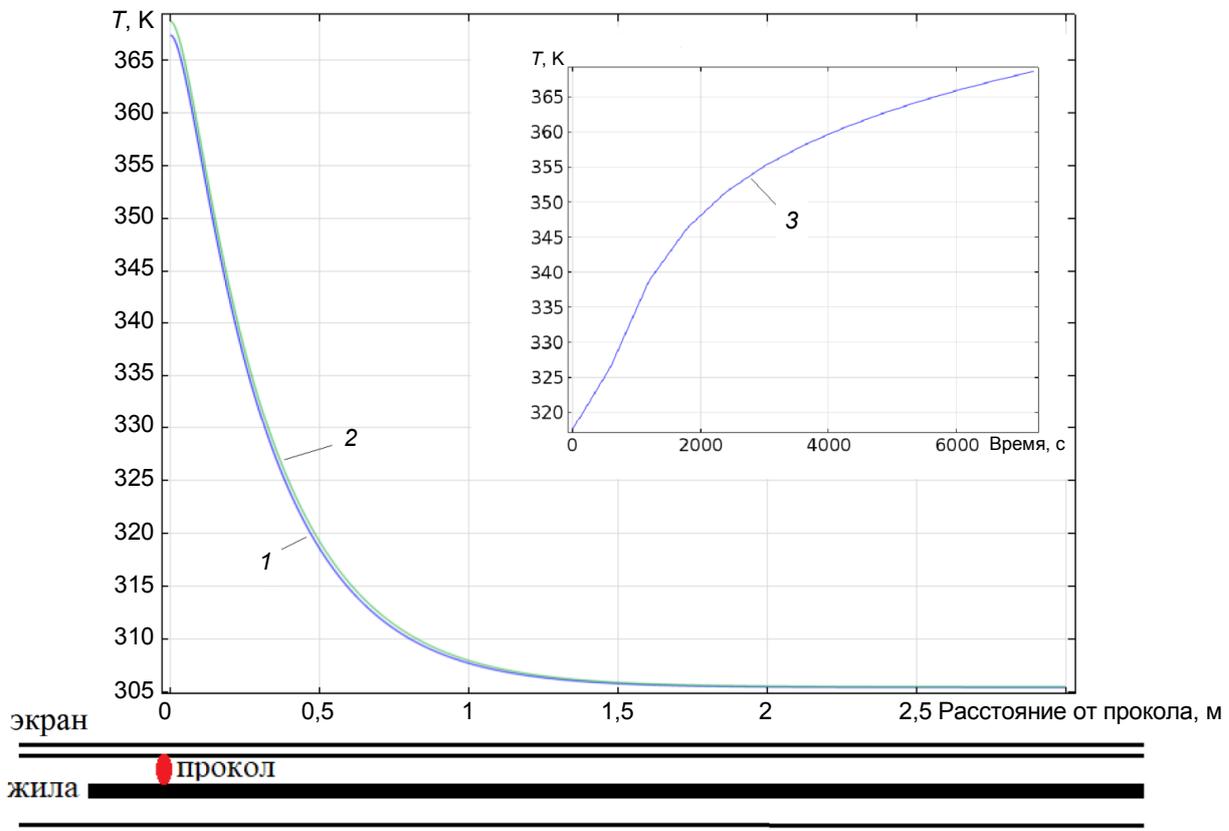


Рис. 5. Распределение температуры вдоль внешней поверхности 10 кВ кабеля при  $t = 6600$  с (1) и  $t = 7200$  с (2); зависимость температуры оболочки над проколом от времени (3)  
 Fig. 5. Temperature distribution along the outer surface of 10 kV cable at  $t = 6600$  s (1) and  $t = 7200$  s (2); the dependence of outer shell temperature from time (3)

Больших значений токов ОЗЗ можно ожидать в кабельных линиях более высокого класса напряжения в сети с изолированной нейтралью.

Рассмотрим случай ОЗЗ в кабеле класса 35 кВ. Сечение кабеля представлено на рис. 3. Для такого кабеля длиной 1 км ток ОЗЗ составит 16,4 А. Рассчитанная с помощью (1) зависимость  $\dot{Q}(T)$  для канала радиусом 0,1 мм при толщине изоляции 9 мм показан на рис. 4, б.

Распределения температуры на поверхности внешней изоляции кабельной линии с ОЗЗ вдоль образующей оболочки кабеля и зависимость от времени температуры оболочки кабеля над проколом приведены на рис. 6.

Из рис. 6 видно, что область расплавления полимерных компонент конструкции кабеля вблизи прокола составляет величину порядка 7 см. В то же время размер по длине кабеля области возмущения температурного поля, вызванного током ОЗЗ, состав-

ляет около 2 м. Время, предшествующее началу процесса термической деструкции изоляции от момента возникновения дуги прокола, составляет примерно 7,5 мин.

Комментируя результаты рассмотренных выше расчетных примеров, следует отметить, что появление зоны расплава изоляции вблизи канала разряда может привести к периодическому погасанию дуги и заметному снижению тепловыделения. При этом масштаб зоны повреждения может оказаться существенно меньше, чем показывают, например, приведенные здесь оценки для кабеля 35 кВ. Тем не менее, очевидно, что в случае относительно длинных КЛ с большой зарядной мощностью целесообразно принимать меры, ограничивающие ток ОЗЗ величиной 10 А, например эффективное заземление нейтрали. В этом случае фазы кабеля можно располагать стесненно, к примеру компактным треугольником. При этом ОЗЗ не приведет к масштабным разрушениям и переходу аварии в режим замыкания двух фаз кабельной линии.

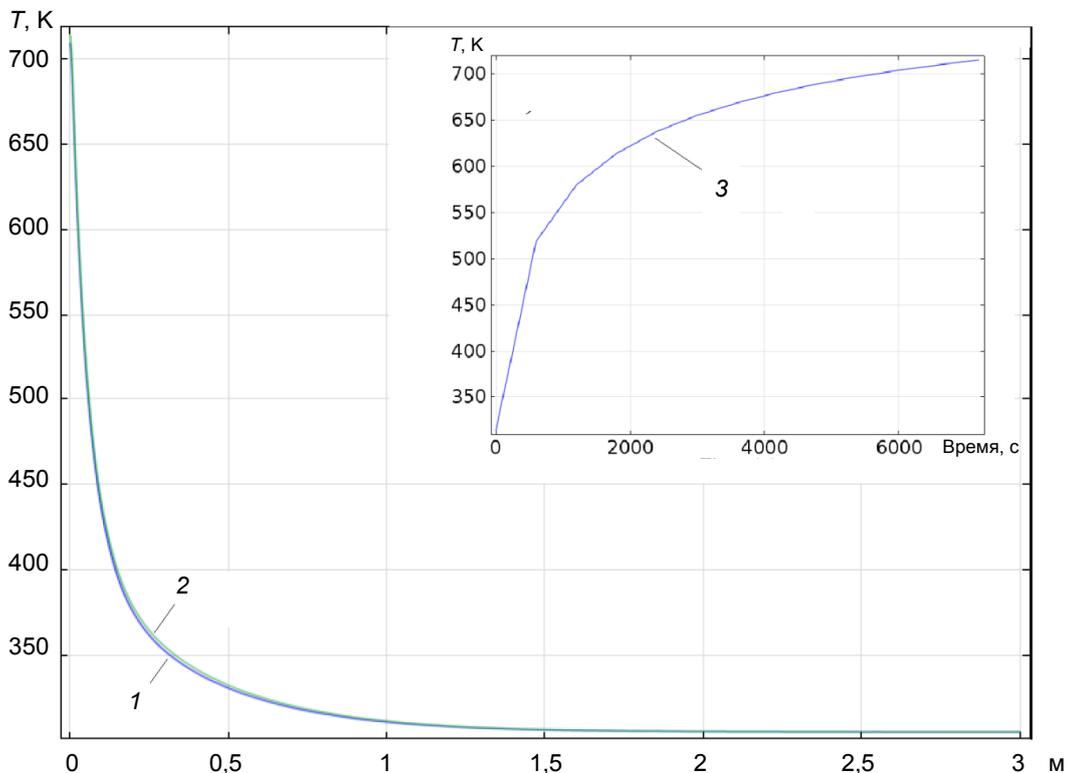


Рис. 6. Распределение температуры вдоль внешней поверхности 35 кВ кабеля при  $t = 6600$  с (1) и  $t = 7200$  с (2); зависимость температуры оболочки над проколом от времени (3)  
 Fig. 6. Temperature distribution along the outer surface of 35 kV cable at  $t = 6600$  s (1) and  $t = 7200$  s (2): the dependence of outer shell surface temperature from time (3)

### Заключение

Однофазное замыкание на землю в кабельных линиях, выполненных однофазными кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена, при токе замыкания, ограниченном 10 А, не приводит к быстрым разрушительным последствиям.

Длительное действие маломасштабного дугового разряда в изоляции кабеля приводит к возмущению его температурного поля, достаточному для идентификации данного дефекта системами оптоволоконного контроля температуры кабельной линии.

Следует избегать возможности появления токов ОЗЗ, превышающих 10–15 А, поскольку в этом случае неизбежно появление области расплава изоляции масштаба нескольких десятков сантиметров. При этом возникает вероятность деградации изоляции «здоровых» фаз и перехода однофазного замыкания в междуфазное.

Предупреждение аварии междуфазного замыкания достигается отказом от часто применяемого стесненного расположения фаз кабельной линии треугольником.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кожевников А.Г. Системы электропередачи на базе СПЭ-кабелей. Эффективность применения // Новости электротехники. 2007. № 1. С. 24–29.
2. Лавров Ю.А. Кабели 6–35 кВ с пластмассовой изоляцией // Новости электротехники. 2007. № 1. С. 32–36.

3. Беляков В.В., Малышев А.В., Кривошеев Н.В., Маршнер Вольфганг К. Мониторинг силовых кабельных линий с адаптацией к условиям окружающей среды в режиме реального времени // ЭЛЕКТРО. 2008. № 5. С. 38–40.

4. **Titkov V.V. [et al.]**. The capacity limitations of power transmission cable lines in the structure of civil and industry engineering networks // *Magazine of Civil Engineering*. 2014. № 6. С. 75–83.

5. **Дмитриев М.В.** Заземление нейтрали в кабельных сетях 6–35 кВ // *Сети России*. 2016. № 5 (38). С. 76–81.

6. **Дмитриев М.В.** Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6–500 кВ. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 154 с.

7. **Антонов А.А., Гусев Ю.П.** Электродуговые процессы при однофазных замыканиях в пофазно-экранированных кабелях // *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2013. № 5.

8. **Ларин Ю.Т., Смирнов Ю.В., Гринштейн М.Л.** Применение системы температурного мониторинга с помощью оптического кабеля для контроля распределения температуры вдоль электрического силового кабеля // *Кабель-news*. 2009. № 8. С. 48–53.

9. **Мокански В.** Силовой кабель высокого напряжения со встроенным волоконно-оптическим модулем // *Кабели и провода*. 2009. № 2. С. 14–17.

10. **Удовиченко О.В.** Температурный мониторинг кабельных линий высокого напряжения на основе кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена // *Линии электропередачи 2008: проектирование, строительство опыт эксплуатации и научно-технический прогресс: материалы III российской научн.-практ. конф.*

с международным участием. Новосибирск, 2008. С. 301–304.

11. **Якунин А.В.** Мониторинг теплового режима эксплуатации кабельных линий 110–500 кВ // *Линии электропередачи 2010: проектирование, строительство опыт эксплуатации и научно-технический прогресс: материалы IV российской научн.-практ. конф. с международным участием*. Новосибирск, 2010. С. 306–310.

12. **Anders G.J., Braun J.-M., Downes John A., Fujimoto N., Luton M.-H., Rizzetto S.** Real Time Monitoring of Power Cables by Fibre Optic Technologies. Tests, Applications and Outlook // *6th International Conference on Insulated Power Cables (JiCable'03)*. Paris, 2003.

13. **Адамьян Ю.А. [и др.]**. Электроэнергетика. Высоковольтные электротехнологии / Под ред. О.В. Махровой. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. 120 с.

14. **Карпова И.М., Титков В.В.** Компьютерные модели электромагнитных технологий. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 1999. 226 с.

15. **Титков В.В., Филатов В.В.** Абляционно-газодинамическая модель мощной электрической дуги в закрытом объеме // *Плазменные установки и процессы*. 2000. Т. 8. С. 95–109.

16. Ограничители перенапряжений для защиты изоляции электрооборудования и линий сетей среднего, высокого и сверхвысокого напряжения от грозных и внутренних перенапряжений / Под ред. Ф.Х. Халилова, В.Г. Гольдштейна. М.: Энергоатомиздат, 2010. 263 с.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ТИТКОВ Василий Васильевич** — доктор технических наук профессор заведующий кафедрой Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого  
E-mail: titkovprof@yandex.ru

**ЛУБКОВ Александр Николаевич** — руководитель лаборатории Научно-исследовательского института по передаче электроэнергии постоянным током высокого напряжения  
E-mail: lubkoff@pisem.net

**ТУКЕЕВ Павел Дмитриевич** — аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого  
E-mail: paultuk@yandex.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 12.02.2018

#### REFERENCES

[1] **Kozhevnikov A.G.** Sistemy elektroperedachi na baze SPE-kabelei. Effektivnost' primeneniia. *Novosti elektrotekhniki*. 2007. № 1. С. 24–29. (rus.)

[2] **Lavrov Iu.A.** Kabeli 6–35 kV s plastmassovoi izoliatsiei. *Novosti elektrotekhniki*. 2007. № 1. С. 32–36. (rus.)

[3] **Beliakov V.V., Malyshev A.V., Krivosheev N.V., Marshner Vol'fgang K.** Monitoring silovykh ka-

bel'nykh linii s adaptatsiei k usloviyam okruzhaiushchei sredy v rezhime real'nogo vremeni. *ELEKTRO*. 2008. № 5. С. 38–40. (rus.)

[4] **Titkov V.V. [et al.]**. The capacity limitations of power transmission cable lines in the structure of civil and industry engineering networks. *Magazine of Civil Engineering*. 2014. № 6. С. 75–83. (rus.)



- [5] **Dmitriev M.V.** Zazemlenie neutrali v kabel'nykh setiakh 6–35 kV. *Seti Rossii*. 2016. № 5 (38). S. 76–81. (rus.)
- [6] **Dmitriev M.V.** Zazemlenie ekranov odnofaznykh silovykh kabelei 6–500 kV. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2010. 154 s. (rus.)
- [7] **Antonov A.A., Gusev Iu.P.** Elektrodugovyye protsessy pri odnofaznykh zamykaniyakh v pofazno-ekranirovannykh kabeliakh. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana*. 2013. № 5. (rus.)
- [8] **Larin Iu.T., Smirnov Iu.V., Grinshtein M.L.** Primenenie sistemy temperaturnogo monitoringa s pomoshch'iu opticheskogo kabelia dlia kontrolya raspredeleniya temperatury vdol' elektricheskogo silovogo kabelia. *Kabel'-news*. 2009. № 8. S. 48–53. (rus.)
- [9] **Mokanski V.** Silovoi kabel' vysokogo napriazheniya so vstroennym volokonno-opticheskim modulem. *Kabeli i provoda*. 2009. № 2. S. 14–17. (rus.)
- [10] **Udovichenko O.V.** Temperaturnyi monitoring kabel'nykh linii vysokogo napriazheniya na osnove kabelei s izoliatsiei iz sshitogo polietilena. *Linii elektroperedachi 2008: proektirovanie, stroitel'stvo opyt ekspluatatsii i nauchno-tekhnicheskii progress: materialy III rossiiskoi nauchn.-prakt. konf. s mezhdunarodnym uchastiem*. Novosibirsk, 2008. S. 301–304. (rus.)
- [11] **Iakunin A.V.** Monitoring teplovogo rezhima ekspluatatsii kabel'nykh linii 110–500 kV. *Linii elektroperedachi 2010: proektirovanie, stroitel'stvo opyt ekspluatatsii i nauchno-tekhnicheskii progress: materialy IV rossiiskoi nauchn.-prakt. konf. s mezhdunarodnym uchastiem*. Novosibirsk, 2010. S. 306–310. (rus.)
- [12] **Anders G.J., Braun J.-M., Downes John A., Fujimoto N., Luton M.-H., Rizzetto S.** Real Time Monitoring of Power Cables by Fibre Optic Technologies. Tests, Applications and Outlook. *6th International Conference on Insulated Power Cables (JiCable'03)*. Paris, 2003.
- [13] **Adam'ian Iu.A. [i dr.]**. Elektroenergetika. Vysokovol'tnye elektrotekhnologii / Pod red. O.V. Makhrovoi. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2006. 120 s. (rus.)
- [14] **Karpova I.M., Titkov V.V.** Komp'uternye modeli elektromagnitnykh tekhnologii. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 1999. 226 s. (rus.)
- [15] **Titkov V.V., Filatov V.V.** Abliatsionno-gazodinamicheskaya model' moshchnoi elektricheskoi dugi v zakrytom ob'eme. *Plazmennyye ustanovki i protsessy*. 2000. T. 8. S. 95–109. (rus.)
- [16] Ogranichiteli perenapriazhenii dlia zashchity izoliatsii elektrooborudovaniia i linii setei srednego, vysokogo i sverkhvysokogo napriazheniya ot grozovykh i vnutrennikh perenapriazhenii / Pod red. F.Kh. Khalilova, V.G. Gol'dshteina. M.: Energoatomizdat, 2010. 263 s. (rus.)

#### AUTHORS

**TITKOV Vasilii V.** – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university

E-mail: titkovprof@yandex.ru

**LUBKOV Aleksandr N.** – NIIPT.

E-mail: lubkoff@pisem.net

**TUKEEV Pavel D.** – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university

E-mail: paultuk@yandex.ru

Received: 12.02.2018

DOI: 10.18721/JEST.240104  
УДК 620.9

*А.С. Хисматуллин<sup>1</sup>, М.Г. Баширов<sup>2</sup>, Е.Г. Солдатова<sup>2</sup>, Е.Ю. Мавлекаев<sup>2</sup>*

1 – Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Россия

2 – Филиал ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Салават, Россия

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ МАСЛОНАПОЛНЕННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

Статья посвящена повышению эффективности систем охлаждения силовых масляных трансформаторов при значительных длительных и кратковременных перегрузках, что позволяет увеличить их ресурс, повысить экономичность и безопасность эксплуатации. На базе изучения статистических данных установлено, что одна из основных причин отказа трансформаторов – неэффективность систем масляного охлаждения в летний период эксплуатации и при значительных перегрузках, как длительных, так и кратковременных. Для повышения эффективности системы охлаждения силовых масляных трансформаторов предлагается барботирование охлаждающего масла циркулирующим элегазом и последующее охлаждение элегаза термоэлектрическим холодильником. Система циркуляции и охлаждения элегаза включается автоматически при значительных перегрузках, длительных и кратковременных. Рассмотрены конструкция и работа предлагаемой системы охлаждения масляных трансформаторов. Проведена серия лабораторных экспериментов охлаждения трансформаторного масла в баке силового трансформатора без компрессора и с наличием компрессора. Приведены графики зависимостей температуры от времени при естественном охлаждении и при использовании барботирования. Экспериментально определены коэффициенты теплопроводности и теплоотдачи трансформаторного масла на различных расстояниях от нагревательного элемента. Рассмотрена математическая задача распределения теплового потока в прямоугольном параллелепипеде, приведено решение уравнения теплопроводности в баке силового трансформатора, который представляет собой прямоугольный параллелепипед.

ТЕХНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ТРАНСФОРМАТОРА; ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ; КОНТРОЛЬ; РЕМОНТ; ЭЛЕГАЗ; ЭФФЕКТИВНОСТЬ; БАРБОТИРОВАНИЕ.

*Ссылка при цитировании:*

А.С. Хисматуллин, М.Г. Баширов, Е.Г. Солдатова, Е.Ю. Мавлекаев. Повышение эффективности охлаждения маслонеполненных трансформаторов // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 1. С. 38–49. DOI: 10.18721/JEST.240104.

*A.S. Khismatullin<sup>1</sup>, M.G. Bashirov<sup>2</sup>, E.G. Soldatova<sup>2</sup>, E.Yu. Mavlekaev<sup>2</sup>*

1 – Ufa State petroleum technological university, Ufa, Russia

2 – Ufa State petroleum technological university Salavat branch, Salavat, Russia

## **INCREASING THE EFFICIENCY OF COOLING IN OIL TRANSFORMERS**

The article is dedicated to the currently important problem of increasing the efficiency of cooling systems of oil transformers with considerable long and short overloads. Increasing the efficiency of cooling in oil transformers makes it possible to increase their engine life, improve efficiency and safety of operation. Statistical data are given on the causes of failure of the transformers of differ-

ent voltage classes and with different operating times. Based on the study of statistical data, it is established that inefficiency of oil cooling systems during the summer period of operation and with considerable short overloads is one of the main causes of transformer failure. To increase the efficiency of cooling systems of oil transformers, we propose agitation of cooling oil with circulating sulfur hexafluoride and subsequent cooling of sulfur hexafluoride with a thermoelectric cooler. The system of circulation and cooling of sulfur hexafluoride switches on automatically with considerable long and short overloads. We have considered the design and operation of the proposed cooling system for oil transformers. A series of laboratory experiments was carried out for cooling transformer oil in a power transformer tank with and without a compressor. The temperature versus time curves have been plotted for natural cooling and for the case when agitation is used. We have experimentally determined the coefficients of thermal diffusivity and heat transfer of transformer oil at various distances from the heating element. We have considered the mathematical problem of the distribution of the heat flux in a rectangular parallelepiped and obtained the solution of the heat conduction equation in a tank of a power transformer shaped as a rectangular parallelepiped. The construction of a laboratory installation is described in detail. The brands of thermocouples used, the brand of the compressor and the analog-digital converter are given.

TECHNICAL POSITION TRANSFORMER; ELECTRIC POWER SUPPLY; SUPERVISION; RECONDITION; SULFUR HEXAFLUORIDE; EFFICIENCY; AGITATION.

*Citation:*

A.S. Khismatullin, M.G. Bashirov, E.G. Soldatova, E.Yu. Mavlekaev. Increasing the efficiency of cooling in oil transformers, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 24(01)(2018) 38–49, DOI: 10.18721/JEST.240104.

## Введение

В трансформаторах большой мощности выделяется большое количество теплоты, для отвода которой используются специальные масляно-воздушные охладители, обдуваемые воздухом с помощью вентилятора и оснащенные насосами для принудительной циркуляции масла. Принудительная циркуляция масла позволяет получить более равномерное распределение температуры по высоте бака и повышает эффективность охлаждения обмоток и магнитопровода трансформатора. В случае отключения системы охлаждения трансформаторы могут оставаться включенными в сеть очень непродолжительное время, так как теплоотдающей поверхности бака недостаточно даже для отвода энергии потерь холостого хода.

Срок естественного износа силовых трансформаторов марок ТМЗ, ТМ, ТАМ, работающих в номинальном режиме, составляет примерно 30 лет.

Поскольку приобретение новых трансформаторов высокочрезмерно затратно, то энергослужбы проводят дополнительные мероприятия и увеличивают срок их службы. При этом повышается риск возникновения

аварийных ситуаций. Как видно из рис. 1, значительное количество отказов силовых трансформаторов происходит из-за неудовлетворительной эксплуатации (более 50 % всех отказов) [1–14].

К основным эксплуатационным причинам, вызывающим повреждение (отказы) трансформаторов, следует отнести перегрев активной части из-за неэффективности системы масляного охлаждения в летний период эксплуатации и при кратковременных, но значительных перегрузках; существенным фактором также является ухудшение качества самого масла [12].

В случае аварийной перегрузки трансформатора происходит локальный перегрев масла у поверхности активной части трансформатора, что сопровождается интенсивным выделением газов из масла, вызывающим срабатывание газового реле и отключение трансформатора. Перегрев изоляции обмоток и магнитопровода сокращает ресурс трансформатора, а срабатывание газового реле часто приводит к необоснованным отключениям трансформатора при кратковременных перегрузках. Поэтому проблема повышения эффективности охлаждения масляных трансформаторов весьма актуальна.

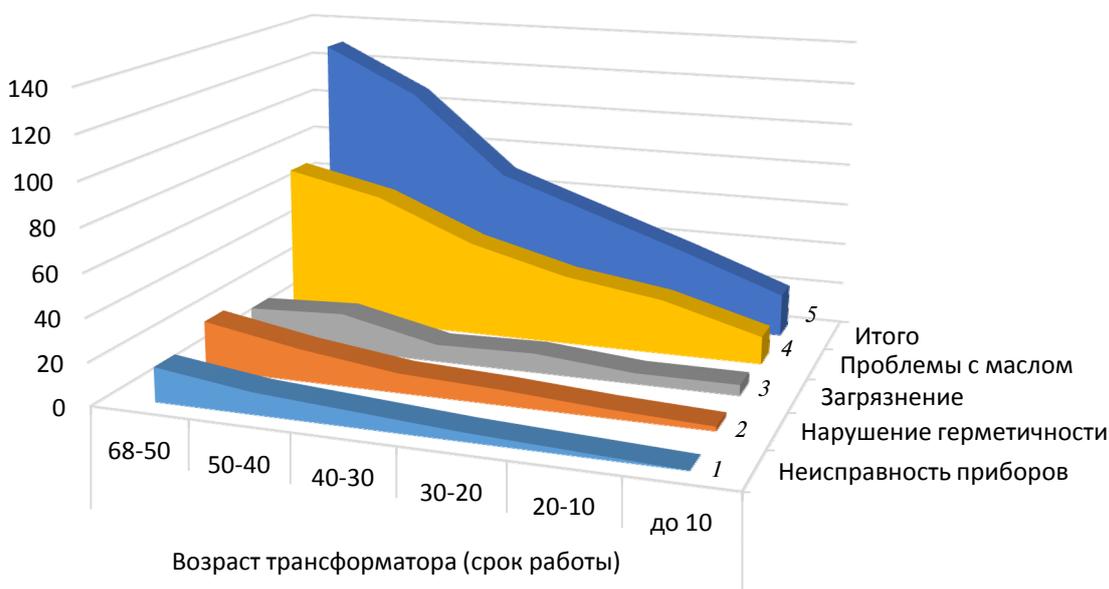


Рис. 1. Причины отказов масляных трансформаторов  
 1 – неисправность приборов; 2 – нарушение герметичности; 3 – загрязнение;  
 4 – проблемы с маслом; 5 – итого  
 Fig. 1. Reasons for oil transformer failures

Принцип элегазового барботирования трансформаторного масла лежит в основе полезной модели «Установка для охлаждения масляного трансформатора» [7]. Он заключается в том, что теплосъем с активной части трансформатора осуществляется трансформаторным маслом с циркулирующим в нем элегазом. Элегазовые пузырьки, всплывая, уносят с собой частички масла, которые последовательно отделяются от элегаза в баке-расширителе, фильтрах грубой и тонкой очистки. Далее элегаз охлаждается в холодильнике и попадает в специальную емкость, откуда подается компрессором в бак с минеральным маслом через равномерно расположенные в нижней части бака трубки с клапанами-распределителями.

Непосредственно в зоне расположения обмотки трансформатора установлен датчик температуры, выход которого подключен к входу блока управления. При нагревании активной части трансформатора (обмотки и магнитопровод) выше установленного значения блок управления выдает сигналы включения на управляющие входы компрессора и холодильника; при снижении температуры активной части транс-

форматора ниже заданного значения блок управления подает сигналы отключения на управляющие входы компрессора и холодильника [8]. При отсутствии перегрузок, а значит, перегрева трансформатор работает в обычном режиме, т.е. охлаждение активной части осуществляется циркулирующим трансформаторным маслом. Применение холодильника позволяет повысить эффективность охлаждения элегаза, а соответственно, – трансформаторного масла и активной части трансформатора. Холодильник представляет собой термоэлектрический модуль, работа которого основана на явлении термоэлектрической эмиссии. Термоэлектрический модуль содержит последовательно соединенные полупроводники *p*- и *n*-типа, образующие *p-n*-переходы между керамическими пластинами. В свою очередь каждый из таких переходов имеет тепловой контакт с одним из двух радиаторов. В результате прохождения электрического тока определенной полярности образуется перепад температур между радиаторами модуля: один радиатор работает как холодильник, другой радиатор нагревается и служит для отвода тепла.

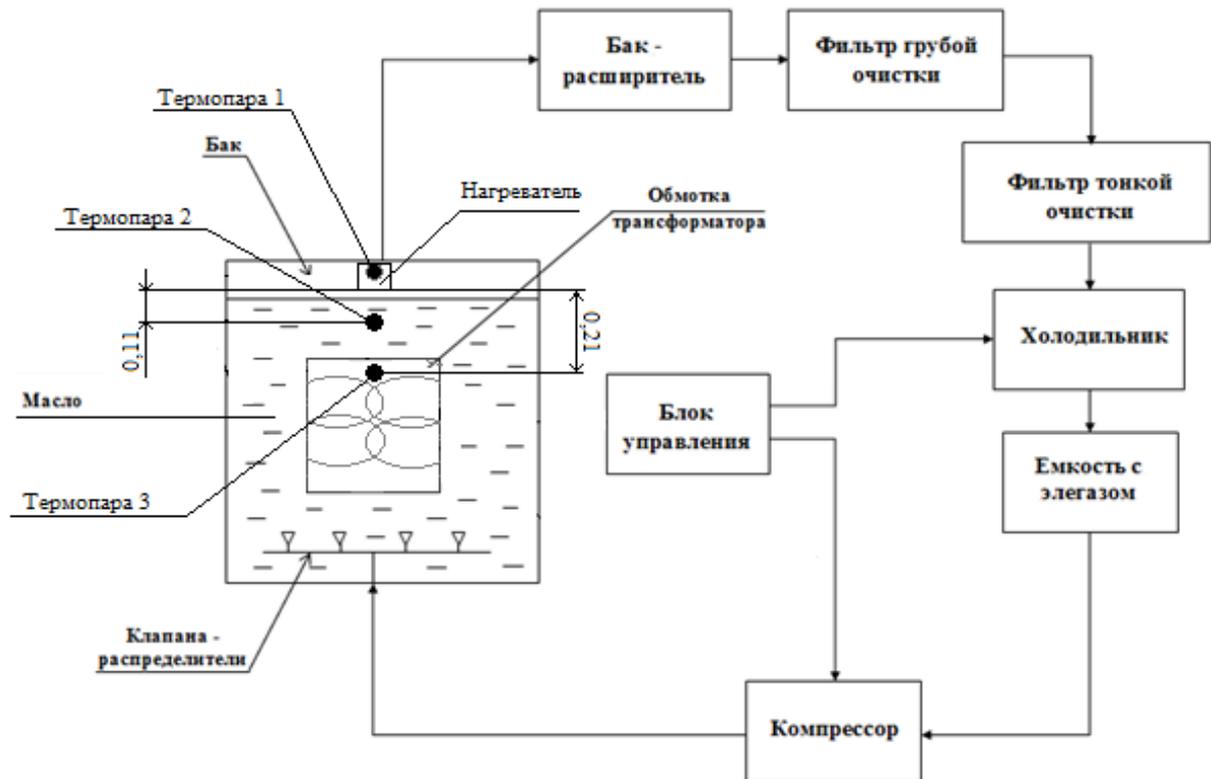


Рис. 2. Структурная схема установки для охлаждения масляного трансформатора  
 Fig. 2. Block diagram of the unit for cooling oil transformer

Основным преимуществом термоэлектрического модуля является то, что он позволяет получить значительный температурный перепад – в несколько десятков градусов, т.е. обеспечить эффективное охлаждение элегаза, а это, в свою очередь, обеспечивает более эффективное охлаждение активной части трансформатора.\*

«Установка для охлаждения масляного трансформатора» [7] включает в себя последовательно соединенные трубками емкость, заполненную элегазом, компрессор, трубки с равномерно расположенными на них клапанами-распределителями, бак-расширитель, фильтры тонкой и грубой

очистки. Между выходом фильтра тонкой очистки и входом в емкость с элегазом включен холодильник; в зоне расположения обмотки трансформатора установлен датчик температуры, выход которого подключен к входу блока управления, а выходы блока управления подключены к управляющим входам компрессора и холодильника.

На рис. 2 изображена структурная схема установки для охлаждения масляного трансформатора.

Согласно ГОСТ 12.1.007–76 по степени воздействия на организм элегаз относится к 4 классу опасности, к которому принадлежат вещества малоопасные. При проведении экспериментальных исследований вместо элегаза был использован воздух, так как по технике безопасности в лабораторных условиях в помещениях элегаз применять запрещено. Его использование опасно для людей.

Целью работы было исследование эффективности способа охлаждения трансформатора, основанного на барботировании трансформаторного масла элегазом [1–9].

\* Патент РФ на полезную модель № 167206. Установка для охлаждения масляного трансформатора. Правообладатель ФГБОУ ВО УГНТУ / Баширов М.Г., Хисматуллин А.С., Переверзев А.И. Заявка № 2016124531. Приоритет полезной модели 20 июня 2016. Зарегистрировано в гос. реестре полезных моделей Российской Федерации 08.12.2016. Срок действия патента истекает 20.06.2026.

**Расчетная часть исследований**

Постановка задачи. Рассмотрим тепловой поток в прямоугольном параллелепипеде (рис. 3).

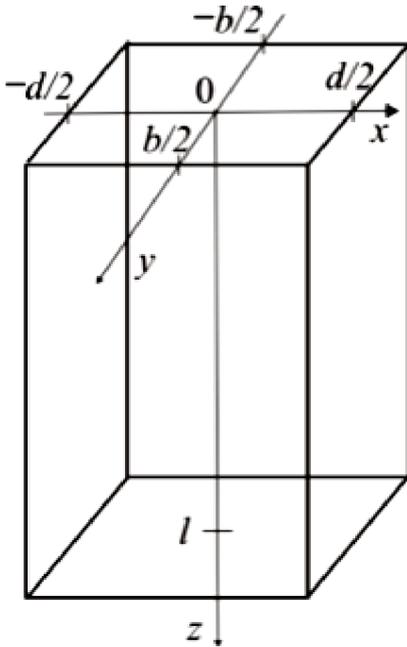


Рис. 3. Геометрия задачи  
Fig. 3. Geometry of the problem

В начальный момент масло находится внутри резервуара при температуре  $T_0 = 15^\circ\text{C}$ , но со временем приобретает температуру нагревателя  $T_H = 50^\circ\text{C}$ . Рассмотрим прямоугольный параллелепипед, ограниченный по осям  $x$ ,  $y$  и  $z$ : соответственно  $0 < x < d/2$ ;  $0 < y < b/2$ ;  $0 < z < l$ ,  $t > 0$ . Решается уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

в области

$$0 < x < \frac{d}{2}, 0 < y < \frac{b}{2}, 0 < z < l, t > 0 \quad (1)$$

с начальным условием

$$T|_{t=0} = T_0. \quad (2)$$

Здесь  $a = \lambda/c\rho$  – коэффициент температуропроводности;  $\lambda$  – коэффициент теп-

лопроводности;  $T_0$  – температура окружающей среды. Теплообмен с окружающей средой на поверхности  $S$  описывается согласно закону Ньютона:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_S = \alpha (T|_S - T_0),$$

где  $S$  – поверхность стенки;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи среды (масло – металл – воздух).

В эксперименте температура над нагревателем в течение 10 минут достигает установившегося значения. Поэтому при продолжительности эксперимента более 30 минут можно считать, что  $T_H = \text{const}$ . Температура окружающей среды тоже предполагается постоянной,  $T_0 = \text{const}$ , т.к. среднесуточное изменение температуры в течение года примерно  $10^\circ\text{C}$ , а время проведения экспериментов, кроме экспериментов без всплывающих пузырьков, меньше двух часов.

Обозначим  $h = \alpha/\lambda$ . Тогда граничные условия можно записать так:

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=d/2} + h \left( T|_{x=d/2} - T_0 \right) = 0;$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=b/2} + h \left( T|_{y=b/2} - T_0 \right) = 0;$$

$$T|_{z=l} = T_0, \quad T|_{z=0} = T_H.$$

Решив задачу методом свертки, окончательно получим для расчетов

$$T = 16 \left[ \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\sin(\chi_n d/2) \sin(\mu_n b/2)}{\chi_n d + \sin(\chi_n d)} \times \frac{\cos(\chi_n x) \cos(\mu_n y)}{\mu_n b + \sin(\mu_n b)} \left\{ \frac{\text{sh}(\sqrt{\chi_n^2 + \mu_n^2} (1-z))}{\text{sh}(\sqrt{\chi_n^2 + \mu_n^2} l)} + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\pi k \sin\left(\frac{\pi k}{l} z\right) e^{-a(\chi_n^2 + \mu_n^2 + (\pi k/l)^2) t}}{((\chi_n^2 + \mu_n^2) l^2 + \pi^2 k^2)} \right\} \right] \times (T_H - T_0) + T_0,$$

где  $\chi_n$  и  $\mu_n$  – константы трансцендентного уравнения; уравнения для их определения записываются так:

$$-\chi_n \sin\left(\chi_n \frac{d}{2}\right) + h \cos\left(\chi_n \frac{d}{2}\right) = 0,$$

$$h \cos\left(\mu_n \frac{b}{2}\right) - \mu_n \sin\left(\mu_n \frac{b}{2}\right) = 0.$$

### Экспериментальная часть

Для исследования предложенного способа охлаждения масляных трансформаторов была разработана лабораторная установка (рис. 4). При проведении серии экспериментов трансформаторное масло подвергалось нагреву нагревательным элементом мощностью 450 Вт при начальной температуре масла 20 °С.

Для исследования топографии теплового поля в баке трансформатора на определенных расстояниях установлены термопары ТХК-0292 (*L*-типа), сигналы с которых поступают на вход аналогово-цифрового преобразователя ADAM 4018 В

(фирма-изготовитель Advantech), сигналы с выхода которого поступают в компьютер 1 для последующей обработки и анализа. Сигнал верхней термопары 1 с помощью специальной программы управляет масляным компрессором 5 (фирма-изготовитель Abac Pole Position 241), подающим газ в керамические распределители, расположенные на дне резервуара. Компрессор автоматически включается при достижении верхними слоями масла температуры 55 °С и отключается при понижении температуры до 30 °С.

В случае, когда происходит охлаждение трансформаторного масла всплывающими пузырьками воздуха, расход воздуха составляет 1,3 л/мин. Масло нагревалось до температуры 70 °С; фиксировалось время остывания масла без барботирования элегазом. Температура масла снизилась до уровня комнатной температуры 25 °С за 100 минут. Во время остывания каждые 5 минут фиксировалось значение температуры. По этим полученным значениям был построен график естественного остывания масла (рис. 6).

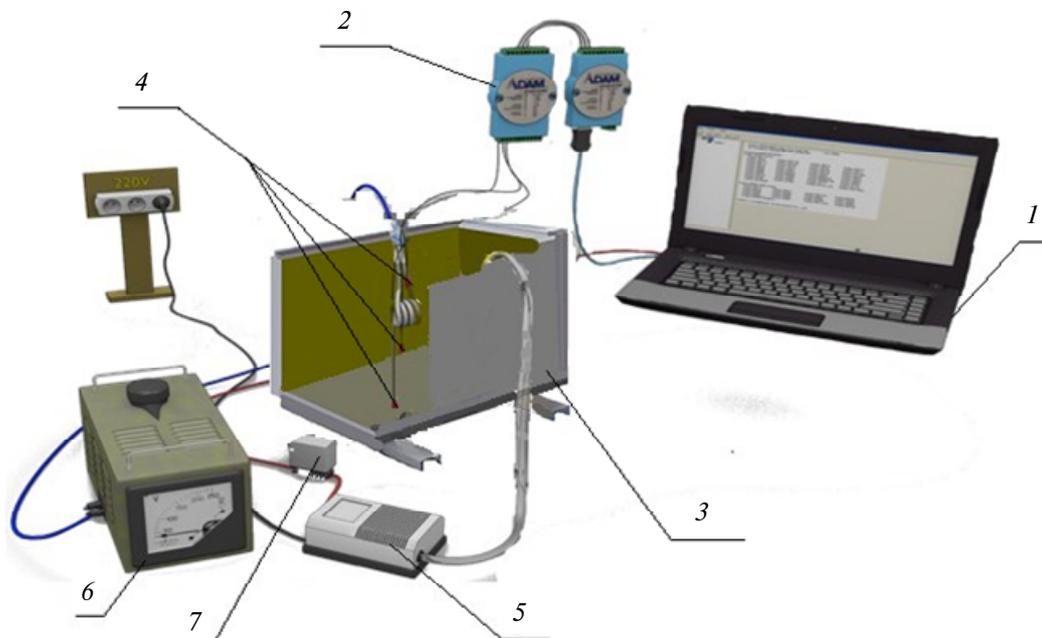


Рис. 4. Схема экспериментальной установки:

1 – компьютер; 2 – аналогово-цифровой преобразователь; 3 – резервуар в виде бака от масляного трансформатора; 4 – термопары; 5 – микрокомпрессор; 6 – автотрансформатор; 7 – реле

Fig. 4. The scheme of the experimental setup:

1 – the computer; 2 – analog-to-digital converter; 3 – a tank in the form of a tank from an oil transformer; 4 – thermocouples; 5 – microcompressor; 6 – autotransformer; 7 – relay

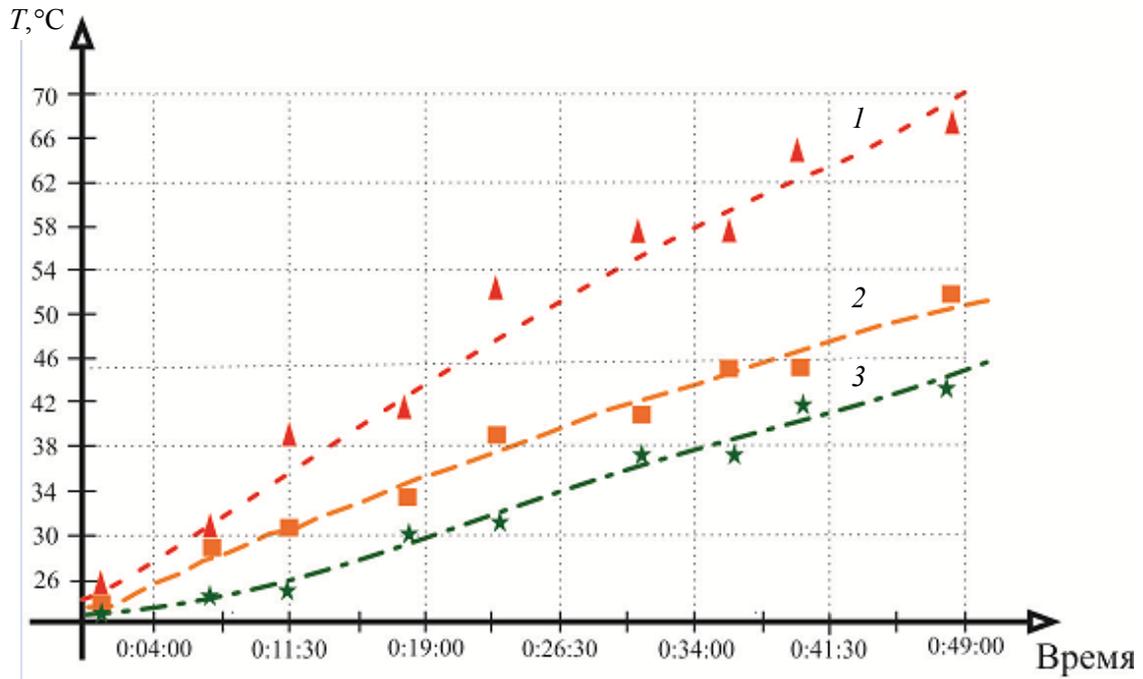


Рис. 5. Зависимости температур от времени при мощности нагревательного элемента 450 Вт:  
 1 (термопара 1) – температура рядом с нагревателем; 2 (термопара 2) – на расстоянии 0,11 м от нагревателя;  
 3 (термопара 2) – 0,21 м от нагревателя

Fig. 5. Temperature versus time at power heating element 450 W:

1 – temperature next to the heater; 2 – at a distance of 0.11 m from the heater; 3 – 0.21 m from the heater

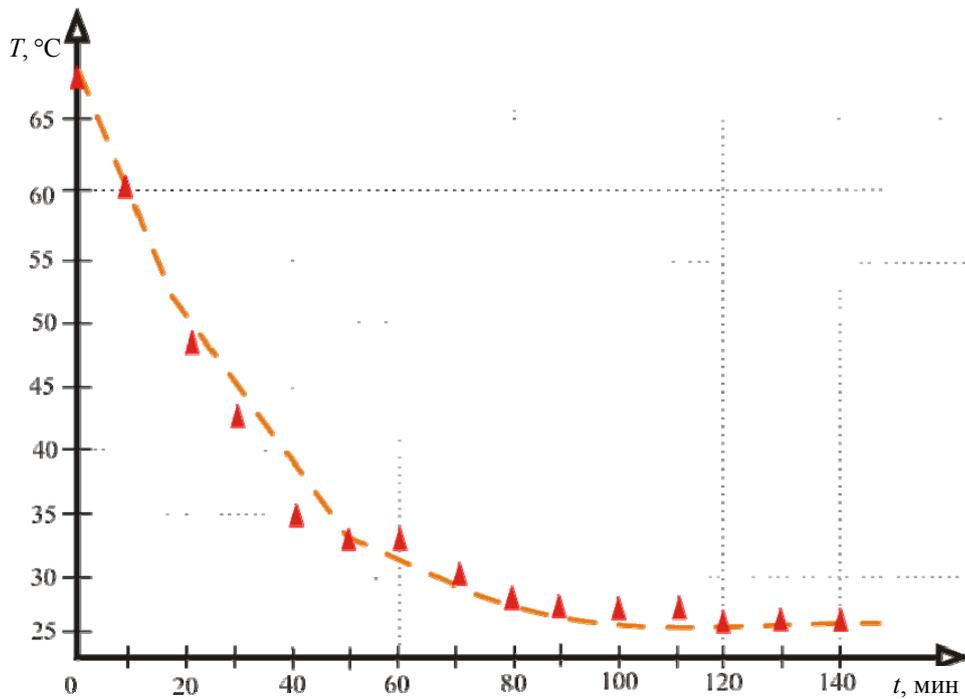


Рис. 6. График естественного охлаждения масла  
 Fig. 6. Schedule of natural cooling of oil

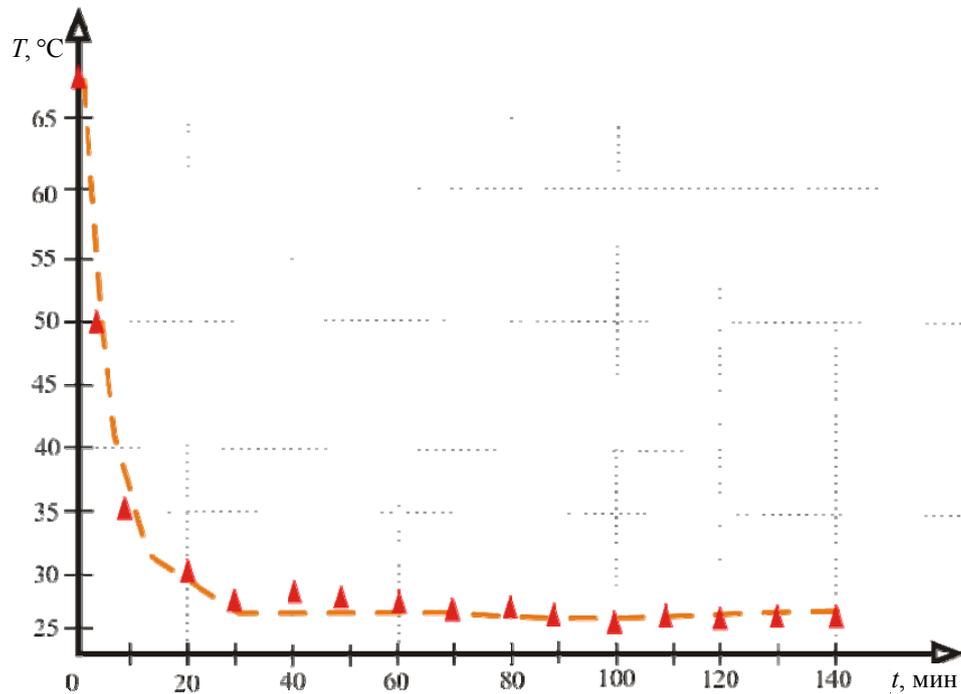


Рис. 7. График охлаждения масла при барботировании  
Fig. 7. Oil cooling diagram for bubbling

При проведении второго эксперимента включен компрессор для барботирования масла пузырьками воздуха. После нагревания масла до температуры 70 °C был включен компрессор (рис. 7).

Данный эксперимент показал, что охлаждение масла с помощью пузырьков эффективнее, чем без них. Сравнивая графики рис. 6 и 7, видим, что у трансформаторного масла объемом 0,018 м<sup>3</sup> температура понижается с 70 °C до 25 °C за 30 минут при барботировании, в то время как без барботирования — за 100 мин.

Экспериментально определен параметр теплообмена: его значение на поверхности масла —  $h = 0,02 \pm 0,003 \text{ м}^{-1}$ , где  $h = \alpha / \lambda$  (здесь  $\lambda$  — эффективный коэффициент теп-

лопроводности среды в емкости;  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи через среду «трансформаторное масло — металлический корпус трансформатора — воздух»). Данные приведены в таблице.

Полученные опытные данные свидетельствуют о работоспособности установки. Определен коэффициент молекулярной теплопроводности  $a$ , который составляет примерно  $10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ , где  $a = \frac{\lambda}{c\rho}$

(здесь  $c$  — удельная теплоемкость трансформаторного масла;  $\rho$  — плотность трансформаторного масла). Указанные коэффициенты определяются с помощью программы Тепло.exe [4].

#### Результаты экспериментов

#### Results of experiments

Номер термопары и ее расположение	Коэффициент теплопроводности, м <sup>2</sup> /с	Коэффициент теплоотдачи, м <sup>-1</sup>
1 — рядом с нагревом	$2,5 \cdot 10^{-4}$	0,02
2 — на расстоянии 0,11 м	$2,5 \cdot 10^{-4}$	0,005
3 — на расстоянии 0,21 м	$2,5 \cdot 10^{-4}$	0,0045

Как видно из таблицы, коэффициент теплоотдачи уменьшается с глубиной из-за уменьшения градиента температуры.

Основываясь на результатах экспериментов, можно сказать, что полученные данные подтверждают эффективность охлаждения при использовании пузырьков. Недостаток воздушного барботирования в том, что воздух по своей природе имеет свойство проникать в молекулы трансформаторного масла, тем самым ухудшая его качество. При использовании элегазового барботирования такого явления не наблюдается.

Элегаз гораздо эффективнее в качестве диэлектрика, чем воздух. Из-за физических свойств элегаза масляный трансформатор может быть компактнее своих аналогов на воздушном барботировании.

Контроль за интенсивностью охлаждения масла можно осуществлять, измеряя расход элегаза, проходящего через объем трансформатора за единицу времени. Для рационального расходования элегаза и экономии машинного ресурса насосно-компрессорного оборудования необходимо четко поддерживать определенный диапазон температур, одновременно выполняя две задачи: эффективно охлаждать масло в трансформаторе и делать это как можно более экономично.

Таким образом, в системе необходимо иметь цифровое автоматическое устройство, регулирующее расход электротехнического газа, основываясь на непрерывно поступающих показаниях с приборов измерения температуры и давления; также необходим многосторонний анализ газа в рабочем объеме устройства. В процессе решения поставленной задачи было решено в системе элегазового охлаждения масляного трансформатора применить прибор компании «МТЕ» под названием HYDROCAL 1008. Данный прибор служит для он-лайн мониторинга состояния масляных трансформаторов.

Прибор HYDROCAL 1008 предназначен для постоянной установки на маслонаполненном трансформаторе и выполняет

функцию раннего оповещения предаварийного состояния трансформаторов. Также приборы непрерывно производят измерение содержания в масле наиболее важных газов, воды, которые свидетельствуют о возникновении проблем в трансформаторе. Они позволяют записывать показания, устанавливать индивидуальные пороги срабатывания аварийного сигнала, подключать внешние устройства и имеют различные коммуникационные интерфейсы. Прибор имеет программируемые управляющие выходы.

Благодаря тому, что прибор не требует регулярной замены расходных материалов или частей, а также периодического обслуживания, система является необслуживаемой.

Прибор HYDROCAL 1008 — это устанавливаемая на постоянную работу система многостороннего анализа газа в масле с функциями мониторинга трансформатора. Она позволяет произвести индивидуальные замеры влаги и ключевых газов, растворенных в масле трансформатора, таких, как водород ( $H_2$ ), угарный газ ( $CO$ ), углекислый газ ( $CO_2$ ), метан ( $CH_4$ ), ацетилен ( $C_2H_2$ ), этилена ( $C_2H_4$ ) и этан ( $C_2H_6$ ).

## Выводы

Результаты анализа отказов масляных трансформаторов позволяют сделать вывод о необходимости повышения эффективности их системы охлаждения, так как основной причиной выхода трансформаторов из строя является перегрев. Экспериментальные исследования показывают, что барботирование масла пузырьками элегаза позволяет более эффективно охлаждать его, а соответственно и активную часть масляных трансформаторов. Такой способ охлаждения силовых масляных трансформаторов — современное, более эффективное решение для использования на предприятиях и является новым направлением развития трансформаторостроения. Установка эффективна особенно в жаркий период времени, когда масляная система охлаждения не справляется с отводом тепла.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Abramov V.O., Abramova A.V., Keremetin P.P., Mullakaev M.S., Vexler G.B., Mason T.J.** Ultrasonically improved galvanochemical technology for the remediation of industrial wastewater // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2014. Vol. 21. No 2. P. 812–818.
2. **Asadi N., Kelk H.** Meshgin Modeling, Analysis, and Detection of Internal Winding Faults in Power Transformers // *IEEE transactions on power delivery*. 2015. Vol. 30. No 6. P. 2419–2426.
3. **Chang H.M., Choi Y.S., Van Sciver S.W., Choi K.D.** Cryogenic cooling system of HTS transformers by natural convection of subcooled liquid nitrogen // *Cryogenics*. 2003. Vol. 43. No 10–11. P. 289–596.
4. **Olivares-Galvan J.C., Escarela-Perez R., Georgilakis P.S., Fofana I., Salvador Magdaleno-Adame.** A Bibliographic Analysis of Transformer Literature 1990–2000 // *Electrical and Electronic Engineering*. 2012. P. 96–121.
5. **Mullakaev M.S., Abramov V.O., Abramova A.V.** Development of ultrasonic equipment and technology for well stimulation and enhanced oil recovery // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2015. Vol. 125. P. 201–208.
6. **Mullakaev M.S., Abramov V.O., Pechkov A.A.** Ultrasonic unit for restoring oil wells // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2009. Vol. 45. No 3–4. P. 133–137.
7. **Nigmatulin R.I., Filippov A.I., Khismatullin A.S.** Transcillatory heat transfer in a liquid with gas bubbles // *Thermophysics and aeromechanics*. 2012. Vol. 19. No 4. P. 589–606.
8. **Баширов М.Г., Грибовский Г.Н., Галлямов Р.У., Гареев И.М., Хисматуллин А.С.** Рекомендации по повышению надежности электрооборудования промышленной площадки линейно-производственного управления магистральных газопроводов // *Электротехнические системы и комплексы*. 2016. № 2 (31). С. 23–26.
9. **Баширов М.Г., Грибовский Г.Н., Галлямов Р.У., Хисматуллин А.С.** Применение автоматического режима контроля электрооборудования промышленной площадки линейно-производственного управления магистральных газопроводов // *Новое в российской электроэнергетике*. 2016. № 6. С. 28–35.
10. **Камалов А.Р., Хисматуллин А.Г., Хайрулина Д.Д., Хисматуллин А.С.** Повышение эффективности охлаждения силовых масляных трансформаторов при помощи элегаза // *Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья*. 2017. № 1. С. 54–56.
11. **Лизунова С.Д., Лоханина А.К.** Силовые трансформаторы // *Энергоиздат*. 2004. 616 с.
12. **Хисматуллин А.С., Вахитов А.Х., Феоктистов А.А.** Мониторинг и ремонт промышленных силовых трансформаторов по техническому состоянию // *Современные наукоемкие технологии*. 2016. № 4. Т. 2. С. 271–274.
13. **Салиева Л.М., Зайнакова И.Ф., Хуснутдинова И.Г., Баширов М.Г., Хисматуллин А.С.** Хроматографический метод оценки технического состояния силовых и масляных трансформаторов // *Экологические системы и приборы*. 2015. № 12. С. 35–41.
14. **Хисматуллин А.С., Сураков М.Р., Сынтимиров А.А.** Повышение охлаждения масляных силовых трансформаторов путем барботажа пузырьков элегаза // *Инженерная физика*. 2017. № 6. С. 27–31.
15. **Хисматуллин А.С., Вахитов А.Х., Феоктистов А.А.** Система охлаждения трансформаторного масла на основе трансцилляторного переноса тепла // *Энергобезопасность и энергосбережение*. 2016. № 4. С. 43–46.
16. **Хисматуллин А.С., Хисматуллин А.Г., Камалов А.Р.** Исследование теплопереноса в промышленных силовых трансформаторах с элегазовым охлаждением // *Экологические системы и приборы*. 2017. № 2. С. 29–33.
17. **Хисматуллин А.С. [и др.]** Продление ресурса масляных трансформаторов с длительным сроком эксплуатации / О.О. Кривоконева, Р.И. Кудояров, Е.Ю. Мавлекаев, Е.М. Коньис, И.В. Прахов, А.С. Хисматуллин // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. 2017. Т. 17, № 3. С. 60–66. DOI: 10.145529/power17307.
18. **Хорошев Н.И., Елтышев Д.К., Кычкин А.В.** Комплексная оценка эффективности технического обеспечения энергомониторинга // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 5. С. 716–720.
19. **Хорошев Н.И., Елтышев Д.К.** Многоаспектная оценка технического состояния оборудования электротехнических комплексов // *Труды IX международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016*. 2016. С. 552–556.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ХИСМАТУЛЛИН Азат Салаватович** – кандидат физико-математических наук доцент Уфимского государственного нефтяного технического университета

E-mail: hism5az@mail.ru

**БАШИРОВ Мусса Гумерович** – доктор технических наук заведующий кафедрой «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий» филиала ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

E-mail: eapp@yandex.ru

**СОЛДАТОВА Евгения Геннадьевна** – студент кафедры «Электрооборудование и автоматика промышленных предприятий» филиала ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

E-mail: gadag76@gmail.com

**МАВЛЕКАЕВ Евгений Юрьевич** – студент филиала ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

E-mail: giltanasheal@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 24.01.2018

## REFERENCES

- [1] **Abramov V.O., Abramova A.V., Keremetin P.P., Mullakaev M.S., Vexler G.B., Mason T.J.** Ultrasonically improved galvanochemical technology for the remediation of industrial wastewater. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2014. Vol. 21. No 2. P. 812–818.
- [2] **Asadi N., Kelk H.** Meshgin Modeling, Analysis, and Detection of Internal Winding Faults in Power Transformers. *IEEE transactions on power delivery*. 2015. Vol. 30. No 6. P. 2419–2426.
- [3] **Chang H.M., Choi Y.S., Van Sciver S.W., Choi K.D.** Cryogenic cooling system of HTS transformers by natural convection of subcooled liquid nitrogen. *Cryogenics*. 2003. Vol. 43. No 10–11. P. 289–596.
- [4] **Olivares-Galvan J.C., Escarela-Perez R., Georgilakis P.S., Fofana I., Salvador Magdaleno-Adame.** A Bibliographic Analysis of Transformer Literature 1990–2000. *Electrical and Electronic Engineering*. 2012. P. 96–121.
- [5] **Mullakaev M.S., Abramov V.O., Abramova A.V.** Development of ultrasonic equipment and technology for well stimulation and enhanced oil recovery. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2015. Vol. 125. P. 201–208.
- [6] **Mullakaev M.S., Abramov V.O., Pechkov A.A.** Ultrasonic unit for restoring oil wells. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2009. Vol. 45. No 3–4. P. 133–137.
- [7] **Nigmatulin R.I., Filippov A.I., Khismatullin A.S.** Transcillatory heat transfer in a liquid with gas bubbles. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2012. Vol. 19. No 4. P. 589–606.
- [8] **Bashirov M.G., Gribovskii G.N., Galliamov R.U., Gareev I.M., Khismatullin A.S.** Rekomendatsii po povysheniiu nadezhnosti elektrosnabzheniia promyshlennoi ploshchadki lineino-proizvodstvennogo upravleniia magistral'nykh gazoprovodov. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы*. 2016. № 2 (31). S. 23–26. (rus.)
- [9] **Bashirov M.G., Gribovskii G.N., Galliamov R.U., Khismatullin A.S.** Primenenie avtomaticheskogo rezhima kontrolya elektrosnabzheniia promyshlennoi ploshchadki lineino-proizvodstvennogo upravleniia magistral'nykh gazoprovodov. *Novoe v rossiiskoi elektroenergetike*. 2016. № 6. S. 28–35. (rus.)
- [10] **Kamalov A.R., Khismatullin A.G., Khairullina D.D., Khismatullin A.S.** Povyslenie effektivnosti okhlazhdeniia silovykh maslianykh transformatorov pri pomoshchi elegaza. *Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ia*. 2017. № 1. S. 54–56. (rus.)
- [11] **Lizunova S.D., Lokhanina A.K.** Silovye transformatory. Energoizdat. 2004. 616 s. (rus.)
- [12] **Khismatullin A.S., Vakhitov A.Kh., Feoktistov A.A.** Monitoring i remont promyshlennykh silovykh transformatorov po tekhnicheskomu sostoianiiu. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2016. № 4. T. 2. S. 271–274. (rus.)
- [13] **Salieva L.M., Zainakova I.F., Khusnutdinova I.G., Bashirov M.G., Khismatullin A.S.** Khromatograficheskii metod otsenki tekhnicheskogo sostoianiia silovykh i maslianykh transformatorov. *Ekologicheskiesistemy i pribory*. 2015. № 12. S. 35–41. (rus.)
- [14] **Khismatullin A.S., Surakov M.R., Syntimirov A.A.** Povyslenie okhlazhdeniia maslianykh silovykh transformatorov putem barbotazha puzyr'kov elegaza. *Inzhenernaia fizika*. 2017. № 6. S. 27–31. (rus.)



[15] **Khismatullin A.S., Vakhitov A.Kh., Feoktistov A.A.** Sistema okhlazhdeniia transformatornogo masla na osnove transtsiatornogo perenosa tepla. *Energobezopasnost' i energosberezhenie*. 2016. № 4. S. 43–46. (rus.)

[16] **Khismatullin A.S., Khismatullin A.G., Kamalov A.R.** Issledovanie teploperenosa v promyshlennykh silovykh transformatorakh s elegazovym okhlazhdeniem. *Ekologicheskie sistemy i pribory*. 2017. № 2. S. 29–33. (rus.)

[17] **Khismatullin A.S. [i dr.]**. Prodlenie resursa maslianykh transformatorov s dlitel'nym srokom ekspuatatsii / O.O. Krivokoneva, R.I. Kudoiarov,

E.Iu. Mavlekaev, E.M. Konys, I.V. Prakhov, A.S. Khismatullin. *Vestnik IuUrGU. Seriya «Energetika»*. 2017. T. 17, № 3. S. 60–66. DOI: 10.145529/power17307. (rus.)

[18] **Khoroshev N.I., Eltyshev D.K., Kychkin A.V.** Kompleksnaia otsenka effektivnosti tekhnicheskogo obespecheniia energomonitoringa. *Fundamental'nye issledovaniia*. 2014. № 5. S. 716–720. (rus.)

[19] **Khoroshev N.I., Eltyshev D.K.** Mnogoaspektnaia otsenka tekhnicheskogo sostoianiia oborudovaniia elektrotekhnicheskikh kompleksov. *Trudy IX mezhdunarodnoi (XX Vserossiiskoi) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2016*. 2016. S. 552–556. (rus.)

#### AUTHORS

**KHISMATULLIN Azat S.** – *Ufa state petroleum technological university*

E-mail: hism5az@mail.ru

**BASHIROV Mussa G.** – *Ufa state petroleum technological university Salavat branch*

E-mail: eapp@yandex.ru

**SOLDATOVA Evgeniia G.** – *Ufa state petroleum technological university Salavat branch*

E-mail: gadag76@gmail.com

**MAVLEKAEV Evgenii Yu.** – *Ufa state petroleum technological university Salavat branch*

E-mail: giltanasheal@mail.ru

Received: 24.01.2018

DOI: 10.18721/JEST.240105  
УДК 621.319.4; 537.226.7

*А.П. Плотников<sup>1</sup>, О.А. Емельянов<sup>1</sup>, В.О. Белько<sup>1</sup>, Р.А. Курьяков<sup>2</sup>*

1 – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

2 – АО «НИИ «Гириконд», Санкт-Петербург, Россия

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ЧИП-КОНДЕНСАТОРОВ: I. ОСНОВНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ**

Разработаны установки для определения импульсной электрической прочности чип-конденсаторов и напряжения их пробоя под воздействием грозовых импульсов. Экспериментально получены функции распределения указанных характеристик, обнаружено что они соответствуют нормальному закону. Получены осциллограммы тока и напряжения на конденсаторах, а также зависимость емкости и тангенса угла потерь от амплитудного напряжения испытательного импульса. Выполнен анализ отказов испытанных конденсаторов. Выделены основные возможные причины отказа чип-конденсаторов, представлены предварительные оценки по каждой из потенциальных причин отказа. Полученные результаты лягут в основу разработки методики предварительной оценки ИЭП чип-конденсаторов.

ЧИП-КОНДЕНСАТОР; ИМПУЛЬСНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ; ГРОЗОВОЙ ИМПУЛЬС;  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ; АНАЛИЗ ПРИЧИН ОТКАЗОВ.

*Ссылка при цитировании:*

А.П. Плотников, О.А. Емельянов, В.О. Белько, Р.А. Курьяков. Исследование импульсной электрической прочности современных чип-конденсаторов: I. Основные экспериментальные результаты // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 1. С. 50–59. DOI: 10.18721/JEST.240105.

*A.P. Plotnikov<sup>1</sup>, O.A. Emelyanov<sup>1</sup>, V.O. Belko<sup>1</sup>, R.A. Kuryakov<sup>2</sup>*

1 – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

2 – «NII «GIRICOND» JS Co, St. Petersburg, Russia

## **STUDY OF SHORT-PULSE DIELECTRIC STRENGTH OF CHIP CAPACITORS. PART I: THE MAIN EXPERIMENTAL RESULTS**

The goal of the paper is testing the short-pulse dielectric strength of chip capacitors and lightning impulse testing with subsequent failure analysis. The experimental setups are developed in order to determine the short-pulse dielectric strength and lightning impulse withstand voltage. The distribution functions of these characteristics have been found to follow the normal distribution. The oscillograms of current and voltage across the capacitors are presented, as well as the dependence of the capacitance and dissipation factor on the testing impulse voltage magnitude. A brief failure analysis is carried out. The main failure mechanisms are highlighted. The obtained results will be the basis for the method of preliminary estimation of short-pulse dielectric strength in chip capacitors.

CHIP CAPACITOR; SHORT PULSE DIELECTRIC STRENGTH; LIGHTNING IMPULSE; ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY; FAILURE ANALYSIS.

*Citation:*

A.P. Plotnikov, O.A. Emelyanov, V.O. Belko, R.A. Kuryakov. Study of short-pulse dielectric strength of chip capacitors. Part I: The main experimental results, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 24(01)(2018) 50–59, DOI: 10.18721/JEST.240105.

## Введение

Электрические конденсаторы для поверхностного монтажа, называемые чип-конденсаторами (или SMD-конденсаторами), широко применяются в современной электронной и радиоэлектронной аппаратуре. Преимуществами чип-конденсаторов являются компактные размеры, высокие удельные емкости, низкие паразитные характеристики, быстрый монтаж на плату. Основные диэлектрики, используемые в современных чип-конденсаторах, — керамика и полимерные пленки [1]. Такие конденсаторы производятся по многослойной технологии и известны как «MLCC (*Multilayer ceramic capacitors*)» в случае керамического и «SMD chip film capacitor» в случае полимерного диэлектрика. К преимуществам керамических конденсаторов относятся высокая удельная емкость и высокая рабочая температура; пленочным конденсаторам свойственны высокая электрическая прочность, а также способность к самовосстановлению, существенно увеличивающая надежность конструкции.

Функционирование электронных компонентов силовых устройств нередко сопряжено с коммутационными перенапряжениями, для которых характерны многократное увеличение амплитуды напряжения и субмикросекундная длительность процесса. Такие импульсы могут также приводить к появлению электромагнитных помех [2]. Одним из вариантов контроля электронных компонентов (в нашем случае — чип-конденсаторов) на электромагнитную совместимость (ЭМС) являются имитационные испытания на импульсную электрическую прочность (ИЭП). Под ИЭП понимается способность изделия выполнять свои функции в процессе и (или) после воздействия на его выводы одиночного импульса напряжения (ОИН) заданной формы. Так, длительность импульса на уровне  $0,5U_{исп}$ , где  $U_{исп}$  — амплитуда ОИН, не должна превышать единиц мкс, а передний фронт — 5 % от длительности

импульса, т. е. время нарастания импульса напряжения не превышает единиц — десятков наносекунд. Следовательно, в связи с высоким значением отношения  $dU_{исп}/dt$  такой режим испытаний предполагает существенную электродинамическую (токовую) нагрузку на конденсатор. Последнее обстоятельство и отличает испытания конденсатора на ИЭП от испытаний повышенным напряжением, равным  $\sim (2-3)U_{ном}$  (где  $U_{ном}$  — номинальное напряжение конденсатора), когда время подъема напряжения составляет секунды и более. Таким образом, при испытаниях на ИЭП конденсатор подвергается воздействию как повышенного электрического поля, так и значительных электродинамических нагрузок.

Широко используемый аналог испытаний на ИЭП — испытания грозowymi импульсами. Испытаниям грозowymi импульсам подвергается все электрооборудование, для которого существует опасность поражения разрядом молнии. В этом случае параметры импульса в соответствии с ГОСТ и МЭК [3] представляют собой  $1,2/50$  мкс, что, с одной стороны, является облегченным режимом по отношению к испытаниям на ИЭП, а с другой — остается серьезным испытанием с точки зрения как электрических, так и электродинамических нагрузок.

Сведений об ИЭП чип-конденсаторов (как пленочных, так и керамических) в литературе имеется крайне мало. Найденные работы посвящены исследованию ИЭП электролитических (то есть полярных) конденсаторов [4]. Встречаются публикации на тему исследования ИЭП микросхем [5, 6], а также отдельно взятых полимерных пленок [7, 8].

Ограниченность сведений по исследуемой теме, с одной стороны, может быть объяснена весьма узкой нишей, которую занимают испытания на ИЭП среди других типов испытаний электротехнических изделий, с другой — существенной зависимостью ИЭП от таких факторов, как тип диэлектрика и конструкции кон-

денсатора, технологии изготовления и т.п. Результаты испытаний одних конденсаторов обычно неприменимы для аналогичных конденсаторов другого производителя, не говоря уже о других номиналах и конструкциях.

Тем не менее в связи с требованиями основных потребителей конденсаторной продукции отечественных предприятий необходимо включать результаты испытаний на ИЭП производимых изделий в сопроводительную документацию, а впоследствии ввести параметр ИЭП в ТУ на производимые конденсаторы.

Поскольку временные ресурсы как отделов технического контроля на предприятиях, так и служб входного контроля потребителя ограничены, имеет смысл разработать методику предварительной оценки ИЭП чип-конденсаторов на основе данных об основном диэлектрике, конструкции, номинальных параметрах. Такая методика позволит сократить длительность цикла испытаний и проводить только «прицельные» испытания вблизи значений, предсказываемых методикой. Предлагаемая работа является начальным этапом проекта, направленного на разработку методики предварительной оценки ИЭП чип-конденсаторов. Цель – разработать испытательные установки для определения импульсной электрической прочности чип-конденсаторов и напряжения их пробоя под воздействием грозových импульсов, а также выявить возможные причины отказа конденсаторов в ходе соответствующих испытаний.

### Методическая часть

**Объекты исследования.** В работе были испытаны на импульсную прочность пленочные конденсаторы К73-31\* ( $U_{ном} = 630$  В,  $C_{ном} = 6,8$  нФ). Тип диэлектрика – полиэтилентерефталат (ПЭТФ). Толщина полимерной пленки – 6 мкм.

\* Конденсаторы с органическим диэлектриком. Каталог продукции ЗАО «ЭЛКОД». 2015. 225 с.

**Испытательное оборудование.** При испытаниях изделий на ИЭП электрические импульсы, наводимые на электродах (выводах) конденсаторов в результате воздействия электромагнитных импульсов, моделируются эквивалентными одиночными импульсами напряжения, подаваемыми на внешние электроды образцов от генератора с нормированными параметрами. Схема разработанного генератора представлена на рис. 1.

Разработанный генератор импульсов позволяет регулировать длительность импульса напряжения в интервале 0,25–15 мкс, при этом длительность фронта не превышает 0,2 мкс, максимальная амплитуда напряжения – 5 кВ, ток – до 1 кА. Для испытаний конденсаторов на ИЭП были выбраны следующие параметры: длительность импульса – 10 мкс, длительность фронта – 150 нс.

Для испытания грозowymi импульсами напряжения используется установка, схема которой изображена на рис. 2.

Как известно, требования к параметрам одиночного импульса напряжения при испытаниях грозowymi импульсами следующие: длительность переднего фронта должна составлять 1,2 мкс; время снижения напряжения до 0,5 амплитудного – 50 мкс.

Для обеспечения необходимых длительностей переднего и заднего фронтов, а также полной длительности одиночного грозового импульса были выбраны следующие параметры элементов схемы:  $R_3 = 100$  кОм,  $R1 = 129$  Ом,  $R2 = 1640$  Ом,  $C = 0,047$  мкФ. В качестве быстродействующего ключа (время нарастания меньше 10 нс) использовались искровые разрядники фирмы EPCOS соответствующего номинала напряжения.

Напряжение на испытуемом конденсаторе измерялось емкостным делителем с коэффициентом деления  $k = 1:140$  и временем отклика ~0,5 нс. Ток измерялся с помощью низкоиндуктивного шунта специальной конструкции,  $R_{ш} = 0,8$  Ом.

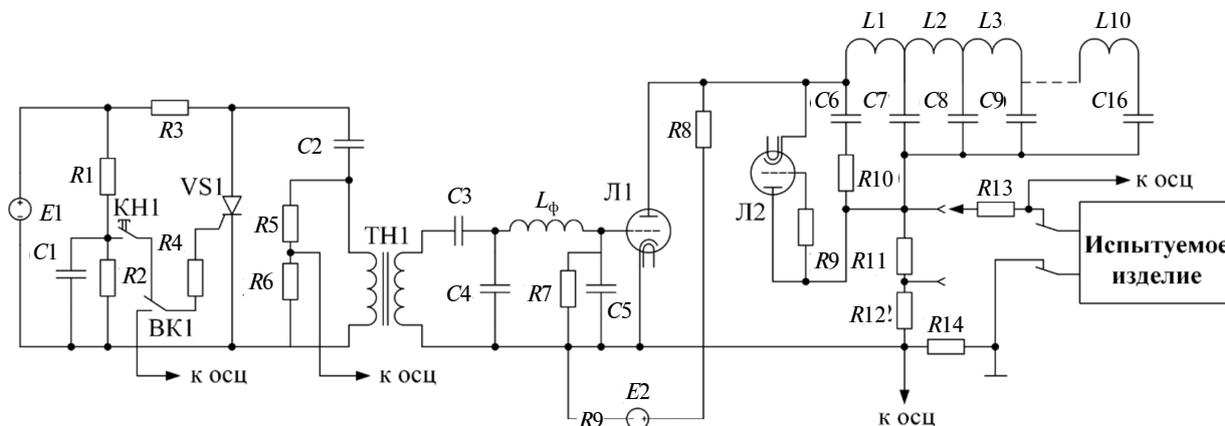


Рис. 1. Схема генератора коротких импульсов:  $E1$  – источник питания 500 В, 5 мА;  $E2$  – регулируемый источник питания 10 кВ, 5 мА  
 Fig. 1. Short pulses generator circuit diagram:  $E1$  – power supply 500 V, 5 mA;  $E2$  – regulated power supply 10 kV, 5 mA

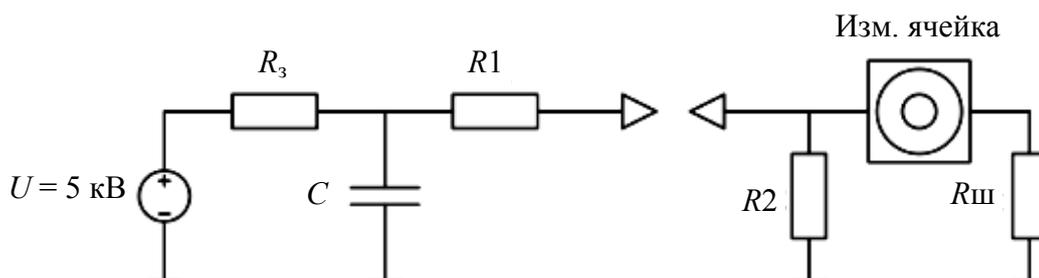


Рис. 2. Упрощенная схема установки для испытания чип-конденсаторов грозовыми импульсами напряжения  
 Fig. 2. Simplified circuit diagram for chip capacitors lightning impulse test

**Методика проведения испытаний**

Целью испытаний на ИЭП / испытаний грозовыми импульсами является контроль показателей электрической прочности образцов при заданных длительностях одиночных импульсов напряжений с учетом доминирующих механизмов деградации.

Этапы проведения испытаний:

1. Последовательное воздействие одиночных импульсов напряжения с выбранными параметрами на выводы испытательного образца и измерение его реакции на внешнее воздействие (изменения параметров  $C$  и  $tg \delta$ ).

2. Определение максимального значения амплитуды импульса, во время и (или) после воздействия которого параметры-критерии электрической прочности испытываемого образца соответствуют установленным нормам, а также соответствующих максимальных значений параметров реак-

ции конденсатора (амплитуды тока и напряжения на выводах).

В процессе испытаний амплитуду одиночных импульсов постепенно повышают до значения, при котором происходит обратимый и (или) необратимый выход контролируемых параметров конденсатора за пределы установленных норм. Значения показателей электрической прочности определяются по результатам измерения реакции образца при значениях параметров импульса напряжения на шаге, предшествующем отказу образца.

При исследовании электрической прочности конденсаторов рассматриваются два вида отказов образцов: параметрический и катастрофический.

Параметрический отказ конденсатора происходит, когда значения характеристик конденсатора ( $C$  и  $tg \delta$ ) изменяются на 20 % относительно начальных: электрическая емкость уменьшается, а тангенс угла

диэлектрических потерь растет. Параметрический отказ конденсатора фиксируется также в том случае, если наблюдается замыкание выводов конденсатора по его поверхности (поверхностное перекрытие).

К катастрофическим отказам образцов можно отнести нарушение целостности корпуса конденсатора, обугливание его составных частей, приводящее к невозможности его дальнейшей эксплуатации.

### Результаты экспериментов и обсуждение

Осциллограммы тока и напряжения на испытуемых конденсаторах, полученные при исследовании пленочных чип-конденсаторов на ИЭП и при воздействии на них грозowymi импульсами напряжения, представлены на рис. 3.

На рис. 3, *а, в* показаны случаи, когда конденсатор выдерживает испытательный импульс без каких-либо последствий – катастрофический отказ не происходит и измеренные после приложения импульса параметры конденсаторов не изменяются. На рис. 3, *б, г* представлены осциллограммы для случаев, когда в результате приложения импульса происходил катастрофический отказ конденсатора, а именно разрушение корпуса (см. рис. 5). Причем характер разрушения был идентичен для обоих типов импульсов. Интересная особенность такого отказа: даже будучи разрушенным, конденсатор сохранял существенную часть своей изначальной емкости, однако при этом резко (на порядок и более) увеличивался его тангенс угла диэлектрических потерь.

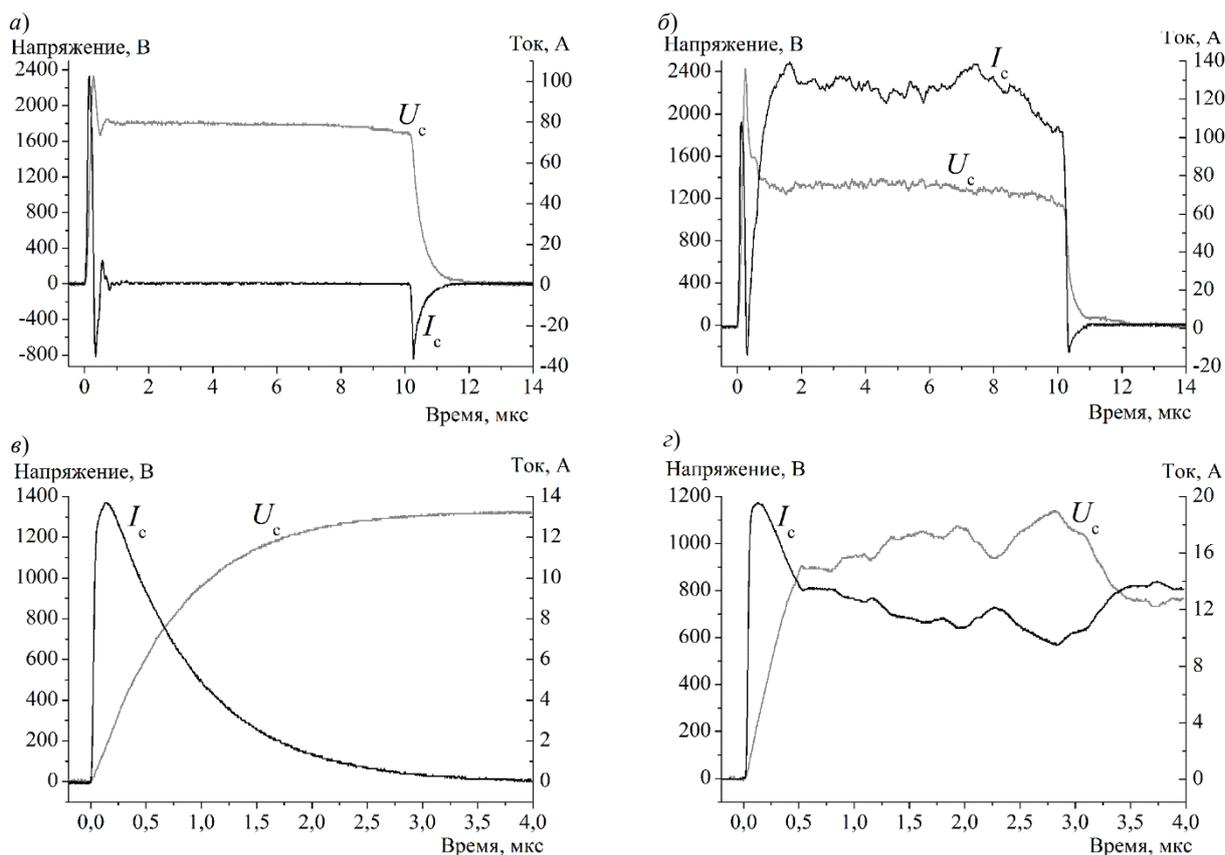


Рис. 3. Осциллограммы тока и напряжения на конденсаторе:  
*а* – испытание на ИЭП, отказа нет; *б* – испытание на ИЭП, отказ; *в* – испытание грозowym импульсом, отказа нет; *г* – испытание грозowym импульсом, отказ

Fig. 3. The oscillograms of current and voltage across the capacitor:  
*a* – short pulse dielectric strength test, no failure; *б* – short pulse dielectric strength test, failure;  
*в* – lightning impulse test, no failure; *г* – lightning impulse test, failure

Для наглядности были построены типичные зависимости емкости  $C$  и тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg } \delta$  от амплитудного значения импульса напряжения при испытании на ИЭП. Испытание грозовыми импульсами дает качественно аналогичную картину.

Типичные фотографии разрушенных в ходе испытаний конденсаторов представлены на рис. 5. На левой фотографии можно заметить некоторые потемнения на торце секции.

При сравнении амплитудных значений импульсов напряжения (коротких и грозовых), при которых происходил отказ чип-конденсаторов, было установлено, что ИЭП составляет  $(1670 \pm 75)$  В, напряжение пробоя при испытании грозовыми импульсами –  $(2350 \pm 110)$  В (см. рис. 4). Напряжения пробоя удовлетворительно описы-

ваются нормальным законом распределения [9].

На основании экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что ИЭП исследованных пленочных чип-конденсаторов оказалась в  $\sim 1,4$  ниже, чем электрическая прочность при испытании грозовыми импульсами.

Наиболее вероятные причины разрушения корпуса чип-конденсаторов К73-31 в ходе испытаний:

*термомеханические напряжения*, возникающие в результате неравномерного разогрева конденсатора при подаче на него испытательного импульса;

*неэффективное самовосстановление*, приводящее к разрушению корпуса конденсатора вследствие чрезмерного выделения газообразных продуктов, сопровождающего процесс [10, 11].

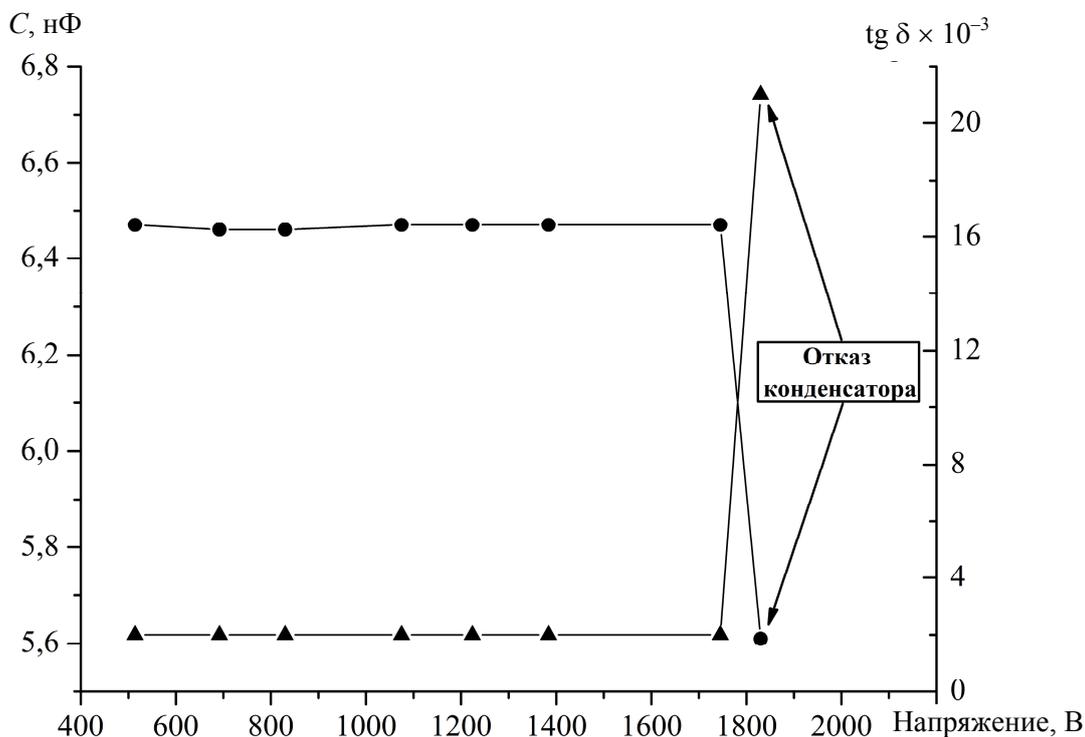


Рис. 4. Изменение емкости и тангенса угла диэлектрических потерь конденсатора в ходе испытаний

(—●—) –  $C$ ; (—▲—) –  $\text{tg } \delta$

Fig. 4. Capacitance and dissipation factor changes during the short pulse dielectric strength test

(—●—) –  $C$ ; (—▲—) –  $\text{tg } \delta$

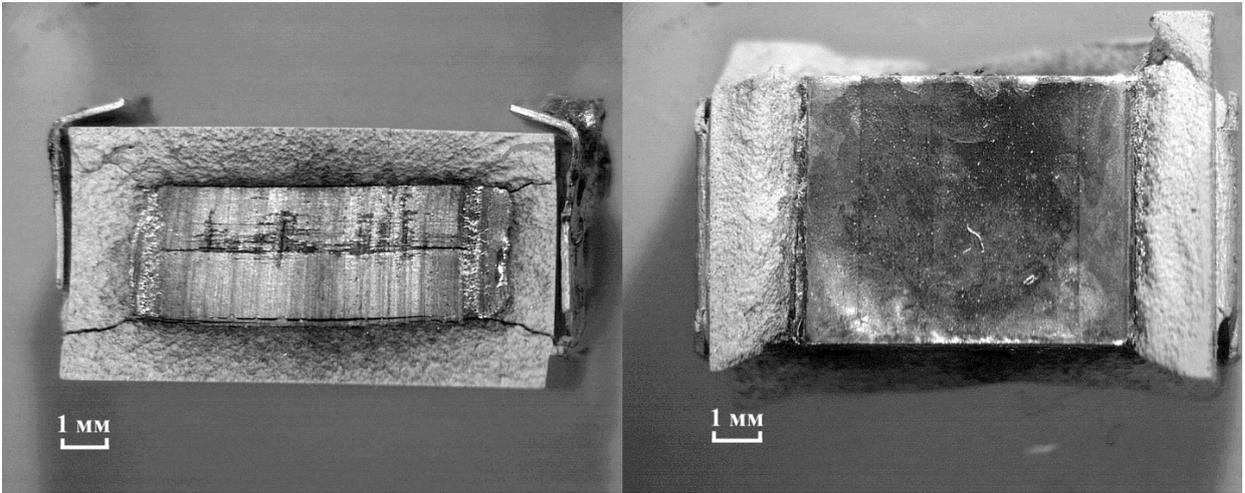


Рис. 5. Типичные фото разрушения конденсаторов К73-31  
 Fig. 5. The photographs of capacitors type K73-31 destruction

Вероятность, %

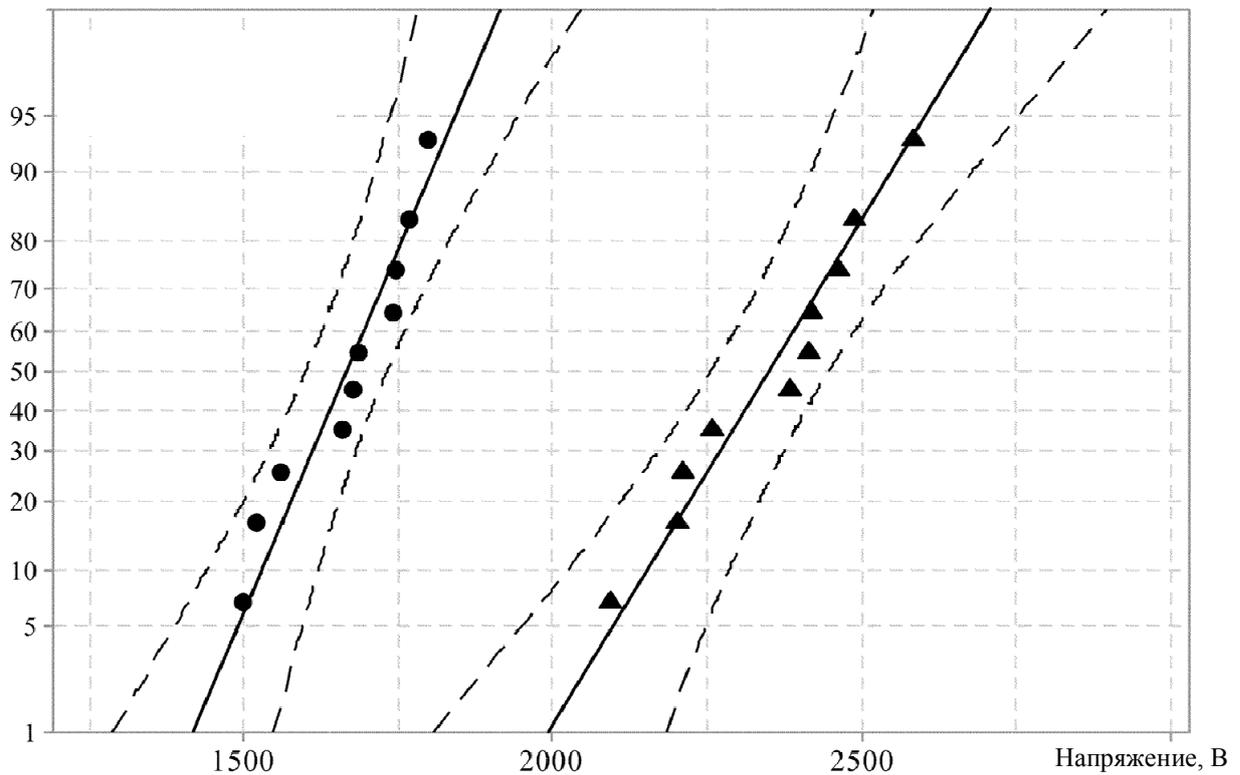


Рис. 6. Функции распределения напряжения пробоя при испытаниях на ИЭП (—●—) и грозовыми импульсами (—▲—)  
 Fig. 6. Withstand voltage distribution functions for short pulse dielectric strength (—●—) and lightning impulse tests (—▲—)

*межслоевое перекрытие* в месте разреза заготовки при изготовлении пленочных чип-конденсаторов.

Предварительные оценки по каждому из этих вариантов представлены далее.

**1. Термомеханические напряжения.** Геометрическая модель чип-конденсатора К73-31 с  $U_{\text{ном}} = 630$  В,  $C = 6,5$  нФ представляет собой параллелепипед размерами  $10 \times 8 \times 5$  мм. Источником тепла является активная часть конденсатора. Так как испытание происходит в импульсном режиме, то и тепловыделение — импульсное. В первом приближении можно предположить, что напряжение представляет собой гармоническую функцию с эквивалентной частотой  $f = (2\pi\tau_{\text{front}})^{-1} \approx 1$  МГц, где  $\tau_{\text{front}} \sim 120\text{--}180$  нс — время нарастания «короткого» импульса напряжения.\*\* Тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg } \delta$  конденсатора К73-31 на указанной частоте был определен при помощи измерительного моста Hioki IM3570 и составляет  $\sim 10^{-2}$ . Тогда в соответствии с выражением для оценки потерь  $P$  в конденсаторе получаем:

$$P = 2\pi f C U^2 \text{tg } \delta \approx 2000 \text{ Вт.}$$

По результатам предварительного расчета через 180 нс после начала подачи импульса напряжения отсутствует какой-либо градиент температуры по объему конденсатора, т. е. конденсатор даже не успевает прогреться за время приложения импульса. А поскольку отсутствует перепад температуры, то и появление термомеханических напряжений невозможно.

**2. Неэффективное самовосстановление.** Так как напряжение пробоя конденсатора в среднем составляет  $\sim 2000$  В, толщина пленки ПЭТФ равна 6 мкм, а конденсатор представляет собой секционированную структуру (две последовательные секции), то средняя напряженность поля в слое ди-

электрика составляет  $\sim 160$  В/мкм. А поскольку электрическая прочность пленок ПЭТФ лежит в диапазоне 500–700 В/мкм, представляется маловероятным электрический пробой пленки с последующей инициацией процесса самовосстановления, в результате которого образующиеся газообразные продукты разрушат корпус конденсатора изнутри.

**3. Межслоевое перекрытие.** При разрезе изначальной заготовки на блоки граница разреза (ввиду отсутствия закраин в этом месте) изолируется парафиносодержащим составом. Расстояние между слоями металлизации противоположной полярности равно толщине полимерной пленки (в нашем случае 6 мкм). Таким образом, напряжение пробоя шестимикронного слоя парафина ограничивается его электрической прочностью в таких коротких промежутках. Предварительные эксперименты показали, что электрическая прочность коротких изоляционных промежутков, покрытых парафином, в резко неоднородном поле в 3–4 раза выше, чем на воздухе. Основываясь на результатах, полученных в [12, 13], можно ожидать, что напряжение пробоя парафина между соседними слоями металлизации составит 750–1000 В, что соответствует испытательному напряжению (2000 В на две последовательные секции). В то же время, как показывают экспериментальные данные, электрическая прочность зависит также от длительности фронта импульса напряжения, причем чем короче фронт, тем меньше электрическая прочность. По всей видимости, данное обстоятельство связано с особенностями импульсной электрической прочности парафиносодержащего состава. Данный вопрос выходит за рамки данного исследования и требует дополнительного изучения.

## Выводы

В ходе исследований были разработаны испытательные установки для определения импульсной электрической прочности чип-

\*\* Емельянов О.А. Основы электроизоляционной, кабельной и конденсаторной техники. Расчет систем конденсаторной изоляции и электрических конденсаторов: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 41 с.

конденсаторов и их напряжения пробоя под воздействием грозových импульсов. Апробация установок проведена на полимерных чип-конденсаторах. В ходе испытаний было установлено, что ИЭП составляет  $(1670 \pm 75)$  В, а напряжение пробоя при испытании грозowymi импульсами –  $(2350 \pm 110)$  В. По результатам предвари-

тельного анализа причин отказа было установлено, что наиболее вероятно межслоевое перекрытие в зоне торца секции. Следующим этапом работы будет теоретическое исследование и численное моделирование процессов деградации чип-конденсаторов при испытании на импульсную электрическую прочность.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ho J., Jow T.R., Boggs S. Historical introduction to capacitor technology // IEEE Electrical Insulation Magazine. 2010. Vol. 26. No 1. P. 20–25.
2. Lampe L., Tonello A.M., Swart T.G. Electromagnetic Compatibility // Power Line Communications: Principles, Standards and Applications from Multimedia to Smart Grid. 1, Wiley Telecom. 2014.
3. Ramarao G., Chandrasekaran K. Evaluation of circuit and its analytical function parameters for lightning and switching impulse // 2017 International Conference on Innovations in Electrical, Electronics, Instrumentation and Media Technology (ICEEIMT), Coimbatore, 2017. P. 302–305.
4. Курганов А.В., Романенко Л.В., Селезнев В.К. Экспериментальные исследования импульсной электрической прочности полярных конденсаторов // Научно-технический сборник «Вопросы атомной науки и техники». 2011. Вып. 2. С. 41–42.
5. Ерoшкин А.Л., Попов Р.А. Оценка надёжности полупроводниковых приборов и микросхем // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 12-2. С. 221–225.
6. Epifantsev K.A., Skorobogatov P.K., Gerasimchuk O.A. An Analysis of the Temperature Effect on the Impulse Electric Strength of CMOS Chips // Russian Microelectronics. 2015. Vol. 44. Issue 1. P. 40–43.
7. Закревский В.А., Пахотин В.А., Сударь Н.Т. Импульсная электрическая прочность пленки полипропилена // Журнал технической физики. 2017. Т. 87. Вып. 2. С. 249–253.
8. Zhao L., Liu G.Z., Su J.C., Pan Y.F., Zhang X.B. Investigation of Thickness Effect on Electric Breakdown Strength of Polymers Under Nanosecond Pulses // IEEE Transactions on Plasma Science. 2011. Vol. 39. No 7. P. 1613–1618.
9. Хаушильд В., Мош В. Статистика для электротехников в приложении в технике высоких напряжений. Л.: Энергоатомиздат, 1989. 312 с.
10. Shanshan Qin, Shilei Ma, Boggs S.A. The mechanism of clearing in metalized film capacitors // Electrical Insulation (ISEI) Conference Record of the 2012 IEEE International Symposium. 10–13 June 2012. P. 592–595.
11. Belko V.O., Emelyanov O.A. Self-healing in segmented metallized film capacitors: Experimental and theoretical investigations for engineering design // J. Appl. Phys. 2016. Vol. 119. No 2. P. 024509.
12. Belko V., Emelyanov O., Shemet M. A study of nanosecond arc surface flashover in metalized polymer films // 2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Shenzhen. 2013. P. 476–477.
13. Grafton M.A., Fothergill J.C., Dissado L.A., Shirley-Elgood J.R.R., Stevens G.C., Thomas J.L. Controlling flashover between electrode segments in DC power capacitors // Solid Dielectrics, 2001. ICSD '01. Proceedings of the 2001 IEEE 7th International Conference, Eindhoven. 2001. P. 279–282.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ПЛОТНИКОВ Андрей Павлович** — аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: andreyplochnikow@gmail.com

**ЕМЕЛЬЯНОВ Олег Анатольевич** — кандидат технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: oaemel2@gmail.com

**БЕЛЬКО Виктор Олегович** — кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: vobelko@gmail.com

**КУРЬЯКОВ Роман Андреевич** — аспирант АО «НИИ «Гириконд»

E-mail: kuryakov\_roman@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 31.01.2018



## REFERENCES

- [1] **Ho J., Jow T.R., Boggs S.** Historical introduction to capacitor technology. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2010. Vol. 26. No 1. P. 20–25.
- [2] **Lampe L., Tonello A.M., Swart T.G.** Electromagnetic Compatibility. *Power Line Communications: Principles, Standards and Applications from Multimedia to Smart Grid*. 1, Wiley Telecom. 2014. 624 p.
- [3] **Ramarao G., Chandrasekaran K.** Evaluation of circuit and its analytical function parameters for lightning and switching impulse. *2017 International Conference on Innovations in Electrical, Electronics, Instrumentation and Media Technology (ICEEIMT), Coimbatore*, 2017. P. 302–305.
- [4] **Kurganov A.V., Romanenko L.V., Seleznev V.K.** Eksperimental'nye issledovaniia impul'snoi elektricheskoi prochnosti poliarnykh kondensatorov. *Nauchno-tekhnicheskii sbornik «Voprosy atomnoi nauki i tekhniki»*. 2011. Vyp. 2. S. 41–42. (rus.)
- [5] **Eroshkin A.L., Popov R.A.** Otsenka nadezhnosti poluprovodnikovyykh priborov i mikroskhem. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*. 2015. № 12-2. S. 221–225. (rus.)
- [6] **Epifantsev K.A., Skorobogatov P.K., Gerasimchuk O.A.** An Analysis of the Temperature Effect on the Impulse Electric Strength of CMOS Chips. *Russian Microelectronics*. 2015. Vol. 44. Issue 1. P. 40–43.
- [7] **Zakrevskii V.A., Pakhotin V.A., Sudar' N.T.** Impul'snaia elektricheskaiia prochnost' plenki polipropilena. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 2017. T. 87. Vyp. 2. C. 249–253. (rus.)
- [8] **Zhao L., Liu G.Z., Su J.C., Pan Y.F., Zhang X.B.** Investigation of Thickness Effect on Electric Breakdown Strength of Polymers Under Nanosecond Pulses. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2011. Vol. 39. No 7. P. 1613–1618.
- [9] **Khaushil'd V., Mosh V.** Statistika dlia elektrotekhnikov v prilozhenii v tekhnike vysokikh napriazhenii. L.: Energoatomizdat, 1989. 312 s. (rus.)
- [10] **Shanshan Qin, Shilei Ma, Boggs S.A.** The mechanism of clearing in metallized film capacitors. *Electrical Insulation (ISEI) Conference Record of the 2012 IEEE International Symposium*. 10–13 June 2012. P. 592–595.
- [11] **Belko V.O., Emelyanov O.A.** Self-healing in segmented metallized film capacitors: Experimental and theoretical investigations for engineering design. *J. Appl. Phys.* 2016. Vol. 119. No 2. P. 024509.
- [12] **Belko V., Emelyanov O., Shemet M.** A study of nanosecond arc surface flashover in metallized polymer films. *2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Shenzhen*. 2013. P. 476–477.
- [13] **Grafton M.A., Fothergill J.C., Dissado L.A., Shirley-Elgood J.R.R., Stevens G.C., Thomas J.L.** Controlling flashover between electrode segments in DC power capacitors. *Solid Dielectrics, 2001. ICSD '01. Proceedings of the 2001 IEEE 7th International Conference, Eindhoven*. 2001. P. 279–282.

## AUTHORS

**PLOTNIKOV Andrei P.** – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university  
E-mail: andreyplochnikov@gmail.com

**EMELYANOV Oleg A.** – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university  
E-mail: oaemel2@gmail.com

**BELKO Viktor O.** – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university  
E-mail: vobelko@gmail.com

**KURYAKOV Roman A.** – «NII «GIRICOND» JS Co.  
E-mail: kuryakov\_roman@mail.ru

Received: 31.01.2018

DOI: 10.18721/JEST.240106  
УДК 621.313.322

*М.А. Люлина<sup>1</sup>, Г.А. Першиков<sup>1</sup>, А.А. Смирнов<sup>2</sup>,  
А.Н. Беляев<sup>1</sup>, С.В. Смоловик<sup>3</sup>*

1 – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

2 – Транснефтьэлектросетьсервис, г. Самара, Россия

3 – Акционерное общество «Научно-технический центр Единой энергетической системы»,  
Санкт-Петербург, Россия

### **АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПРОТЯЖЕННЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С УСТРОЙСТВАМИ ПРОДОЛЬНОЙ ЕМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИИ**

В работе проведено аналитическое исследование режимов работы линий электропередачи переменного тока с устройствами продольной компенсации (УПК). Показано, что применение УПК связано с ограничениями, определяемыми отклонениями напряжения в узлах их примыкания. Значительная реактивная мощность, генерируемая емкостью УПК при протекании рабочих токов, требует применения устройств поперечной компенсации. Полученные результаты указывают на недостатки применения УПК с большим емкостным сопротивлением, поскольку возможности повышения пропускной способности электропередачи с такой УПК ограничиваются перепадом напряжения на емкости. В случае необходимости компенсации индуктивного сопротивления протяженных ВЛ целесообразен переход к использованию нескольких УПК с уменьшенным емкостным сопротивлением каждой из них. Выполнен анализ режимов работы одной из известных компенсированных электропередач с несколькими УПК. Показано, что возможность регулирования реактивной мощности при изменении загрузки линии и возможность управления уставками УШР по напряжению способствуют существенному увеличению их пропускной способности.

ДАЛЬНИЕ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ; УСТРОЙСТВО ПРОДОЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ; СТАТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ; УПРАВЛЯЕМЫЙ ШУНТИРУЮЩИЙ РЕАКТОР; СТАТИЧЕСКИЙ ТИРИСТОРНЫЙ КОМПЕНСАТОР.

*Ссылка при цитировании:*

М.А. Люлина, Г.А. Першиков, А.А. Смирнов, А.Н. Беляев, С.В. Смоловик. Аналитическое исследование режимов работы протяженных линий электропередачи с устройствами продольной емкостной компенсации // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 1. С. 60–74. DOI: 10.18721/JEST.240106.

*М.А. Lyulina<sup>1</sup>, G.A. Pershikov<sup>1</sup>, A.A. Smirnov<sup>2</sup>,  
A.N. Belyaev<sup>1</sup>, S.V. Smolovik<sup>3</sup>*

1 – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

2 – Transneftelektroservis, St. Petersburg, Russia

3 – Joint Stock Company «Scientific and Technical Center of Unified Power System»,  
St. Petersburg, Russia

### **ANALYTICAL STUDY OF OPERATING CONDITIONS OF LONG-DISTANCE POWER TRANSMISSION LINES WITH SERIES COMPENSATION DEVICES**

We have carried out an analytical study of the operation conditions of AC transmission lines with series compensation devices (SCDs). We have established that the application of capacitive compensation is associated with the limitations determined by voltage deviations at the



intermediate points of the line. Significant reactive power generated by capacitance requires the use of shunt compensation. The obtained results indicate the disadvantages of using SCDs with a large capacitive conductance, since the possibilities for increasing the transmission capacity of such an SCD are limited by the voltage drop across the capacitance. If it is necessary to compensate the inductance of long-distance overhead lines, it is advisable to apply several SCDs with a reduced capacitance in each of them. We have analyzed the operation conditions of one of the well-known compensated power transmissions with several SCDs. It is shown that the ability to control reactive power when changing line loading and the ability to control the voltage settings of the CSR contribute to a significant increase in their transfer capability.

LONG-DISTANCE AC TRANSMISSION SYSTEM; SERIES COMPENSATION; SHUNT COMPENSATION; OPERATING CONDITIONS; SMALL SIGNAL STABILITY; CONTROLLED SHUNT REACTOR; STATIC VAR COMPENSATOR.

*Citation:*

M.A. Lyulina, G.A. Pershikov, A.A. Smirnov, A.N. Belyaev, S.V. Smolovik. Analytical study of operating conditions of long-distance power transmission lines with series compensation devices, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 24(01)(2018) 60–74, DOI: 10.18721/JEST.240106.

## Введение

Наиболее эффективным способом повышения пропускной способности линий электропередачи является повышение номинального напряжения, однако на сегодня, по всей видимости, достигнут предел (1000/1150/1200 кВ). Натуральная мощность линий указанных классов напряжения составляет 4000–5400 МВт, и аварийное отключение такой линии даже для очень мощной энергосистемы – чрезмерное возмущение.

Конкурирующие способы повышения пропускной способности линий электропередачи сверхвысоких и ультравысоких напряжений – компенсация параметров и глубокое расщепление проводов. Продольно-емкостная компенсация, теоретически обоснованная еще в 30-х годах прошлого столетия [1], на практике применена в 40–50-х годах для компенсации части индуктивного сопротивления линий 220–400 кВ и соответствующего увеличения передаваемых мощностей [2].

Установка продольной компенсации (УПК) способна существенно (на 30–50 %) увеличить пропускную способность линии электропередачи, заметно сокращает взаимный угол между напряжениями на шинах отправной и приемной частей системы, повышая уровень устойчивости [3]. Стоимость конденсаторной группы УПК со-

ставляет обычно небольшую часть от стоимости новой ЛЭП, при этом время сооружения УПК намного меньше, чем ЛЭП. Как показывает практика, срок окупаемости капиталовложений для УПК обычно составляет всего лишь несколько лет, в отличие от срока сооружения новых линий.

Однако упрощенное объяснение эффективности УПК только уменьшением продольного индуктивного сопротивления линии электропередачи является недостаточным.

Большая сосредоточенная емкость УПК, генерирующая реактивную мощность пропорционально квадрату тока, приводит к значительному изменению уровней напряжений в узлах, что обуславливает необходимость применения поперечно включенных шунтирующих устройств [4]. До настоящего времени для этой цели использовались неуправляемые шунтирующие реакторы (ШР). Многообразие режимов работы электропередачи поставило вопрос о целесообразности применения в качестве компенсирующих устройств управляемых шунтирующих реакторов (УШР).

Цель нашей работы заключалась в анализе режимов электропередачи с УПК, определении эффективности использования УШР и установлении закона управления уставками напряжения УШР, целесообразного с точки зрения оптимизации режим-

ных параметров при условии обеспечения нормативных величин напряжений в узлах.

При этом решались следующие задачи:

1) аналитически исследовать влияние устройства продольной компенсации на пропускную способность линий электропередачи;

2) численно исследовать установившиеся режимы работы ВЛ 500 кВ длиной 687 км с целью обоснования эффективности установки УПК и законов регулирования УШР.

#### Аналитическое исследование влияния УПК на пропускную способность линий электропередачи

Основная идея продольной емкостной компенсации заключается в уменьшении полного продольного индуктивного сопротивления электропередачи. Математически этому соответствует уменьшение величины индуктивного сопротивления линии  $X$  в выражении  $P = \frac{U_1 U_2}{X} \sin \delta$ , характеризующем передаваемую по отдельной линии мощность [5]. Рассмотрим простейшую модель линии с продольной емкостной компенсацией.

Эффективное сопротивление линии  $X_{эф}$  определяется выражением

$$X_{эф} = X - X_c, \quad (1)$$

или

$$X_{эф} = (1 - \eta_c)X, \quad (2)$$

где  $\eta_c$  называется степенью продольной компенсации;

$$\eta_c = X_c/X, \quad 0 \leq \eta_c < 1. \quad (3)$$

При допущении о равенстве напряжений  $U_1 = U_2 = U$  активная и реактивная мощности компенсированной линии могут быть рассчитаны по следующим формулам:

$$P = \frac{U^2}{(1 - \eta_c)X} \sin \delta; \quad (4)$$

$$Q = \frac{U^2}{(1 - \eta_c)X} - \frac{U^2}{(1 - \eta_c)X} \cos \delta. \quad (5)$$

Тогда квадрат тока компенсированной линии может быть выражен следующим образом:

$$\begin{aligned} I^2 &= \frac{P^2 + Q^2}{U^2} = \left( \frac{U^4}{(1 - \eta_c)^2 X^2} \sin^2 \delta + \right. \\ &+ \frac{U^4}{(1 - \eta_c)^2 X^2} - 2 \frac{U^4}{(1 - \eta_c)^2 X^2} \cos \delta + \\ &\left. + \frac{U^4}{(1 - \eta_c)^2 X^2} \cos^2 \delta \right) / U^2 = \\ &= \left( \frac{2U^4}{(1 - \eta_c)^2 X^2} - 2 \frac{U^4}{(1 - \eta_c)^2 X^2} \cos \delta \right) / U^2 = \\ &= 2 \frac{U^2}{(1 - \eta_c)^2 X^2} (1 - \cos \delta). \quad (6) \end{aligned}$$

Тогда выражение, определяющее реактивную мощность, генерируемую продольно включенной емкостью, можно записать так:

$$Q_c = I^2 X_c = \frac{2U^2}{X} \frac{\eta_c}{(1 - \eta_c)^2} (1 - \cos \delta). \quad (7)$$

Взаимосвязь между активной мощностью  $P$ , реактивной мощностью продольного конденсатора  $Q_c$  и углом  $\delta$  показана на рис. 1 для различных значений степени продольной компенсации  $\eta_c$ . Как и ожидалось, с увеличением степени продольной компенсации  $\eta_c$  передаваемая по линии мощность быстро увеличивается и, аналогично, также резко увеличивается генерируемая продольным конденсатором реактивная мощность, которая изменяется с углом  $\delta$  таким же образом, как и реактивная мощность линии.

Полученные простые соотношения, характеризующие продольно-емкостную компенсацию, демонстрируют недостаточность приведенных физических объяснений эффективности УПК тем, что сопротивление продольного компенсирующего конденсатора погашает часть фактического реактивного сопротивления линии и, таким образом, эффективное сопротивление передачи в выражении (1) уменьшается, как в случае физического уменьшения длины линии. Следует учесть, что существенным фактором является значительная реактивная мощность, генерируемая конденсаторной батареей и заметно влияющая на величины напряжений на ее выводах.

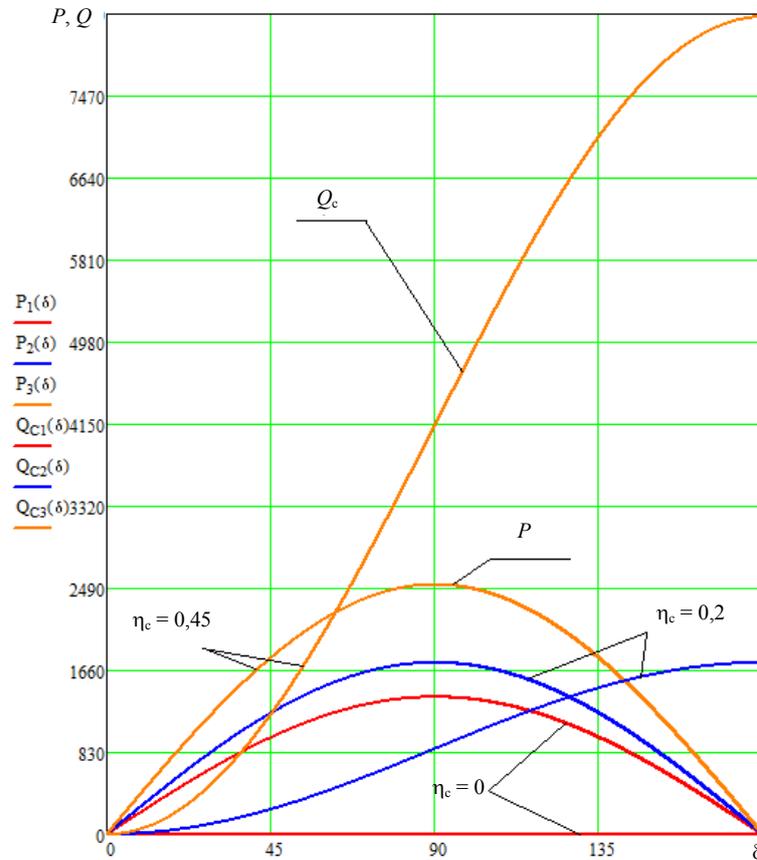


Рис. 1. Характеристики мощности компенсированной линии и реактивная мощность продольного конденсатора в функции угла  $\delta$   
Fig. 1. Power-angle characteristics of compensated line and reactive power of the series capacitor as functions of the angle  $\delta$

На рис. 2 представлена векторная диаграмма токов и напряжений во всех точках электропередачи 500 кВ длиной 687 км при передаче мощности  $1,3P_n$  при подключении неуправляемых реакторов в узлах 2 и 4 с проводимостью  $-0,2$  о.е.

Напряжения в узлах и проводимости реакторов следующие:  $U_1 = 1,008$  о.е.;  $U_2 = 1,082$  о.е.;  $U_3 = 0,933$  о.е.;  $U_4 = 0,811$  о.е.;  $U_5 = 1,0$  о.е.;  $B_{r1} = -0,2$  о.е.;  $B_{r2} = -0,2$  о.е.

Рис. 3, а показывает, как изменяются напряжения на зажимах емкости при изменении передаваемой мощности в случае использования неуправляемых реакторов, компенсирующих зарядную мощность линии. Разница между зеленой и фиолетовой кривыми соответствует падению напряжения на конденсаторной батарее.

Для снижения напряжения на выводах УПК до допустимых значений необходимо компенсировать избыточную зарядную

мощность линии и реактивную мощность, генерируемую батареями (рис. 3, б, в). Для этого на протяженных линиях устанавливаются дополнительные нерегулируемые реакторы на выводах УПК [4, 7, 12]. Одной из целей настоящей работы было выяснить, насколько эффективным окажется применение управляемой поперечной компенсации для обеспечения допустимых значений напряжения на УПК.

#### Анализ условий работы устройств продольной емкостной компенсации

Анализу применения УПК на протяженных линиях электропередачи было уделено значительное внимание в книге Г.Н. Александрова [8]. Поэтому ниже выполнен анализ некоторых соотношений, полученных в [8] и подвергающих критике идею применения УПК.

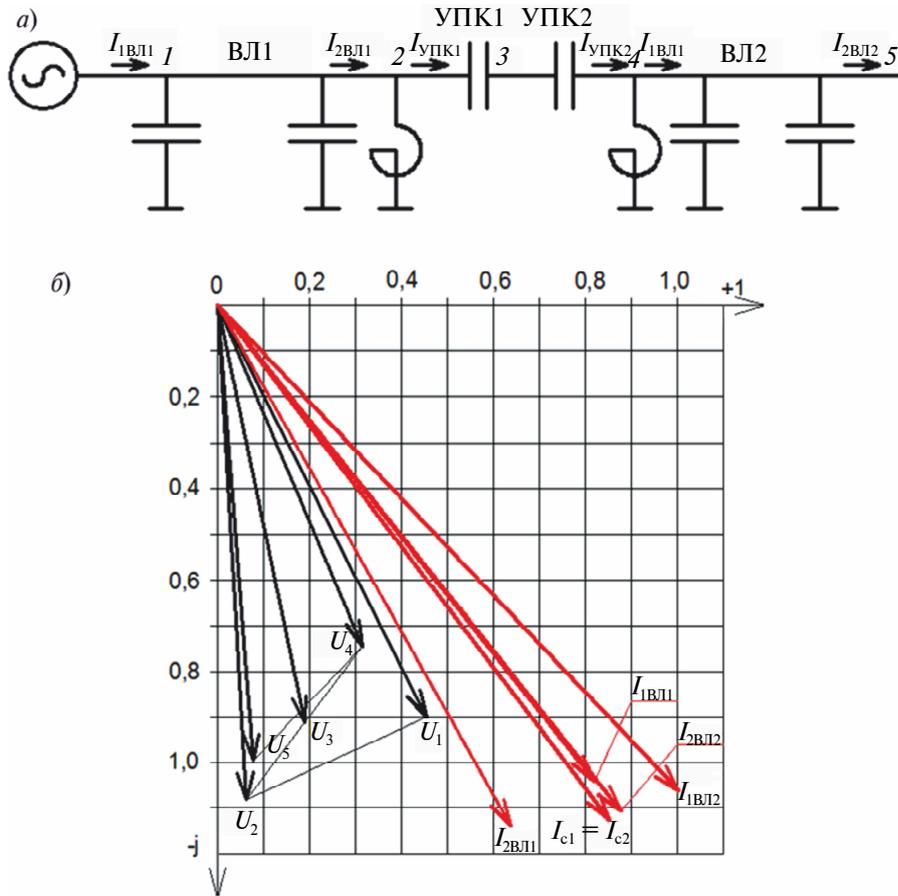


Рис. 2. Схема электропередачи с ШР (а) и векторная диаграмма (б) токов и напряжений при передаче мощности  $1,3P_H$   
 Fig. 2. Line diagram with conventional shunt reactors (a) and vector diagram (b) of voltages and currents for  $1,3P_H$  power transmission

При использовании допущения о равномерном распределении УПК вдоль линии анализ условий ее работы может быть выполнен с помощью волновых уравнений со следующими параметрами:

$$\left. \begin{aligned} \eta_c &= \frac{X_c}{X_L} = \frac{1}{\omega C_{УПК} \omega L_0 l}; \\ L_{0\vartheta} &= L_0(1 - \eta_c); \\ z_{\vartheta} &= \sqrt{L_{0\vartheta}/C_0} = \frac{\sqrt{L_0(1 - \eta_c)}}{\sqrt{C_0}} = z\sqrt{1 - \eta_c}; \\ v_{\vartheta} &= \frac{1}{\sqrt{L_{0\vartheta} C_0}} = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0(1 - \eta_c)}} = \frac{v}{\sqrt{1 - \eta_c}}; \\ \lambda_{\vartheta} &= \frac{\omega l}{v_{\vartheta}} = \omega l \sqrt{L_0 C_0(1 - \eta_c)} = \lambda\sqrt{1 - \eta_c}; \\ P_{H\vartheta} &= \frac{3U_{\Phi \text{ ном}}^2}{z\sqrt{1 - \eta_c}} = \frac{P_H}{\sqrt{1 - \eta_c}}. \end{aligned} \right\} (8)$$

Эквивалентное волновое сопротивление  $z_{\vartheta}$  и эквивалентная волновая длина  $\lambda_{\vartheta}$  линии с распределенными УПК уменьшаются, а натуральная мощность линии  $P_{H\vartheta}$  соответственно увеличивается.

Суммарная мощность УПК на линии при степени компенсации  $\eta_c$  равна

$$\begin{aligned} Q_{УПК} &= 3I^2 \eta_c X = 3I_H^2 \left( \frac{P_{2УПК}}{P_H} \right)^2 \eta_c z \sin \lambda = \\ &= 3U_{\Phi \text{ ном}} I_H \left( \frac{P_{2УПК}}{P_H} \right)^2 \eta_c \sin \lambda = \\ &= P_H \left( \frac{P_{2УПК}}{P_H} \right)^2 \eta_c \sin \lambda. \end{aligned} \quad (9)$$

Все расчеты производились в относительных единицах (за базисные величины приняты номинальное напряжение и волновое сопротивление ВЛ 500 кВ).

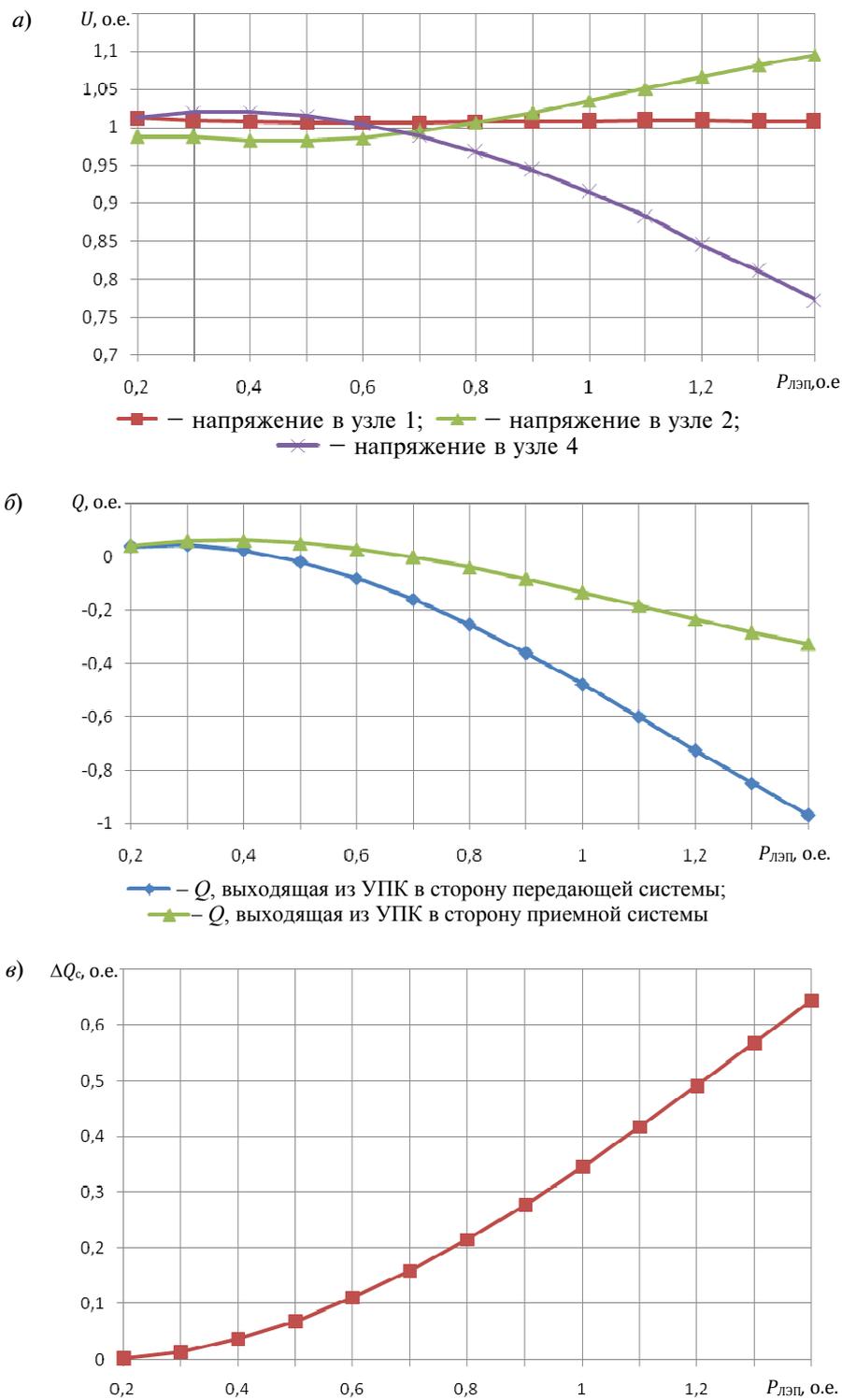


Рис. 3. Напряжения в промежуточных узлах (а), поток реактивной мощности с разных сторон УПК (б) и реактивная мощность, генерируемая УПК (в)  
 Fig. 3. Voltage profile at intermediate points (a), reactive power flow at different sides of capacitor (b), reactive power generated by capacitor (c)

Результаты расчетов по формуле (9) для линии 687 км при степени компенсации  $\eta_c = 0,45$  следующие:

$Q$	$I$
0,19	0,8
0,297	1,0
0,427	1,2
0,581	1,4
0,759	1,6
0,961	1,8
1,186	2,0
1,435	2,2

На рис. 4 приведена суммарная мощность, генерируемая УПК в зависимости от загрузки линии и изменения от 0 до 80 % степени емкостной компенсации индуктивного сопротивления линии, рассчитанные по формуле (9).

Согласно [8] отношение суммарной мощности УПК к приращению допустимой передаваемой по линии мощности при равенстве напряжений по концам линии и

при пренебрежении активным сопротивлением линии равно

$$\begin{aligned} \frac{Q_{\text{УПК}}}{P_{2\text{УПК}} - P_2} &= \frac{Q_{\text{УПК}}}{P_{2\text{УПК}} - P_H} = \eta_c \sin \lambda \frac{P_{2\text{УПК}}^2}{P_H (P_{2\text{УПК}} - P_H)} = \\ &= \eta_c \sin \lambda \frac{P_{2\text{УПК}}}{P_H} \frac{1}{(1 - \frac{P_H}{P_{2\text{УПК}}})} = \\ &= \eta_c \sin \lambda \frac{1}{\sqrt{1 - \eta_c}} \frac{1}{1 - \sqrt{1 - \eta_c}}. \end{aligned} \quad (10)$$

Однако в [8] сделано допущение, что  $\sin(\lambda) \cong \lambda$ . Это достаточно грубое для длинных линий допущение дает заметную ошибку в расчетах. Так, например, для линии 1000 км при таком допущении получаются данные, представленные во втором столбце таблицы, а при правильном расчете результаты значительно отличаются от них (третий столбец таблицы). Таким образом, допущение  $\sin(\lambda) \cong \lambda$  вносит ошибку в расчеты от 0,372 до 0,512 о.е. (17–20 %).

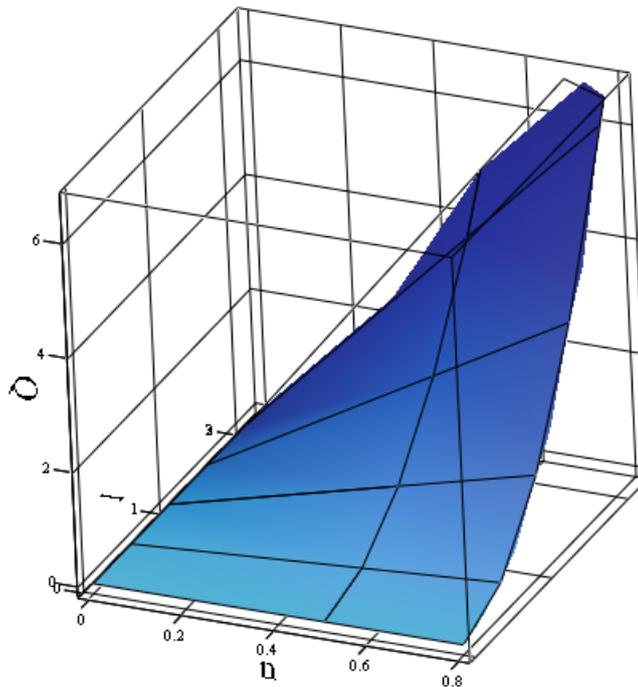


Рис. 4. Зависимость суммарной мощности УПК от степени компенсации и загрузки линии  
 Fig. 4. Reactive power of series device as function of compensation degree and transmitted power

**Соотношение реактивной мощности УПК и активной мощности передаваемой по линии**

**The ratio of compensation device reactive power and the active power transmitted through the line**

$\eta_c$	$Q_{\text{УПК}} / (P_{2\text{УПК}} - P_2)$	
	упрощен.	точн.
0,1	2,151	1,779
0,2	2,218	1,834
0,3	2,299	1,901
0,4	2,399	1,984
0,5	2,528	2,091
0,6	2,703	2,235
0,7	2,959	2,447

В работе [8] произведен анализ падения напряжения на сосредоточенном емкостном сопротивлении, поскольку при увеличении степени компенсации увеличивается падение напряжения на конденсаторной батарее, что приводит к повышению напряжения на зажимах УПК сверх допустимого. Падение напряжения на батарее УПК равно

$$\Delta U_c = IX_c = I_H \frac{P_2}{P_H} \eta_c X = \tag{11}$$

$$= I_H \frac{P_2}{P_H} \eta_c z \sin \lambda = U_2 \frac{P_2}{P_H} \eta_c \sin \lambda,$$

где  $U_2$  – напряжение с одной стороны УПК (со стороны приемной системы). Для линии 687 км на рис. 5 приведен трехмерный график зависимости падения напряжения на УПК от загрузки линии и степени компенсации, построенный по формуле (11).

Напряжение на другой стороне УПК выражено формулой

$$U_X = U_2 \sqrt{1 + \left(\frac{P_2}{P_H}\right)^2 \eta_c^2 \sin^2 \lambda}. \tag{12}$$

Допустимое отношение передаваемой мощности к натуральной при заданном перепаде напряжений на УПК равно [8]

$$\left(\frac{P_2}{P_H}\right)_{\text{доп}} = \frac{\sqrt{\left(\frac{U_X}{U_2}\right)_{\text{доп}}^2 - 1}}{\eta_c \sin \lambda}. \tag{13}$$

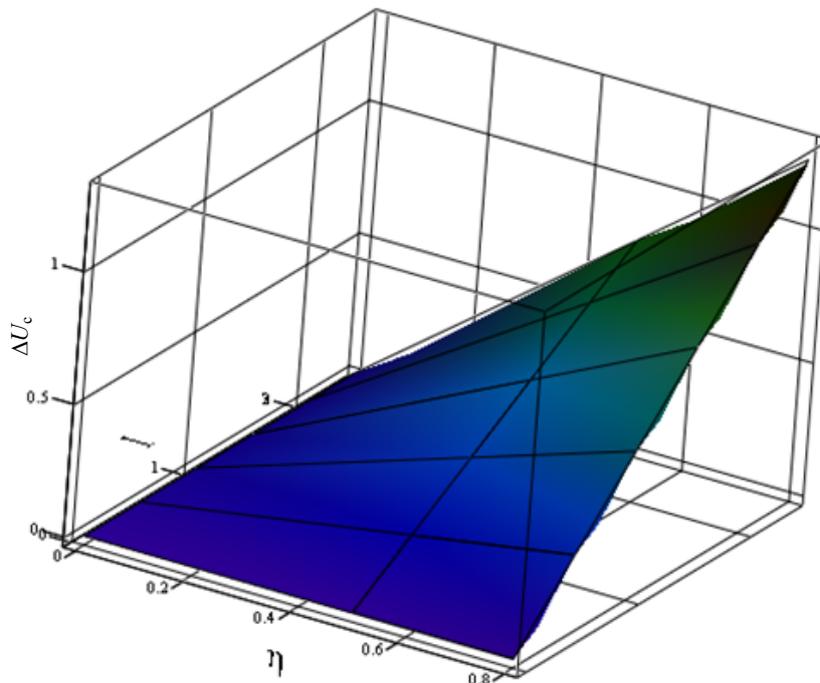


Рис. 5. Зависимость падения напряжения на УПК от степени компенсации и загрузки линии  
Fig. 5. Voltage drop on series device as function of compensation degree and transmitted power

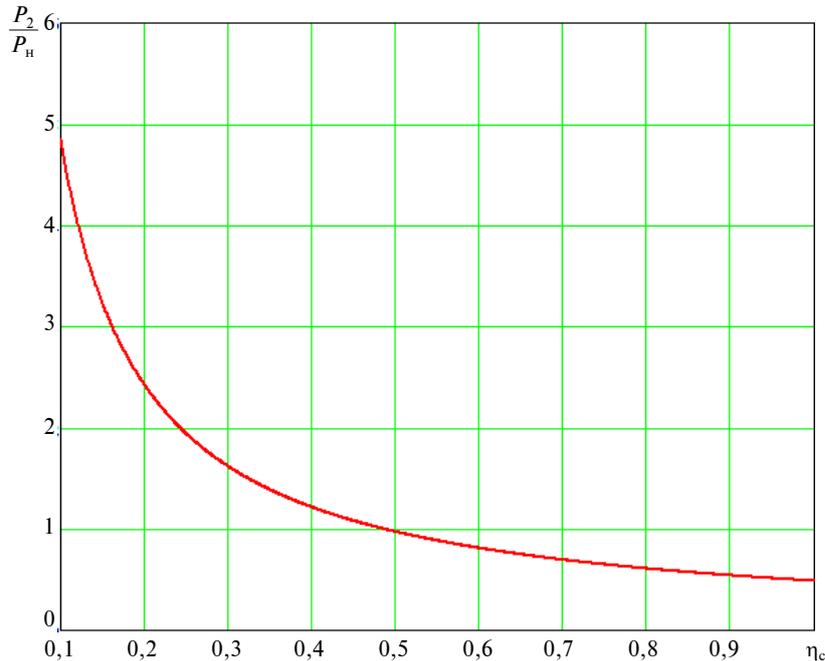


Рис. 6. Зависимость допустимого отношения передаваемой мощности к натуральной от степени продольной емкостной компенсации для линии 687 км  
 Fig. 6. Transmission capacity as a function of compensation degree for 687 km line

Принимая допустимый перепад напряжений на батарее УПК равным 1,05 о.е., получаем зависимость (см. рис. 6) допустимого отношения передаваемой мощности к натуральной от степени компенсации индуктивного сопротивления линии длиной 687 км.

Из рис. 6 следует, что при  $\eta_c = 0,45$  допустимая передаваемая мощность не может превысить величину  $P = 1,1P_n$ . Полученная кривая также входит в явное противоречие с кривыми рис. 5.10 в работе [8], согласно которым максимальная степень компенсации для ВЛ длиной 687 км не может превысить 34 %.

При равенстве напряжений по концам линии отношение допустимой передаваемой мощности при наличии УПК и при отсутствии УПК определяется соотношением

$$\frac{P_{2\text{доп УПК}}}{P_{2\text{доп}}} = \frac{1}{\sqrt{1-\eta_c}} \times \sqrt{\frac{1 - \frac{\rho J l}{U_2 \sin^2 \lambda \sqrt{1-\eta_c}} \left(1 + \frac{\sin 2\lambda \sqrt{1-\eta_c}}{2\lambda \sqrt{1-\eta_c}}\right)}{1 - \frac{\rho J l}{U_2 \sin^2 \lambda} \left(1 + \frac{\sin 2\lambda}{2\lambda}\right)}} \approx \frac{1}{\sqrt{1-\eta_c}}. \quad (14)$$

Согласно этому соотношению получена зависимость (рис. 7) от степени продольной емкостной компенсации отношения допустимой передаваемой по линии мощности к натуральной при наличии и отсутствии УПК.

Как видно, увеличение степени продольной компенсации приводит к значительному возрастанию допустимой передаваемой по линии мощности. Так, например, для линии 687 км при компенсации 45 % индуктивного сопротивления линии можно получить увеличение передаваемой мощности на 40 % выше натуральной.

Допустимая степень продольной емкостной компенсации определяется выражением

$$\eta_c = \sqrt{\left[ \left( \frac{U_1}{U_2} \right)^2 - 1 \right]^2 + \left[ \left( \frac{U_1}{U_2} \right)^2 - 1 \right] \left[ \sin^2 \lambda - \frac{\rho J l}{U_2} \left( 1 + \frac{\sin 2\lambda}{2\lambda} \right) \right]} + 1 - \left( \frac{U_1}{U_2} \right)^2 \left\{ \left[ \sin^2 \lambda - \frac{\rho J l}{U_2} \left( 1 + \frac{\sin 2\lambda}{2\lambda} \right) \right]^2 \right\}^{-1}. \quad (15)$$

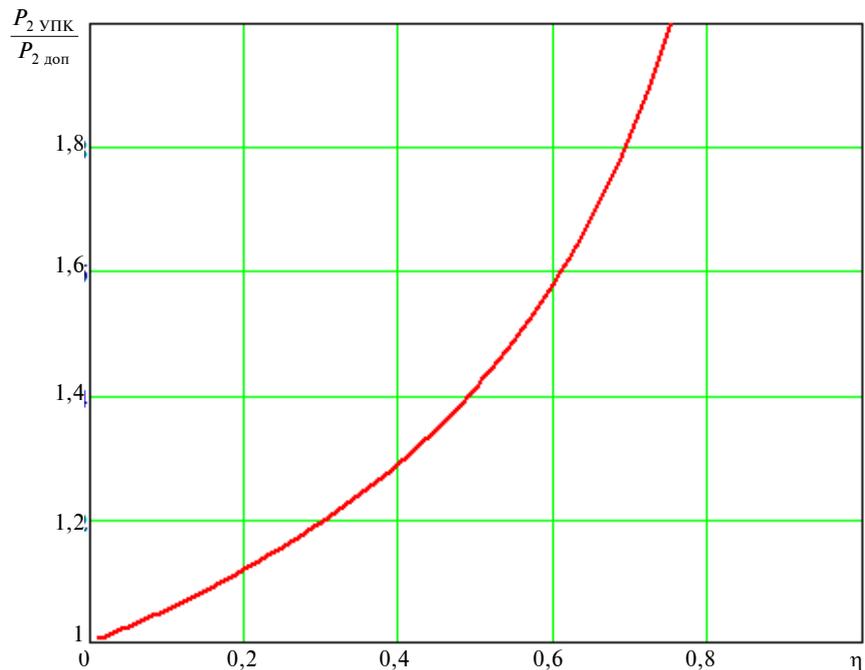


Рис. 7. Зависимость отношения допустимых передаваемых по линии мощностей при наличии и отсутствии УПК от степени продольной емкостной компенсации для линии 687 км

Fig. 7. Dependence of the ratio of permissible power transmission through the line in the presence and absence of compensation device on the degree of series capacitive compensation for the line 687 km

Таким образом, в [8] имеется явное противоречие с зависимостями (13), (14) и (15) нашей работы. Например, для линии длиной 687 км при допустимом перепаде напряжений на батарее УПК 1,05 о.е. и степени компенсации 45 % получаем допустимое отношение передаваемой мощности к натуральной:  $\left(\frac{P_2}{P_H}\right)_{\text{доп}} = 1,0792$ . А отношение допустимой передаваемой мощности при наличии и отсутствии УПК для той же линии при равенстве напряжений по концам линии будет равно  $\left(\frac{P_{2\text{УПК}}}{P_2}\right)_{\text{доп}} = 1,347$ .

Однако согласно (15) нашей работы для данной линии максимальная степень продольной емкостной компенсации равняется 34 %; при указанной степени компенсации может быть достигнуто превышение допустимой передаваемой мощности сверх натуральной на 56 %.

Указанные противоречия заставили выполнить подробный анализ режимов работы протяженных ВЛ с УПК и выявить влияние различных способов поперечной компенсации на режимы напряжений линии и возможное увеличение допустимых передаваемых мощностей.

#### Критическая волновая длина линии, соответствующая нулевому значению степени компенсации

При 100 % компенсации зарядной мощности линии необходимая степень компенсации  $\eta_c$  в зависимости от отношения  $P_2/P_H$  определяется выражением

$$\eta_c = 1 - \frac{P_H}{P_2} \frac{\sqrt{1 - \left[ 2 \left( \frac{U_{\text{экс}}}{U_2} \right)^2 - 1 - \frac{2\rho l}{U_2} \right]^2}}{\lambda}, \quad (16)$$

где  $U_{\text{экс}}$  – экстремальное значение понижения напряжения в середине линии.

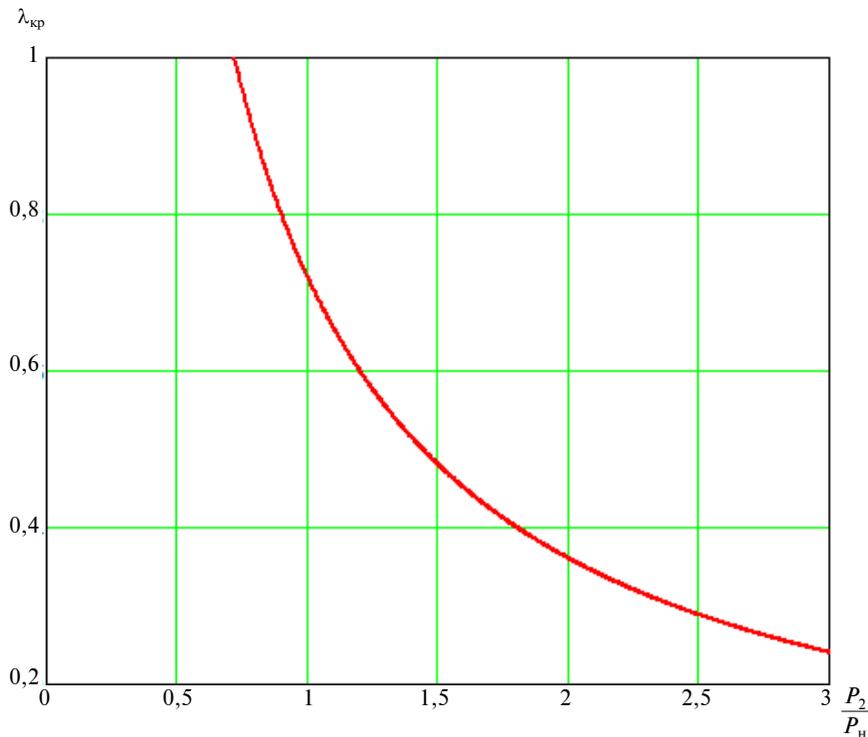


Рис. 8. Зависимость критической волновой длины линии от отношения передаваемой мощности к натуральной  
 Fig. 8. Dependence of the critical wave length of the line on the ratio of transmitted power to surge impedance loading

Из этой формулы при малых длинах линий следует отрицательное значение  $\eta_c$ , т. е. продольная компенсация не нужна. Тогда критическая волновая длина линии, соответствующая нулевому значению  $\eta_c$ , определяется выражением

$$\lambda_{кр} = \frac{P_n}{P_2} \sqrt{1 - \left[ 2 \left( \frac{U_{экс}}{U_2} \right)^2 - 1 - \frac{2\rho J l}{U_2} \right]^2}. \quad (17)$$

Таким образом, при увеличении отношения  $P_2/P_n$  критическая волновая длина линии уменьшается (см. рис. 8). При передаче натуральной мощности критическая волновая длина линии равна 0,722 рад.

Утверждение, что при волновой длине линии 0,722 рад и меньше установка продольной компенсации не нужна, вызывает сомнения и противоречит известной инженерной практике. Данное положение требует проверки. Далее приведены при-

меры расчетов режимов электропередачи 500 кВ длиной 687 км (0,72 рад) с установкой продольной компенсации.

#### Оценка эффективности применения УШР на воздушной линии 500 кВ с УПК

Возможность изменения потребляемой реактивной мощности – важное свойство управляемых реакторов, так как нерегулируемая поперечная индуктивная компенсация всегда уменьшает эквивалентную натуральную мощность линии. К тому же, регулируемые реакторы решают очень важные задачи дальних электропередач – поддержание статической и повышение уровня динамической устойчивости режимов, близких к режиму передачи натуральной мощности.

Результаты расчетов линии 500 кВ длиной 687 км с установкой УШР по концам УПК схожи с расчетами, представленными

ранее для неуправляемых ШР. Однако при установке УШР генерация реактивной мощности УПК оказывается ниже. Еще одно из преимуществ использования УШР – плавное регулирование мощности, в то время как обычные ШР необходимо коммутировать при изменении передаваемой мощности, что приводит к скачкам напряжения.

Дополнительной иллюстрацией особенностей передачи мощности по линии с УПК является векторная диаграмма токов и напряжений (рис. 9) в разных точках электропередачи 500 кВ длиной 687 км при передаче мощности  $1,3P_n$  при подключении управляемых реакторов в узлах 2 и 3.

Напряжения в узлах и проводимости реакторов следующие:  $U_1 = 1,044$  о.е.;  $U_2 = 1,046$  о.е.;  $U_3 = 0,943$  о.е.;  $U_4 = 0,89$  о.е.;  $U_5 = 1,0$  о.е.;  $B_{r1} = -0,42$  о.е.;  $B_{r2} = -0,08$  о.е.

Характерной особенностью режима такой линии электропередачи является различие уровней напряжений на участках, примыкающих к передающей и принимающей энергосистемам. Из-за понижения напряжения за УПК величина угла на правом участке ВЛ превышает аналогичную величину на левом участке ( $28,82^\circ$  против  $22,95^\circ$ ); соответственно различаются и величины токов ( $1,46$  против  $1,28$  о.е.).

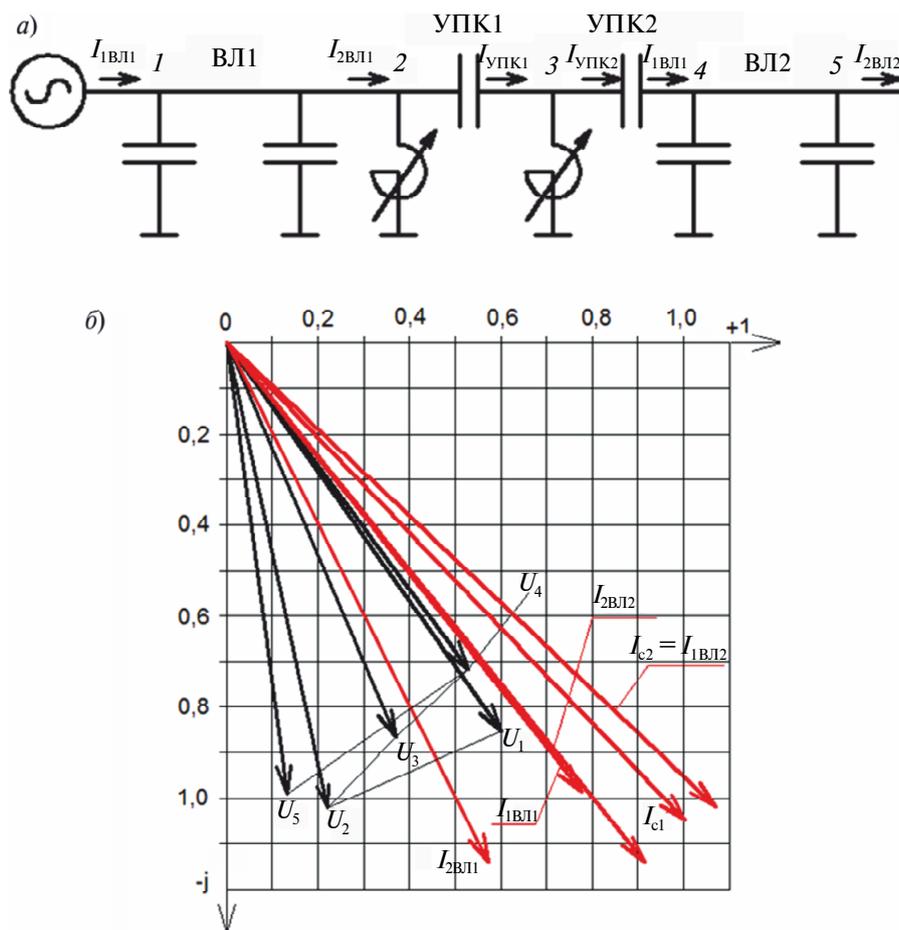


Рис. 9. Схема электропередачи с УШР (а) и векторная диаграмма (б) токов и напряжений при передаче мощности  $1,3P_n$   
 Fig. 9. Line diagram with controlled shunt reactors (a) and vector diagram (b) of voltages and currents for  $1.3P_{sil}$  power transmission

Обобщая полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

для рассматриваемой линии можно отказаться от реактора в точке за УПК, так как его функции берет на себя реактор в средней точке. К тому же при отказе установки реактора в узле 4 общая мощность реакторов становится меньше;

установка УПК повышает пропускную способность линии на 30–40 % и более. Таким образом, расчеты опровергают утверждение работы [8] о том, что для линии 500 кВ длиной 687 км установка УПК не имеет смысла. Реализация режимов передачи больших мощностей ограничивается понижением напряжения за емкостью.

Как было отмечено ранее, в [8] утверждается, что при установке на линии УШР и УПК в режиме передачи натуральной мощности проводимость реакторов становится равной нулю. Полученные результаты расчетов режимов работы электропередачи, изображенной на рис. 2 и 9, доказывают обратное: в режиме передачи натуральной мощности устройства продольной компенсации генерируют значительное количество реактивной мощности. Поток реактивной мощности в данной модели оказывается направленным в сторону передающей системы (электростанции), из-за чего в узле перед УПК наблюдается значительное увеличение напряжения; для его понижения реакторы должны потреблять избыток реактивной мощности. Так, например, для поддержания напряжения в узле 2 необходимо потребить 290 Мвар.

Следует также отметить, что установка реактора в средней точке между емкостями позволяет передать по линии большую мощность ( $1,55P_n$ ). Это достигается тем, что при помощи реактора в средней точке можно добиться некоторого снижения напряжения, что делает возможным обеспечение допустимого значения напряжения на УПК со стороны передающей системы.

В целом необходимо признать, что использование УШР вместо нерегулируемых ШР не приводит к существенному увеличению передаваемых мощностей, но его несомненным преимуществом является

плавное регулирование напряжений в узловых точках электропередачи.

Полученные результаты указывают на недостатки применения УПК с большим емкостным сопротивлением, поскольку возможности повышения пропускной способности электропередачи с такой УПК ограничиваются перепадом напряжения на емкости.

### Выводы

Проведено аналитическое исследование режимов работы линий электропередачи переменного тока с устройствами продольной емкостной компенсации.

Показано, что применение устройств продольной компенсации имеет ограничения, определяемые отклонениями напряжения в узлах их примыкания.

Значительная реактивная мощность, генерируемая емкостью УПК при протекании рабочих токов, требует применения устройств поперечной компенсации. Находящиеся в эксплуатации УПК используют для этой цели только неуправляемые шунтирующие реакторы.

Полученные результаты указывают на недостатки применения УПК с большим емкостным сопротивлением ( $X_c > 0,4X_n$ ), поскольку возможности повышения пропускной способности электропередачи с таким УПК ограничиваются перепадом напряжения на емкости. В случае необходимости компенсации индуктивного сопротивления протяженных ВЛ целесообразен переход к использованию нескольких УПК с уменьшенным емкостным сопротивлением каждой из них.

Выполнен анализ режимов работы одной из известных компенсированных электропередач с несколькими УПК. Показано, что регулирование реактивной мощности при изменении загрузки линии и управление уставками УШР по напряжению может способствовать существенному увеличению их пропускной способности.

При существующей структуре ценообразования на линейное и подстанционное оборудование повышение пропускной способности линии за счет сооружения УПК более выгодно, чем за счет применения глубокого расщепления проводов ВЛ.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марченко Е.А., Розовский Ю.А., Шур С.С. Продольная емкостная компенсация линий электропередачи. М., Л.: ГЭИ, 1957. 48 с.
2. Hingorani N.G., Gyugyi L. Understanding FACTS. Concept and technology of Flexible AC Transmission Systems. New York: IEEE press, 2000. 432 p.
3. Eremia M. Advanced Solutions in Power Systems, HVDC, FACTS, and Artificial Intelligence. Wiley: IEEE Press, 2016. 1063 p.
4. Gama C., Tenorio R. Improvements for power systems performance: modeling, analysis and benefits of TCSCs // IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. 2000. Vol. 2. P. 1462–1467.
5. Голов В.П., Мартиросян А.А., Москвин И.А., Кормилицын Д.Н. Использование управляемых электропередач с регулируемой продольной компенсацией для реализации адаптивных сетей // Электротехника. 2017. № 2. С. 60–66.
6. Шакарян Ю.Г., Фокин В.К., Лихачев А.П. Установившиеся режимы работы электроэнергетических систем с устройствами FACTS // Электричество. 2013. № 12. С. 2–13.
7. Хазов М.А., Черняев П.В., Беляев А.Н. Исследование режимов и устойчивости межсистемной связи на основе гибкой линии электропередачи переменного тока с управляемой продольной и поперечной компенсацией // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. Т. 23. № 4. С. 74–88. DOI: 10.18721/JEST.230407.
8. Александров Г.Н. Передача электрической энергии. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 411 с.
9. Smolovik S.V., Belyaev A.N., Bryantsev A.M. Magnetically controlled shunt reactor use in 110–500 kV power grids // CIGRE Session 2016, B4-209.
10. Lyamov A., Makarova M., Smolovik S.V. Controllable shunt reactor deployment effect on power station stability indices // 2015 IEEE Eindhoven PowerTech, Eindhoven, 2015. P. 1–4.
11. Беляев А.Н., Смоловик С.В. О быстродействии управляемых шунтирующих реакторов с точки зрения статической и динамической устойчивости электроэнергетических систем // Электрические станции. 2014. № 1. С. 27–30.
12. Беляев А.Н., Брянецев А.М., Смоловик С.В. Применение управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов в электроэнергетических системах // Энергетик. 2016. № 8. С. 9–13.
13. Кочкин В.И., Шакарян Ю.Г. Применение гибких (управляемых) систем электропередачи переменного тока в энергосистемах. М.: ТРУС ПРЕСС, 2011. 312 с.
14. Manjusha K., Balamurugan S., Kirthika N. Real power flow control in transmission system using TCSC // 2016 Biennial International Conference on Power and Energy Systems: Towards Sustainable Energy (PESTSE). Bangalore, 2016. P. 1–5.
15. Lei B., Fei S., Wu X. Nonlinear coordinated control of generator excitation and SVC in multi-machine power systems using energy-shaping method // 2014 International Conference on Information Science, Electronics and Electrical Engineering. Sapporo, 2014. P. 200–204.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ЛЮЛИНА Мария Александровна** – старший преподаватель Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: lyulinam@mail.ru

**ПЕРШИКОВ Георгий Анатольевич** – кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: georg\_p@mail.ru

**СМИРНОВ Александр Александрович** – кандидат технических наук ведущий специалист «Транснефтьэлектросетьсервис»

E-mail: mulller@list.ru

**БЕЛЯЕВ Андрей Николаевич** – доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: andrey.belyaev@gmail.com

**СМОЛОВИК Сергей Владимирович** – доктор технических наук заместитель начальника отдела акционерного общества «Научно-технический центр Единой энергетической системы»

E-mail: smol401@yandex.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 03.02.2018

## REFERENCES

- [1] **Marchenko E.A., Rozovskii Iu.A., Shur S.S.** Prodol'naiia emkostnaia kompensatsiia linii elektroperedachi. M., L.: GEI, 1957. 48 s. (rus.)
- [2] **Hingorani N.G., Gyugyi L.** Understanding FACTS. Concept and technology of Flexible AC Transmission Systems. New York: IEEE press, 2000. 432 p.
- [3] **Eremia M.** Advanced Solutions in Power Systems, HVDC, FACTS, and Artificial Intelligence. Wiley: IEEE Press, 2016. 1063 p.
- [4] **Gama C., Tenorio R.** Improvements for power systems performance: modeling, analysis and benefits of TCSCs. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*. 2000. Vol. 2. P. 1462–1467.
- [5] **Golov V.P., Martirosian A.A., Moskvina I.A., Kormilitsyn D.N.** Ispol'zovanie upravliaemykh elektroperedach s reguliruemoi prodol'noi kompensatsiei dlia realizatsii adaptivnykh setei. *Elektrotehnika*. 2017. № 2. S. 60–66. (rus.)
- [6] **Shakarian Iu.G., Fokin V.K., Likhachev A.P.** Ustanovivshiesia rezhimy raboty elektroenergeticheskikh sistem s ustroistvami FACTS. *Elektrichestvo*. 2013. № 12. S. 2–13. (rus.)
- [7] **Khazov M.A., Chernyaev P.V., Belyaev A.N.** Analysis of operating conditions and stability of interconnections based on flexible AC transmission lines with controlled series and shunt compensation devices, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 23(04)(2017) 74–88. DOI: 10.18721/JEST.230407. (rus.)
- [8] **Aleksandrov G.N.** Peredacha elektricheskoi energii. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2007. 411 s. (rus.)
- [9] **Smolovik S.V., Belyaev A.N., Bryantsev A.M.** Magnetically controlled shunt reactor use in 110–500 kV power grids. *CIGRE Session 2016*, B4–209.
- [10] **Lyamov A., Makarova M., Smolovik S.V.** Controllable shunt reactor deployment effect on power station stability indices. *2015 IEEE Eindhoven PowerTech, Eindhoven*, 2015. P. 1–4.
- [11] **Beliaev A.N., Smolovik S.V.** O bystrodeistvii upravliaemykh shuntiruiushchikh reaktorov s tochki zreniia staticheskoi i dinamicheskoi ustoychivosti elektroenergeticheskikh sistem. *Elektricheskie stantsii*. 2014. № 1. S. 27–30. (rus.)
- [12] **Beliaev A.N., Briantsev A.M., Smolovik S.V.** Primenenie upravliaemykh podmagnichivaniem shuntiruiushchikh reaktorov v elektroenergeticheskikh sistemakh. *Energetik*. 2016. № 8. S. 9–13. (rus.)
- [13] **Kochkin V.I., Shakarian Iu.G.** Primenenie gibkikh (upravliaemykh) sistem elektroperedachi peremennogo toka v energosistemakh. M.: TORUS PRESS, 2011. 312 s. (rus.)
- [14] **Manjusha K., Balamurugan S., Kirthika N.** Real power flow control in transmission system using TCSC. *2016 Biennial International Conference on Power and Energy Systems: Towards Sustainable Energy (PESTSE)*. Bangalore, 2016. P. 1–5.
- [15] **Lei B., Fei S., Wu X.** Nonlinear coordinated control of generator excitation and SVC in multi-machine power systems using energy-shaping method. *2014 International Conference on Information Science, Electronics and Electrical Engineering*. Sapporo, 2014. P. 200–204.

## AUTHORS

**LYULINA Mariia A.** – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university

E-mail: lyulinam@mail.ru

**PERSHIKOV Georgii A.** – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university

E-mail: georg\_p@mail.ru

**SMIRNOV Aleksandr A.** – Transneftelektroservis

E-mail: muller@list.ru

**BELYAEV Andrei N.** – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university

E-mail: andrey.belyaev@gmail.com

**SMOLOVIK Sergei V.** – Joint Stock Company «Scientific and Technical Center of Unified Power System»

E-mail: smol401@yandex.ru

Received: 03.02.2018



DOI: 10.18721/JEST.240107  
УДК 621.3.048.1

*Н.М. Журавлева<sup>1</sup>, Д.В. Кизеветтер<sup>1</sup>, А.С. Резник<sup>1</sup>,  
Е.Г. Смирнова<sup>2</sup>, А.К. Хрипунов<sup>3</sup>*

1 – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

2 – Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова,  
Санкт-Петербург, Россия

3 – Институт высокомолекулярных соединений РАН, Санкт-Петербург, Россия

### **ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БУМАЖНО-ПРОПИТАННОЙ ИЗОЛЯЦИИ ПРИ МОДИФИКАЦИИ ЦЕЛЛЮЛОЗНОЙ ОСНОВЫ БИОПОЛИМЕРОМ**

В статье рассмотрена возможность повышения электрофизических свойств и нагревостойкости целлюлозной диэлектрической бумаги (компонента высоковольтной бумажно-пропитанной изоляции) за счет использования биополимера как в качестве основы, так и для модификации материала из традиционного растительного сырья. В ходе научных исследований получены опытные образцы изоляционных бумаг, обладающие преимуществами по ряду электрофизических свойств, позволяющие повысить эксплуатационные характеристики твердого диэлектрика. Установлено влияние модификации на устойчивость твердого диэлектрика к длительному термовоздействию в среде электроизоляционной пропитывающей жидкости. Рассмотрена перспективность технологического приема дезинтегрирования биополимера, что открывает возможность его применения в промышленном производстве целлюлозных диэлектриков. Показана целесообразность создания целлюлозных диэлектриков нового поколения, отличающихся повышенными электрофизическими характеристиками, как полноценной альтернативы растительной целлюлозе, получаемой из хвойных пород древесины.

БУМАЖНО-ПРОПИТАННАЯ ИЗОЛЯЦИЯ; ЦЕЛЛЮЛОЗА; БИОПОЛИМЕР; МОДИФИКАЦИЯ; СИЛОВОЙ ТРАНСФОРМАТОР.

*Ссылка при цитировании:*

Н.М. Журавлева, Д.В. Кизеветтер, А.С. Резник, Е.Г. Смирнова, А.К. Хрипунов. Электрофизические характеристики бумажно-пропитанной изоляции при модификации целлюлозной основы биополимером // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 1. С. 75–86. DOI: 10.18721/JEST.240107.

*N.M. Zhuravleva<sup>1</sup>, D.V. Kiesewetter<sup>1</sup>, A.S. Reznik<sup>1</sup>,  
E.G. Smirnova<sup>2</sup>, A.K. Khripunov<sup>3</sup>*

1 – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

2 – Saint Petersburg state forest technical university under name of S.M. Kirov,  
St. Petersburg, Russia

3 – Institute of macromolecular compounds RAS, St. Petersburg, Russia

### **ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF PAPER-IMPREGNATED INSULATION BY MODIFYING THE CELLULOSE BASE WITH A BIOPOLYMER**

In this paper, we have considered the possibility of improving the electrophysical properties and heat resistance of dielectric cellulose paper (a component of high-voltage paper-impregnated insulation) by using a biopolymer as a basis and as a modifier for traditional cel-

lulose. We have obtained prototypes of insulating papers with enhanced electrophysical properties allowing to improve the performance characteristics of a solid dielectric. We have established that modification affects the stability of a solid dielectric against long thermal exposure in an electrical insulation fluid. We have considered the prospects of the technological method of biopolymer disintegration, which can be used in industrial production of cellulosic dielectrics. We have established that it is expedient to create new-generation cellulose dielectrics, which are a valuable alternative to plant cellulose obtained from coniferous woods, differing by their increased electrophysical characteristics.

PAPER-IMPREGNATED INSULATION; CELLULOSE; BIOPOLYMER; MODIFICATION; POWER TRANSFORMER.

*Citation:*

N.M. Zhuravleva, D.V. Kiesewetter, A.S. Reznik, E.G. Smirnova, A.K. Khripunov. Electrophysical characteristics of paper-impregnated insulation by modifying the cellulose base with a biopolymer, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 24(01)(2018) 75–86, DOI: 10.18721/JEST.240107.

### Введение

Одна из серьезнейших проблем современных энергосистем состоит в необходимости повышения надежности и работоспособности таких силовых объектов, как высоковольтные трансформаторы и кабели. Их отказы и различные техногенные инциденты, связанные с ними, приводят к существенным сбоям в энергоснабжении и значительным материальным потерям. Применительно к силовым трансформаторам (СТ) ситуация осложнена отсутствием возможности достоверно оценить состояние базовой бумажно-пропитанной изоляции (БПИ) и дать четкий прогноз её остаточного ресурса вследствие непредсказуемости возникновения коротких замыканий [1]. Действительно, если разрушение пропитывающей среды в процессе эксплуатации негативно сказывается на диэлектрических характеристиках БПИ и способствует дальнейшему нагреву изоляции (вследствие роста диэлектрических потерь и в результате нарушения теплоотвода при осаждении шлама)<sup>1</sup>, то деструктивные процессы в целлюлозном компоненте сопровождаются морфологическими изменениями и потерей механической прочности электроизоляционной бумаги (ЭИБ). Поэтому динамические усилия, возникающие

при коротких замыканиях и вызывающие относительное движение проводников, — дополнительный опасный фактор, особенно по отношению к бумаге пониженной прочности [2, 3]. В то же время статистически доказано, что именно старение БПИ чаще всего является причиной, приводящей к крайне нежелательным последствиям, включая отказы, взрывы и пожары [3–5]<sup>2, 3</sup>. Иными словами, пригодность к полноценной эксплуатации идентичных СТ со временем может быть в значительной мере разной. Очевидна необходимость повышения механической прочности и нагревостойкости целлюлозного материала, а также изучения факторов, влияющих на указанные показатели ЭИБ [6–8]<sup>3</sup>.

Особого внимания заслуживает модификация электроизоляционной бумаги, в частности со структурообразующими компонентами [9]<sup>2, 3</sup>. Хорошо известно<sup>2</sup>, что при производстве целлюлозных диэлектриков в нашей стране используется электроизоляционная целлюлоза (ЭИЦ) сульфатной варки, которая составляет основу

<sup>1</sup> Савина А.Ю. Усовершенствование системы оптического мониторинга электроизоляционных масел: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2013. 183 с.

<sup>2</sup> См. также: Маслякова А.В. Повышение электрофизических характеристик и устойчивости к термостарению целлюлозосодержащего диэлектрика путем его модификации хитозаном: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2005. 204 с.

<sup>3</sup> См. также: Резник А.С. Повышение термостабильности компонентов высоковольтной бумажно-пропитанной изоляции путем структурной модификации целлюлозной бумаги: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2017. 182 с.



трансформаторной, кабельной и конденсаторной бумаги. Под «модификацией основы» обычно понимают введение в состав материала дополнительных компонентов, зачастую инородных по отношению к целлюлозе, с целью совершенствования тех или иных свойств диэлектрика, что может отрицательно сказаться на не менее значимых характеристиках ЭИБ. Так, например, было предложено [6] использовать мелкодисперсный порошок оксида алюминия для повышения природной сорбционной активности целлюлозных бумаги и картона, т. е. способности связывать продукты старения компонентов БПИ, ионы металлов и ионогенные примеси (тем самым обеспечивая некоторую стабилизацию изоляции по параметру  $\text{tg } \delta$ )<sup>2</sup>. Однако частицы модификатора с абразивными краями удерживались в целлюлозной основе механически, снижая прочность указанных диэлектриков и усугубляя экологические проблемы вследствие высыпания частиц адсорбента. В то же время совершенствованию свойств ЭИБ и повышению работоспособности БПИ в перспективе может способствовать развитие работ по использованию в высоковольтной изоляции так называемой бактериальной целлюлозы (БЦ) — биополимера, получаемого, в частности, дезинтеграцией нано-гель-пленки целлюлозы *Glucanacetobacter xylinus* (НГП ЦГХ) [9]<sup>4</sup>. Являясь полным аналогом растительной целлюлозы (РЦ), ЦГХ по надмолекулярной организации имеет существенные отличия, в частности: диаметр кристаллических микрофибрилл составляет в среднем всего 50–60 Å, а внутренняя удельная поверхность характеризуется чрезвычайной развитостью (не менее 500 м<sup>2</sup>/г). Известно, что сетка нано-лент НГП ЦГХ активно удерживает воду (100 г на 1 г сухого полимера) [10], которая может быть полностью или частично заменена на лекарственные препараты, разнообразные органические и неорганические соедине-

<sup>4</sup> См. также: Архарова Н.А. Структура композитов на основе целлюлозы *glucanacetobacter xylinus* и наночастиц различной природы: дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2017. 142 с.

ния, масла или иные элементы, необходимые для получения различных композиционных материалов [11]<sup>4</sup>, включая диэлектрики [9]<sup>3,5</sup>, что представляется актуальной и практически полезной задачей.

**Цель нашей работы** — изучение свойств целлюлозных диэлектриков, полученных с применением нано-гель-пленки ЦГХ, их совместимости с жидкими диэлектриками, а также целесообразности использования перспективных электроизоляционных материалов для повышения работоспособности высоковольтной БПИ.

#### **Объекты исследования**

нано-гель-пленки ЦГХ различной толщины;

бумагоподобный материал из ЦГХ (для дезинтеграции целлюлозы использовался профессиональный блендер JTC OmniBlend I, модель ТМ-767);

образцы бумаги из электроизоляционной целлюлозы, модифицированные ЦГХ (для роспуска и размола целлюлозы использовался лабораторный ролл Валлея);

образцы электроизоляционной бумаги промышленного производства.

Для пропитки целлюлозных материалов применялось нефтяное трансформаторное масло марки ГК Ангарского нефтеперерабатывающего завода, широко используемое в высоковольтном трансформаторостроении.

Толщина  $h$  целлюлозных образцов варьировалась в пределах от 0,003 мм (НГП ЦГХ) до 0,142 мм (ЭИБ из растительной целлюлозы).

#### **Методика измерений**

**Определение кратковременной электрической прочности ( $E_{\text{пр}}$ , кВ/мм) ЭИБ.** Оценка  $E_{\text{пр}}$  (по 10–20 значений на точку) осуществлялась с использованием высоковольтной пробивной установки (скоростью подъема напряжения составляла 3 кВ/с) и электродной системы «шар (диаметр 6 мм) — плоскость» (диаметр 25 мм).

<sup>5</sup> См. также: Патент РФ. № 2415221. Способ получения электроизоляционной бумаги / Журавлева Н.М., Сажин Б.И., Смирнова Е.Г., Хрипунов А.К., Ткаченко А.А. Приоритет. 30.04.2010.

**Определение механической прочности на разрыв.** Для сравнительной оценки предела механической прочности на разрыв  $\sigma_p$ , МПа целлюлозных образцов применялся испытательный стенд серии ES (модель ESM301/ESM301L) компании MAPK-10. При испытании образцов малой толщины использовалось разрывное устройство УТС 201-10.

Испытывались фрагменты материала (ширина 15 мм, длина 60 мм) по 5–20 образцов на точку.

**Определение коэффициента относительного светопропускания проб жидкого диэлектрика ( $K_{oc\ 458}$ , %).** Измерения (по 3–5 замеров на точку) проводились с использованием микроколориметра МКМФ-1 в видимом диапазоне длин волн ( $\lambda = 458$  нм). В качестве эталона, светопропускание которого было принято за 100 %, использовался глицерин.

**Оценка совместимости компонентов БПИ.** Анализировалось изменение  $K_{oc\ 458}$  проб электроизоляционной жидкости в процессе ускоренного термостарения (при температуре 140 °С в закрытых стеклянных бюксах), которое проводилось в контакте с исследуемыми целлюлозными диэлектриками и спиральными медными проводниками, активизирующими термоокислительную деструкцию образцов (в дальнейшем – «медный катализатор»). Присутствие «меди» обусловлено контактом компонентов БПИ с медными проводниками СТ.

**Мониторинг состояния фрагментов ЭИБ при помощи увеличительной техники.** Анализ морфологических особенностей образ-

цов ЭИБ в сухом состоянии проводился при помощи сканирующего электронного микроскопа (SEM) SUPRA-55VP-25-78 (Zeiss) – по 20 изображений на фрагмент материала с различной степенью увеличения. Степень разрушения целлюлозных диэлектриков в процессе термостарения в среде электроизоляционной жидкости (в среднем по 10–20 микрофотографий на точку) оценивалась при помощи микроскопа «Analyt» и камеры «Celestron» (Digital microscope image) с выводом изображения на монитор персонального компьютера.

**Определение состава по волокну.** Для анализа волокна использовали прибор «Fiber – Tester» фирмы «Lorentz & Wettre» и «LDW–STSI» (Швеция).

### Полученные результаты

С целью изучения диэлектрических свойств опытного материала на основе биополимера была определена кратковременная электрическая прочность образцов нано-гель-пленки ЦГХ различной толщины. На рис. 1, а показан внешний вид НГП ЦГХ (в дальнейшем – НГП) в водной среде, а на рис. 1, б – один из исследованных образцов (толщина 0,016 мм) указанной нативной НГП, полученной в результате поверхностного культивирования биосинтеза и очищенной до химически чистого состояния от следов питательной среды и клеток GX с последующим высушиванием на стекле при комнатной температуре.

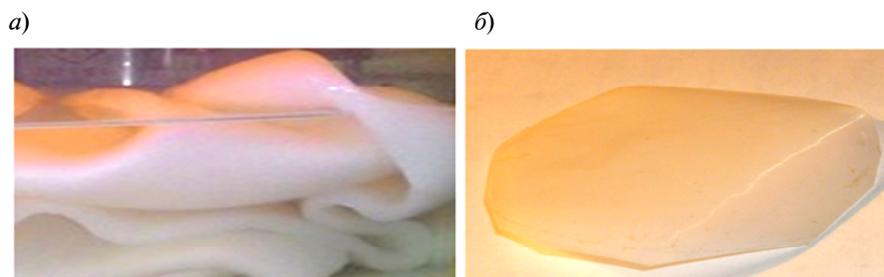


Рис. 1. НГП ЦГХ в водной среде (а) и пример опытного образца целлюлозного диэлектрика из НГП ЦГХ толщиной 0,016 мм (б)

Fig. 1. NGF CGX in water (a) prototype of NGF CGX cellulose dielectric 0,016 mm thick (b)

В табл. 1 приведены значения  $E_{пр}$  (средние из 10 измерений) образцов НПП различной толщины  $h$  и (для сравнения) промышленной электроизоляционной конденсаторной бумагой разных производителей. Разброс ( $K_{вар}$ , %) значений характеристики (более 15 %) обусловлен отсутствием отработанной технологии получения опытного материала. Однако представленные результаты, на наш взгляд, интересны тем, что демонстрируют возможность получения целлюлозных диэлектриков малой толщины.

Таблица 1  
Значения  $E_{пр}$  целлюлозных диэлектриков

Table 1  
The average value of the electric strength  $E_{пр}$  of cellulose dielectrics

Образец диэлектрика	$h$ , мкм	$E_{пр}$ , кВ/мм	$K_{вар}$ , %
ЭИБ китайского производства	8,0	44	5,0
ЭИБ российского производства	8,0	54	6,1
НПП ЦГХ	3,0	82	16,7
	3,5	84	20,6
	5–7	58	27
	8,0	61	19,5
	16,0	48	6,3
	20,5	38	9,8

Анализ результатов (табл. 2) определения предела механической прочности на разрыв конденсаторной электроизоляционной бумаги и опытного целлюлозного диэлектрика одинаковой толщины (0,008 мм) позволяет констатировать превосходство материала из НПП ЦГХ перед ЭИБ традиционного исполнения, несмотря на значительный разброс значений  $\sigma_p$ .

Таблица 2  
Значения предела механической прочности на разрыв целлюлозных диэлектриков

Table 2  
The average value of the maximum mechanical tensile strength of cellulose dielectrics

Образец диэлектрика		$\sigma_p$ , МПа	$K_{вар}$ , %
Конденсаторная бумага промышленного производства	1	117	12,5
	2	121	10,3
НПП ЦГХ	1	248	15,8
	2	252	16,0

Далее определялась кратковременная электрическая прочность (по 10 пробоев на точку) целлюлозных образцов толщиной 0,140 мм – см. рис. 2 и табл. 3:

1 – электроизоляционная бумага марки К140 промышленного производства;

2 – опытная ЭИБ состава 90 % ЭИЦ + 10 % ЦГХ [12];

3 – опытная ЭИБ состава 100 % ЦГХ;

4 – нативная НПП ЦГХ, высушенная на воздухе.

Таблица 3

Кратковременная электрическая прочность целлюлозных диэлектриков

Table 3

The electric strength of cellulose dielectrics

Образец диэлектрика	$E_{пр.ср}$ , кВ/мм	$K_{вар}$ , %
1 – 100 % ЭИЦ	9,1	5,5
2 – 90 % ЭИЦ + 10 % ЦБХ	13,7	3,9
3 – 100 % ЦГХ	21,7	13,0
4 – НПП ЦБХ	24,9	10,1

При изготовлении образцов 2 и 3 для роспуска и размола сырья использовался ролл Валлея.

Диаграмма (рис. 2), в которой за 100 % принято значение  $E_{пр}$  эталона (промышленная трехслойная ЭИБ марки К140), демонстрирует существенное превосходство (как минимум в 2 раза) материалов из 100 % ЦГХ НПП ЦГХ над традиционной ЭИБ и в 1,5 раза – над образцом, содержащим в композиции 10 % ЦГХ.

Предел механической прочности на разрыв определялся для образцов 1–3 (по 10 значений на точку) в процессе ускоренного термостарения в воздушной среде при температуре 140° (рис. 3).

НПП ЦГХ не испытывалась вследствие недостаточного количества материала, но известно, что она способна выдерживать до 10 ГПа на разрыв [11]. Для образца из 100 % ЭИЦ зафиксировано ожидаемое снижение значения характеристики (на 28 %) на момент окончания термостарения. Образец бумаги, содержащий 10 % ЦГХ, показал повышенную устойчивость к термовоздействию: снижение  $\sigma_p$  составило 6,5 %, тогда как прочность ЭИБ из 100 % ЦГХ за указанный период времени практически не изменилась.

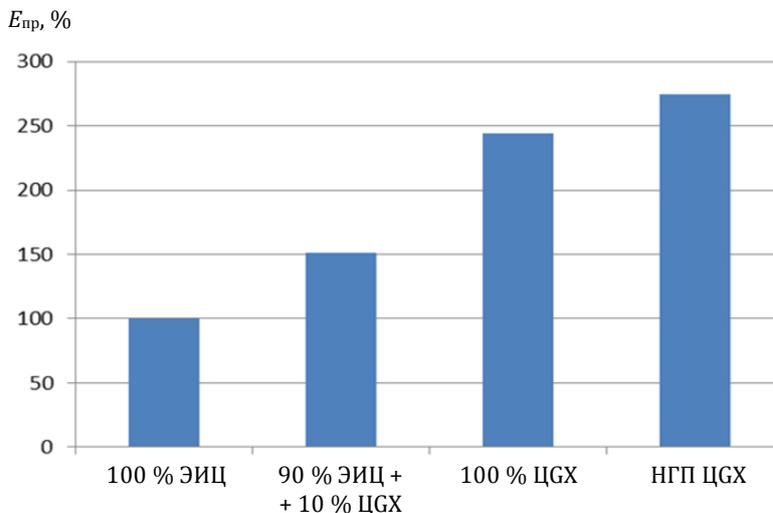


Рис. 2. Кратковременная электрическая прочность  $E_{пр}$  целлюлозных диэлектриков  
 Fig. 2. The electric strength  $E_{пр}$  of cellulose dielectrics

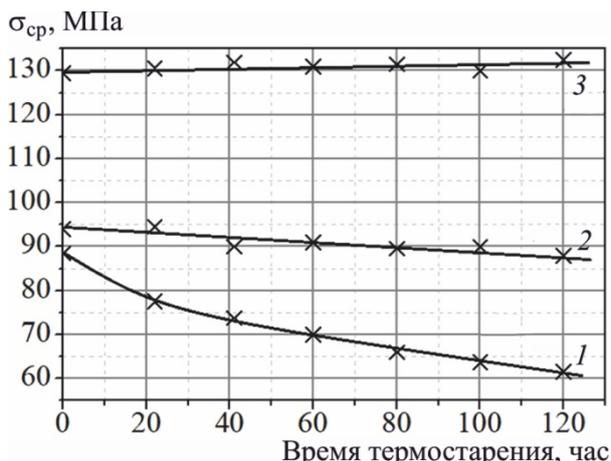


Рис. 3. Зависимости предела механической прочности на разрыв ( $\sigma_{р,ср}$ ) от времени термостарения образцов электроизоляционной бумаги следующих составов:  
 1 – 100 % ЭИЦ; 2 – 90 % ЭИЦ + 10 % ЦГХ;  
 3 – 100 % ЦГХ  
 Fig. 3. Dependence of average value of the maximum mechanical tensile strength ( $\sigma_{р,ср}$ ) on thermal aging time for electrical insulation paper:  
 1 – 100 % EIC; 2 – 90 % EIC + 10 % CGX;  
 3 – 100 % CGX

Визуальная оценка состояния фрагментов ЭИБ из 100 % ЭИЦ (1) и 100 % ЦГХ (3) после термостарения в течение 220 ч в среде нефтяного масла марки ГК в контакте с медным проводником (оказывающим каталитическое влияние на процессы деструкции).

Видно (рис. 4, а), что полотно и край материала из ЦГХ сохранил свою целостность, тогда как полотно и край фрагмента из ЭИЦ (рис. 4, б) интенсивно разрушается.

Параллельно в процессе старения определялась сорбционная активность обеих видов ЭИБ по отношению к продуктам деструкции твердых и жидких диэлектрических материалов. С этой целью при помощи микроколориметра МКМФ-1 снимались зависимости коэффициента относительного светопропускания проб масла на длине волны 458 нм ( $K_{oc\ 458}, \%$ ), которые сопоставлялись с аналогичной кривой для пробы масла ГК, которое старилось в контакте с медным проводником, но без бумаги (контрольная проба). В пробах, старение которых велось с бумагой обоих видов, светопропускание жидкости оказалось близким и существенно превзошло показатели контрольного образца:  $K_{oc\ 458}$  последнего снизилось до 0 за 148 ч термовоздействия, а у проб масла с бумагой – в среднем за 200 ч старения.

Необходимо отметить, что целлюлозный материал из ЦГХ обладает высокой сорбционной активностью, обеспечивающей замедление процесса шламообразования в масле, что подтвердили наши исследования [9] и наглядно демонстрирует рис. 5.

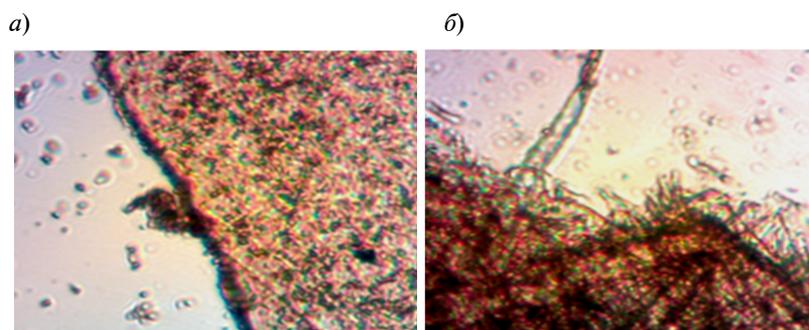


Рис. 4. Микрофотографии ( $\times 400$ ) фрагментов ЭИБ из 100 % ЦГХ (а) и 100 % ЭИЦ (б) после термостарения в масле марки ГК в присутствии медного катализатора  
Fig. 4. Microphotos ( $\times 400$ ) of the samples of EIP consist of 100 % CGX (a) and 100 % EIC (b) after thermal ageing in petroleum oil GK with copper catalyst



Рис. 5. Микрофотографии ( $\times 400$ ) проб трансформаторного масла марки ГК после 180 часов термостарения при температуре 140 °С с медным катализатором (а), а также в присутствии ЭИБ из 100 % ЭИЦ (б) и 100 % ЦГХ (е)  
Fig. 5. Microphotos ( $\times 400$ ) of the samples of transformer oil GK after 180 hours of thermal ageing at the temperature of 140 °С with copper catalyst (a); the same with traditional EIP (б) and with paper of 100 % CGX (е)

Однако за время испытаний по данному показателю превосходства ЦГХ над растительной целлюлозой выявлено не было, что, возможно, связано с тончайшей пористостью бумаги из биополимера.

Полученные результаты, по нашему мнению, указывают на перспективность создания диэлектриков из 100 % НПП ЦГХ. Однако применение традиционной технологии изготовления бумаги на основе данного целлюлозного сырья сталкивается с проблемой роспуска НПП, весьма сложного вследствие высокой структурированности и малой толщины лент бактериальной целлюлозы, что отчетливо показано на рис. 6. На фото (рис. 6, б) степень увеличения последних выше, чем сульфатной хвойной целлюлозы (рис. 6, а): соответственно 8,51 Кх и 5,11 Кх.

При проведении сравнительного анализа состава по волокну образцов бумаги из ЭИЦ (1) и ЦГХ (3) сложность качественного роспуска и размола сырья из биополимера была подтверждена.

Исследовались пробы материалов в виде суспензий, которые содержали по 0,1 г целлюлозы каждая. При этом в первой было зафиксировано порядка  $10^5$  волокон растительной целлюлозы, а во второй — около  $3 \cdot 10^3$  более крупных образований ЦГХ, предположительно возникающих при изменении морфологии НПП в процессе дезинтегрирования.

Из рис. 7, на котором приведены полученные соотношения длины и ширины для волокон ЭИЦ и структурных элементов ЦГХ, видно, что средняя длина последних (0,875 мм) почти вдвое ниже, чем у ЭИЦ (1,386 мм).

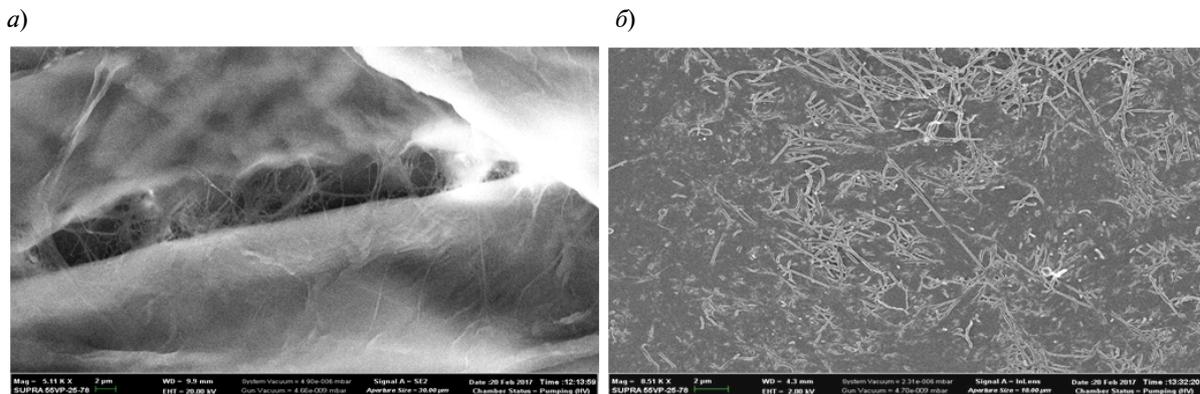


Рис. 6. SEM-микротографии целлюлозных волокон ЭИБ:

*a* – ЭИЦ (5,11 Кх); *b* – ЦГХ (8,51 Кх)

Fig. 6. SEM-microphotos of EIP cellulose fibers: *a* – EIC (5,11 Kx); *b* – CGX (8,51 Kx)

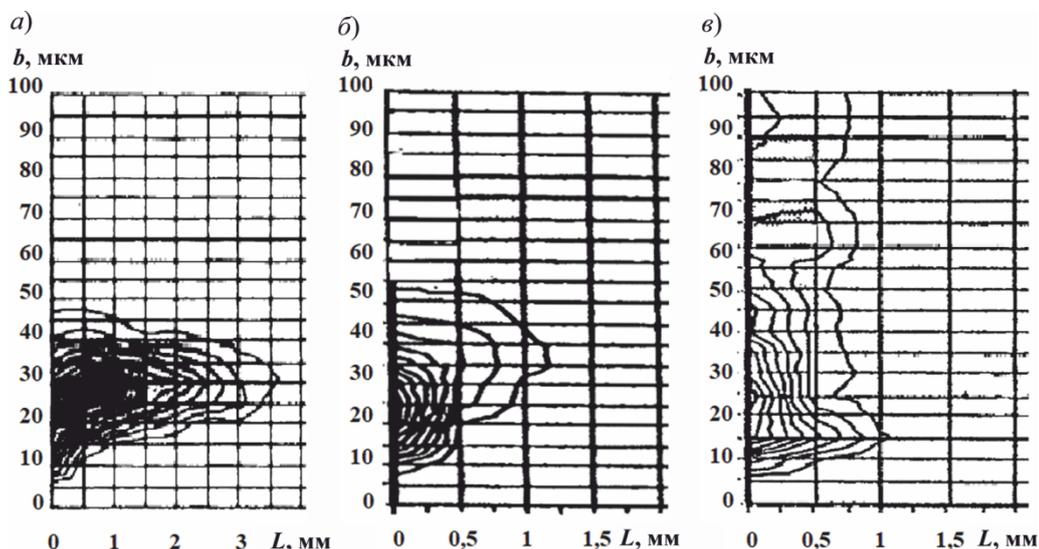


Рис. 7. Соотношения длины ( $L$ ) – ширины ( $b$ ): *a* – волокна ЭИЦ (исходное состояние); структурные элементы ЦГХ: *b* – исходное состояние; *в* – после термостарения

Fig. 7. Length ( $L$ ) and width ( $b$ ): *a* – EIC fibers (initial state); the same for CGX: *b* – initial state; *в* – after thermal ageing

Что касается ширины, то у волокон ЭИЦ и структурных элементов ЦГХ в исходном состоянии ее значения оказались близкими: соответственно 31,3 и 34,8 мкм. Но после термостарения (в течение 120 часов при температуре 140 °С) ширина образований бактериальной целлюлозы аномально выросла до среднего значения 41,9 мкм (рис. 7, *в*). Можно предположить, что эффект связан с постепенными морфологическими нарушениями указанных структурных элементов ЦГХ, что обусловлено процессами деструкции, при которой происходит их расширение и, вероятно, некоторое уменьшение плотности упаковки макромолекул.

С целью устранения указанной проблемы и поиска способов подготовки ЦГХ, менее затратных по времени и энергоёмкости, а также приемлемых для применения в бумажной промышленности, нами впервые были испытаны образцы, изготовленные с использованием нового способа дезинтегрирования нативной НПП ЦГХ: при помощи профессионального (JTC OmniBlend I, модель ТМ-767) блендера с последующим отливом коллоидной суспензии целлюлозы на подложку. Из-за отсутствия отработанной технологии получения материала отливки были неоднородны по толщине и содержали воздушные «пузыри» (рис. 8). Это сказалось на разбросе результатов.

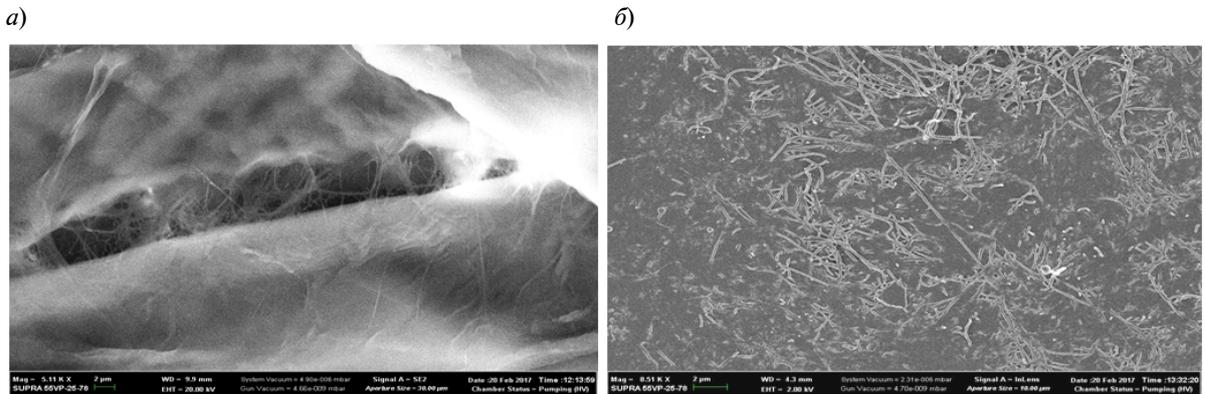


Рис. 6. SEM-микротографии целлюлозных волокон ЭИБ:

*a* – ЭИЦ (5,11 Кх); *b* – ЦГХ (8,51 Кх)

Fig. 6. SEM-microphotos of EIP cellulose fibers: *a* – EIC (5,11 Kx); *b* – CGX (8,51 Kx)



Рис. 8. Опытная отливка из ЦГХ:

*a* – внешний вид; SEM-снимки: *b* – поверхность (×72) и *в* – морфологические структуры образца (43,99 Кх)

Fig. 8. Specimen of CGX-modified paper:

*a* – visual appearance; SEM-photos: *b* – surface (×72) и *в* – structure of specimen (43,99 Kx)

В табл. 4 приведены результаты сравнительной оценки кратковременной электрической прочности целлюлозных диэлектриков, полученных с применением различных технологий. Выявлено, что, не-

смотря на отмеченные недостатки, отливки превосходят по  $E_{пр}$  промышленную ЭИБ (1) в среднем в 6 раз, ЭИБ из ЦГХ (3) как минимум в 3 раза и даже в 2 раза НПП ЦПЧ (4).

Таблица 4

Значения кратковременной электрической прочности электроизоляционных материалов из растительной и бактериальной целлюлозы

Table 4

The average value of the electric strength of electrical insulation materials consist of pine-tree and bacterial cellulose

№ образца	Состав образца,изготовитель	Толщина $h_{ср}$ , мм	$E_{пр,ср}$ , кВ/мм	$K_{стан}$ , %
1	Промышленный образец ЭИБ марки К-140	0,140	9,1	6,4
2	Опытная ЭИБ состава: 90 % ЭИЦ + 10 % ЦГХ	0,140	14,2	6,2
3	Опытная ЭИБ состава: 100 % ЦГХ	0,139	22,5	14,1
4	НПП ЦГХ (сушка на воздухе)	0,142	25,2	11,8
5	Опытный образец состава: 100 % ЦГХ (размол в блендере)	0,137	58,0	22,3
6	Опытный образец состава: 100 % ЦГХ (размол в блендере)	0,120	69,4	23,0

Из-за малого количества исследуемого опытного материала оценка предела механической прочности на разрыв носит исключительно предварительный характер. Однако можно утверждать, что средние значения  $\sigma_p$  промышленной ЭИБ из ЭИЦ (1) и отливки из ЦГХ (5) одного порядка (несмотря на неоднородность структуры последнего): соответственно 86 и 80 МПа.

С целью проверки впитывающей способности указанные образцы, предварительно высушенные при 100 °С в течение 1 часа были залиты нагретым до 50 °С нефтяным маслом марки ГК и выдержаны при комнатной температуре в течение 48 часов. Затем при помощи фильтровальной бумаги масло удалили с поверхности ЭИБ и определили  $E_{пр}$  материалов. Хорошо известно, что термо-вакуумная сушка с последующей пропиткой жидкими диэлектриками позволяет повысить кратковременную электрическую прочность бумаги на порядок. В данном случае вакуумирование не применялось (то есть воздух и влага не были удалены из объема образцов), вследствие чего увеличение электрической прочности было значительно ниже:  $E_{пр\ ср}$  промышленной ЭИБ (1) возросло в 4 раза (с 8,7 до 42 кВ/мм), а ЭИБ из 100 % ЦГХ – в 2 раза (с 62 до 112 кВ/мм). Однако указанная характеристика отливки оказалась значительно выше, чем у ЭИБ из растительной ЭИЦ, изготовленной по традиционной технологии, несмотря на тот факт, что тончайшая пористость ЦГХ усложняет проникновение жидкости в материал. Причем можно предположить, что даже при частичном вытеснении воздуха маслом развитие частичных разрядов будет тормозиться минимальным размером пустот и воздушных включений.

## Выводы

Подтверждено, что использование бактериальной целлюлозы для получения диэлектрических материалов способствует повышению кратковременной электрической и механической прочности бумаги.

Доказано, что ЭИБ из бактериальной целлюлозы отличается повышенной нагревостойкостью как на воздухе, так и в среде нефтяного масла.

Впервые экспериментально показана возможность применения блендера для дезинтегрирования нано-гель-пленки ЦГХ, что открывает перспективы её использования для промышленного производства диэлектриков.

Выявлено, что отсутствие фибрилляции при использовании блендера для дезинтегрирования НПП БЦ (которое имеет место при размоле целлюлозы в ролле Валлея и признано полезным с точки зрения повышения механической прочности бумаги), предположительно, может быть компенсировано частичным нарушением структуры образований ЦГХ в процессе старения за счет образования дополнительной «сцепки» между ними (как механической, так и вследствие возникновения водородных связей).

В целом можно заключить, что работы, направленные на создание целлюлозных диэлектриков нового поколения, отличающихся повышенными электрофизическими характеристиками и нагревостойкостью, являющихся полноценной альтернативой растительной целлюлозы, получаемой из хвойных пород древесины, целесообразны, практически полезны и вносят вклад в развитие новых ресурсо- и энергосберегающих технологий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Осотов В.Н.** Практические аспекты оценки фактического срока службы силовых трансформаторов // III Научно-практическая конференция «Контроль технического состояния оборудования объектов энергетики». 2016. С. 49. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.ti-ees.ru/fileadmin/f/Conference/2016/15.\\_Osotov\\_V.N.\\_Pr](http://www.ti-ees.ru/fileadmin/f/Conference/2016/15._Osotov_V.N._Pr)

[akticheskie\\_aspekty\\_ocenki\\_sroka\\_sluzhby\\_transformatorov.pdf](#)

2. **Wang W.** A comparative analysis of dielectric properties of oil-paper insulation and polymer materials before and after thermal aging // Science China Technological Sciences. 2014. Vol. 57. No 4. P. 738–746.



3. Geissler D., Leibfried T. Mechanical breakdown of aged insulating paper around continuously transposed conductors for power transformers under the influence of short-circuit forces – analysis by numerical simulations // IEEE Electrical Insulation Conference (EIC). 2015. P. 401–406.
4. Heywood R., Jarman P., Ryder S. Transformer Asset Health Review: Does it really work? // Proceedings of CIGRE. Session 45. 2014. 8 p.
5. Лоханин А.К. Краткие обзоры докладов 43 сессии СИГРЭ // Электроэнергия. Передача и распределение. 2010. № 3. С. 80–87.
6. Müllerova E. Life Cycle Management of Power Transformers: Results and Discussion of Case Studies // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2015. Vol. 22. No 4. P. 2379–2389.
7. Perrier C. Aging behavior of cellulosic materials in presence of mineral oil and ester liquids under Various Conditions // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2013. Vol. 20. No 6. P. 1971–1976.
8. Duval M, de Pablo A., Atanasova-Hoehlein I., Grisaru M. Significance and detection of very low degree of polymerization of paper transformers // IEEE Electrical Insulation Magazine. 2017. Vol. 33. No 1. P. 31–38.
9. Zhuravleva N., Reznik A., Kiesewetter D., Tukacheva A., Smirnova E. About the Possibilities of Increasing the Reliability of Paper-Impregnated Insulation of Power Transformers // 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga technical University (RTUCON-2016), 14–18 oct. 2016. 4 p.
10. Brown R.M. The Biosynthesis of Cellulose // Journal of Macromolecular Science. – Part A Pure and Applied Chemistry. 1996. Vol. 33 (10). P. 1345–1373.
11. Keshk S. Bacterial cellulose production and its industrial applications // J. Bioprocessing and Biotechniques. 2014. Vol. 4. P. 1–10.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ЖУРАВЛЕВА Наталия Михайловна** – кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: Natalia\_Zhurav@mail.ru

**КИЗЕВЕТТЕР Дмитрий Владимирович** – доктор физико-математических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: dmitrykiesewetter@gmail.com

**РЕЗНИК Александр Сергеевич** – инженер Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: alexreznik85@gmail.com

**СМИРНОВА Екатерина Григорьевна** – доктор технических наук доцент Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета им. С.М. Кирова

E-mail: smirnova@smirnova@mail.ru

**ХРИПУНОВ Альберт Константинович** – кандидат химических наук старший научный сотрудник Института высокомолекулярных соединений РАН

E-mail: biocell@mail.macro.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 03.02.2018

#### REFERENCES

- [1] Osotov V.N. Prakticheskie aspekty otsenki fakticheskogo sroka sluzhby silovykh transformatorov. *III Nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Kontrol' tekhnicheskogo sostoianiia oborudovaniia ob'ektov energetiki»*. 2016. S. 49. [Elektronnyi resurs]. URL: [http://www.ti-ees.ru/fileadmin/f/Conference/2016/15\\_Osotov\\_V.N.\\_Prakticheskie\\_aspekty\\_ocenki\\_sroka\\_sluzhby\\_transformatorov.pdf](http://www.ti-ees.ru/fileadmin/f/Conference/2016/15_Osotov_V.N._Prakticheskie_aspekty_ocenki_sroka_sluzhby_transformatorov.pdf) (rus.)
- [2] Wang W. A comparative analysis of dielectric properties of oil-paper insulation and polymer materials before and after thermal aging. *Science China Technological Sciences*. 2014. Vol. 57. No 4. P. 738–746.
- [3] Geissler D., Leibfried T. Mechanical breakdown of aged insulating paper around continuously transposed conductors for power transformers under the influence of short-circuit forces – analysis by numerical simulations. *IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*. 2015. P. 401–406.
- [4] Heywood R., Jarman P., Ryder S. Transformer Asset Health Review: Does it really work? *Proceedings of CIGRE*. Session 45. 2014. 8 p.
- [5] Lokhanin A.K. Kratkie obzory dokladov 43 sessii SIGRE. *Elektroenergiia. Peredacha i raspredelenie*. 2010. № 3. S. 80–87. (rus.)

[6] Müllerova E. Life Cycle Management of Power Transformers: Results and Discussion of Case Studies. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2015. Vol. 22. No 4. P. 2379–2389.

[7] Perrier C. Aging behavior of cellulosic materials in presence of mineral oil and ester liquids under Various Conditions. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2013. Vol. 20. No 6. P. 1971–1976.

[8] Duval M, de Pablo A., Atanasova-Hoehlein I., Grisar M. Significance and detection of very low degree of polymerization of paper transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2017. Vol. 33. No 1. R. 31–38.

[9] Zhuravleva N., Reznik A., Kieseewetter D., Tukacheva A., Smirnova E. About the Possibilities of Increasing the Reliability of Paper-Impregnated Insulation of Power Transformers. *57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga technical University (RTU CON-2016)*, 14–18 oct. 2016. 4 p.

[10] Brown R.M. The Biosynthesis of Cellulose // *Journal of Macromolecular Science. – Part A Pure and Applied Chemistry*. 1996. Vol. 33 (10). P. 1345–1373.

[11] Keshk S. Bacterial cellulose production and its industrial applications. *J. Bioprocessing and Biotechniques*. 2014. Vol. 4. P. 1–10.

#### AUTHORS

**ZHURAVLEVA Nataliia M.** – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: Natalia\_Zhurav@mail.ru

**KIESEWETTER Dmitrii V.** – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: dmitrykieseewetter@gmail.com

**REZNIK Aleksandr S.** – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: alexreznik85@gmail.com

**SMIRNOVA Ekaterina G.** – *Saint Petersburg state forest technical university under name of S.M. Kirov*

E-mail: smirnovalta@gmail.com

**KHRIPUNOV Albert K.** – *Institute of macromolecular compounds RAS*

E-mail: biocell@mail.macro.ru

Received: 03.02.2018

DOI: 10.18721/JEST.240108  
УДК 669.046:536.45

*Г.В. Галевский, В.В. Руднева, К.А. Ефимова*

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ОКИСЛЕННОСТИ И ТЕРМООКСИЛИТЕЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ДИБОРИДА ТИТАНА**

Исследованы окисленность и термоокислительная устойчивость диборида титана при хранении и нагревании в воздушной среде. Диборид титана синтезирован плазменным и магниетермическим способами и имеет удельную поверхность, м<sup>2</sup>/кг: TiB<sub>2</sub> (1) – 43000, TiB<sub>2</sub> (2) – 38000, TiB<sub>2</sub> (3) – 2600. Установлено, что при хранении на воздухе в течение первых 24 часов диборид титана активно адсорбирует кислород и влагу: окисленность TiB<sub>2</sub> (1) достигает  $11,06 \cdot 10^{-7}$ , TiB<sub>2</sub> (2) –  $8,15 \cdot 10^{-7}$ , TiB<sub>2</sub> (3) –  $31,5 \cdot 10^{-7}$  кг O<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>. Для расчета окисленности получены аналитические зависимости. При нагревании на воздухе нанокристаллы диборида титана окисляются в интервале температур  $(623-673) \pm 15$  К, микрокристаллы – при температуре  $688 \pm 5$  К и выше. Сопутствующие дибориду пиролитические бор и углерод окисляются соответственно в интервалах температур  $(550-870) \pm 12$  К и  $(670-790) \pm 17$  К.

ДИБОРИД ТИТАНА; НАНОКРИСТАЛЛЫ; МИКРОКРИСТАЛЛЫ; ОКИСЛЕННОСТЬ; ТЕРМООКСИЛИТЕЛЬНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ.

*Ссылка при цитировании:*

Г.В. Галевский, В.В. Руднева, К.А. Ефимова. Исследование окисленности и термоокислительной устойчивости нанокристаллического диборида титана // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 1. С. 87–94. DOI: 10.18721/JEST.240108.

*G.V. Galevsky, V.V. Rudneva, K.A. Efimova*

Siberian state industrial university, Novokuznetsk, Russia

### **STUDY OF OXIDATION AND THERMOOXIDATIVE STABILITY OF NANOCRYSTALLINE TITANIUM DIBORIDE**

Oxidation and thermal-oxidative stability of titanium diboride are studied during storage and heating in air. Titanium diboride has been synthesized by plasma and magnesium-thermal methods and has the following specific surface areas, m<sup>2</sup>/kg: 43000 for TiB<sub>2</sub> (1), 38000 for TiB<sub>2</sub> (2), 2600 for TiB<sub>2</sub> (3). It was found that titanium diboride actively adsorbs oxygen and moisture when stored in air for the first 24 hours: the oxidation reaches  $11,06 \cdot 10^{-7}$  for TiB<sub>2</sub> (1),  $8,15 \cdot 10^{-7}$  for TiB<sub>2</sub> (2),  $31,5 \cdot 10^{-7}$  kg O<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> for TiB<sub>2</sub> (3). Analytical dependencies were obtained for the calculation of oxidation. When heated in air, titanium diboride nanocrystals are oxidized in the temperature range  $(623-673) \pm 15$  K, micro-

crystals at a temperature of  $688 \pm 5$  K and higher. The pyrolytic boron and carbon accompanying the diboride are oxidized in the temperature ranges  $(550-870) \pm 12$  K and  $(670-790) \pm 17$  K.

TITANIUM DIBORIDE; NANOCRYSTALS; MICROCRYSTALS; OXIDATION; THERMOOXIDATIVE STABILITY.

*Citation:*

G.V. Galevsky, V.V. Rudneva, K.A. Efimova. Study of the oxidation and thermooxidative stability of nanocrystalline titanium diboride, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 24(01)(2018) 87–94, DOI: 10.18721/JEST.240108.

### Введение

Наноматериалы, как правило, имеют следующие особенности кристаллического строения и энергетического состояния [1–4], которые обуславливают их высокую химическую активность:

1) малый размер зерен определяет большую развитость и протяженность межзеренных границ: при размере зерна от 100 до 10 нм границы содержат от 10 до 50 % атомов нанокристаллического твердого тела;

2) зерна в наносостоянии содержат различные атомные дефекты – вакансии, их комплексы, дислокации, количество и распределение которых качественно иное, чем в крупных зернах размером 5–10 мкм и более;

3) исключительно высокую диффузионную подвижность атомов по границам зерен нанокристаллического твердого тела, в  $10^5-10^6$  раз превосходящую таковую в обычных поликристаллах;

4) возбужденное состояние в нанозернах атомных слоев вблизи их поверхностей, вызывающее сжатие кристаллов и отклонение в них атомов от положения, соответствующего равновесному;

5) постоянное стремление наносистем к релаксации избыточной энергии.

В совокупности это приводит к проявлению наноразмерных эффектов в таких свойствах, как склонность к агрегированию, активное взаимодействие с атмосферными и технологическими газами, повышенная растворимость в жидких средах, диффузионная подвижность в матрицах композиционных материалов, способность к твердофазной коалесценции и спеканию и др. Особенности физико-химических свойств наноматериалов приводит к необходимости проведе-

ния их комплексной аттестации с обязательным определением характеристик, практически значимых для дальнейшего применения, оценки конкурентных преимуществ и реальной стоимости этих материалов. В течение последних 15 лет опубликовано значительное количество работ, в частности [5–8], содержащих результаты исследования особенностей свойств нанопорошков металлов, карбидов, боридов, их композиций. Их анализ в целом подтверждает специфику свойств нанокристаллических веществ и необходимость ее учета при проведении последующих технологических переделов с их участием. Однако для каждого вещества в наносостоянии характерны свои температурно-временные условия проявления размерных эффектов и конкретные уровневые значения. Это позволяет в каждом случае рассматривать полученные результаты как новую информацию, имеющую научно-прикладное значение.

С учетом особенностей свойств нанокристаллических материалов по предложению их потребителей начиная с 2000 года расширен спектр сертификационных характеристик порошковой нанопродукции. К традиционным характеристикам – фазовому и химическому составам, удельной поверхности – добавлены окисленность и температура начала окисления.

### Цель и методика исследований

Целями настоящей работы были исследование окисленности и термоокислительной устойчивости диборида титана нано- и микроразмерного уровня дисперсности в воздушной среде и сопоставительный анализ результатов.

## Характеристики исследуемых образцов диборида титана

## Characteristics of test samples of titanium diboride

Образец порошка диборида титана	Характеристики порошка											
	Фазовый состав	Химический состав, %								Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /кг	Размерный диапазон частиц, мкм	Окисленность, 10 <sup>-7</sup> кгО <sub>2</sub> /м <sup>2</sup>
		TiB <sub>2</sub>	B <sub>своб</sub>	Ti <sub>своб</sub>	TiO <sub>2</sub>	C	Mg	O <sub>2</sub>	N			
TiB <sub>2</sub> (1)	TiB <sub>2</sub>	96,32	1,00	1,15	—	—	—	0,61	0,92	43000	0,01-0,06	1,42
TiB <sub>2</sub> (2)	TiB <sub>2</sub>	93,61	0,42	—	3,84	1,12	—	1,54	1,01	38000	0,02-0,08	4,05
TiB <sub>2</sub> (3)	TiB <sub>2</sub>	97,24	0,42	—	—	—	0,41	0,82	0,41	2600	<5	31,5

Окисленность определяется количеством, кг, кислорода, приходящегося на 1 м<sup>2</sup> поверхности порошка. Определение удельной поверхности диборида титана проводилось на анализаторе TRISTAR 3020 и было основано на методе низкотемпературной адсорбции азота.

Температура начала окисления соответствует изменению массы нанопорошка на 1 % при нагревании в воздушной среде. В качестве характеристики термоокислительной устойчивости может быть принят также наиболее вероятный температурный интервал, в котором начинается процесс окисления нанопорошка при нагревании на воздухе. Окисление порошков диборида титана в воздушной среде исследовалось методами термогравиметрии и высокотемпературной рентгенографии, для чего использовались дериватограф Setaram LabSys

Evo и дифрактомер ДРОН-3 с приставкой ГПВТ-1500.

В качестве объектов исследования использовались не контактировавшие с воздухом нанопрошки диборида титана, полученные плазмосинтезом из шихт Ti+V (TiB<sub>2</sub> (1)), TiO<sub>2</sub>+V (TiB<sub>2</sub> (2)), а также полученный магнетермическим способом его микропорошок (TiB<sub>2</sub> (3)). Фазовый и химический составы, удельная поверхность, начальная окисленность образцов приведены в таблице.

## Определение окисленности

Изменение окисленности образцов диборида титана при контактировании их с воздухом в течение 240 часов отражено на рис. 1. В течение первых двух суток содержание кислорода в образцах контролировалось каждые 4 часа, в последующие сутки — каждые 12 часов.

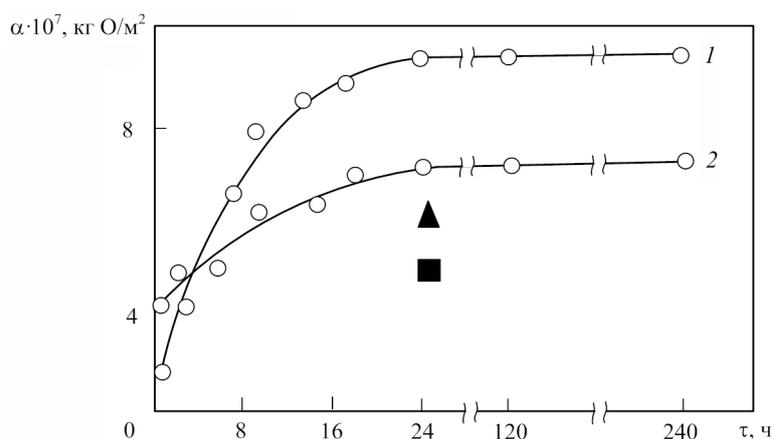


Рис. 1. Изменение окисленности  $\alpha$  образцов диборида титана при контактировании их с воздухом: 1 — (1,42 ч 11,06)  $\pm$  (0,02 ч 0,18); 2 — (4,05 ч 8,0)  $\pm$  (0,06 ч 0,016) (приведена также окисленность образцов 1 (▲) и 2 (■), термодесорбированных в вакууме после хранения на воздухе в течение 24 часов)  
 Fig. 1. Change in oxidation  $\alpha$  of samples of titanium diboride in contact with air (oxidation of samples 1 (▲) and 2 (■), thermodesorbed in vacuum after storage in air for 24 hours)

Анализ полученных результатов позволил выделить четыре научных аспекта, подлежащих обсуждению. Рассмотрим их.

1. Значительный рост окисленности происходит в течение первых 20–24 часов. В последующий период времени окисленность практически не меняется. При этом отмечается увеличение окисленности для  $TiB_2$  в образце 1 приблизительно в 8 раз (с  $1,42 \cdot 10^{-7}$  до  $11,06 \cdot 10^{-7}$  кг  $O_2/m^2$ ), в образце 2 – примерно в 2 раза (с  $4,05 \cdot 10^{-7}$  до  $8,15 \cdot 10^{-7}$  кг  $O_2/m^2$ ). Оксиды титана и бора на рентгенограммах образцов не обнаружены. Повышение окисленности, вероятнее всего, связано с адсорбцией кислорода и паров воды. Этот факт подтвержден в целом ряде работ при исследовании высокотемпературных наноразмерных соединений [9–13]. Однако механизм сорбции (физическая адсорбция или хемосорбция) до сих пор не изучен.

Полученные данные позволили определить зависимость величины окисленности диборида титана от продолжительности контактирования его с воздухом. Она описывается для образца 1 уравнением вида  $\alpha = [-0,0134\tau^2 + 0,7065\tau + 1,5175] \cdot 10^{-7}$ , (1) а для образца 2 –  $\alpha = [-0,0044\tau^2 + 0,2672\tau + 4,1023] \cdot 10^{-7}$ , (2) где  $\alpha$  – окисленность, кг  $O_2 \cdot m^{-2}$ ;  $\tau$  – продолжительность контактирования  $TiB_2$  с воздухом, ч.

Эти зависимости представлены на рис. 2.

2. Образец 2  $TiB_2$  более устойчив к воздействию кислорода воздушной атмосферы, что обусловлено адсорбцией им на стадии получения монооксида углерода, обладающего высокой пассивирующей способностью по отношению к высокодисперсным порошкам переходных металлов и их соединениям с углеродом, бором, азотом [14]. Действительно, концентрация CO в газовой фазе для варианта 2 составляет 3,2–5 %, для варианта 1 – 0,8–1,0 % об.

3. Вакуумный отжиг при температуре 973 К для десорбции газов образцов 1 и 2, контактировавших с воздухом, обеспечивает удаление только 40 % кислорода (точки  $\blacktriangle$  и  $\blacksquare$  на рис. 1). Оставшееся количество кислорода при этих температурных условиях, по-видимому, участвует в поверхностном окислении наночастиц с образованием аморфных оксидных пленок, что подтверждается описанными далее результатами определения температуры начала окисления исследуемых образцов.

4. Сравнение окисленности образцов 1, 2, выдержанных на воздухе в течение 24 часов, и 3 (соответственно  $11,06 \cdot 10^{-7}$ ,  $8 \cdot 10^{-7}$  и  $31,5 \cdot 10^{-7}$  кг  $O_2/m^2$  поверхности) подтверждает, что по этой характеристике нанопорошки не только не уступают микропорошку, но и превосходят его.

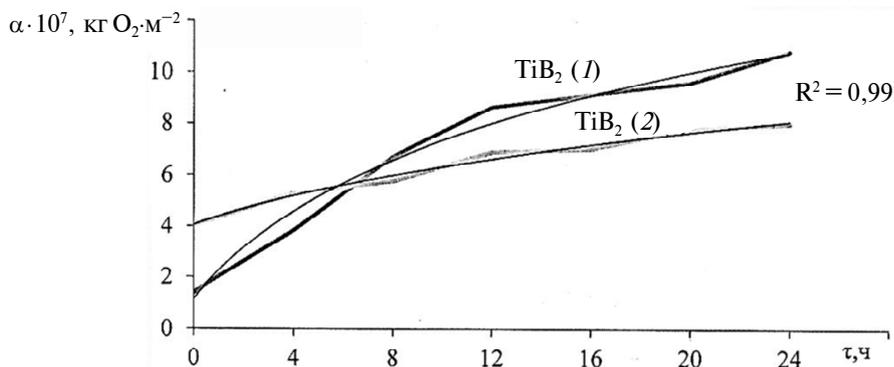


Рис. 2. Зависимости окисленности  $\alpha$  образцов диборида титана  $TiB_2$  1 и 2 при контактировании их с воздухом ( $\tau$  – продолжительность контактирования  $TiB_2$  с воздухом, ч;  $R^2$  – коэффициент детерминации)  
 Fig. 2. Graphical dependence of oxidation  $\alpha$  of samples of titanium diboride  $TiB_2$  1 and 2 upon contacting them with air ( $\tau$  – duration of contact of  $TiB_2$  with air, h;  $R^2$  – coefficient of determination)

### Определение термоокислительной устойчивости

Процесс окисления при нагревании в воздушной среде обычно исследуют двумя методами — высокотемпературной рентгенографии и термогравиметрии.

В первом случае изучается температурная зависимость интенсивности одного из характеристических пиков исследуемого материала, в связи с чем особых требований по содержанию основной фазы и примесей к объекту исследований не предъявляется. Однако этот метод позволяет констатировать лишь интервал температуры, в котором начинается процесс окисления.

Значительно более точно температура начала окисления может быть определена методом термогравиметрии, но при условии

отсутствия или минимального содержания примесей, окисляющихся в том же температурном интервале, что и основная фаза. Диборид титана, получаемый по вариантам 1 и 2, фактически представляет собой композиции составов, %:  $92,55\text{TiB}_2 + 1,05\text{Ti}_{\text{своб}} + 1,05\text{B}_{\text{своб}}$  в образце 1 и  $91,25\text{TiB}_2 + 0,83\text{B}_{\text{своб}} + 1,21\text{C}$  в образце 2. При этом пиролитические бор и углерод окисляются в интервалах температур соответственно 550–870 К и 671–790 К, что создает непреодолимые трудности корректного термографирования нанокристаллического  $\text{TiB}_2$  (см. рис. 3). Следует ожидать, что температура окисления нанокристаллического  $\text{TiB}_2$  может быть на 30–50° ниже, чем у микропорошка  $\text{TiB}_2$  [15], окисление которого начинается при температуре  $688 \pm 5$  К.

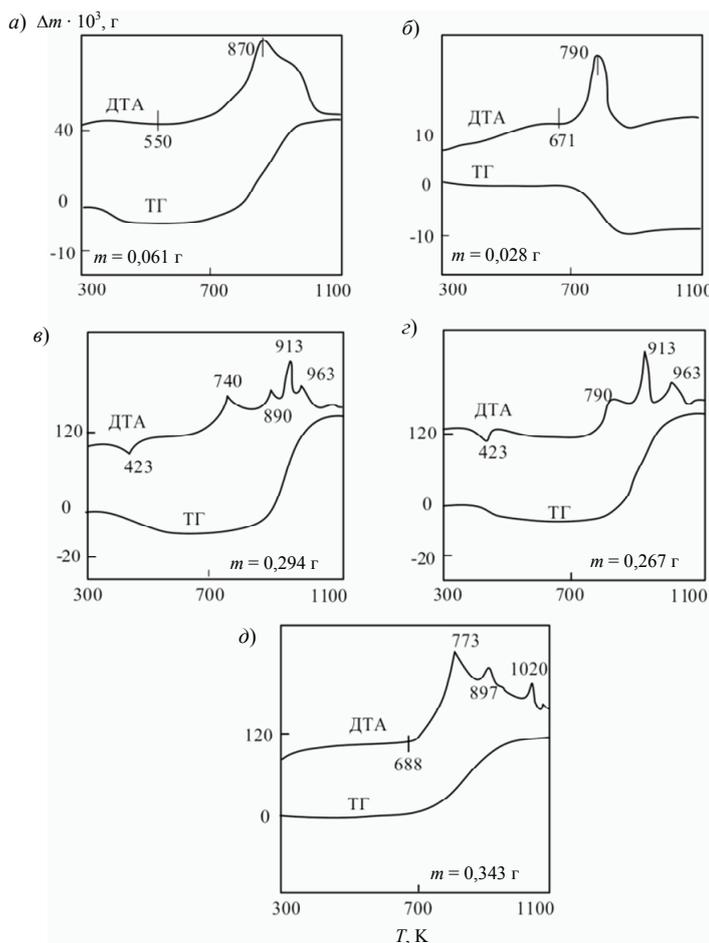


Рис. 3. Дериватограммы нанопорошков пиролитических бора (а), углерода (б), диборидов титана 1 (в), 2 (г) и микропорошков диборида титана (д)

Fig. 3. Derivatograms pyrolytic boron nanopowder (a), carbon (b), titanium diboride 1 (c), 2 (d) and micro-powders of titanium diboride (d)

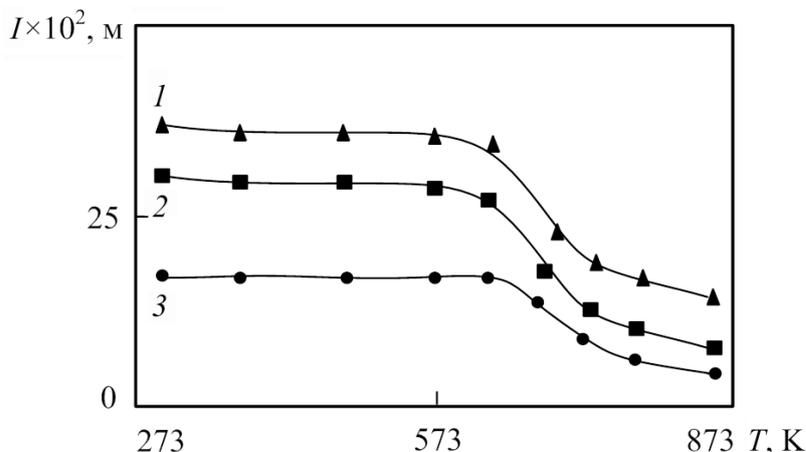


Рис. 4. Рентгеновская термическая характеристика диборида титана (1 – TiB<sub>2</sub> (1); 2 – TiB<sub>2</sub> (2); 3 – TiB<sub>2</sub> микропорошок)  
 Fig. 4. X-ray thermal characteristics of titanium diboride (1 – TiB<sub>2</sub> (1); 2 – TiB<sub>2</sub> (2); 3 – TiB<sub>2</sub> micropowder)

Данные о термоокислительной устойчивости нанопорошков TiB<sub>2</sub> 1, 2 и микропорошка TiB<sub>2</sub> (3), полученные высокотемпературной рентгенографией, представлены на рис. 4 в виде зависимости интенсивности характеристического пика TiB<sub>2</sub> (101) от температуры. При нагревании образцов в интервале температур (273–623)±15 К изменение интенсивности пиков не отмечается. При дальнейшем нагревании у образцов 1 и 2 TiB<sub>2</sub> в интервале температур (623–673)±15 К и у образца микропорошка TiB<sub>2</sub> в интервале температур (673–723)±15 К наблюдается значительное снижение интенсивности пиков, продолжающееся и в более высокой температурной области, что свидетельствует о начале и развитии процессов окисления.

В исследуемой области температур на рентгенограммах отсутствуют пики, соответствующие оксидам титана и бора, что позволяет предположить их образование в аморфном состоянии.

### Заключение

Исследованы окисленность и термоокислительная устойчивость на воздухе нано- и микропорошка диборида титана. Диборид титана при хранении на воздухе в течении первых 24 часов активно адсорбирует кислород и влагу: окисленность TiB<sub>2</sub> (1), синтезированного по варианту (Ti+B),

изменяется в пределах (1,42–11,06) · 10<sup>-7</sup> кг O<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>. TiB<sub>2</sub> (2), синтезированного по варианту (TiO<sub>2</sub>+B), – в диапазоне (4,05–8,15) · 10<sup>-7</sup> кг O<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>. Она может быть описана уравнениями:

$$\alpha(1) = [-0,0134\tau^2 + 0,7065\tau + 1,5175] \cdot 10^7;$$

$$\alpha(2) = [-0,0044\tau^2 + 0,2672\tau + 4,1023] \cdot 10^7.$$

Сравнение окисленности образцов 1, 2, выдержанных на воздухе в течение 24 часов, и 3 (соответственно 11,06 · 10<sup>-7</sup>, 8 · 10<sup>-7</sup> и 31,5 · 10<sup>-7</sup> кг O<sub>2</sub>/м<sup>2</sup> поверхности) подтверждает, что по этой характеристике нанокристаллический диборид превосходит более крупный микрокристаллический.

Диборид титана термодесорбирует в вакууме при температуре 973 К не более 40 % поглощенного при хранении кислорода, что подтверждает адсорбционно-диффузионный механизм его взаимодействия с атмосферными газами и возможность окисления наночастиц с формированием аморфных оксидных слоев при нагревании. Нанокристаллы диборида титана при нагревании на воздухе окисляются в интервале температур (623–673)±15 К, что на 66 градусов ниже температуры начала окисления его микрокристаллов, которая составляет 688±5 К. Сопутствующие дибориду пиролитические бор и углерод окисляются соответственно в интервалах температур (550–870)±12 К и (671–790)±17 К.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Физматлит, 2005. 416 с.
2. Рудской А.И. Нанотехнологии в металлургии. СПб.: Наука, 2007. 186 с.
3. Колмаков А.Г., Баринов С.М., Алымов М.И. Основы технологий и применение наноматериалов. М.: Физматлит, 2012. 208 с.
4. Балоян Б.М., Колмаков А.Г., Алымов М.И., Кротов А.М. Наноматериалы. Классификация, особенности свойств, применение и технологии получения. М.: Международный университет природы, общества и человека «Дубна», Филиал «Угреша», 2007. 125 с.
5. Гуров А.А., Карманов В.И., Порозова С.Е., Шоков В.О. Синтез и свойства нанопорошка диоксида титана для получения функциональных материалов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2014. Т. 16. № 1. С. 23–29.
6. Zhao G., Zhang X., Shen Z., Zhang Z. Oxidation of ZrB<sub>2</sub> nanoparticles at high temperature under low oxygen pressure // Journal of the American Ceramic Society. 2014. P. 2360–2363.
7. Golla B.R., Bhandari T., Mukhopadhyay A., Basu V. Titanium diboride // Journal Ultra-High Temperature Ceramics: Materials for Extreme Environment Applications. 2015. P. 316–360.
8. Карпов И.В., Ушаков А.В., Лепешев А.А. Исследование технологических свойств нанопорошка TiN, синтезированного в плазме дугового разряда низкого давления // Технология машиностроения. 2013. № 2. С. 39–42.
9. Лепешев А.А., Ушаков А.В., Карпов И.В. Плазмохимический синтез нанодисперсных порошков и полимерных нанокмполитов. Красноярск: Изд-во СФУ, 2012. 310 с.
10. Ноздрин И.В., Руднева В.В., Галевский Г.В. Борид хрома – нанотехнология, свойства, применение: монография. Саарбрюкен (Германия): LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 233 с.
11. Цзкан Ilker, Dokumaci Esra, Бьлент Цпау А. Cyclic oxidation behavior of TiB<sub>2</sub> pellets at elevated temperatures // Journal of the Australian Ceramic Society. 2017. Vol. 53. P. 415–420.
12. Ушаков А.В., Лепешев А.А., Карпов И.В., Крушенко Г.Г. Физико-химические свойства порошка TiO<sub>2</sub>, полученного в плазмохимическом реакторе низкого давления // Технология металлов. 2012. № 10. С. 27–32.
13. Пойлов В.З., Прямилова Е.Н. Термодинамика окисления боридов циркония и гафния // Журнал неорганической химии. 2016. Т. 61. № 1. С. 59–62.
14. Наноматериалы и нанотехнологии в производстве карбида кремния: монография: в 3 т. / Науч. ред. Г.В. Галевский; Т. 3. Плазмометаллургическое производство карбида кремния для конструкционной керамики. М.: Флинта, Наука, 2007. 210 с.
15. Иванов В.В., Блохина И.А., Кирик С.Д. Изотермическое окисление порошков TiB<sub>2</sub> в воздухе // Огнеупоры и техническая керамика. 2013. № 4–5. С. 10–15.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ГАЛЕВСКИЙ Геннадий Владиславович — доктор технических наук заведующий кафедрой Сибирского государственного индустриального университета

E-mail: kafcmet@sibsiu.ru

РУДНЕВА Виктория Владимировна — доктор технических наук профессор Сибирского государственного индустриального университета

E-mail: kafcmet@mail.ru

ЕФИМОВА Ксения Александровна — аспирант Сибирского государственного индустриального университета

E-mail: efimovaksenia@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 24.07.2017

## REFERENCES

- [1] Gusev A.I. Nanomaterialy, nanostrukturny, nanotekhnologii. M.: Fizmatlit, 2005. 416 s. (rus.)
- [2] Rudskoi A.I. Nanotekhnologii v metallurgii. SPb.: Nauka, 2007. 186 s. (rus.)
- [3] Kolmakov A.G., Barinov S.M., Alymov M.I. Osnovy tekhnologii i primenenie nanomaterialov. M.: Fizmatlit, 2012. 208 s. (rus.)
- [4] Baloian B.M., Kolmakov A.G., Alymov M.I., Krotov A.M. Nanomaterialy. Klassifikatsiia, osobennosti svoistv, primenenie i tekhnologii polucheniia. M.: Mezhdunarodnyi universitet prirody, obshchestva i cheloveka «Dubna», Filial «Ugresha», 2007. 125 s. (rus.)
- [5] Gurov A.A., Karmanov V.I., Porozova S.E., Shokov V.O. Sintez i svoistva nanoporoshka

dioksida titana dlia polucheniia funktsional'nykh materialov. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*. 2014. T. 16. № 1. S. 23–29. (rus.)

[6] **Zhao G., Zhang X., Shen Z., Zhang Z.** Oxidation of ZrB<sub>2</sub> nanoparticles at high temperature under low oxygen pressure. *Journal of the American Ceramic Society*. 2014. P. 2360–2363. (rus.)

[7] **Golla B.R., Bhandari T., Mukhopadhyay A., Basu B.** Titanium diboride. *Journal Ultra-High Temperature Ceramics: Materials for Extreme Environment Applications*. 2015. P. 316–360.

[8] **Karpov I.V., Ushakov A.V., Lepeshev A.A.** Issledovanie tekhnologicheskikh svoistv nanoporoshka TiN, sintezirovannogo v plazme dugovogo razriada nizkogo davleniia. *Tekhnologiya mashinostroeniia*. 2013. № 2. S. 39–42. (rus.)

[9] **Lepeshev A.A., Ushakov A.V., Karpov I.V.** Plazmokhimicheskii sintez nanodispersnykh poroshkov i polimernykh nanokompozitov. Krasnoiarsk: Izd-vo SFU, 2012. 310 s. (rus.)

[10] **Nozdrin I.V., Rudneva V.V., Galevskii G.V.** Borid khroma – nanotekhnologiya, svoistva,

primeneniie: monografiia. Saarbriuken (Germaniia): LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 233 s.

[11] **Uzkan ilker, Dokumaci Esra, Bylent Unay A.** Cyclic oxidation behavior of TiB<sub>2</sub> pellets at elevated temperatures. *Journal of the Australian Ceramic Society*. 2017. Vol. 53. P. 415–420.

[12] **Ushakov A.V., Lepeshev A.A., Karpov I.V., Krushenko G.G.** Fiziko-khimicheskie svoistva poroshka TiO<sub>2</sub>, poluchennogo v plazmokhimicheskom reaktore nizkogo davleniia. *Tekhnologiya metallov*. 2012. № 10. S. 27–32. (rus.)

[13] **Poilov V.Z., Priamilova E.N.** Termodinamika okisleniia boridov tsirkoniia i gafniia. *Zhurnal neorganicheskoi khimii*. 2016. T. 61. № 1. S. 59–62. (rus.)

[14] Nanomaterialy i nanotekhnologii v proizvodstve karbida kremniia: monografiia: v 3 t. / Nauch. red. G.V. Galevskii; T. 3. Plazmometallurgicheskoe proizvodstvo karbida kremniia dlia konstruktsionnoi keramiki. M.: Flinta, Nauka, 2007. 210 s. (rus.)

[15] **Ivanov V.V., Blokhina I.A., Kirik S.D.** Izotermicheskoe okislenie poroshkov TiB<sub>2</sub> v vozdukh. *Ogneupory i tekhnicheskaiia keramika*. 2013. № 4–5. S. 10–15.

#### AUTHORS

**GALEVSKY Gennadii V.** – *Siberian state industrial university*

E-mail: kafcmet@sibsiu.ru

**RUDNEVA Viktoriia V.** – *Siberian state industrial university*

E-mail: kafcmet@mail.ru

**EFIMOVA Kseniia A.** – *Siberian state industrial university*

E-mail: efimovaksenia@mail.ru

Received: 24.07.2017



DOI: 10.18721/JEST.240109  
УДК 621.762

*С.А. Котов, Л.П. Батурова, А.Н. Бурлова, Е.Д. Зверева*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

## **ВЛИЯНИЕ МЕТОДА МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ НА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТИТАНА**

Титан обладает уникальным сочетанием высокой коррозионной стойкости и высокой удельной прочности, благодаря чему нашел широкое применение в областях, где требуется долговечность и надежность оборудования. Однако во многих условиях эксплуатации ему требуется защита от коррозии в агрессивных средах. Для этого применяются различные методы модифицирования поверхности титана и его сплавов. В работе сравнивались два метода модифицирования: анодное окисление и лазерная обработка. С помощью окисления на поверхности титана формируется инертное покрытие, снижающее выход легирующих компонентов. При лазерной обработке получается развитый рельеф поверхности, повышается микротвердость и образуется защитный оксидный слой. Показано, что лазерная обработка эффективнее повышает коррозионную стойкость титана и его сплавов в агрессивных средах.

КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ТИТАНА; МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ; ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА; АНОДНОЕ ОКСИДИРОВАНИЕ; ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ТИТАНА В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ.

*Ссылка при цитировании:*

С.А. Котов, Л.П. Батурова, А.Н. Бурлова, Е.Д. Зверева. Влияние метода модифицирования поверхности на электрохимические свойства титана // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 1. С. 95–104. DOI: 10.18721/JEST.240109.

*S.A. Kotov, L.P. Baturova, A.N. Burlova, E.D. Zvereva*

Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

## **INFLUENCE OF THE METHOD OF SURFACE MODIFICATION ON THE ELECTROCHEMICAL PROPERTIES OF TITANIUM**

Titanium possess a unique combination of high resistance to corrosion and high specific strength, which is why it has found wide application in fields where durability and reliability of equipment is required. However, in many operating conditions, it requires corrosion protection in aggressive substances. Various methods of modifying the surface of titanium and its alloys are employed for this purpose. The paper compares two methods of modification: anode oxidation and laser treatment. Oxidation forms inert coating, which reduces the output of alloying components, on the surface of titanium. Laser treatment produces a developed surface relief, increases microhardness and forms a protective oxide layer. We have found that laser treatment is more effective in increasing the corrosion resistance of titanium and its alloys.

RESISTANCE TO CORROSION OF TITANIUM; SURFACE MODIFICATION; LASER PROCESSING; ANODIC OXIDATION; ELECTROCHEMICAL BEHAVIOR OF TITANIUM IN VARIOUS SUBSTANCES.

*Citation:*

S.A. Kotov, L.P. Baturova, A.N. Burlova, E.D. Zvereva. Influence of the method of surface modification on the electrochemical properties of titanium, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 24(01)(2018) 95–104, DOI: 10.18721/JEST.240109.

Широкое промышленное применение титана и его сплавов определяется как уникальными физико-химическими свойствами, так и технологичностью обработки. Благодаря своим свойствам титан применяется в военной промышленности, ракетостроении и космической технике, судостроении. Титан и его сплавы находят все большее применение и в других областях: машиностроении, химической и пищевой промышленности, медицине. Однако основные перспективы применения связаны с титаном как конструкционным материалом. Использование титана позволяет повысить долговечность и надежность оборудования.

Титан — химически активный металл, но в то же время является одним из немногих металлов с исключительно высокой коррозионной стойкостью: практически вечен в атмосфере воздуха, в холодной и кипящей воде, весьма стоек в морской воде и растворах многих солей. Благодаря такой коррозионной стойкости и высоким значениям удельной прочности титановых сплавов их применяют на объектах мировой тепловой и атомной энергетики. По коррозионной устойчивости титан превосходит в большинстве случаев высоколегированные кислотоустойчивые стали [1–4].

Высокая коррозионная стойкость титана обусловлена образованием на его поверхности инертной хорошо срастающейся с металлом очень тонкой пленки диоксида титана. Металл ею «пассивируется», т.е. защищает сам себя от дальнейшего разрушения. В некоторых агрессивных средах титан начинает разрушаться. Существуют различные способы защиты, одним из которых является модифицирование поверхности [5, 6].

Эффективным способом формирования на различных металлах и сплавах инертных оксидных покрытий, снижающих выход легирующих компонентов, служит термическое оксидирование в реактивных газовых средах [7–9]. Виды оксидирования: анодное, воздушно-термическое, паротермическое и аргонокислородное.

Анодное оксидирование осуществляется в электролитах при подаче тока. Создаваемое покрытие обладает высокими показателями шероховатости, благоприятным составом инертных оксидов титана и хорошими защитными свойствами.

Метод паротермического оксидирования основан на воздействии перегретого водяного пара на металл. Исследования покрытий, полученных данным методом, показали, что они обладают большим количеством открытых пор различного размера и высокой шероховатостью поверхности. Образуется трещиноватая поверхность, однако коррозионные свойства таких покрытий удовлетворительны.

Метод аргонокислородного оксидирования представляет собой высокотемпературное воздействие смеси аргона и кислорода на титан для избежания образования малопрочных и некоррозионностойких титанонитридных и прочих соединений, ухудшающих свойства покрытия.

Формирование оксидного покрытия при воздушно-термическом методе происходит за счет нагрева фиксаторов в электропечи с воздушной атмосферой и определенной температурой. При этом оксидирование поверхности повышает трибологические свойства титана, склонность которого к налипанию и задирам обусловлена высоким коэффициентом трения [10].\*

Другой возможный способ модифицирования поверхности — лазерная обработка [11–13]. При этом виде обработки луч лазера воздействует на поверхности, приводя к ее нагреву, плавлению и испарению титана. Перемещая луч по поверхности, можно получить развитый рельеф поверхности. Лазерная обработка позволяет повысить микротвердость и стойкость к коррозии за счет образования оксидного слоя. Увеличение твердости поверхностного слоя осуществляется за счет упрочняющего воздействия обработки и придания микро- и нанометровых показателей морфологии поверхности [14–16]. Меняя режимы обработки, можно получить поверхность с требуемыми показателями: диаметром пор и размером шероховатости. Преимущества лазерной обработки в том, что метод не требует расходных материалов, а получаемая поверхность характеризуется высокой чистотой и не со-

\* Патент RG 12-487. Способ модификации поверхности титана / Коршунов Л.Г., Черненко Н.Л., Пушин В.Г. 2014. 4 с.

держит остатков кислот или абразивных частиц [17]. Импульсная лазерная обработка поверхности способствует упрочнению конструкции и повышению ее функциональных свойств.

Целью нашей работы было исследование электрохимического поведения титана с модифицированной поверхностью в агрессивной среде.

#### Материал и методика исследования

Для изучения электрохимического поведения титана в различных средах снимали анодные потенциодинамические поляризационные кривые, используя универсальный потенциостат-гальваностат ИРС-Рго М фирмы «Volta» с компьютерной системой регистрации и обработки данных в режиме «программатора».

Лазерная обработка титановой пластины осуществлялась на волоконном иттербиевом лазере (длина волны – 1,07 мкм; модель ЛС-16 IPG, фокусное расстояние линзы 500 мм; расстояние между линзой и поверхностью 705 мм;  $D_{\text{лин}}$  = 14 мм; толщина пластины – 0,5 мм). Обработка производилась расфокусированным лучом без защиты аргоном. Для исследования кривой был выбран один образец, обработанный при следующем режи-

ме: мощность – 0,8 кВт, скорость – 15 м/с, результат – оксидная пленка. Поверхность титанового образца после лазерной обработки представлена на рис. 1.

Электрохимическое оксидирование титановых пластин проводили в 15 %-м растворе  $\text{H}_2\text{SO}_4$  при различных потенциалах с целью получения оксидных пленок, имеющих различную микроструктуру поверхностного слоя, толщину и цвет.

Для оксидирования использовали пластинки титана толщиной 0,5 мм размером 10×40 мм. Оксидирование проводили, осуществляя в течение 20 с анодную поляризацию пластин титана при следующих потенциалах: 1,3; 1,5; 1,8; 2,3; 2,8 В.

На рис. 2 представлено изображение окрашенных пластин титана при различных потенциалах поляризации. Видно, что в исследуемом интервале потенциалов пластины титана окрашиваются в различные цвета в зависимости от потенциала поляризации: от золотистого при потенциале 1,30 до голубого при потенциале 2,50 В. По мере утолщения оксидной пленки цвет ее изменяется в следующей последовательности: золотистый – темно-коричневый – фиолетовый – синий – голубой. При этом толщина пленки меняется от 9,5–12,5 нм до 160–300 нм.



Рис. 1. Поверхность титана после лазерной обработки  
Fig. 1. Titanium surface after laser treatment

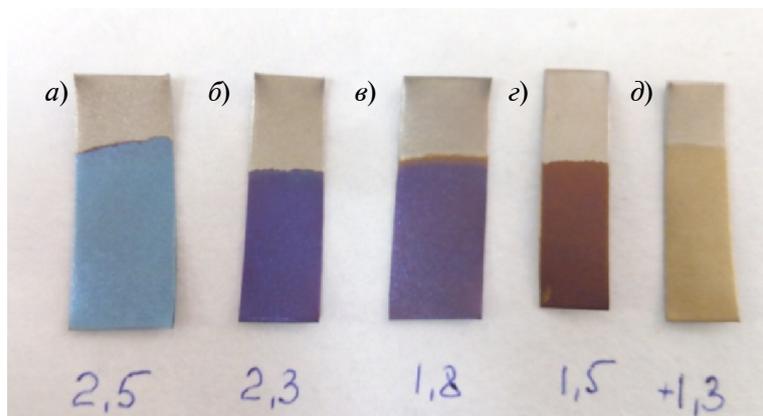


Рис. 2. Изображение пластин титана после поляризации в 15%-ном растворе  $\text{H}_2\text{SO}_4$  при различных потенциалах, В: а – 2,50; б – 2,30; в – 1,80; г – 1,50; д – 1,30  
Fig. 2. Titanium plates after polarization in 15 %- $\text{H}_2\text{SO}_4$  solution at various potentials: а – 2,50; б – 2,30; в – 1,80; г – 1,50; д – 1,30 В

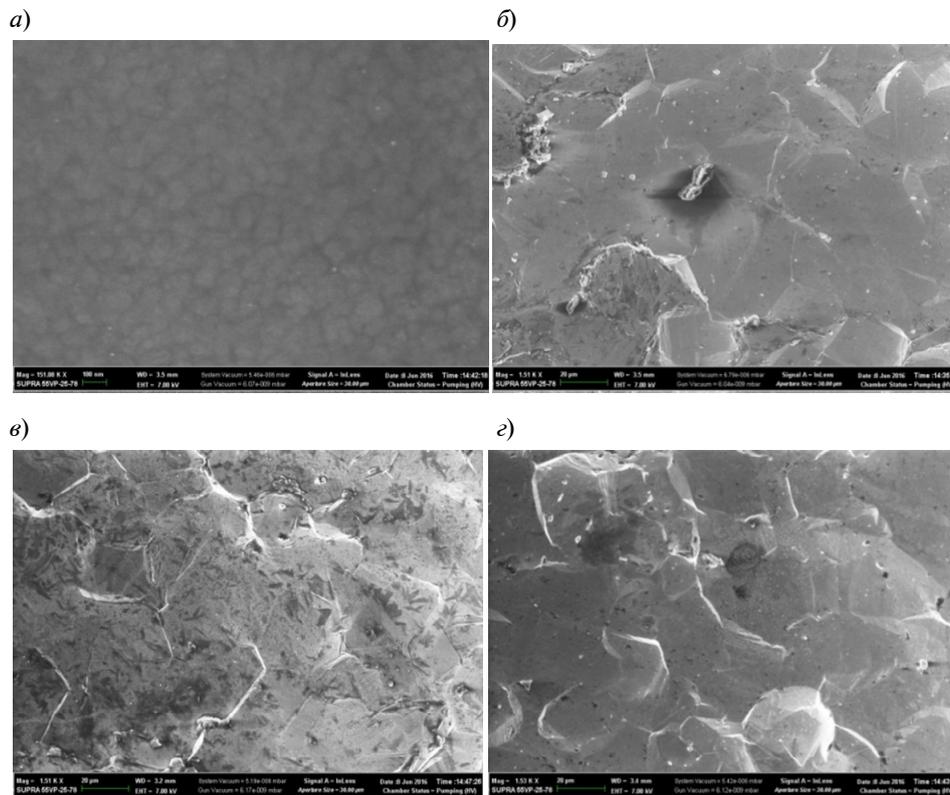


Рис. 3. РЭМ-изображения поверхности титана после окрашивания при различных потенциалах: а – 2500, б – 2300, в – 1800, г – 1300 мВ  
 Fig. 3. SEM-Images of titanium surface after painting at various potentials: а – 2500, б – 2300, в – 1800, г – 1300 mV

На рис. 3 представлены РЭМ-изображения поверхности титана после оксидирования в 15 %-м растворе  $H_2SO_4$  при различных потенциалах.

Видно, что изменение потенциала поляризации в интервале от 1,30 до 2,3 В практически не влияет на микроструктуру оксидного слоя. При потенциале 2,5 В структура поверхностного оксидного слоя становится более мелкокристаллической.

Полученные данные о весовом составе (в %) поверхностного слоя оксидированного титана при разных конечных потенциалах поляризации следующие:

*при потенциале 2,5 В (спектр 83)*

O.....	18,02
Na.....	0,19
Al.....	0,23
Cl.....	0,07
K.....	0,13
Ca.....	0,28

Ti.....	81,08
Сумма.....	100,00
<i>при потенциале 1,8 В (спектр 84)</i>	
O.....	13,87
Al.....	0,25
Si.....	0,12
Ca.....	0,10
Ti.....	85,66
Сумма.....	100,00
<i>при потенциале 1,3 В (спектр 85)</i>	
O.....	8,52
Al.....	0,36
Si.....	0,11
K.....	0,06
Ti.....	90,89
Сумма.....	100,00

По мере увеличения потенциала поляризации соотношение титан/кислород (Ti/O) в оксиде изменяется от 10:1 при потенциале 1,3 В до 4:1 при потенциале 2,5 В. Это указывает на то, что при более поло-

жительном потенциале формируются оксидные слои с более высокой степенью окисленности.

Для исследования электрохимического поведения оксидированных образцов титана были выбраны:

образцы, имеющие крупнокристаллическую структуру поверхностного слоя (рис. 2.7, б) и окрашенные в фиолетовый цвет при потенциале 1,8 В;

образцы, имеющие мелкокристаллическую структуру поверхностного слоя (рис. 2.7, а) и окрашенные в синий цвет при потенциале 2,5 В.

Известно, что в нейтральных и кислых растворах, кроме HF и HBr, титан находится в устойчивом пассивном состоянии. В соответствии с этим в работе проведено исследование электрохимического поведения титана BT1-0 в нейтральных сульфатных растворах (раствор 1), в растворах, содержащих агрессивные ионы – хлорид-ионы (раствор 2) и фторид-ионы (слабокислый раствор – раствор 3). Состав растворов:

0,1н Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (раствор 1);

0,1н Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 0,1н NaCl (раствор 2);

0,1н Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 0,5н NaF – добавка HF до pH=3 (раствор 3).

Результаты исследования представлены на рис. 4.

Анодная потенциодинамическая поляризационная кривая, полученная на титане в сульфатном растворе, представлена на рис. 4 (кривая 1). Стационарный потенциал Ti в 0,1 н растворе Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> равен  $E = -350$  мВ. Как видно, в чисто сульфатном растворе титан находится в устойчивом пассивном состоянии в широком интервале потенциалов, а на поляризационной кривой отсутствует область активного растворения. При потенциале  $E = 1600$  мВ на кривой наблюдается рост анодного тока.

На рис. 4 представлена анодная потенциодинамическая поляризационная кривая (2), полученная на титане в растворе 0,1 н Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+0,1 н NaCl. Как видно из рис. 4, в сульфатно-хлоридных растворах титан также находится в устойчивом пассивном состоянии. Стационарный потенциал равен  $E = -0,45$  В.

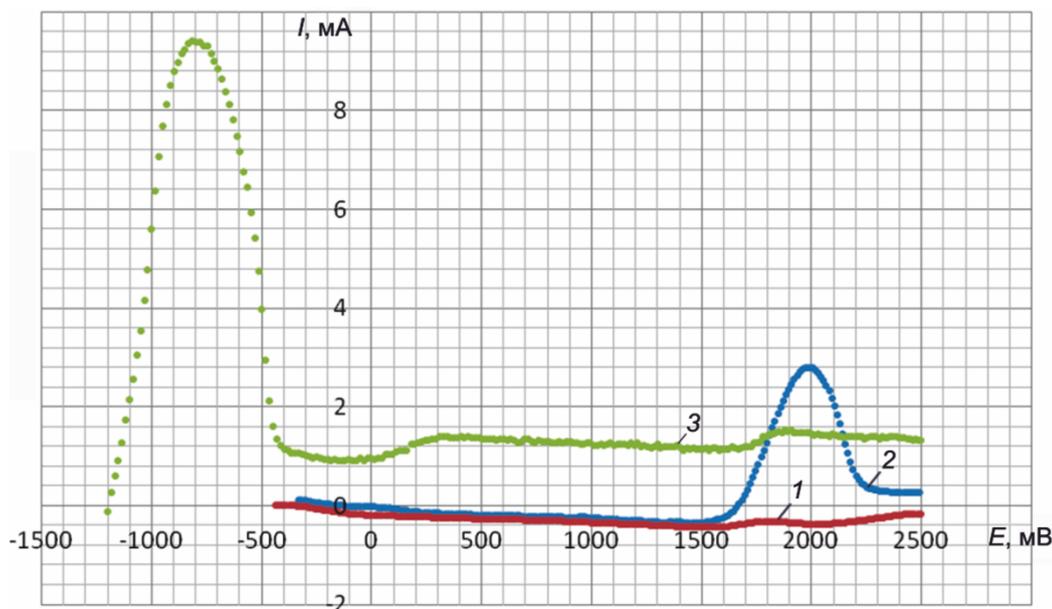


Рис. 4. Анодные потенциодинамические поляризационные кривые, полученные на титане BT 1-0 в средах, содержащих: 0,1 н раствора Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (1); 0,1 н Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+0,1 н NaCl (2); 0,1 н Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 0,5 н NaF (pH = 3) (3)

Fig. 4. Anodic potentiodynamic polarizing curves obtained on titanium in environments containing: 0,1 N solution Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (1); 0,1 N Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 0,1 N NaCl (2); 0,1 N Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 0,5 N NaF (pH = 3) (3)

Анодная потенциодинамическая поляризационная кривая, полученная на титане в растворе 0,1 н Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 0,5 н NaF (pH=3) также представлена на рис. 4 (кривая 3). Как видно, добавка фторид-ионов F<sup>-</sup> в сульфатный раствор приводит к смещению стационарного потенциала в отрицательную сторону на ~700 мВ и составляет E = -1157 мВ. Снятие анодных поляризационных кривых в смешанном сульфатно-фторидном растворе показало, что при сдвиге потенциала в отрицательную сторону на поляризационной кривой появляется область активного растворения. При потенциале E = -800 мВ и положительнее на поляризационной кривой наблюдается уменьшение анодных токов (область перехода титана в пассивное состояние).

Таким образом, на основе полученных результатов из исследуемых растворов для электрохимических испытаний титана с модифицированной поверхностью был выбран смешанный сульфатно-фторидный раствор состава 0,1 н Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 0,5 н NaF (pH=3).

Исследование влияния предварительной обработки поверхности титана ВТ1-0 на скорость его растворения проводили в смешанном сульфатно-фторидном растворе.

На рис. 5 представлены анодные потенциодинамические поляризационные кривые, полученные на титане с различной модифицированной поверхностью – оксидированные при потенциалах 1,3 В (кривая 2) и 2,5 В (кривая 3) и с лазерной обработкой поверхности (кривая 4). Для сравнения представлена анодная потенциодинамическая поляризационная кривая (1), полученная на титане без обработки (в исходном состоянии).

На рис. 5 видно, что в результате оксидирования и лазерной обработки на поверхности титана формируются оксидные слои с высокими защитными свойствами. В обоих случаях титан с модифицированным поверхностным слоем в смешанном сульфатно-фторидном растворе находится в устойчивом пассивном состоянии. Стационарный потенциал титана после обработки смещается в положительную сторону на ~700 мВ при лазерной обработке и составляет -490 мВ, после оксидирования на ~1000 мВ и составляет -190 мВ. На поляризационных кривых, полученных в смешанном сульфатно-фторидном растворе, отсутствует область активного растворения (рис. 5, кривые 2–4).

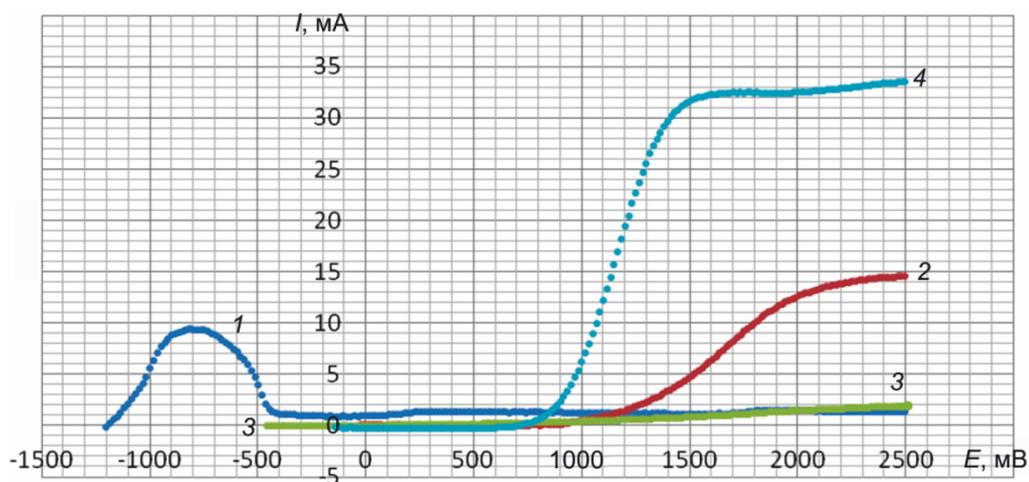


Рис. 5. Анодные потенциодинамические поляризационные кривые, полученные в сульфатно-фторидном растворе: 1 – титан в исходном состоянии; 2 – титан, оксидированный в 15 % растворе H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; 3 – титан с лазерной обработкой поверхности; 4 – оксидированный титан, окрашенный в синий цвет в условиях катодной поляризации

Fig. 5. Anodic potentiodynamic polarizing curve obtained in sulfate-fluoride solution on samples: 1 – Titan in its original state; 2 – is oxidized in the 15 % solution of H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Titan; 3 – Titan with laser surface treatment; 4 – oxidized titanium, painted in blue color in the conditions of cathodic polarization



Титан после лазерной обработки поверхности находится в пассивном состоянии в широком интервале потенциалов, вплоть до потенциала 2,5 В. Это свидетельствует, что при такой обработке формируются бездефектные, плохо проводящие ионы и электроны оксидные слои с высокими защитными свойствами.

На поляризационных кривых, полученных на оксидированном при потенциалах 1,3 и 2,3 В титане, окрашенном соответственно в фиолетовый и синий цвета, при потенциалах ~0,8 и ~1,1 В наблюдается рост тока, переходящий при более положительных потенциалах в предельное значение. Рост тока связан с началом процесса выделения кислорода. При этом предельное значение тока на титане, оксидированном при потенциале 2,5 В и окрашенном в синий цвет, примерно в 2 раза больше, чем предельное значение тока на титане, оксидированном при потенциале 1,3 В и окрашенном в фиолетовый цвет (соответственно 32 и 15 мА).

При оксидировании титана на поверхности образуются более дефектные оксидные пленки, чем при лазерной обработке, причем степень дефектности оксидной пленки возрастает с увеличением потенциала оксидирования.

Следует отметить, что анодные потенциодинамические поляризационные кривые, полученные в смешанном сульфатно-фторидном растворе (раствор 2) на электродах, изготовленных из порошков титана, аналогичны поляризационным кривым, полученным на титане с лазерной обработкой.

### Заключение

Экспериментально показано, что модифицирование поверхности титана и его сплавов эффективно повышает коррозионную стойкость титановых изделий в различных средах, что свидетельствует о целесообразности проведения этой дополнительной технологической операции.

По результатам предварительных электрохимических испытаний для оценки эффективности модифицирования поверхности титановых сплавов был выбран смешанный сульфатно-фторидный раствор.

Результаты электрохимических испытаний титановых сплавов показали, что лазерное модифицирование поверхности в наибольшей степени повышает их антикоррозионные свойства. При оксидировании титана на поверхности образуются более дефектные оксидные пленки, причем степень дефектности растет с увеличением потенциала оксидирования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рачев Х., Стефанова С. Справочник по коррозии: Пер. с болгарского / Пер. С.И. Нейковского; под ред. Н.И. Исаева. М.: Мир, 1982. 520 с.
2. Анастасиади Г.П., Кондратьев С.Ю., Рудской А.И. Избирательное высокотемпературное окисление фаз в литом жаропрочном сплаве системы 25Cr – 35Ni – Si – Nb – C // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2014. № 8 (710). С. 3–8.
3. Анастасиади Г.П., Кокорина А.В., Кондратьев С.Ю. Исследование процесса окисления жаропрочного жаростойкого сплава Fe-25Cr-35Ni-0,45C-Si-Nb // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. 2014. № 3 (202). С. 161–169.
4. Кондратьев С.Ю., Анастасиади Г.П., Рудской А.И. Наноструктурный механизм образования оксидной пленки в жаростойких сплавах на основе Fe – 25Cr – 35Ni // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2014. № 10 (712). С. 15–20.
5. Медвецкий В.М., Попов В.О., Кондратьев С.Ю. Лазерное упрочнение резьбовых соединений // *РИТМ: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация*. 2012. № 4 (72). С. 108–110.
6. Кондратьев С.Ю., Вайнерман А.Е., Попов В.О. Лазерное модифицирование поверхности сталей и сплавов // *РИТМ: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация*. 2013. № 7 (85). С. 28–31.
7. Мальчихина А.И. Биосовместимые покрытия и материалы // *Материалы II Всероссийской заочной научной конференции для молодых ученых, студентов и школьников «Актуальные вопросы «биомедицинской инженерии»: электронное науч. издание. СПб.: ФГУП НТЦ «Информрегистр», 2012. С. 83–89.*

8. Попов В.О., Кондратьев С.Ю. Упрочнение титановых сплавов методом лазерного оксидирования // РИТМ: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. 2013. № 4 (82). С. 106–110.
9. Попов В.О., Смирнов С.Н., Кондратьев С.Ю. Лазерное легирование деталей из сталей и сплавов // РИТМ: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. 2013. № 9 (87). С. 32–36.
10. Мирзоев Р.А., Давыдов А.Д. Анодные процессы электрохимической и химической обработки металлов. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 382 с.
11. Попов В.О., Кондратьев С.Ю. Лазерное упрочнение труб // РИТМ: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. 2014. № 5 (93). С. 84–86.
12. Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А. Новый подход к синтезу порошковых и композиционных материалов электронным лучом. Часть 1. Технологические особенности процесса // Металловедение и термическая обработка металлов. 2016. № 1 (727). С. 30–35.
13. Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А. Новый подход к синтезу порошковых и композиционных материалов электронным лучом. Часть 2. Практические результаты на примере сплава ВТ6 // Металловедение и термическая обработка металлов. 2016. № 3 (729). С. 40–44.
14. Соколов Ю.А., Павлушин Н.В., Кондратьев С.Ю. Новые аддитивные технологии с использованием пучка ионов // Вестник машиностроения. 2016. № 9. С. 72–76.
15. Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А., Копяев В.Н. Особенности моделирования процесса послойного синтеза изделий электронным лучом // Журнал технической физики. 2015. Т. 85. Вып. 11. С. 91–96.
16. Лясников В.Н., Телегин С.В. Импульсная лазерная обработка поверхности титана // Материалы II Всероссийской заочной научной конференции для молодых ученых, студентов и школьников «Актуальные вопросы «биомедицинской инженерии»: электронное научн. издание. СПб.: ФГУП НТЦ «Информрегистр», 2012. С. 74–78.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- КОТОВ Сергей Анатольевич** — кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого  
E-mail: Serkotov51@mail.ru
- БАТУРОВА Людмила Петровна** — кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого  
E-mail: baturova\_lp@mail.ru
- БУРЛОВА Анна Николаевна** — студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого  
E-mail: an.burlova@mail.ru
- ЗВЕРЕВА Екатерина Дмитриевна** — студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого  
E-mail: Ekatzvereff@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 25.01.2018

#### REFERENCES

- [1] Rachev Kh., Stefanova S. Spravochnik po korrozii: Per. s bolgarskogo / Per. S.I. Neikovskogo; pod red. N.I. Isaeva. M.: Mir, 1982. 520 s. (rus.)
- [2] Anastasiadi G.P., Kondrat'ev S.Iu., Rudskoi A.I. Izbiratel'noe vysokotemperaturnoe okislenie faz v litom zharoprochnom splave sistemy 25Cr – 35Ni – Si – Nb – C. *Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov*. 2014. № 8 (710). S. 3–8. (rus.)
- [3] Anastasiadi G.P., Kokorina A.V., Kondrat'ev S.Iu. Issledovanie protsessa okisleniia zharoprochnogo zharostoikogo splava Fe-25Cr-35Ni-0,45C-Si-Nb. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU*. 2014. № 3 (202). S. 161–169. (rus.)
- [4] Kondrat'ev S.Iu., Anastasiadi G.P., Rudskoi A.I. Nanostrukturnyi mekhanizm obrazovaniia oksidnoi plenki v zharostoikikh splavakh na osnove Fe – 25Cr – 35Ni. *Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov*. 2014. № 10 (712). S. 15–20. (rus.)
- [5] Medvetskii V.M., Popov V.O., Kondrat'ev S.Iu. Lazernoe uprochnenie rez'bovykh soedinenii. *RITM: Remont. Innovatsii. Tekhnologii. Modernizatsiia*. 2012. № 4 (72). S. 108–110. (rus.)
- [6] Kondrat'ev S.Iu., Vainerman A.E., Popov V.O. Lazernoe modifitsirovanie poverkhnosti stalei i splavov. *RITM: Remont. Innovatsii. Tekhnologii. Modernizatsiia*. 2013. № 7 (85). S. 28–31. (rus.)

- [7] **Mal'chikhina A.I.** Biosovmestimye pokrytiia i materialy. *Materialy II Vserossiiskoi zaochnoi nauchnoi konferentsii dlia molodykh uchenykh, studentov i shkol'nikov «Aktual'nye voprosy «biomeditsinskoi inzhenerii»: elektronnoe nauch. izdanie.* SPb.: FGUP NTTs «Informregistr», 2012. S. 83–89. (rus.)
- [8] **Popov V.O., Kondrat'ev S.Iu.** Uprochnenie titanovykh splavov metodom lazernogo oksidirovaniia. *RITM: Remont. Innovatsii. Tekhnologii. Modernizatsiia.* 2013. № 4 (82). S. 106–110. (rus.)
- [9] **Popov V.O., Smirnov S.N., Kondrat'ev S.Iu.** Lazernoe legirovanie detalei iz stalei i splavov. *RITM: Remont. Innovatsii. Tekhnologii. Modernizatsiia.* 2013. № 9 (87). S. 32–36.
- [10] **Mirzoev R.A., Davydov A.D.** Anodnye protsessy elektrokhimicheskoi i khimicheskoi obrabotki metallov. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2013. 382 s. (rus.)
- [11] **Popov V.O., Kondrat'ev S.Iu.** Lazernoe uprochnenie trub. *RITM: Remont. Innovatsii. Tekhnologii. Modernizatsiia.* 2014. № 5 (93). S. 84–86. (rus.)
- [12] **Rudskoi A.I., Kondrat'ev S.Iu., Sokolov Iu.A.** Novyi podkhod k sintezu poroshkovykh i kompozitsionnykh materialov elektronnykh luchom. Chast' 1. *Tekhnologicheskie osobennosti protsessa. Metallovedenie i termicheskaiia obrabotka metallov.* 2016. № 1 (727). S. 30–35. (rus.)
- [13] **Kondrat'ev S.Iu., Sokolov Iu.A.** Novyi podkhod k sintezu poroshkovykh i kompozitsionnykh materialov elektronnykh luchom. Chast' 2. Prakticheskie rezul'taty na primere splava VT6. *Metallovedenie i termicheskaiia obrabotka metallov.* 2016. № 3 (729). S. 40–44. (rus.)
- [14] **Sokolov Iu.A., Pavlushin N.V., Kondrat'ev S.Iu.** Novye additivnye tekhnologii s ispol'zovaniem puchka ionov. *Vestnik mashinostroeniia.* 2016. № 9. S. 72–76. (rus.)
- [15] **Rudskoi A.I., Kondrat'ev S.Iu., Sokolov Iu.A., Kopaev V.N.** Osobennosti modelirovaniia protsessa posloinogo sinteza izdelii elektronnykh luchom. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki.* 2015. T. 85. Vyp. 11. S. 91–96. (rus.)
- [16] **Liasnikov V.N., Telegin S.V.** Impul'snaia lazernaia obrabotka poverkhnosti titana. *Materialy II Vserossiiskoi zaochnoi nauchnoi konferentsii dlia molodykh uchenykh, studentov i shkol'nikov «Aktual'nye voprosy «biomeditsinskoi inzhenerii»: elektronnoe nauchn. izdanie.* SPb.: FGUP NTTs «Informregistr», 2012. S. 74–78. (rus.)

#### AUTHORS

- KOTOV Sergei A.** – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*  
E-mail: Serkotov51@mail.ru
- BATUROVA Liudmila P.** – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*  
E-mail: baturova\_lp@mail.ru
- BURLOVA Anna N.** – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*  
E-mail: an.burlova@mail.ru
- ZVEREVA Ekaterina D.** – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*  
E-mail: EkatZvereff@mail.ru

Received: 25.01.2018

DOI: 10.18721/JEST.240110  
УДК 621.771.23

*А.А. Кононов, М.А. Матвеев*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

## **ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПНОЙ СТАЛИ**

Исследованы процессы структурообразования при горячей прокатке электротехнической анизотропной стали. Показано, что формирование структуры поверхностных слоев горячекатаной полосы происходит в результате совместного действия фазового превращения  $\gamma \rightarrow \alpha$  и динамической рекристаллизации, центральных слоев – в результате протекания процесса возврата деформированных зерен. На основании результатов исследования установлено, что неоднородная по толщине горячекатаной полосы ЭАС структура формируется из-за неоднородного развития фазового превращения. Поверхностные слои полосы во время прокатки охлаждаются быстрее, чем центральные, вследствие чего фазовое превращение  $\gamma \rightarrow \alpha$  протекает в них интенсивнее. Полигональный феррит при горячей прокатке исследуемых сталей формируется в результате совместного протекания фазового превращения  $\gamma \rightarrow \alpha$  и динамической рекристаллизации. Поскольку в центральной части полосы фазовое превращение протекает слабо, то в них образуется деформированная структура.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ АНИЗОТРОПНАЯ СТАЛЬ; ТЕКСТУРА ГОССА; ГОРЯЧАЯ ПРОКАТКА; ФАЗОВОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ; КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКАЯ ТЕКСТУРА.

*Ссылка при цитировании:*

А.А. Кононов, М.А. Матвеев. Формирование структуры при горячей прокатке электротехнической анизотропной стали // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 1. С. 104–112. DOI: 10.18721/JEST.240110.

*A.A. Kononov, M.A. Matveev*

Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

## **FORMATION OF THE STRUCTURE OF GRAIN-ORIENTED SILICON STEEL DURING HOT ROLLING**

We have studied the processes of structure formation during hot rolling of grain-oriented silicon steel. We have confirmed that the structure of surface layers of a hot-rolled strip forms as a result of two processes: the  $\gamma \rightarrow \alpha$  phase transformation and dynamic recrystallization. The central layers form as a result of recovery of deformed grains. Based on the obtained results, we have established that a structure that is inhomogeneous in the thickness of the hot-rolled strip forms due to non-uniform phase transformation. The surface layers of the strip are cooled faster than the central ones during rolling because the  $\gamma \rightarrow \alpha$  phase transformation proceeds more intensively in these layers. Polygonal ferrite is formed during hot rolling of the studied steels as a result of two processes: the  $\gamma \rightarrow \alpha$  phase transformation and dynamic recrystallization. Since the phase transformation in the central part of the strip is weak, a deformed structure is formed there.

GRAIN-ORIENTED SILICON STEEL; GOSS TEXTURE; HOT ROLLING; PHASE TRANSFORMATION; CRYSTALLOGRAPHIC TEXTURE.

*Citation:*

A.A. Kononov, M.A. Matveev. Formation of the structure of grain-oriented silicon steel during hot rolling, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 24(01)(2018) 104–112, DOI: 10.18721/JEST.240110.

## Введение

Развитие многих отраслей промышленности требует повышения эксплуатационных свойств как конструкционных, так и функциональных материалов, которые обладают комплексом уникальных или аномально высоких свойств. Материалы с особыми физическими, химическими и механическими свойствами используются в различных областях современной техники. Это – материалы для электроники, магнитные и оптические материалы, сплавы высокого демпфирования и с эффектом памяти формы, биомолекулярные материалы, жаропрочные и коррозионностойкие сплавы, композиционные материалы, сплавы для космической техники и др. [1–8]. Создание функциональных материалов возможно лишь на основе современных экспериментальных и теоретических подходов, описывающих физические процессы, формирующие их требуемые структуру и свойства.

К таким материалам относится и электротехническая анизотропная сталь (ЭАС), магнитомягкий материал, используемый для изготовления сердечников трансформаторов. Кристаллографическая текстура Госсса –  $\{110\}\langle 001\rangle$  («ребровая» текстура) в готовом листе обеспечивает высокую магнитную индукцию и минимальные потери на перемагничивание [9, 10].

Непосредственное формирование текстуры  $\{110\}\langle 001\rangle$  в листе ЭАС происходит на этапе высокотемпературного отжига в процессе вторичной рекристаллизации за счет избирательного роста зерен с «ребровой» ориентировкой. Вторичная рекристаллизация начинается в поверхностном слое листа [11]. Развитие аномального роста «ребровых» зерен возможно в результате механизма текстурной наследственности [12–14],\* согласно которому предпосылки

успешного развития полномасштабной текстуры  $\{110\}\langle 001\rangle$  в готовом листе закладываются на этапе горячей прокатки. Горячекатаная полоса ЭАС имеет сильную структурную неоднородность: поверхностные слои состоят из почти равноосных зерен феррита, центральные – из вытянутых в направлении прокатки. Именно во время горячей прокатки в поверхностных слоях полосы образуются зерна с госссовской ориентировкой [12, 15–16]. Чем острее ориентировка  $\{110\}\langle 001\rangle$  в горячекатаной полосе, тем совершеннее текстура в готовом листе ЭАС [17].

Считается, что ориентировка  $\{110\}\langle 001\rangle$  образуется в области деформации сдвига (обусловлена высоким контактным трением), проникающей на глубину  $\sim 1/4$  от толщины полосы, за счет разворотов решетки при деформации [17–19]. Это подтверждается тем, что большинство «ребровых» зерен – вытянутые деформированные [11, 19, 20], а компонента  $\{110\}\langle 001\rangle$  острее в металле, прокатанном с небольшими обжатиями, т.к. в этом случае в горячекатаной полосе присутствует минимальное количество рекристаллизованных зерен. С повышением обжатий доля рекристаллизованных зерен повышается, а доля компоненты  $\{110\}\langle 001\rangle$  уменьшается.

Однако некоторые авторы полагают [21], что структура поверхностных слоев полосы формируется в результате рекристаллизации. Согласно их представлениям, в очаге деформации поверхность полосы захлаживается и металл в этих слоях наклепывается сильнее, чем в центральных. В паузе после прохода поверхностные слои разогреваются, и в них развивается первичная рекристаллизация. Подтверждением этому служит наличие в поверхностных слоях горячекатаной полосы крупных «ребровых» зерен без субструктуры и мелких «ребровых» зерен с развитой субструктурой и градиентом ориентировки [22]. С другой стороны, в работе [23] наличие рекристаллизованных «ребровых» зерен в поверхностных слоях горячекатаной поло-

\* См. также: Лобанов М.Л. Управление структурой и текстурой электротехнической анизотропной стали с нитридным ингибированием: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.16.01; защищена 18.06.2010, 2010. 238 с.

сы связывают с совместным действием сдвиговой деформации и динамической рекристаллизации *in situ*.

Таким образом, в настоящее время нет полного понимания механизма формирования структуры и текстуры горячекатанной полосы, в частности повышенной плотности ориентировки  $\{110\}\langle 001 \rangle$  в поверхностных слоях горячекатаной ЭАС. В связи с этим цель данной работы – определение механизмов формирования структуры при горячей прокатке ЭАС.

### Материал и методики исследования

В работе исследовали сталь трех химических составов, отличающихся содержанием кремния и углерода (% масс.): 1) Fe – 3,2 % Si – 0,035 % C; 2) Fe – 3,2 % Si – 0,025 % C; 3) Fe – 1,3 % Si – 0,04 % C. Это обеспечило получение различного содержания  $\gamma$ -фазы в структуре стали при температурах горячей прокатки (см. табл.).

Прокатку образцов осуществляли за несколько проходов ( $n_{пр}$ ) с обжатиями  $\epsilon_{пр}$  за проход и температурой начала прокатки  $T_{пр}$ ; после каждого прохода образцы помещали в печь и для выравнивания температуры по сечению образца выдерживали при температурах начала прокатки различ-

ное время  $t_{пауз}$ . После последнего прохода образцы охлаждали на воздухе. Режимы лабораторной прокатки отражены в таблице ( $\epsilon_{пр}$  – суммарные обжатия;  $F_{\gamma}$  – доля  $\gamma$ -фазы в металле при температурах начала прокатки;  $T_{кон}$  – температура металла после последнего прохода).

Исследование структуры проводили на оптическом микроскопе *Leica DMI 5000M* в продольном сечении. Количественный металлографический анализ проводили с использованием анализатора изображений *Thixomet PRO*.

### Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 представлена структура стали химического состава 1, прокатанного с паузами  $t_{пауз} = 300$  с (режимы 1–4 в таблице) в продольном сечении.

Прокатка по режиму 1 приводит к развитию в металле сквозной рекристаллизованной структуры из-за высокой, 1200 °С, температуры прокатки (рис. 1, а) Размер зерен составляет ~100 мкм. В центральной части образца присутствуют мелкие зерна феррита, по-видимому, образовавшиеся в результате фазового превращения  $\gamma \rightarrow \alpha$ , протекающего при остывании стали после прокатки.

### Режимы лабораторной горячей прокатки

Schedule of the laboratory hot rolling

Номер режима прокатки	Температура прокатки, °С		$\epsilon_{пр}$ , %	$n_{пр}$ , ШТ.	$\epsilon_{сум}$ , %	$t_{пауз}$ , с	$F_{\gamma}$ , %	Номер состава стали
	начала $T_{пр}$	конца $T_{кон}$						
1	1200	1100	50	4	91	300	13	1
2	1100	1000	50	4	92	300	19	1
3	1000	950	50	4	90	300	12	1
4	1100	1000	25	7	85	300	19	1
5	1100	1000	50	4	92	30	19	1
6	1100	800	50	3	84	0	19	1
7	1100	1000	50	4	92	300	9	2
8	1100	1000	50	4	91	300	90	3

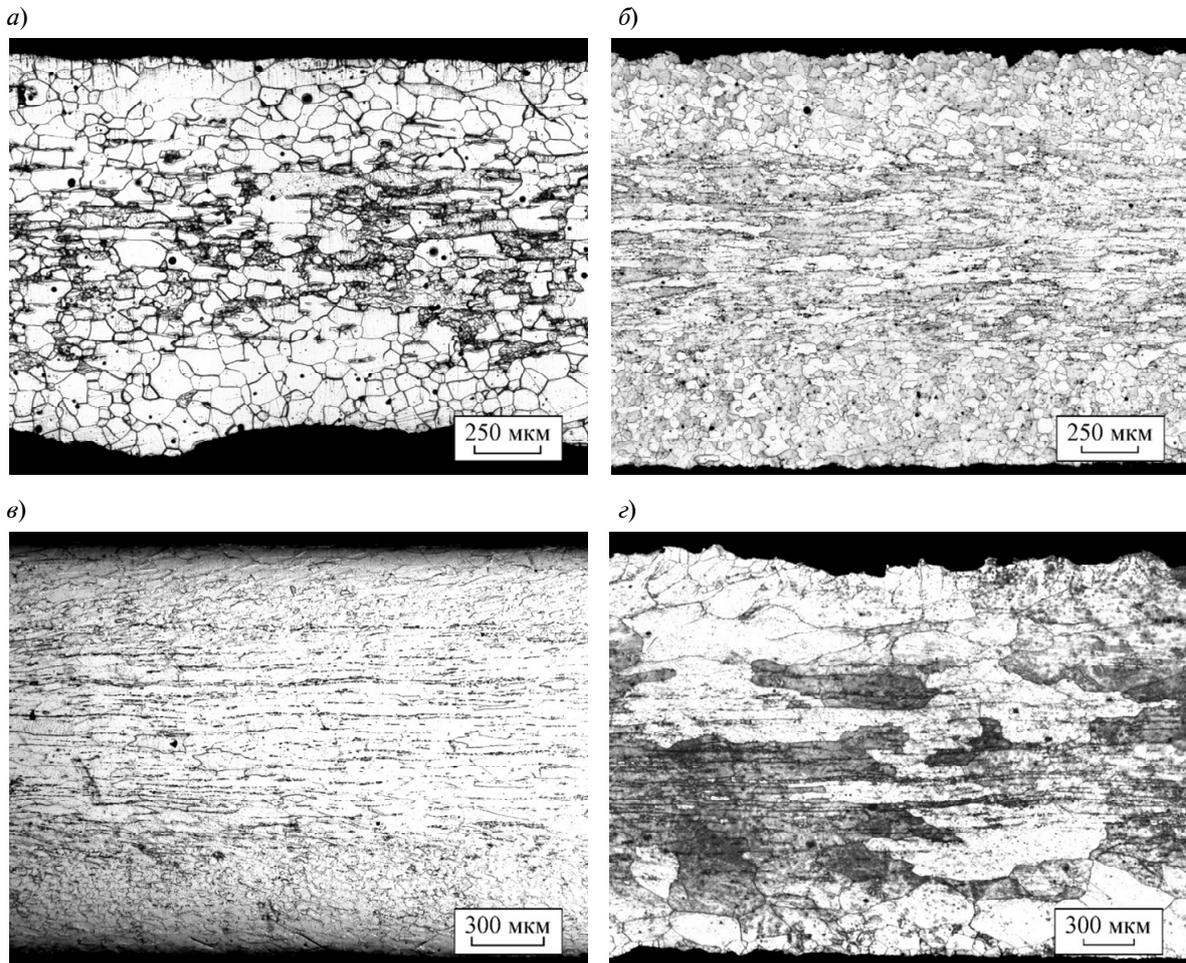


Рис. 1. Структура прокатанного металла в продольном сечении (состав 1), прокатанного с междеформационными паузами  $t_{\text{пауз}} = 300$  с: *a* –  $T_{\text{пр}} = 1200$  °С,  $\epsilon_{\text{пр}} = 50$  % (режим 1); *б* –  $T_{\text{пр}} = 1100$  °С,  $\epsilon_{\text{пр}} = 50$  % (режим 2); *в* –  $T_{\text{пр}} = 1000$  °С,  $\epsilon_{\text{пр}} = 50$  % (режим 3); *г* –  $T_{\text{пр}} = 1100$  °С,  $\epsilon_{\text{пр}} = 25$  % (режим 4)

Fig. 1. Structure of the rolled metal in longitudinal section (composition 1) which was rolled with pauses  $t_{\text{пауз}} = 300$  s: *a* –  $T_{\text{рол}} = 1200$  °С,  $\epsilon_{\text{pass}} = 50$  % (schedule 1); *b* –  $T_{\text{рол}} = 1100$  °С,  $\epsilon_{\text{pass}} = 50$  % (schedule 2); *c* –  $T_{\text{рол}} = 1000$  °С,  $\epsilon_{\text{pass}} = 50$  % (schedule 3); *d* –  $T_{\text{рол}} = 1100$  °С,  $\epsilon_{\text{pass}} = 25$  % (schedule 4)

При прокатке по режиму 2 ( $T_{\text{пр}} = 1100$  °С) в стали формируется неоднородная по толщине проката структура: в поверхностных слоях – равноосные зерна феррита, в центральных – вытянутые в направлении прокатки (рис. 1, б). Размер зерна в поверхностных слоях составляет 10–40 мкм, а длина зерен в центральной части образца – 300–700 мкм. Как видно, снижение температуры прокатки приводит к уменьшению размера зерна. Толщина слоя равноосных зерен составляет 20–25 % от

толщины образца. Больше снижение температуры прокатки ( $T_{\text{пр}} = 1000$  °С, режим 3) приводит к большему измельчению зерна в поверхностных слоях по сравнению с прокаткой при температуре  $T_{\text{пр}} = 1100$  °С – средний диаметр зерна в этом случае составляет 5–25 мкм. В центральных слоях сформировалось вытянутое в направлении прокатки зерно. Толщина слоя равноосных зерен осталась неизменной и составила 20–25 % от толщины образца (рис. 1, в).

Анализируя результаты для режимов 1–3, можно заключить, что снижение температуры прокатки приводит к уменьшению интенсивности процессов рекристаллизации в металле. При этом возможно было ожидать и расширения центральной зоны проката, состоящей из нерекристаллизованных вытянутых в направлении прокатки зерен. Однако этого не наблюдается при металлографическом анализе. Одно из отличий условий прокатки между режима 1 от режимов 2–3, в том, что в первом случае в металле при каждом проходе протекает превращение  $\alpha \rightarrow \gamma$ , а во втором – превращение  $\gamma \rightarrow \alpha$ . Можно предположить, что именно фазовое превращение  $\gamma \rightarrow \alpha$  является одним из условий формирования неравномерной по толщине структуры горячекатаной полосы ЭАС.

Снижение степени деформации за проход с 50 до 25 % (режим 4) приводит к формированию в прокатанном металле сквозной деформированной структуры (рис. 1, з), поскольку такой степени деформации недостаточно для начала динамической рекристаллизации, особенно в последнем проходе. Следовательно, необходимым условием для формирования равноосных зерен в поверхностных слоях полосы ЭАС при горячей прокатке является протекание в них динамической рекристаллизации.

Уменьшение междеформационных пауз при прокатке (режимы 5, 6) приводит к уменьшению разогрева поверхностных захлажденных слоев металла между проходами и, следовательно, снижению интенсивности протекания превращения  $\alpha \rightarrow \gamma$ . Поэтому доля  $\gamma$ -фазы в полосе во время паузы не восстанавливается, а во время деформации после паузы снижается интенсивность фазового превращения  $\gamma \rightarrow \alpha$ , что приводит к формированию в металле деформированной структуры (рис. 2). Таким образом, с уменьшением продолжительности паузы между проходами увеличивается вытянутость зерен в направлении прокатки.

Можно заключить, что второе условие формирования в поверхностных слоях горячекатаной полосы полигонального феррита – это протекание фазового превращения  $\gamma \rightarrow \alpha$  во время деформации, так как при отсутствии фазового превращения при прокатке не развивается динамическая рекристаллизация. Исходя из этого можно предположить, что формирование полигонального феррита в поверхностных слоях горячекатаной полосы ЭАС происходит в результате действия двух процессов, протекающих совместно: фазового превращения  $\gamma \rightarrow \alpha$  и динамической рекристаллизации. При отсутствии условий для протекания хотя бы одного из этих процессов происходит образование деформированной структуры.

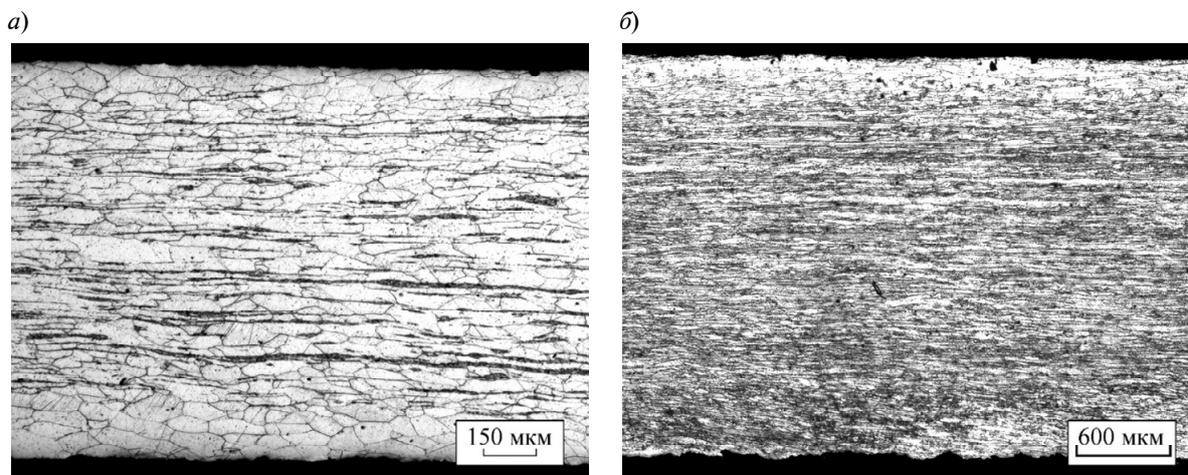


Рис. 2. Структура в продольном сечении металла (состав 1), прокатанного при  $T_{\text{пр}} = 1100 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\varepsilon_{\text{пр}} = 50 \%$  с междеформационными паузами: а –  $t_{\text{пауз}} = 30 \text{ с}$  (режим 5); б –  $t_{\text{пауз}} = 0 \text{ с}$  (режим 6)  
 Fig. 2. Structure of the rolled metal in longitudinal section (composition 1) which was rolled at  $T_{\text{rol}} = 1100 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\varepsilon_{\text{pass}} = 50 \%$  with pauses: а –  $t_{\text{paus}} = 30 \text{ s}$  (schedule 5); б –  $t_{\text{paus}} = 0 \text{ s}$  (schedule 6)

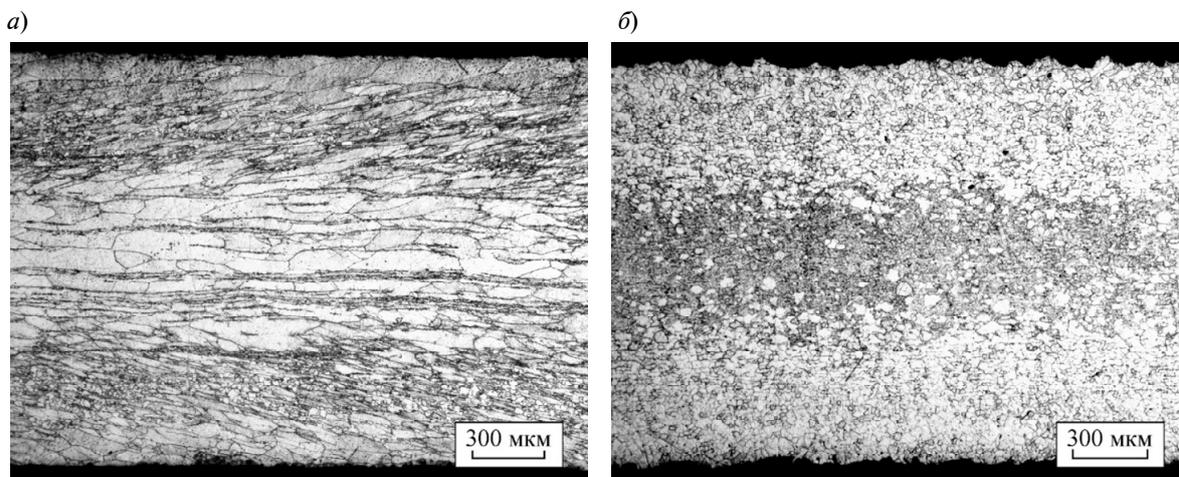


Рис. 3. Структура в продольном сечении металла, прокатанного при  $T_{\text{пр}} = 1100$  °С,  $\epsilon_{\text{пр}} = 50$  % с междеформационными паузами  $t_{\text{пауз}} = 300$  с: *а* – состав 2 (режим 7); *б* – состав 3 (режим 8)  
 Fig. 3. Structure of the rolled metal in longitudinal section (composition 1) which was rolled at  $T_{\text{rol}} = 1100$  °С,  $\epsilon_{\text{pass}} = 50$  % with pauses  $t_{\text{paus}} = 300$  s: *a* – composition 2 (schedule 7); *b* – composition 3 (schedule 8)

На рис. 3 представлена структура стали составов 2, 3, прокатанной по режимам 7, 8 (см. табл.).

Снижение содержания углерода в стали с 0,035 до 0,025 % масс. приводит к уменьшению доли  $\gamma$ -фазы во время прокатки (см. табл.). Фазовый состав металла при прокатке близок к фазовому составу металла при прокатке по режиму 3. В результате при прокатке по этим режимам сформировалась близкая структура, несмотря на разницу в температуре прокатки (рис. 1, *в* и 3, *а*). Это подтверждает сделанное ранее наблюдение, что в отсутствие фазового превращения динамическая рекристаллизация не развивается.

Прокатка металла с химическим составом 3 происходила в условиях высокого содержания аустенита (см. табл.). В результате во всем объеме образца сформировалось равноосное зерно, которое имеет различный размер в центральных и поверхностных слоях. В центральной части образца получено более мелкое зерно диаметром 3–6 мкм, в поверхностных слоях – диаметром 10–30 мкм (рис. 3, *б*). Из-за высокого содержания аустенита фазовое превращение  $\gamma \rightarrow \alpha$  происходило по всей толщине образца с наибольшей интенсивностью в поверхностных слоях из-за большего перепада температур.

На основании результатов лабораторной прокатки можно заключить, что неод-

нородная по толщине горячекатаной полосы ЭАС структура формируется из-за неоднородного развития фазового превращения. Поверхностные слои полосы во время прокатки охлаждаются быстрее, чем центральные, вследствие чего фазовое превращение  $\gamma \rightarrow \alpha$  протекает в них интенсивнее. Установлено, что полигональный феррит при горячей прокатке исследуемых сталей формируется в результате совместного протекания фазового превращения  $\gamma \rightarrow \alpha$  и динамической рекристаллизации. Поскольку в центральной части полосы фазовое превращение протекает слабо, то в них образуется деформированная структура.

#### Заключение

На основании анализа экспериментальных результатов исследования многопроходной горячей прокатки ЭАС установлено, что формирование неоднородной по толщине структуры горячекатаной полосы происходит из-за неоднородного протекания фазового превращения  $\gamma \rightarrow \alpha$ , вызванного захлаживанием поверхностных слоев металла, в результате чего поверхностные слои полосы формируются под действием совместно протекающих процессов  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения и динамической рекристаллизации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Гранта Президента РФ № МК-1587.2017.8.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Pushin V.G.** Alloys with a thermomechanical memory: structure, properties, and application // *The Physics of Metals and Metallography*. 2000. Vol. 90. P. 568–595.
2. **Третьяков Ю.Д., Гудилин Е.А.** Введение в химию функциональных материалов. М.: Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 2006. 125 с.
3. **Матвеев В.В., Ярославский Г.Я., Чайковский Б.С., Кондратьев С.Ю.** Сплавы высокого демпфирования на медной основе. Киев: Наукова думка, 1986. 208 с.
4. **Орыщенко А.С., Кондратьев С.Ю., Анастасиади Г.П., Фукс М.Д., Петров С.Н.** Особенности структурных изменений в жаропрочном сплаве 45X26H33C2B2 при температурах эксплуатации. Сообщение 2: Влияние высокотемпературной выдержки // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*. 2012. № 1(147). С. 217–228.
5. **Рудской А.И., Анастасиади Г.П., Орыщенко А.С., Кондратьев С.Ю., Фукс М.Д.** Особенности структурных изменений в жаропрочном сплаве 45X26H33C2B2 при температурах эксплуатации. Сообщение 3: Механизм и кинетика фазовых превращений // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*. 2012. № 2(154). С. 143–150.
6. **Соколов Ю.А., Павлушин Н.В., Кондратьев С.Ю.** Новые аддитивные технологии с использованием пучка ионов // *Вестник машиностроения*. 2016. № 9. С. 72–76.
7. **Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А.** Новый подход к синтезу порошковых и композиционных материалов электронным лучом. Часть 1. Технологические особенности процесса // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2016. № 1 (727). С. 30–35.
8. **Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А., Копаев В.Н.** Особенности моделирования процесса послойного синтеза изделий электронным лучом // *Журнал технической физики*. 2015. Т. 85. Вып. 11. С. 91–96.
9. **Дружинин В.В.** Магнитные свойства электротехнических сталей. М.: Энергия, 1974. 240 с.
10. **Казаджан Л.Б.** Магнитные свойства электротехнических сталей и сплавов. М.: ООО «Наука и технологии», 2000. 224 с.
11. **Shimizu Y., Ito Y., Iida Y.** Formation of the Goss orientation near the surface of 3 pct silicon steel during hot rolling // *Metallurgical Transactions A*. 1986. Vol. 17a. No 8. P. 1323–1334.
12. **Suzuki S., Ushigami Y., Homma H., Takebayashi S., Kubota T.** Influence of Metallurgical Factors on Secondary Recrystallization of Silicon Steel // *Materials Transactions*. 2001. Vol. 42. No 6. P. 994–1006.
13. **Pease N.C., Jones D.W., Wise M.H.L., Hutchinson W.B.** SEM study of origin of Goss texture in Fe-3.25 Si // *Metal Science*. 1981. Vol. 15. No 5. P. 203–209.
14. **Лифшиц Б., Новиков В., Рощина Л.** Изучение структуры кристалла (110)[001] кремнистого железа при начальной стадии первичной рекристаллизации // *Физика металлов и металловедение*. 1969. Т. 27. № 6. С. 865–869.
15. **Yang P., Shao Y.Y., Mao W.M., Jiang Q.W., Jin W.X.** Orientation Evolutions During Hot Rolling of Electrical Steel Containing Initial Columnar Grains // *Materials Science Forum*. 2012. Vol. 702–703. P. 754–757.
16. **Гольдштейн В.Я., Пашенко С.В., Гражданкин С.Н.** Структурообразование при горячей прокатке сплава Fe 3% Si // *ФММ*. 1980. Т. 50. № 6. С. 1213–1217.
17. **Лобанов М.Л., Редикульцев А.А., Русаков, Г.М., Данилов С.В.** Взаимосвязь ориентировок деформации и рекристаллизации при горячей прокатке электротехнической анизотропной стали // *МиТОМ*. 2015. № 8. С. 44–49.
18. **Decker B., Harker D.** Relations between initial and final orientations in rolling and annealing of silicon ferrite // *Journal of Applied Physics*. 1951. Vol. 22. No 7. P. 900–904.
19. **Лобанов М.Л., Редикульцев А.А., Русаков Г.М., Данилов С.В.** Влияние углерода на формирование текстуры в электротехнической стали Fe-3% Si при горячей прокатке // *МиТОМ*. 2014. Т. 12. С. 12–15.
20. **Inokuto Y., Saito F., Gotoh C.** Computer color mapping analyses of deformation bands and recrystallized grains inside elongated grains near surface of hot-rolled silicon steel sheet // *Materials transactions*. 1996. Vol. 37. No 3. P. 203–209.
21. **Лифанов В.** Прокатка трансформаторной стали. М.: Металлургия, 1975. 200 с.
22. **Dorner D., Zaefferer S., Lahn L., Raabe D.** Overview of microstructure and microtexture development in grain-oriented silicon steel // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2006. Vol. 304. No 2. P. 183–186.
23. **Mishra S., Darmann C., Lucke K.** On the development of the GOSS texture in iron-3% silicon // *Acta Metallurgica*. 1984. Vol. 32. No 12. P. 2185–2201.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**КОНОНОВ Александр Александрович** – инженер Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: kononov.alexandr@yahoo.com

**МАТВЕЕВ Михаил Александрович** – кандидат технических наук старший научный сотрудник Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: matveev\_ma@inbox.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 29.01.2018

## REFERENCES

- [1] **Pushin V.G.** Alloys with a thermomechanical memory: structure, properties, and application. *The Physics of Metals and Metallography*. 2000. Vol. 90. P. 568–595.
- [2] **Tret'iakov Iu.D., Gudilin E.A.** Vvedenie v khimiiu funktsional'nykh materialov. M.: Izd-vo MGU im. M.V. Lomonosova, 2006. 125 s. (rus.)
- [3] **Matveev V.V., Iaroslavskii G.Ia., Chaikovskii B.S., Kondrat'ev S.Iu.** Splavy vysokogo dempfirovaniia na mednoi osnove. Kiev: Naukova dumka, 1986. 208 s. (rus.)
- [4] **Oryshchenko A.S., Kondrat'ev S.Iu., Anastasiadi G.P., Fuks M.D., Petrov S.N.** Osobennosti strukturnykh izmenenii v zharoprochnom splave 45Kh26NZS2B2 pri temperaturakh ekspluatatsii. Soobshchenie 2: Vliianie vysokotemperaturnoi vyderzhki. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*. 2012. № 1(147). S. 217–228. (rus.)
- [5] **Rudskoi A.I., Anastasiadi G.P., Oryshchenko A.S., Kondrat'ev S.Iu., Fuks M.D.** Osobennosti strukturnykh izmenenii v zharoprochnom splave 45Kh26N33S2B2 pri temperaturakh ekspluatatsii. Soobshchenie 3: Mekhanizm i kinetika fazovykh prevrashchenii. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*. 2012. № 1 (154). S. 143–150. (rus.)
- [6] **Sokolov Iu.A., Pavlushin N.V., Kondrat'ev S.Iu.** Novye additivnye tekhnologii s ispol'zovaniem puchka ionov. *Vestnik mashinostroeniia*. 2016. № 9. S. 72–76. (rus.)
- [7] **Rudskoi A.I., Kondrat'ev S.Iu., Sokolov Iu.A.** Novyi podkhod k sintezu poroshkovykh i kompozitsionnykh materialov elektronnykh luchom. Chast' 1. Tekhnologicheskie osobennosti protsessa. *Metallovedenie i termicheskaiia obrabotka metallov*. 2016. № 1 (727). S. 30–35. (rus.)
- [8] **Rudskoi A.I., Kondrat'ev S.Iu., Sokolov Iu.A., Kopaev V.N.** Osobennosti modelirovaniia protsessa posloinogo sinteza izdelii elektronnykh luchom. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 2015. T. 85. Vyp. 11. S. 91–96. (rus.)
- [9] **Druzhinin V.V.** Magnitnye svoistva elektrotekhnicheskikh stalei. M.: Energiia, 1974. 240 s. (rus.)
- [10] **Kazadzhan L.B.** Magnitnye svoistva elektrotekhnicheskikh stalei i splavov. M.: OOO «Nauka i tekhnologii», 2000. 224 s. (rus.)
- [11] **Shimizu Y., Ito Y., Iida Y.** Formation of the Goss orientation near the surface of 3 pct silicon steel during hot rolling. *Metallurgical Transactions A*. 1986. Vol. 17a. No 8. P. 1323–1334.
- [12] **Suzuki S., Ushigami Y., Homma H., Takebayashi S., Kubota T.** Influence of Metallurgical Factors on Secondary Recrystallization of Silicon Steel. *Materials Transactions*. 2001. Vol. 42. No 6. P. 994–1006.
- [13] **Pease N.C., Jones D.W., Wise M.H.L., Hutchinson W.B.** SEM study of origin of Goss texture in Fe-3.25 Si. *Metal Science*. 1981. Vol. 15. No 5. P. 203–209.
- [14] **Lifshits B., Novikov V., Roshchina L.** Izuchenie struktury kristalla (110)[001] kremnistogo zheleza pri nachal'noi stadii pervichnoi rekristallizatsii. *Fizika metallov i metallovedenie*. 1969. T. 27. № 6. S. 865–869. (rus.)
- [15] **Yang P., Shao Y.Y., Mao W.M., Jiang Q.W., Jin W.X.** Orientation Evolutions During Hot Rolling of Electrical Steel Containing Initial Columnar Grains. *Materials Science Forum*. 2012. Vol. 702–703. P. 754–757.
- [16] **Gol'dshtein V.Ia., Pashchenko S.V., Grazhdankin S.N.** Strukuroobrazovanie pri goriachei prokatke splava Fe 3% Si. *FMM*. 1980. T. 50. № 6. S. 1213–1217. (rus.)
- [17] **Lobanov M.L., Redikul'tsev A.A., Rusakov, G.M., Danilov S.V.** Vzaimosviaz' orientirovok deformatsii i rekristallizatsii pri goriachei prokatke elektrotekhnicheskoi anizotropnoi stali. *MiTOM*. 2015. № 8. S. 44–49. (rus.)
- [18] **Decker B., Harker D.** Relations between initial and final orientations in rolling and annealing of silicon ferrite. *Journal of Applied Physics*. 1951. Vol. 22. No 7. P. 900–904.

[19] **Lobanov M.L., Redikul'tsev A.A., Rusakov G.M., Danilov S.V.** Vliianie ugleroda na formirovanie tekstury v elektrotekhnicheskoi stali Fe-3% Si pri goriachei prokatke. *MiTOM*. 2014. T. 12. S. 12–15. (rus.)

[20] **Inokuto Y., Saito F., Gotoh C.** Computer color mapping analyses of deformation bands and recrystallized grains inside elongated grains near surface of hot-rolled silicon steel sheet. *Materials transactions*. 1996. Vol. 37. No 3. P. 203–209.

[21] **Lifanov V.** Prokatka transformatornoi stali. M.: Metallurgiya, 1975. 200 s. (rus.)

[22] **Dorner D., Zaefferer S., Lahn L., Raabe D.** Overview of microstructure and microtexture development in grain-oriented silicon steel. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2006. Vol. 304. No 2. P. 183–186.

[23] **Mishra S., Darmann C., Lucke K.** On the development of the GOSS texture in iron-3% silicon. *Acta Metallurgica*. 1984. Vol. 32. No 12. P. 2185–2201.

#### AUTHORS

**KONONOV Aleksandr A.** – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*  
E-mail: kononov.alexandr@yahoo.com

**MATVEEV Mikhail A.** – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*  
E-mail: matveev\_ma@inbox.ru

Received: 29.01.2018

DOI: 10.18721/JEST.240111  
УДК 65.011.56

*И.Н. Хрусталева, С.А. Любомудров, П.И. Романов*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

### **АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ЕДИНИЧНОГО И МЕЛКОСЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Описана модель автоматизации технологической подготовки мелкосерийного и единичного типов производства. На основе описанной модели производится определение оптимального варианта технологического маршрута обработки партии деталей, сроков их изготовления, величины переменных затрат, оптимальных технологических параметров процесса обработки и управление запасами склада, а также формирование номенклатуры и количества необходимых средств производства. Моделирование производится на основе математических моделей по управлению запасами склада (комбинированная модель) и определению величины переменных затрат и нормы оперативного времени. Определение оптимального варианта производится на основе многокритериального анализа с использованием метода «идеальной точки» по трем параметрам: величина переменных затрат на изготовление партии деталей, минимальные сроки изготовления партии деталей, длительность изготовления партии деталей.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА; СРЕДСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОСНАЩЕНИЯ; РЕЖИМЫ РЕЗАНИЯ; ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ МАРШРУТ ОБРАБОТКИ; ЦЕХ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ.

*Ссылка при цитировании:*

И.Н. Хрусталева, С.А. Любомудров, П.И. Романов. Автоматизация технологической подготовки единичного и мелкосерийного производства // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 1. С. 113–121. DOI: 10.18721/JEST.240111.

*I.N. Khrustaleva, S.A. Lyubomudrow, P.I. Romanov*

Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

### **AUTOMATION OF TECHNOLOGICAL PREPARATION OF PRODUCTION IN SINGLE-UNIT AND SMALL-BATCH MANUFACTURING**

We have described a model of automation of technological preparation of production in single-unit and small-batch manufacturing. The model described allows to estimate the optimal technical route for processing a batch of components, production time, variable costs, optimal technological parameters of processing, to form a nomenclature and the number of necessary means of production, to manage warehouse stocks. Simulation is performed based on mathematical models for warehouse stock management (a combined model) and for determining the value of variable costs and the standard operational time. The definition of opti-

mal variance is based on multicriteria analysis using the method of ideal point by three parameters: amount of variable costs, production time and duration of production.

AUTOMATION OF PRODUCTION; MEANS OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT; CUTTING MODES; TECHNOLOGICAL ROUTE OF PROCESSING; MECHANICAL WORKSHOP.

*Citation:*

I.N. Khrustaleva, S.A. Lyubomudrow, P.I. Romanov, Automation of technological preparation of production in single-unit and small-batch manufacturing, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 24(01)(2018) 113–121, DOI: 10.18721/JEST.240111.

Технологическая подготовка производства — один из важнейших этапов процесса по выпуску изделий, которая в зависимости от сложности их конструкции может занимать значительную часть времени от длительности всего производственного цикла. Согласно ГОСТ 14.004–83 под технологической подготовкой следует понимать совокупность мероприятий, обеспечивающих технологическую готовность производства. К одному из основных этапов технологической подготовки относятся построение оптимальных технологических маршрутов обработки, выбор параметров процесса резания (скорость резания, подача, глубина резания) и средств технологического оснащения (технологическое оборудование, режущий инструмент, установочно-зажимные приспособления).

Автоматизация производственных процессов, в том числе и технологической подготовки производства, способствует повышению эффективности работы и конкурентоспособности предприятия. В современных условиях автоматизация является одним из основных направлений оптимизации производственных процессов [1].

Процесс автоматизации технологической подготовки производства, описанный в научной литературе [2–11], в большинстве случаев базируется на принципе типизации конструкторских элементов и технологических процессов. В условиях мелкосерийного и единичного производства данный принцип не эффективен вследствие больших затрат на выполнение подготовительных работ (разработка классификаторов, типовых и групповых процессов и их элементов) [12].

В научной литературе с помощью автоматизации процесса технологической подго-

товки производства решаются следующие задачи: выбор экономически целесообразного варианта на основе анализа предельных затрат; прогноз себестоимости и производительности изготовления продукции; формирование базы знаний; управление рисками; поиск альтернативных вариантов изготовления деталей; выбор технологического метода изготовления деталей. Известные модели технологической подготовки производства не рассматривают вопросы управления производственными запасами, которые требуют решения следующих задач:

контроля за наличием ресурсов (средств производства), необходимых для производственного процесса по изготовлению деталей; определения оптимальной величины партий поставок и сроков поставки ресурсов для исключения их дефицита на складе.

### Постановка задачи исследования

**Цель данной работы** — проектирование участка механической обработки в структуре судоремонтного предприятия. Проектируемый участок механической обработки предназначен для изготовления как деталей, необходимых для ремонта судов, так и продукции по кооперации в условиях мелкосерийного и единичного производства.

В судоремонтном производстве лишь незначительная часть времени (около 15 %) затрачивается инженером-технологом на принятие решения, а остальное — на поиск нужной информации и оформление документации [13]. Таким образом, задачей нашего исследования является разработка модели, позволяющей сократить длительность технологической подготовки производства в условиях мелкосерийного и единичного производства.

### Описание производственного участка

При проектировании участка механической обработки в структуре судоремонтного предприятия ориентировались на непоточный метод организации производства.

Для решения поставленных технологических задач были выбраны следующие виды технологического оборудования:

- 1) универсальный токарный станок с числовым программным управлением SE1020 РМЦ 8000 (2 шт.);
- 2) горизонтальный фрезерно-расточной станок TOS VARNSDORF 110;
- 3) токарно-винторезный станок мод. 1В625МП РМЦ2000;
- 4) горизонтально-фрезерный станок с ЧПУ X6150;
- 5) круглошлифовальный станок M1450;
- 6) настольный сверлильный станок JET JDP-8L.

При планируемых объемах работ по ремонту судов загрузка производственных мощностей механического цеха оказывается неполной, что будет компенсировано изготовлением деталей по кооперации. Номенклатура деталей, изготавливаемых по кооперации, определяется техническими возможностями и загрузкой технологического оборудования.

### Модель технологической подготовки производства в условиях мелкосерийного и единичного типов производства.

Разрабатываемая модель технологической подготовки мелкосерийного и единичного типов производства решает следующие задачи:

1. Формирование допустимых вариантов технологических маршрутов обработки партии деталей.
2. Формирование перечня средств производства, необходимых для изготовления партии деталей.
3. Определение оптимальных технологических параметров процесса обработки (скорость резания, подача, глубина резания).

4. Определение размера партии и ритма поставки необходимых ресурсов.

5. Определение сроков изготовления партии деталей и величины переменных затрат.

6. Выбор оптимального технологического маршрута изготовления партии деталей.

Схема разрабатываемой модели технологической подготовки производства представлена на рис. 1.

### Описание этапов моделирования

Разрабатываемую модель технологической подготовки производства можно разделить на три этапа.

Первый этап основан на применении модульного принципа в машиностроении, под которым понимают построение различных технических систем с разнообразными характеристиками путем компоновки их из типовых модулей ограниченной номенклатуры [14].

На первом этапе моделирования решаются следующие задачи:

1. Анализ конструкции детали и определение технологических задач (точность размеров, чистота поверхности, физико-механические свойства).

2. Формирование множества модулей поверхностей (МП), образующих контур детали. Выбор моделей поверхностей для описания контура детали производится из множества стандартных МП, для которых определены оптимальные методы формообразования и технологические параметры процесса резания.

3. Определение допустимых методов обработки каждого модуля поверхностей в зависимости от типа и технических характеристик имеющегося технологического оборудования.

4. Формирование модулей операций (МО) и определение комплектов режущего инструмента для каждого МО. Формирование допустимых вариантов модулей поверхностей производится на основе различных сочетаний МП.

Схема первого этапа моделирования представлена на рис. 2.

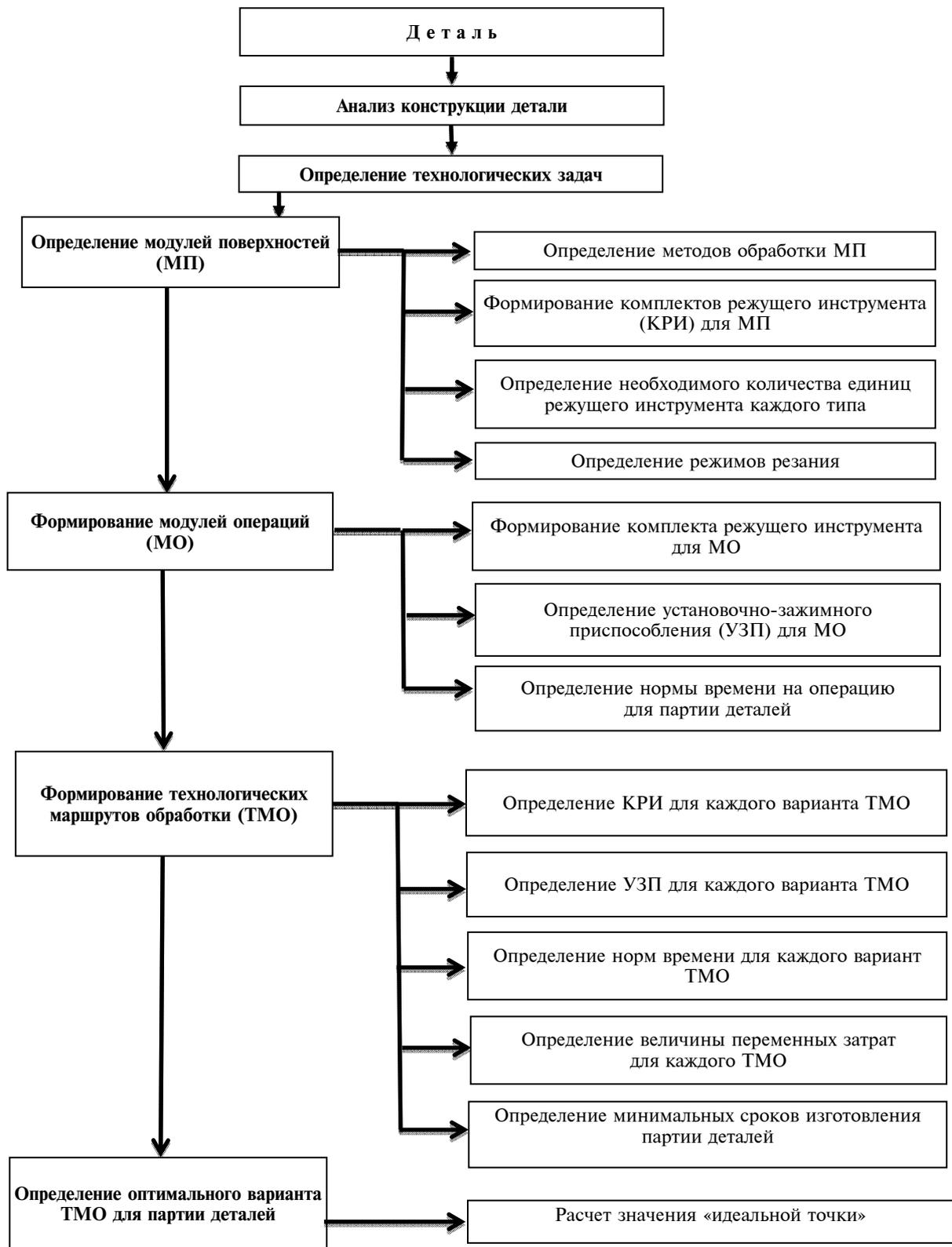


Рис. 1. Схема модели технологической подготовки производства  
 Fig. 1. Scheme of the model of technological preparation of production

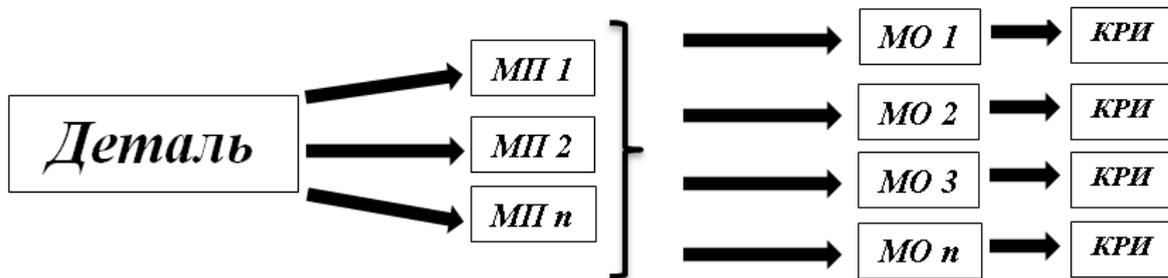


Рис. 2. Схема первого этапа моделирования  
Fig. 2. Scheme of the of the first stage of modeling

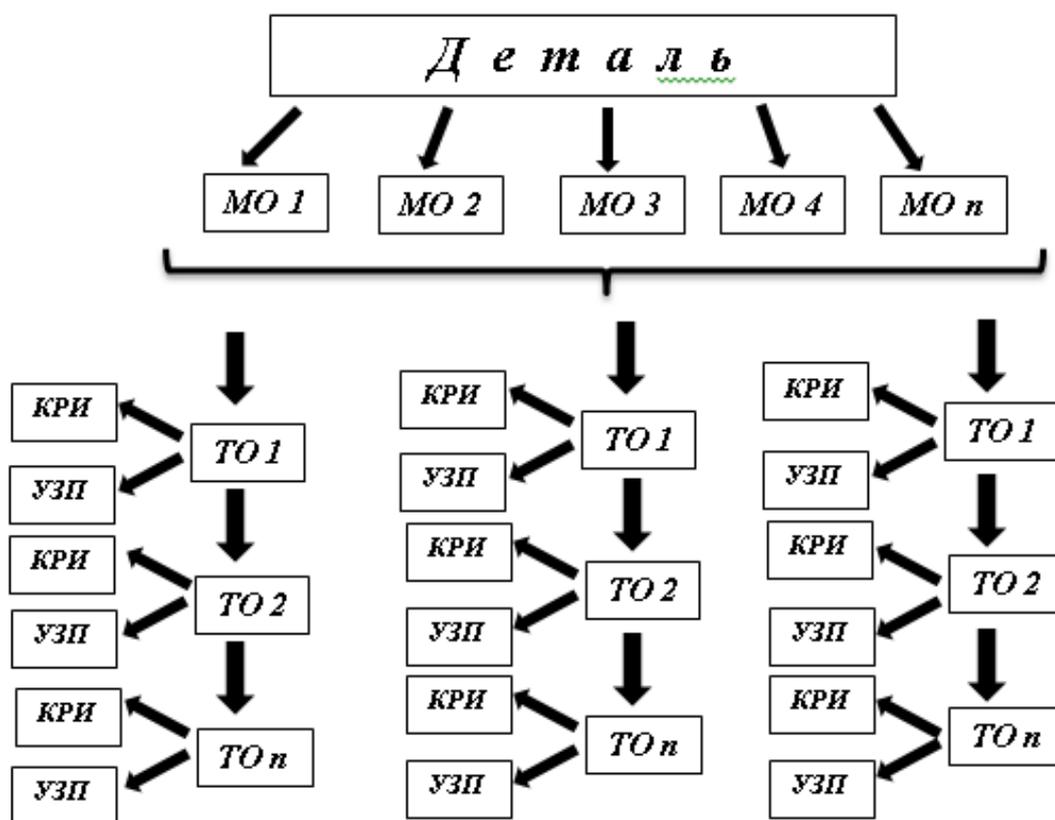


Рис. 3. Схема второго этапа моделирования  
Fig. 3. Scheme of the of the second stage of modeling

На втором этапе моделирования решаются следующие задачи:

1. Формирование допустимых технологических маршрутов обработки. Технологический маршрут обработки определяется на основе разработанных МО.

2. Определение комплектов режущего инструмента (КРИ) и установочно-зажимных приспособлений (УЗП) для каждого варианта технологического маршрута обработки.

3. Определение нормы времени обработки для каждого варианта технологического маршрута.

4. Определение необходимого количества единиц режущего инструмента каждого наименования для всех допустимых вариантов технологического маршрута обработки.

Схема второго этапа моделирования представлена на рис. 3.

На третьем этапе моделирования производится выбор оптимального варианта

технологического маршрута обработки и средств технологического оснащения. На данном этапе решаются следующие задачи:

1. Определение величины переменных затрат на изготовление партии деталей для каждого варианта технологического маршрута.

2. Определение минимальных сроков изготовления партии деталей для каждого технологического маршрута, которые производятся на основе анализа загрузки технологического оборудования, наличия необходимых средств производства и сроков их поставки.

3. Определение сроков и размеров партий поставки средств производства (режущий инструмент, заготовки и др.) с учетом имеющихся материалов и емкости склада.

4. Определение оптимального варианта технологического маршрута обработки на основе анализа группы показателей.

Оптимальный вариант технологического маршрута обработки определяется на основе анализа следующих показателей: величины переменных затрат на изготовление партии деталей; минимальных сроков изготовления партии деталей; длительности изготовления партии деталей. Выбор оптимального варианта технологического маршрута обработки производится на основе метода «идеальной точки». Для определения расстояния до «идеальной точки» применяется формула взвешенного евклидова расстояния [15]:

$$d_{в\ E}(x_i, x_j) = \sqrt{\sum_{k=1}^p w_k (x_i^{(k)} - x_j^{(k)})^2}, \quad (1)$$

где  $d_{в\ E}$  – взвешенное евклидово расстояние;  $x_i^{(k)}$  – значение  $k$ -го свойства объекта  $i$ ;  $x_j^{(k)}$  – значение  $k$ -го свойства объекта  $j$ ;  $w_k$  – «вес»  $k$ -го критерия;  $p$  – количество критериев.

Оптимальным вариантом технологического маршрута обработки будет считаться вариант с минимальным значением взвешенного евклидова расстояния.

### Математическая модель

При разработке модели технологической подготовки мелкосерийного и единичного типов производства были использованы следующие математические модели:

1) определение величины переменных затрат на изготовление продукции;

2) определение нормы оперативного времени ( $T_{оп}$ );

3) комбинированная модель управления запасами.

**Определение величины переменных затрат на изготовление продукции.** Оценка величины переменных затрат на изготовление продукции производится на основе расчета следующих экономических элементов: материальных расходов; затрат на оплату труда; отчислений на обязательное государственное социальное страхование.

Сумма материальных затрат  $M$  предприятия определяется по формуле [16]:

$$M = \sum_{j=1}^m \Pi_{mj} M_j, \quad (2)$$

где  $\Pi_{mj}$  – покупная цена натуральной единицы  $j$ -го материального ресурса, руб/ед;  $M_j$  – количество натуральных единиц  $j$ -го материального ресурса;  $m$  – число наименований материальных ресурсов.

Расходы на оплату труда (3) определяются по формуле [16]

$$З = \alpha Ч \left( 1 + \frac{P_{дз}}{100} \right), \quad (3)$$

где  $\alpha$  – средняя основная заработная плата одного работника предприятия за расчетный период времени, руб/чел;  $Ч$  – средняя численность персонала за этот же период, чел;  $P_{дз}$  – средняя величина дополнительной заработной платы в процентах к основной, %.

Величина отчислений на обязательное государственное социальное страхование ( $O$ , руб.) рассчитывается по формуле [16]

$$O = 3 \frac{P}{100}, \quad (4)$$

где  $p$  – рассчитываемый на основе законодательства суммарный процент отчисле-

ния, %, в фонды от суммы расходов на оплату труда.

**Определение нормы времени на изготовление партии деталей.** Норма оперативного времени ( $T_{оп}$ ) равна сумме основного (машинного) времени и вспомогательного неперекрываемого времени и определяется по формуле [17]

$$T_{оп} = T_o + T_{вн}, \quad (5)$$

где  $T_o$  – основное (машинное) время, мин;  $T_{вн}$  – вспомогательное время, неперекрываемое основным, мин.

Основное (машинное) время зависит от режимов работы оборудования и определяется по формуле [17]

$$T_o = T_{ак} + T_m, \quad (6)$$

где  $T_{ак}$  – время автоматического холостого хода, связанного с подводами, отводами инструмента или детали, поворотами детали, мин;  $T_m$  – собственно машинное время, мин.

Машинное время рассчитывается на основе заданных режимов резания (глубина резания, подача и скорость резания).

**Комбинированная модель управления запасами (детерминированная модель.** Для управления запасами необходимо определить следующие параметры: точку заказа; величину резервного запаса; величину текущей партии.

Точка заказа – это уровень запаса, при котором должен быть сделан заказ очередной партии. Значение точки заказа определяется по формуле [18]

$$H_{тз} = T_{пост} I_{max}, \quad (7)$$

где  $T_{пост}$  – время исполнения заказа;  $I_{max}$  – максимальная интенсивность потребления ресурса.

Величина резервного запаса на складе определяется по формуле [18]

$$H_{рез} = H_{тз} - T_{пост} I_{ср} = T_{пост} \frac{I_{max} - I_{min}}{2}, \quad (8)$$

где  $H_{рез}$  – величина резервного запаса на складе;  $I_{ср}$  – средняя интенсивность потребления ресурса;  $I_{min}$  – минимальная интенсивность потребления ресурса;

$$I_{ср} = \frac{I_{max} + I_{min}}{2}. \quad (9)$$

Величина текущей партии поставки определяется по формуле [18]

$$n_{тек} = H_{скл} - T_{пост} (I_{max} - I_{тек}), \quad (10)$$

где  $n_{тек}$  – величина партии поставки;  $H_{скл}$  – объем склада;

$$(n_{тек})_{max} \geq H_{тз}; \quad (11)$$

$$T_{пост} \leq \frac{H_{скл} - (n_{тек})_{min}}{I_{max} - I_{min}}, \quad (12)$$

$(n_{тек})_{max}$  – максимальный размер партии поставки.

### Выводы

Описанная в статье модель технологической подготовки мелкосерийного и единичного производства позволяет выбрать оптимальный вариант технологического маршрута обработки партии деталей на основе многокритериального анализа и сформировать перечень средств производства, необходимых для процесса обработки, определить оптимальные технологические параметры процесса резания, величину переменных затрат и сроки изготовления партии деталей.

Применение разработанной модели позволит сократить длительность технологической подготовки производства за счет ее автоматизации, что будет служить значительным конкурентным преимуществом в условиях мелкосерийного и единичного производства.

Применение разработанной модели позволяет обеспечить отсутствие простоев технологического оборудования по причине отсутствия на складе средств производства, необходимых для процесса обработки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Stephen Kalas.** Small-Scale Automation in Shipbuilding. Norwegian University of Science and Technology, 2015. 92 p.
2. **Швецова О.В., Белашов М.В.** Применение общих технологических процессов при подготовке производства новых изделий машиностроения // Модели, системы, сети в экономике, природе и обществе. 2013. № 4. С. 212–216.
3. **Гордеев А.С.** Построение многофакторной модели технологической подготовки производства промышленных предприятий в условиях дискретно-нестабильных программ выпуска // Вестник экономики, транспорта и промышленности. 2015. № 52. С. 33–37.
4. **Свирский Д.Н., Климентьев А.Л.** Автоматизация принятия технологических решений в компактном производстве машиностроительной продукции // Вестник полоцкого государственного университета. Серия В: Промышленность. Прикладные науки. 2010. № 2. С. 54–62.
5. **Краснов А.А., Рыбаков А.В., Евдокимов С.А.** Управление технологической подготовкой производства деталей, изготавливаемых на оборудовании с ЧПУ в условиях мелкосерийного производства // Вестник МГТУ СТАНКИН. 2015. № 1(32). С. 69–73.
6. **Трусов А.Н.** Методика выбора оптимального варианта автоматизации конструкторско-технологической подготовки машиностроительного производства // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2012. № 1(89). С. 81–83.
7. **Сидоренко С.А., Власенко М.А.** Исследование методов автоматизации для конструкторско-технологической подготовки производства на предприятиях мелкосерийного и серийного типов производства // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2013. № 3(36). С. 107–110.
8. **Болдырева В.К., Костюков В.Д., Островерх А.И., Петухов А.П.** Концепция создания базы знаний по автоматизации технологической подготовки производства // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2013. № 4(152). С. 267–271.
9. **Mujber T.S., Szecsi T., Hashmi M.S.J.** Virtual reality applications in manufacturing process simulation // Journal of Materials Processing Technology. 2004. № 155–156. P. 1834–1838.
10. **Seleim A., Azab A., AlGeddawy T.** Simulation Methods for Changeable Manufacturing // 45th CIRP Conference on Manufacturing Systems. 2012. P. 179–184.
11. **Pokorny P., Kuznetsov A.** Automation of the Selection of the Integrated, Strategies // International Conference on Manufacturing Engineering and Materials, 2016. P. 380–383.
12. **Жуков Э.Л., Козарь И.И., Мурашкин С.Л., Розовский Б.Я., Дегтярев В.В., Соловейчик А.М.** Основы технологии машиностроения. Производство деталей машин / Под общ. ред. С.Л. Мурашкина. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 412 с.
13. **Зяблов О.К., Фунтикова Е.В.** Автоматизация технологической подготовки судоремонтного производства // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2014. № 38. С. 49–53.
14. **Базров Б.М.** Модульные технологии в машиностроении. М.: Машиностроение, 2001. 368 с., ил.
15. **Айвазян С.А., Мхитарян В.С.** Прикладная статистика и основы эконометрика. М.: ЮНИТИ, 1998. 1005 с.
16. **Минко И.С.** Основы экономики предприятия. СПб.: СПбГУНиПТ, 2000. 89 с.
17. **Бычин В.Б., Малинин С.В.** Нормирование труда / Под ред. Ю.Г. Одегова. М.: Экзамен, 2003. 320 с.
18. **Производственный менеджмент** / Под ред. В.А. Козловского. М.: Инфра-М, 2003. 574 с.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ХРУСТАЛЕВА Ирина Николаевна** — старший преподаватель Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: irina.khrustaleva@mail.ru

**ЛЮБОМУДРОВ Сергей Александрович** — кандидат технических наук заведующий кафедрой Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: lyubomudrow@yandex.ru

**РОМАНОВ Павел Иванович** — доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: irina.khrustaleva@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 24.10.2017



## REFERENCES

- [1] **Stephen Kalas.** Small-Scale Automation in Shipbuilding. Norwegian University of Science and Technology, 2015. 92 p.
- [2] **Shvetsova O.V., Belashov M.V.** Primenenie obshchikh tekhnologicheskikh protsessov pri podgotovke proizvodstva novykh izdelii mashinostroeniia. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, prirode i obshchestve.* 2013. № 4. S. 212–216. (rus.)
- [3] **Gordeev A.S.** Postroenie mnogofaktornoi modeli tekhnologicheskoi podgotovki proizvodstva promyshlennykh predpriatii v usloviakh diskretno-nestabil'nykh programm vypuska. *Vestnik ekonomiki, transporta i promyshlennosti.* 2015. № 52. S. 33–37. (rus.)
- [4] **Svirskii D.N., Kliment'ev A.L.** Avtomatizatsiia priniatiia tekhnologicheskikh reshenii v kompaktnom proizvodstve mashinostroitel'noi produktsii. *Vestnik polovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V: Promyshlennost'. Prikladnye nauki.* 2010. № 2. S. 54–62. (rus.)
- [5] **Krasnov A.A., Rybakov A.V., Evdokimov S.A.** Upravlenie tekhnologicheskoi podgotovkoi proizvodstva detalei, izgotavlivaemykh na oborudovanii s ChPU v usloviakh melkoseriinnogo proizvodstva. *Vestnik MGTU STANKIN.* 2015. № 1(32). S. 69–73. (rus.)
- [6] **Trusov A.N.** Metodika vybora optimal'nogo varianta avtomatizatsii konstruktorsko-tekhnologicheskoi podgotovki mashinostroitel'nogo proizvodstva. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta.* 2012. № 1(89). S. 81–83. (rus.)
- [7] **Sidorenko S.A., Vlasenko M.A.** Issledovanie metodov avtomatizatsii dlia konstruktorsko-tekhnologicheskoi podgotovki proizvodstva na predpriatiiakh melkoseriinnogo i seriinnogo tipov proizvodstva. *Vestnik Severo-Kavkazskogo federal'nogo universiteta.* 2013. № 3(36). S. 107–110. (rus.)
- [8] **Boldyreva V.K., Kostiukov V.D., Ostroverkh A.I., Petukhov A.P.** Kontseptsiiia sozdaniia bazy znaniia po avtomatizatsii tekhnologicheskoi podgotovki proizvodstva. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve.* 2013. № 4(152). S. 267–271. (rus.)
- [9] **Mujber T.S., Szecsi T., Hashmi M.S.J.** Virtual reality applications in manufacturing process simulation. *Journal of Materials Processing Technology.* 2004. № 155–156. P. 1834–1838.
- [10] **Seleim A., Azab A., AlGeddawy T.** Simulation Methods for Changeable Manufacturing. *45th CIRP Conference on Manufacturing Systems.* 2012. P. 179–184.
- [11] **Pokorny R., Kuznetsov A.** Automation of the Selection of the Integrated, Strategies. *International Conference on Manufacturing Engineering and Materials,* 2016. P. 380–383.
- [12] **Zhukov E.L., Kozar' I.I., Murashkin S.L., Rozovskii B.Ia., Degtiarev V.V., Soloveichik A.M.** Osnovy tekhnologii mashinostroeniia. Proizvodstvo detalei mashin / Pod obshch. red. S.L. Murashkina. SPb.: Izd-vo Politekh. un-ta, 2008. 412 s. (rus.)
- [13] **Ziablov O.K., Funtikova E.V.** Avtomatizatsiia tekhnologicheskoi podgotovki sudoremontnogo proizvodstva. *Vestnik Volzhskoi gosudarstvennoi akademii vodnogo transporta.* 2014. № 38. S. 49–53. (rus.)
- [14] **Bazrov B.M.** Modul'nye tekhnologii v mashinostroenii. M.: Mashinostroenie, 2001. 368 s., il. (rus.)
- [15] **Aivazian S.A., Mkhitarian V.S.** Prikladnaia statistika i osnovy ekonometrika. M.: IuNITI, 1998. 1005 s. (rus.)
- [16] **Minko I.S.** Osnovy ekonomiki predpriatiia. SPb.: SPbGUNiPT, 2000. 89 s. (rus.)
- [17] **Bychin V.B., Malinin S.V.** Normirovanie truda / Pod red. Iu.G. Odegova. M.: Ekzamen, 2003. 320 s. (rus.)
- [18] **Proizvodstvennyi menedzhment / Pod red. V.A. Kozlovskogo.** M.: Infra-M, 2003. 574 s. (rus.)

## AUTHORS

**KHRUSTALEVA Irina N.** – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university

E-mail: irina.khrustaleva@mail.ru

**LYUBOMUDROW Sergei A.** – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university

E-mail: lyubomudrow@yandex.ru

**ROMANOV Pavel I.** – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university

E-mail: irina.khrustaleva@mail.ru

Received: 24.10.2017

DOI: 10.18721/JEST.240112  
УДК 62-529

*Н.В. Бабанин*

Санкт-Петербургское государственное бюджетное профессиональное образовательное учреждение «Автотранспортный и электромеханический колледж»,  
Санкт-Петербург, Россия

## **ДИНАМИКО-АМОРТИЗАЦИОННАЯ ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ПОДВЕСКИ**

Объектом исследования является разработанная автором конструкция подвески с динамико-амортизационной гидравлической системой (ДАГС), предупреждающая резонансные частоты за счет использования современных инертных компонентов, таких, как силиконовое масло и газ азот, с автоматическим регулированием давления в газовой камере. С целью выявления эффективности влияния установки подвески с системой ДАГС на мобильное энергетическое средство (улучшение условий движения оператора и главных технических показателей – производительности, надежности, экономичности, эргономичности) проведен ее расчет. На основании полученных теоретических частотных характеристик сделаны выводы об улучшении условий движения оператора. Отмечен факт предупреждения неблагоприятных частот путем увода в нерезонансную область и снижение данных частот на 27,7 % за счет диссипативных свойств силиконового масла, обеспечивающего стабильные рабочие характеристики.

ПОДВЕСКА; ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ СИСТЕМА; РЕЗОНАНСНЫЕ ЧАСТОТЫ; НАДЕЖНОСТЬ; ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ; БЕЗОПАСНОСТЬ.

*Ссылка при цитировании:*

Н.В. Бабанин. Динамико-амортизационная гидравлическая система подвески // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 1. С. 122–129. DOI: 10.18721/JEST.240112.

*N.V. Babanin*

St. Petersburg State Budgetary Professional Educational Institution «Auto transport and electromechanical college», St. Petersburg, Russia

## **DYNAMIC-DAMPING HYDRAULIC SUSPENSION SYSTEM**

The object of the study is an original hydraulic suspension system with dynamic damping (DDHS) which suppresses resonant frequencies by using modern (inert) components such as silicone oil and Nitrogen gas with automatic regulation of pressure in the gas chamber. A calculation of the installation was carried out in order to determine whether it can effectively influence the mobile energy suspension with the DDHS system to improve the operator's traffic conditions and the main technical indicators (performance, reliability, economy, ergonomics). Based on the theoretical frequency characteristics obtained, conclusions are drawn about improving the conditions of motion of the operator. It was found that it is possible to suppress unfavorable frequencies by deflecting them to the off-resonance region; a reduction of these frequencies by 27,7 % was observed, due to dissipative properties of silicone oil, which provides stable performance.

SUSPENSION; HYDRAULIC SYSTEM; RESONANT FREQUENCIES; RELIABILITY; PERFORMANCE; SAFETY.

*Citation:*

N.V. Babanin. Dynamic-damping hydraulic suspension system. *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 24(01)(2018) 122–129, DOI: 10.18721/JEST.240112.

### Введение

Динамические перегрузки мобильных энергетических средств (МЭС) – весьма значимый аспект, влияющий на важные технические показатели: производительность, надежность, экономичность, эргономичность.

Данной проблемой занимались В.А. Анилович, И.Б. Барский, В.П. Гуськов, И.П. Ксенович и другие. В результате исследований этих ученых были разработаны более эффективные конструкции, снижающие динамические перегрузки.

После обзора предшествующих конструкций и выявленных недостатков автором была разработана динамическая амортизационно-гидравлическая система (ДАГС), которую целесообразно использовать для защиты от повышения динамических перегрузок и улучшения упомянутых основных технических показателей [10].

**Целью** было разработать конструкцию подвески и провести теоретический анализ конструкции и системы ДАГС.

На рис. 1 изображена проектируемая конструкция подвески с системой ДАГС.

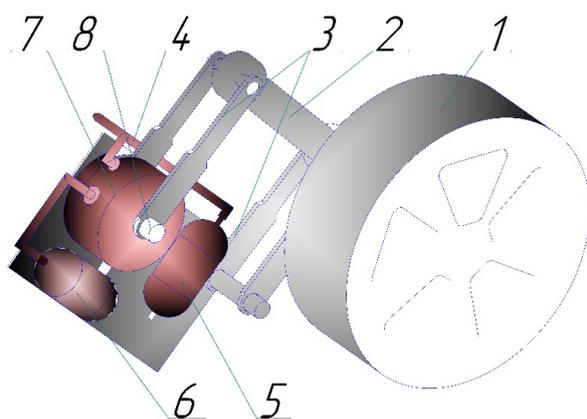


Рис. 1. Подвеска для гусеничной или колесной техники  
Fig. 1. Suspension for crawler vehicles or wheeled

Подвеска состоит из неподрессоренных частей (колесо 1) и прдрессоренных (стойка 2, нижний и верхний рычаги 3, гидролинии 4, силовой квадрант 7, гидрогазовые аккумуляторы 5, 6).

Работает подвеска следующим образом: при движении транспортного средства (ТС) по неровностям дороги возникают переменные силы, вызывающие колебания, которые передаются через колесо 1, стойку 2, рычаги 3, вал 8 на силовой квадрант 7. Верхние рычаги 3 жестко соединены с валом 8 силового квадранта 7, в результате чего на валу 8 возникает переменный крутящий момент  $\pm M_k$ . Момент  $\pm M_k$  перемещает лопасти 4 через вал 5, возмущая систему ДАГС, представленную на рис. 2 [13, 14].

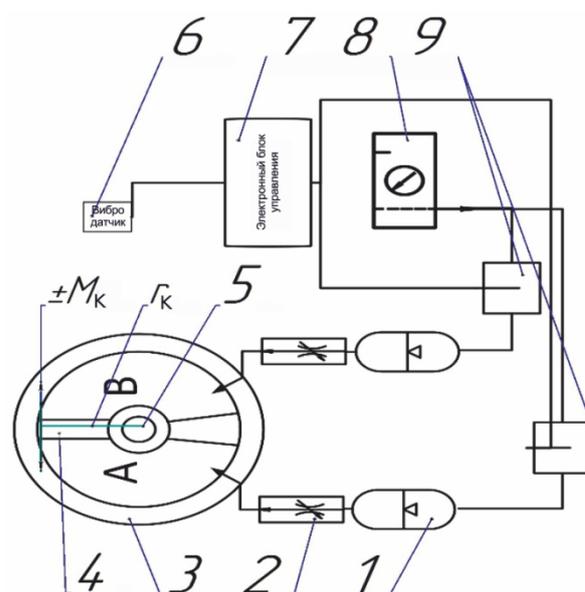


Рис. 2. Динамическая амортизационно-гидравлическая система  
Fig. 2. Dynamic shock-hydraulic system

Система ДАГС (см. рис. 2) включает следующие элементы: 1 – гидрогазовые аккумуляторы; 2 – регулируемые дросселирующие клапаны; 4 – лопасти силового квадранта, разделяющего корпус 3 на полости А и В; 5 – вал лопастика; 6 – датчик вибрации; 7 – электронный блок управления; 8 – пневматический ресивер; 9 – управляемые индукционные клапаны [3].

Работает система ДАГС следующим образом: крутящий момент  $\pm M_k$  вызывает перемещение лопастика 4, который



На колесо действуют:  $G, G_1, G_2$  – силы сцепного веса колеса, Н;  $N$  – нормальная реакция, Н;  $P_{\text{тяги}}$  – сила тяги, Н;  $P_{\text{тр}}$  – сила трения, Н;  $F_{\text{ц}}$  – центробежная сила, Н (на схеме рис. 3 обозначено:  $r_k$  – радиус колеса, м;  $A$  – точка взаимодействия колеса с почвой;  $a_n$  – расстояние деформации шины, м;  $m_0$  – масса остова, приходящаяся на одно колесо, кг). Кроме этого, на колеса действуют колебания свободных  $f_z$  и вынужденных  $f_{\omega}$  частот.

Чтобы понять, как работает колесо автомобиля (см. рис. 3) и какие силы действуют на него, необходимо воспользоваться законами теоретической механики, в которой давно и качественно изучены данные задачи. Отмечено, что условием движения колеса является равенство крутящего момента на колесе или колесах и момента сопротивления движению, т.е.  $M_k = M_c$  [1, 2, 4–7]. Основываясь на равенстве  $M_k = M_c$ , рассмотрим связь между силой тяги  $P_{\text{тяги}}$  и частотами свободных  $f_{\omega}$  и вынужденных  $f_z$  колебаний остова, возникающих в вертикальном направлении. Для этого необходимо составить сумму всех моментов относительно точки  $A$ , т.е.  $\sum M_A = 0$ :

$$\sum M_A = M_1 + M_2 + M_k, \quad (1)$$

где  $(M_1 + M_2) = M_c$  – момент сопротивления движению колеса, Н · м;  $M_k$  – крутящий момент на колесе, Н · м.

Найдем момент

$$M_1 = G_1 r_k = G \cos \alpha r_k \quad (2)$$

и момент

$$M_2 = N a_n. \quad (3)$$

Зная моменты  $M_1$  и  $M_2$ , найдем момент сопротивления  $M_c$ :

$$M_c = G \cos \alpha r_k + N a_n. \quad (4)$$

Момент на колесе найдем как произведение силы тяги  $P_{\text{тяги}}$  на плечо  $r_k$ :

$$M_k = P_{\text{тяги}} r_k. \quad (5)$$

Используя условие равенства  $M_c = M_k$ , получим

$$G \cos \alpha r_k + N a_n = P_{\text{тяги}} r_k. \quad (6)$$

Из (6) выразим массу остова  $m_0$ , зная, что сцепной вес есть произведение массы на ускорение свободного падения ( $G = m_0 g$ ):

$$m_0 = \frac{P_{\text{тяги}} + N a_n}{g \cos \alpha}. \quad (7)$$

Выразим нормальную реакцию  $N$  из уравнения статики, которое гласит, что сумма всех сил на вертикальную ось  $y$  равна 0 ( $\sum P_y = 0$ ), то есть

$$N - P_{\text{ц}} - G \cos \alpha = 0. \quad (8)$$

Преобразовав формулу (8) с учетом, что центробежная сила есть отношение произведения массы на квадрат скорости к радиусу кривизны  $P_{\text{ц}} = \frac{m_0 V^2}{\rho}$ , получим

$$N = \frac{m V^2}{\rho} - mg \cos \alpha. \quad (9)$$

Подставим (9) в (7), получим

$$m_0 = \frac{\rho(-mg \cos \alpha + P_{\text{тяги}} + mg \cos \alpha)}{V^2}. \quad (10)$$

Зная, что  $\text{tg} \alpha = y'$  и  $\rho = \frac{(1 + y'^2)^{3/2}}{y''}$ , и

учитывая, что  $\sin \alpha = \frac{\text{tg} \alpha}{\sqrt{1 + \text{tg}^2 \alpha}}$ ,  $\cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \text{tg}^2 \alpha}}$ ,

а значит,  $\sin \alpha = \frac{y'}{\sqrt{1 + y'^2}}$ ,  $\cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + y'^2}}$ ,

преобразуем (10) и получим

$$m_0 = \frac{y''(-\sqrt{1 + y'^2} + P_{\text{тяги}})}{V^2 \sqrt{(1 + y'^2)^{3/2}}}. \quad (11)$$

Далее будем использовать уже известные аналитические формулы для определения средних частот свободных (12) и вынужденных (13) колебаний остова [10]:

$$\omega_z = \sqrt{\frac{2C}{m_0}}, \quad (12)$$

где  $C$  – жесткость подвески остова, Н/м;

$$f_z = \frac{2\pi V}{S}, \quad (13)$$

где  $V$  – скорость движения колеса, м/с;  $S$  – длина неровности, м.

```

int X=40, x0=450, y0=400 ;// масштаб по оси x и y координаты точки отсчета
double WW12[100000], wd, ct, fi[100000];

float Xp=17, Yp=6.6; // масштаб по осям
int Xo=115/0.256, Yo=134/0.256; // положение точки начала координат
float xleft=0.9f, xprav=17.0f, V=14, C1=1 ; //указывает в начало кривой

MoveToEx(hdc,Xo+Xp*xleft, Yo-Yp*sqrt(1*pow(V, 2)/xleft+6.28), NULL);
for ( double j=xleft; j<xprav; j+=0.001)
{
LineTo(hdc, Xo+Xp*j, Yo-Yp*sqrt(1*pow(V, 2)/j+6.28)); // программный вид формулы (15)

fclose(PP);
}
MoveToEx(hdc,Xo+Xp*xleft, Yo-Yp*sqrt(4*pow(V, 2)/xleft+6.28), NULL);
for ( double j=xleft; j<xprav; j+=0.001)
{
LineTo(hdc, Xo+Xp*j, Yo-Yp*sqrt(4*pow(V, 2)/j+6.28));
}

```

Рис. 4. Фрагмент программы расчета частот колебаний остова в зависимости от силы тяги  
 Fig. 4. Fragment of the program for calculating the vibration frequencies of the core as a function of the traction force

Подставим (12) в (11), получим

$$f_{\omega} = \sqrt{\frac{2CV^2 \sqrt{(1+y'^2)^{3/2}}}{y''(-\sqrt{1+y'^2} + P_{\text{тяг}})}}. \quad (14)$$

Общая (резонансная) частота  $f_{\text{об}}$  колебаний складывается из частот вынужденных колебаний (13) и частот свободных колебаний (12):

$$f_{\text{об}} = \frac{2\pi V}{S} + \sqrt{\frac{2CV^2 \sqrt{(1+y'^2)^{3/2}}}{y''(-\sqrt{1+y'^2} + P_{\text{тяг}})}}. \quad (15)$$

Далее рассчитаем общие частоты колебаний остова  $f_{\text{об}}$  по формуле (15) в зависимости от изменения силы тяги  $P_{\text{тяг}}$ , для этого автоматизируем процесс, используя гибкую среду программирования на языке СИ (фрагмент представлен на рис. 4), с помощью которой получим теоретический массив данных с последующей аппроксимацией полиномиальной зависимости и построением графика функции  $f_{\text{об}} = f(P_{\text{тяг}})$  (рис. 5).

Графики представляют: 1 – характеристику базовой подвески; 2 – характеристику опытной подвески; 3 – резонансную область.

Анализ графиков (рис. 5) заключается в сравнении характеристик базовой 1 и опытной 2 подвесок, которые построены по следующим данным: для базовой подвески 1 заданы скорость движения  $V = 15$  км/ч,

жесткость  $c_1 = 4$  кН/м, колебания тяги  $\Delta P_{\text{тяг}} = 0-0,7$  кН; а для опытной подвески 2 – скорость  $V = 15$  км/ч, жесткость  $c_1 = 1$  кН/м, подстраиваемая автоматической системой ДАГС (рис. 2), колебания тяги в диапазоне 0–0,7 кН. Согласно стандарту ИСО 2631 (условия труда) наиболее чувствительными для человека являются частоты в диапазоне 4–8 Гц, которые на графике отмечены заштрихованной областью 3. В основном здесь возникают резонансные явления, которые влияют на систему «человек – машина», ухудшая главные технические показатели и эргономичность [10].\* На графике также можно увидеть самую неблагоприятную частоту в 4,5 Гц при колебании тяги в 0,09 кН: здесь есть вероятность возникновения резонанса, приводящего к аритмии сердечной мышцы, ее длительное воздействие может привести к инфаркту миокарда. С использованием системы ДАГС удалось снизить частоты в среднем на 27,7 % и увести их в нерезонансную зону, что видно на опытной подвеске (позиция 2 на рис. 5).

\* См. также: **Чернышев В.И.** Улучшение условий труда операторов транспортных средств путем разработки и реализации виброзащитных систем с импульсным управлением: дисс. ... д-ра техн. наук. СПб.: СПбГАУ, 1994. 43 с.

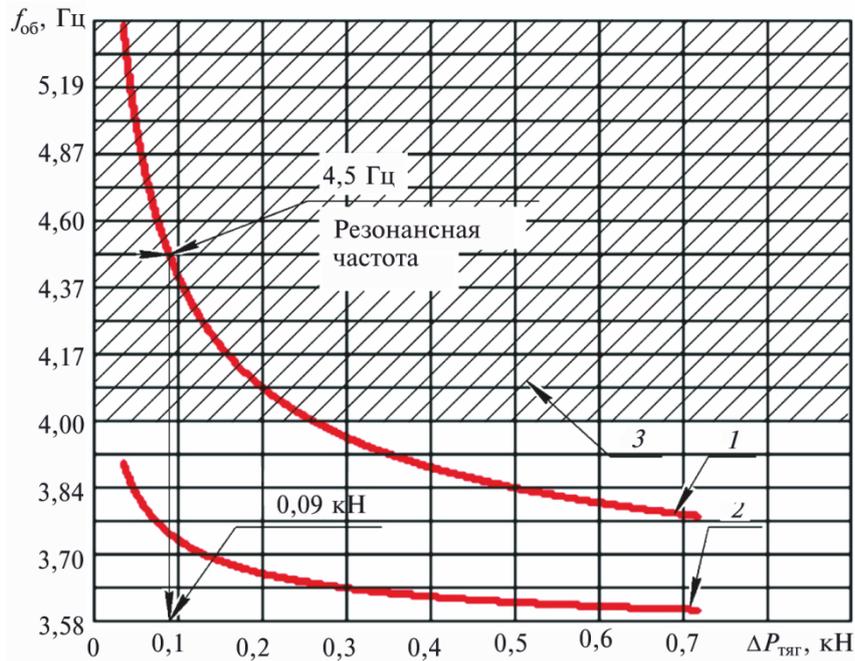


Рис. 5. Зависимости частоты от колебаний силы тяги при скорости движения до 15 км/ч

Fig. 5. Graph of the dependence of the frequency on the oscillations of the traction force at a speed of up to 15 km/h

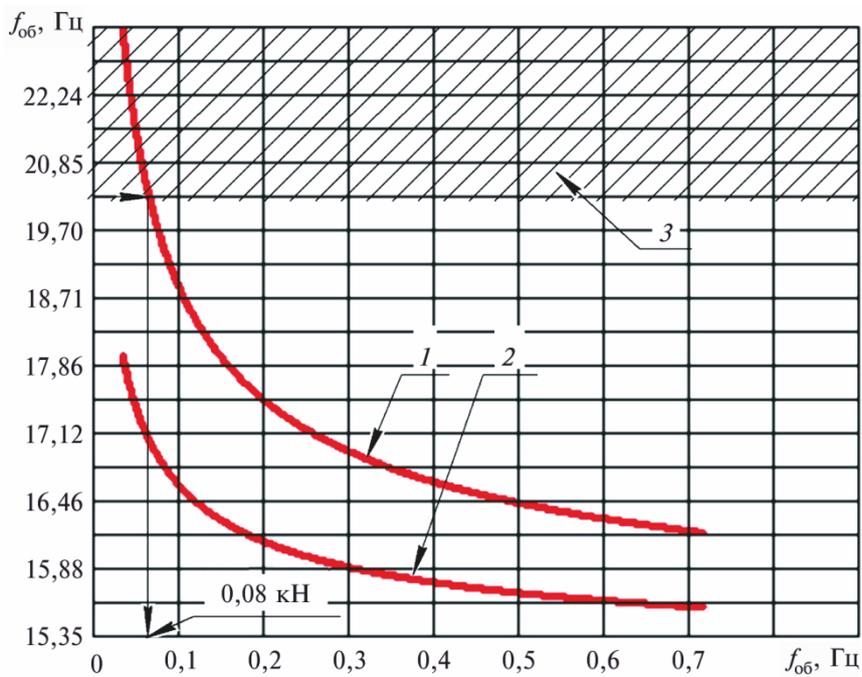


Рис. 6. Зависимости частоты от колебаний силы тяги при скорости движения до 60 км/ч

Fig. 6. Graph of frequency dependence on the oscillations of the traction force at a speed of up to 60 km/h

Анализ рис. 6 аналогичен рис. 5, представленному выше, изменяется только скорость движения до 60 км/ч, что приводит к увеличению частоты  $f_{об}$  колебаний системы «человек – машина» (заштрихованная область 3 – зона резонанса). При частоте  $f_{об} = 20$  Гц и амплитуде 0,08 кН есть вероятность возникновения резонанса головы. Благодаря разработанной конструкции с системой ДАГС удалось сместить частоты из области 3 в нерезонансную область.

### Выводы

Динамические перегрузки в условиях бездорожья – актуальная проблема, так как они приводят к снижению трудоспособности оператора, надежности конструкции и топливной экономичности.

В связи с этим разработана конструкция с системой ДАГС, благодаря которой (согласно расчетам) удалось повысить некоторые эксплуатационные показатели, например плавность хода.

Расчеты показали следующее: используя разработанную конструкцию с системой ДАГС, можно снизить частоту колебаний в среднем на 27,7 % и сместить их в нерезонансную область, предупреждая резонанс при самых неблагоприятных частотах в диапазоне 4–5 Гц, за счет автоматического контроля системы ДАГС и использования высококачественных инертных компонентов (таких, как силиконовое масло ПМС-200, азот), в сочетании обеспечивающих в силу вязкостного и молекулярного трения в средах нелинейную характеристику.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бабанин Н.В.** Повышение плавности хода трактора тягового класса 1.4 при движении через криволинейное препятствие с упруго-демпфирующим приводом // Международный независимый институт математики и систем, «МиС». 2015. № 2 (13). С. 4–8.
2. **Бабанин Н.В.** Улучшение плавности хода машинно-тракторного агрегата на базе трактора класса 1,4 с упругодемпфирующим приводом на ведущих колесах // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2. С. 100–106.
3. **Башта Т.М.** Гидропривод и гидропневматика. М.: Машиностроение, 1972. 133 с.
4. **Гамаюнов П.П., Алексеев С.А.** Оптимальное управление параметрами упруго-демпфирующего тягово-сцепного устройства // Тракторы и сельхоз машины. 2009. № 7. С. 30–31.
5. **Гамаюнов П.П., Алексеев С.А.** Повышение устойчивости автотракторного поезда на базе тракторов МТЗ «Беларусь» // Научное обозрение. 2014. № 12-1. С. 422–424.
6. **Гамаюнов П.П., Алексеев С.А.** Моделирование процесса трогания и разгона тракторно-транспортного агрегата с упругодемпфирующим тягово-сцепным устройством // Научное обозрение. 2014. № 3. С. 50–52.
7. **Тарасик В.П.** Теория движения автомобиля. СПб.: БХВ, 2006. 478 с.
8. **Чернышев К.В., Хрипов М.Ю.** Обзор алгоритмов регулирования демпфирования в подвески автомобиля // Международный научный журнал «Символ науки». 2016. № 4. С. 140–143.
9. **Сарач Е.Б., Ципилев А.А.** Исследование внутренней динамики пневматических устройств // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2017. № 2. 683 с.
10. **Ротенберг Р.В.** Подвеска автомобиля. М.: Машиностроение, 1972. 265 с.
11. **Загородних Н.А., Загородних К.А.** Математическое моделирование обеспечения безопасности дорожного движения для водителей транспортных средств // Успехи современной науки. 2015. № 2. С. 31–36.
12. **Юшкин В.В.** Гидравлика и гидравлические машины. Минск: Высшая школа, 1974. 260 с.
13. **Осипов А.Г.** Совершенствование гидропневматических подвесок гусеничных и колесных машин // Вестник ИрГТУ. 2016. № 4. С. 40–45.
14. **Андрейчиков А.В., Горобцов А.С., Андрейчикова О.Н.** Компьютерное моделирование динамики автомобиля с активной виброзащитной подвеской // Известия Вологодского государственного технического университета. 2008. № 8(46). С. 5–11.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**БАБАНИН Николай Викторович** – кандидат технических наук преподаватель Санкт-Петербургского государственного бюджетного профессионального образовательного учреждения «Автотранспортный и электромеханический колледж»  
E-mail: nikolai-babanin@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 22.11.2017



## REFERENCES

- [1] Babanin N.V. Povyshenie plavnosti khoda traktora tiagovogo klassa 1.4 pri dvizhenii cherez krivolineinoe prepiatstvie s uprugodempfiruiushchim privodom. *Mezhdunarodnyi nezavisimyi institut matematiki i sistem, «MiS»*. 2015. № 2 (13). S. 4–8. (rus.)
- [2] Babanin N.V. Uluchshenie plavnosti khoda mashinno-traktornogo agregata na baze traktora klassa 1,4 s uprugodempfiruiushchim privodom na vedushchikh kolesakh. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia*. 2015. № 2. S. 100–106. (rus.)
- [3] Bashta T.M. Gidroprivod i gidropnevmatika. M.: Mashinostroenie, 1972. 133 s. (rus.)
- [4] Gamaiunov P.P., Alekseev S.A. Optimal'noe upravlenie parametrami uprugo-dempfiruiushchego tiagovo-stsepnogo ustroystva. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2009. № 7. S. 30–31. (rus.)
- [5] Gamaiunov P.P., Alekseev S.A. Povyshenie ustoichivosti avtotraktornogo poezda na baze traktorov MTZ «Belarus». *Nauchnoe obozrenie*. 2014. № 12-1. S. 422–424. (rus.)
- [6] Gamaiunov P.P., Alekseev S.A. Modelirovanie protsessa troganiia i razgona traktorno-transportnogo agregata s uprugodempfiruiushchim tiagovo-stsepnym ustroystvom. *Nauchnoe obozrenie*. 2014. № 3. S. 50–52. (rus.)
- [7] Tarasik V.P. Teoriia dvizheniia avtomobilia. SPb.: BXV, 2006. 478 s. (rus.)
- [8] Chernyshev K.V., Khripov M.Iu. Obzor algoritmov regulirovaniia dempfirovaniia v podveski avtomobilia. *Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal «Simvol nauki»*. 2016. № 4. S. 140–143. (rus.)
- [9] Sarach E.B., Tsipilev A.A. Issledovanie vnutrennei dinamiki pnevmaticheskikh ustroystv. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie*. 2017. № 2. 683 s. (rus.)
- [10] Rotenberg R.V. Podveska avtomobilia. M.: Mashinostroenie, 1972. 265 s. (rus.)
- [11] Zagorodnikh N.A., Zagorodnikh K.A. Matematicheskoe modelirovanie obespecheniia bezopasnosti dorozhnogo dvizheniia dlia voditelei transportnykh sredstv. *Usp ekhi sovremennoi nauki*. 2015. № 2. S. 31–36. (rus.)
- [12] Iushkin V.V. Gidravlika i gidravlicheskie mashiny. Minsk: Vysshaia shkola, 1974. 260 s. (rus.)
- [13] Osipov A.G. Sovershenstvovanie gidropnevmaticheskikh podvesok gusenichnykh i kolesnykh mashin. *Vestnik IrGTU*. 2016. № 4. S. 40–45. (rus.)
- [14] Andreichikov A.V., Gorobtsov A.S., Andreichikova O.N. Komp'iuternoe modelirovanie dinamiki avtomobilia s aktivnoi vibrozashchitnoi podveskoi. *Izvestiia Vologodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2008. № 8(46). S. 5–11. (rus.)

## AUTHORS

**BABANIN Nikolai V.** – *St. Petersburg state budgetary professional educational institution «Auto transport and electromechanical college»*  
E-mail: nikolai-babanin@mail.ru

Received: 22.11.2017

DOI: 10.18721/JEST.240113  
УДК 621.7.044

*К.С. Арсентьева, В.С. Мамутов*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

## **ДИНАМИЧЕСКАЯ КРИВАЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ ПРИ РАСЧЕТАХ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ВЫТЯЖКИ-ФОРМОВКИ В КОМПЛЕКСЕ LS-DYNA®**

В условиях электрогидроимпульсной вытяжки-формовки с использованием конечно-элементного программного комплекса LS-DYNA 971 исследовано влияние вариантов задания параметров динамической кривой деформационного упрочнения на погрешность расчета. Компьютерный расчет проводился для заготовки из латуни Л68 толщиной 0,24 мм при свободной вытяжке в матрицу диаметром 60 мм. Исследовалось влияние на разные степени деформации вида кривой квазистатического деформационного упрочнения, получаемой на основе испытаний образцов на растяжение и способа многократно прокатываемой металлической полосы. Проведено сравнение методов аппроксимации кривой деформационного упрочнения и получения параметров аппроксимации, оценено их влияние на последующие компьютерные расчеты. Выполнено сравнение погрешности учета динамического упрочнения с помощью постоянного коэффициента динамичности и с использованием функциональной зависимости Cowper-Symonds.

ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНАЯ ВЫТЯЖКА-ФОРМОВКА; КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ КОМПЛЕКС LS-DYNA 971; КВАЗИСТАТИЧЕСКАЯ КРИВАЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ; ДИНАМИЧЕСКОЕ УПРОЧНЕНИЕ; ПОСТОЯННЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ДИНАМИЧНОСТИ; ЗАВИСИМОСТЬ COWPER-SYMONDS.

*Ссылка при цитировании:*

К.С. Арсентьева, В.С. Мамутов. Динамическая кривая деформационного упрочнения при расчетах электрогидроимпульсной вытяжки-формовки в комплексе LS-DYNA® // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 1. С. 130–140. DOI: 10.18721/JEST.240113.

*X.S. Arsentyeva, V.S. Mamutov*

Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

## **DYNAMIC STRAIN HARDENING CURVE IN SIMULATION OF ELECTRO-HYDRAULIC SHEET METAL FORMING USING LS-DYNA®**

The article presents an investigation of the influence that variation of the parameters of a dynamic strain hardening curve has on the calculation error in electro-hydraulic impulse metal drawing. Finite-element LS-DYNA 971 code was used. Computer simulation in this study was carried out for 0.24 mm-thick CuZn33 brass sheet blank under free drawing into a die 60 mm in diameter. We have investigated the influence of the type of quasi-static strain hardening curve. We have considered two different techniques of obtaining the curves: the tensile test method and the method of repeatedly rolled metal strip with different degrees of deformation. Moreover, we have considered methods of approximating the strain hardening curve and methods of obtaining the approximation coefficients for computer calculations. We have also estimated the error of taking into account dynamic hardening with a constant dynamic coefficient in comparison with using the Cowper-Symonds functional dependence.

ELECTRO-HYDRAULIC SHEET METAL DRAWING; FINITE-ELEMENT SOFTWARE LS-DYNA 971; QUASI-STATIC STRAIN HARDENING CURVE TYPE; ALLOWANCE OF THE DYNAMIC HARDENING; CONSTANT DYNAMIC COEFFICIENT; COWPER-SYMONDS RELATION.

*Citation:*

X.S. Arsentyeva, V.S. Mamutov. Dynamic strain hardening curve in simulation of electro-hydraulic sheet metal forming using LS-DYNA®, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 24(01)(2018) 130–140, DOI: 10.18721/JEST.240113.

**Введение**

Электрогидроимпульсная (ЭГИ) вытяжка-формовка тонколистовых и особо тонколистовых металлов – один из наиболее эффективных процессов ЭГИ штамповки в условиях мелкосерийного производства [1, 2]. Схема ЭГИ вытяжки-формовки в открытую матрицу представлена на рис. 1.

При подаче управляющего импульса на разрядник *D* ЭГИ установки происходит высоковольтный разряд предварительно

заряженной конденсаторной батареи *C* на искровой промежуток между электродами *1* в рабочей жидкости *2*, которая заполняет разрядную камеру *3*. В канале разряда выделяется электрическая энергия и образуется низкотемпературная плазма высокого давления. При расширении плазменной полости в рабочей жидкости возникает импульсное давление, за счет которого осуществляется вытяжка-формовка листовой заготовки *4* в соответствии с профилем матрицы *5*.

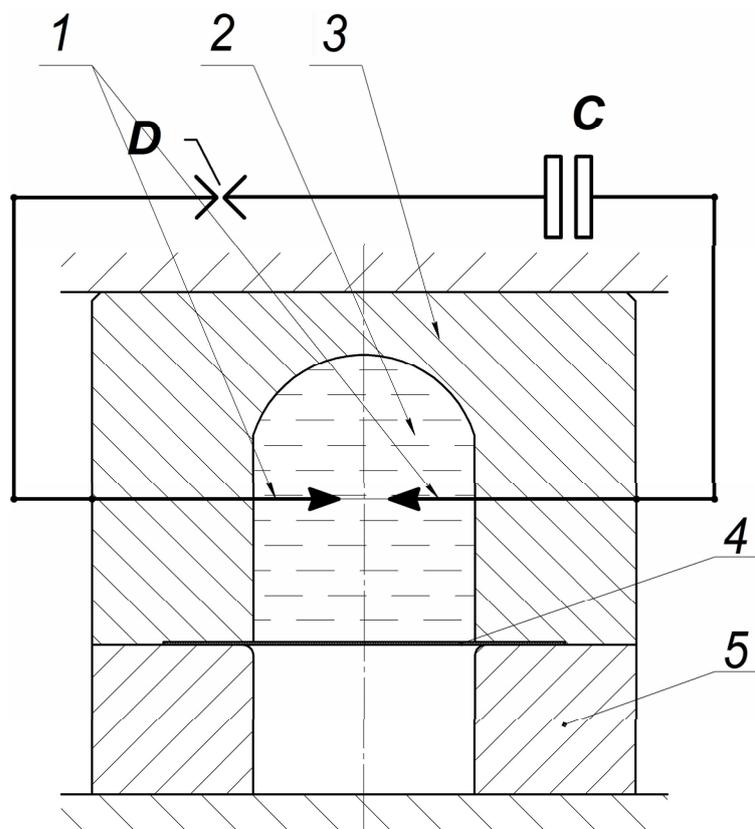


Рис. 1. Схема ЭГИ вытяжки-формовки: 1 – электроды; 2 – рабочая жидкость; 3 – разрядная камера; 4 – листовая заготовка; 5 – матрица  
 Fig. 1. Scheme of electro-hydraulic impulse drawing: 1 – electrodes; 2 – pressure transmitting liquid; 3 – discharge chamber; 4 – sheet metal blank; 5 – die

При правильном проектировании технологии данный процесс обеспечивает низкую себестоимость получаемых деталей и сжатые сроки подготовки производства за счет простоты технологической оснастки по сравнению со штамповкой в жестких инструментальных штампах. Кроме того, можно обеспечить более высокую точность и качество изделий за счет импульсного нагружения и незначительного пружинения заготовки [3], а также замедления начала деструкционной пластичности. Данный процесс характеризуется рядом сложных физико-механических явлений преобразования электрической энергии конденсаторов сначала в энергию плазмы, потом в энергию сжатой жидкости, а затем в энергию пластического деформирования заготовки. Большое число факторов, значимо влияющих на процесс, требует его трудоемкой экспериментальной отладки либо корректного компьютерного моделирования, чтобы проектируемая технология была работоспособной.

С развитием современных ЭВМ и вычислительных методов появилась возможность численного решения таких сложных задач во всей полноте технологической и физической постановки. Один из наиболее эффективных конечно-элементных (КЭ) комплексов для расчета процессов импульсной штамповки — LS-DYNA [4] — изначально разработан для расчетов воздействия подводных взрывов на металлические конструкции. С начала 2010-х годов он начал применяться для расчетов процессов импульсной листовой штамповки [5]. При этом первоначально давление на заготовку предполагалось заданным. Дальнейшее развитие моделирования позволило учитывать динамику развития плазменного канала и гидродинамику жидкости [6–8], что дало возможность получить реальное давление на подвижной заготовке. Использование специальных типов моментных оболочек позволяет оценить вероятность складкообразования

при формоизменении материала, как это показано в работах [9, 10]. В указанных выше работах при задании параметров динамической кривой деформационного упрочнения металла влияние скорости деформации учитывалось экспериментальным интегральным коэффициентом — некоторой постоянной величиной, корректирующей зависимость деформационного упрочнения. В реальном процессе вытяжки-формовки в каждой точке заготовки для разных моментов времени коэффициент скоростного упрочнения имеет разные значения, особенно в силу того, что деформирование начинается с центра заготовки при неподвижном фланце из-за большой его инерционности в направлении образующей заготовки. Используя комплекс LS-DYNA, можно применять различные физические модели и подходы для учета скоростного упрочнения металла, однако оценка их применимости для расчета процесса вытяжки-формовки ранее не производилась.

**Целью нашей работы** была оценка влияния параметров динамической кривой деформационного упрочнения металла в условиях ЭГИ вытяжки-формовки на расчеты, осуществляемые с помощью КЭ комплекса LS-DYNA.

#### **Динамическая кривая деформационного упрочнения**

Динамическая кривая деформационного упрочнения определяет зависимость напряжения текучести  $\sigma_s$  от интенсивности тензора накопленных деформаций  $\varepsilon_i$  и скорости деформаций  $\dot{\varepsilon}_i = d\varepsilon_i / dt$ :

$$\sigma_s = \sigma_s(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i). \quad (1)$$

Применение такой зависимости необходимо для расчета процессов импульсной штамповки, где скорости деформаций достигают до величины  $\dot{\varepsilon}_i = 10^3 - 10^4 \text{ с}^{-1}$ . Динамическое сопротивление текучести при ЭГИ штамповке может на 40–60 % пре-

вышать статическое напряжение текучести, что в свою очередь определяет уровень дополнительной погрешности при неучете данного фактора. В современных расчетных моделях чаще всего зависимость (1) представляют в виде произведения статической и динамической составляющей:

$$\sigma_s = f_s(\varepsilon_i) f_d(\dot{\varepsilon}_i), \quad (2)$$

хотя динамический эффект зависит и от величины деформации.

Статическую составляющую кривой деформационного упрочнения  $\sigma_s = f_s(\varepsilon_i)$  чаще всего получают путем испытания образцов специальной формы на растяжение [11]. При этом для инженерных расчетов листовой штамповки вместо зависимости  $f_s(\varepsilon_i)$  часто используют зависимость условных напряжений  $\sigma_{s0}$  от относительной (инженерной) деформации  $\varepsilon_e$  [12]. Из такой зависимости можно получить, кроме начального напряжения текучести  $\sigma_{s0}$ , также предел прочности и относительное удлинение при разрыве образца, необходимые для простых инженерных расчетов процессов обработки давлением. Для компьютерных расчетов используют параметры аппроксимации зависимости истинных напряжений от истинных деформаций,  $\sigma_s = f_s(\varepsilon_i)$ , полагая, что в условиях простого нагружения при испытаниях сумма приращений интенсивности тензора накопленных деформаций совпадает с эффективной деформацией. При этом достаточно часто экспериментальные данные аппроксимируют степенной зависимостью Холломана

$$\sigma_s = B \varepsilon_i^m, \quad (3)$$

где  $B$  и  $m$  – коэффициенты аппроксимации.

Главным недостатком испытания образцов на растяжение является незначительная деформация до момента шейкообразования, когда тензор напряжений сохраняет одноосный вид. Однако компьютерные расчеты даже при листовой штам-

повке часто осуществляются при значительно больших деформациях, и реальная кривая деформационного упрочнения может сильно отличаться от аппроксимированной зависимости (3), полученной при растяжении образца.

Более предпочтителен способ получения статической кривой деформационного упрочнения, представленный в работе [13]. При указанном способе предварительно термообработанная на максимальную пластичность металлическая полоса многократно прокатывается на разные степени деформации. Для каждой степени деформации вырезается образец и испытывается на растяжение. Определяется начальное напряжение текучести  $\sigma_{s0}$  и строится зависимость  $\sigma_s = \sigma_{s0} = f_s(\varepsilon_i)$ . Величина  $\varepsilon_i$  определяется для каждой степени деформации. Такой способ более трудоемок по сравнению с однократным растяжением, но параметры аппроксимации полученной зависимости можно использовать при расчете процессов с большими деформациями.

Более сложно с экспериментальной точки зрения определение динамической добавки  $f_d(\dot{\varepsilon}_i)$ . Существует достаточно много способов экспериментальной оценки влияния скорости деформации на параметры кривой деформационного упрочнения. Однако не все они пригодны при скоростях деформаций, характерных для ЭГИ вытяжки-формовки, из-за возможного влияния волновых процессов в образце и в опытной оснастке на результаты испытаний. Достаточно приемлемыми испытаниями для таких скоростей деформаций являются метод импульсной раздачи кольцевых образцов и метод поперечного удара, результаты практической апробации которых для ряда листовых металлов представлены в работе [14]. В них для определенного диапазона скоростей деформации, характерных для испытания, определяется некоторый интегральный коэффициент динамичности

$$f_d(\dot{\varepsilon}_i) = K_d, \quad (4)$$

при помощи которого можно упрощенно учитывать скоростное упрочнение зависимость

$$\sigma_s = K_d f_s(\varepsilon_i). \quad (5)$$

При степенной аппроксимации упрочнения (3) в этом случае можно использовать зависимости

$$\sigma_s = B_d \varepsilon_i^m; \quad B_d = K_d B. \quad (6)$$

Зная величину  $K_d$ , скорость деформации при динамическом испытании, а также скорость деформации, при которой динамическая кривая близка к квазистатической (нормирующая скорость деформаций), можно определить соответствующую функцию  $f_d(\dot{\varepsilon}_i)$ . Обычно в современных моделях металлов, например в модели Джонсона–Кука, значение нормирующей скорости деформаций выбирается  $\dot{\varepsilon}_0 = 1 \text{ с}^{-1}$  [15].

Далее делается оценка погрешности применения динамической кривой деформационного упрочнения (6) при расчете ЭГИ вытяжки-формовки при помощи КЭ комплекса LS-DYNA.

#### Модель динамического упрочнения металла в КЭ комплексе LS-DYNA

В рамках КЭ комплекса LS-DYNA коррекцию расчетов, связанную с учетом влияния больших скоростей, можно осуществить несколькими способами. Рассмотрим наиболее часто применяемую для расчетов листовой штамповки модель \*MAT\_018: MAT\_POWER\_LAW\_PLASTICITY (MPL). Данная модель предполагает изотропный материал и позволяет учитывать деформационное и скоростное упрочнение металла.

Модель MPL использует степенной закон деформационного упрочнения. При этом для учета динамического упрочнения степенную зависимость (3) можно скорректировать скоростным коэффициентом  $K_d$  (6).

Кроме того, в модели MPL может быть учтена скоростная зависимость по формуле Cowper-Symonds:

$$f_d(\dot{\varepsilon}_i) = 1 + \left( \frac{d\varepsilon / dt}{C} \right)^P, \quad (7)$$

параметры  $C$  и  $P$  которой могут быть определены по величинам  $K_d$ , скорости деформации при динамическом испытании, а также нормирующей скорости деформаций. При выборе зависимости (6) коэффициенты  $C$  и  $P$  в карте \*MAT\_POWER\_LAW\_PLASTICITY не задаются.

#### Исходные расчетные данные

В качестве материала принята латунь Л68. Предполагалась ее изотропность. Согласно данным работы [13] для выбранного материала зависимость истинного напряжения (в кГ/мм<sup>2</sup>) от инженерной деформации, полученная методом многократной прокатки полосы, имеет вид

$$\sigma_{02} = 12 + 3,6(100\varepsilon_e)^{0,62}. \quad (8)$$

Переходя от инженерной деформации к истинной деформации

$$\varepsilon_i = \ln(1 + \varepsilon_e) \quad (9)$$

и аппроксимируя (например, с помощью MS Excel) зависимость (8) формулой (3), можно получить коэффициенты аппроксимации:  $B = 661 \text{ МПа}$ ;  $m = 0,356$  при  $\varepsilon_e^* \leq 0,4$  и  $B = 742 \text{ МПа}$ ;  $m = 0,4$  при  $\varepsilon_e^* \leq 0,7$ . Здесь  $\varepsilon_e^*$  – верхняя граница диапазона инженерной деформации, в котором осуществлялась аппроксимация.

Значение коэффициента динамического упрочнения –  $K_d = 1,25$  – взято из работы [16]. При расчете задавались также:  $E = 115 \text{ ГПа}$  (модуль Юнга);  $\nu = 0,34$  (коэффициент Пуассона);  $\rho = 8600 \text{ кг/м}^3$  (плотность); кулоновское трение со значениями коэффициента при трении покоя  $\mu = 0,15$  и при движении  $\mu = 0,1$ .

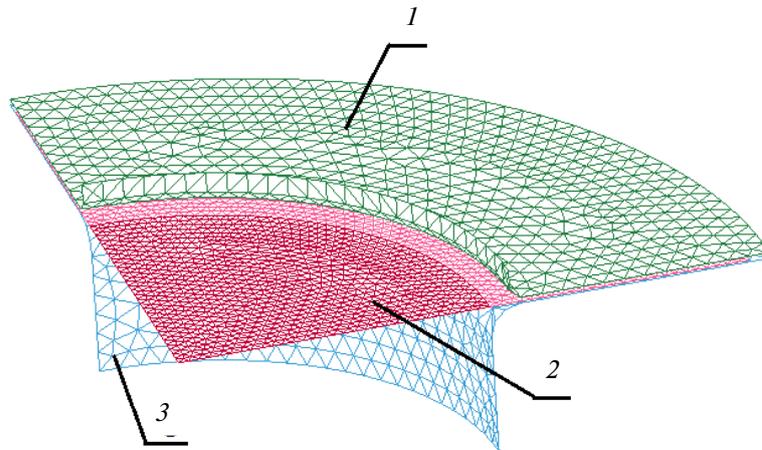


Рис. 2. Геометрическая модель вытяжки-формовки: 1 – прижим; 2 – заготовка; 3 – матрица  
 Fig. 2. Geometrical model of drawing: 1 – sheet holder; 2 – blank; 3 – die

Для варианта расчета с использованием скоростной зависимости упрочнения по формуле Cowper-Symonds (7) в диапазоне скоростей деформаций  $\dot{\epsilon}_i \in [10^3-10^4] \text{ c}^{-1}$  при значении  $K_d = 1,25$  получены величины  $C = 4,58 \cdot 10^8 \text{ c}^{-1}$  и  $P = 8,413$  с учетом  $\dot{\epsilon}_0 = 1 \text{ c}^{-1}$ .

Оценка влияния параметров динамической кривой деформационного упрочнения осуществлялась для процесса свободной вытяжки-формовки круглых в плане заготовок диаметром 110 мм и толщиной 0,24 мм в матрицу с диаметром очка 60 мм и радиусом скругления кромки 3 мм. Материалы матрицы и прижима предполагались абсолютно жесткими и задавались моделью RIGID. С учетом плоскостей симметрии бралась 1/4 часть заготовки (рис. 2).

Для заготовки использовалась модель оболочки по типу Belytschko-Wong, позволяющая при соответствующем задании карт контакта учесть текущую толщину материала. Дополнительный зазор между заготовкой – матрицей – прижимом задавался 5 % от толщины материала заготовки и полагался фиксированным в процессе формоизменения заготовки.

Импульсное давление задавалась равномерно по площади свободной части заготовки временным соотношением

$$p = p_0 N_p (t/\theta)^a \exp(-bt/\theta), \quad (10)$$

где  $t$  – время;  $p_0$  – амплитудное значение давления;  $\theta$  – характеристическое время,

за которое давление уменьшается в  $e$  раз. Нормирующая величина  $N_p$ , определяется соотношениями

$$N_p = \exp(b - 1); \quad a = bt^*, \\ b = 1/(1 - t^* + t^* \ln t^*); \quad t^* = t_m/\theta,$$

где  $t_m$  – время нарастания давления.

Рассматривались два варианта импульса давления – с относительным временем нарастания давления  $t^* = 0,1$  и  $t^* = 0,5$  при характеристической длительности давления  $\theta = 1200$  мкс. Величина импульса давления при этом подбиралась таким образом, чтобы максимальная деформация была близка к нижней кривой предельных деформаций (FLD) (рис. 3). На диаграммах показано деформированное состояние точек вдоль образующей заготовки.

### Численный эксперимент и анализ результатов

При поведении численного эксперимента оценивалось:

- влияние на результаты расчетов верхней границы аппроксимации статической кривой деформационного упрочнения ( $\epsilon_e^* \leq 0,4$  и  $\epsilon_e^* \leq 0,7$ ) при постоянном коэффициенте динамичности ( $K_d = 1,25$ );
- влияние на результаты расчетов того, как задается динамическое упрочнение: постоянным коэффициентом  $K_d = 1,25$  или зависимостью Cowper-Symonds со значениями параметров  $C = 4,58 \cdot 10^8 \text{ c}^{-1}$ ,  $P = 8,413$ .

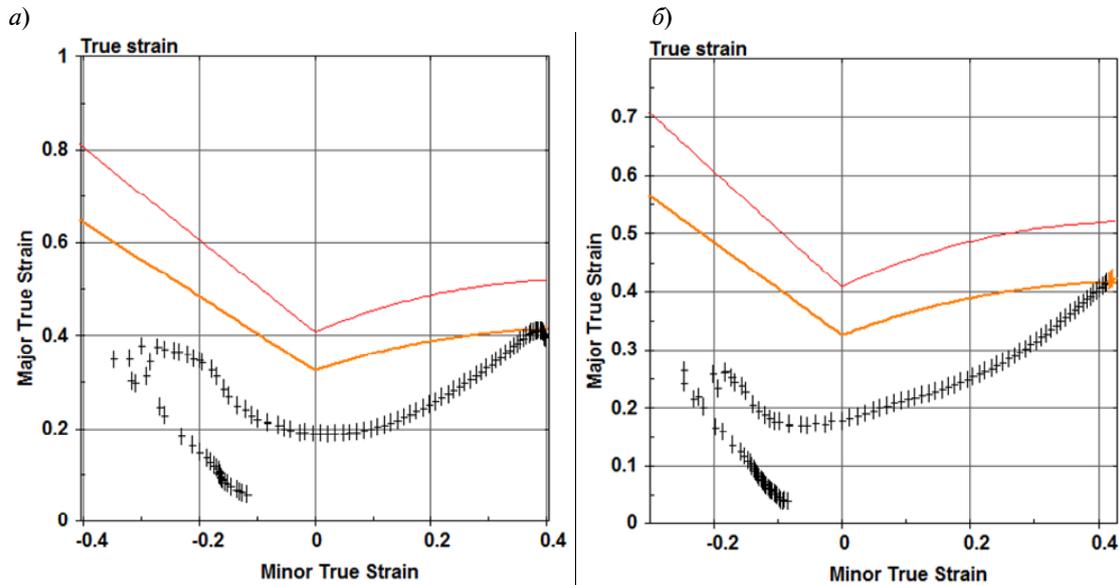


Рис. 3. Диаграммы предельных деформаций в координатах «первая истинная главная деформация – вторая истинная главная деформация» для параметров расчета:

- а)  $\varepsilon_e^* \leq 0,7$ ,  $K_d = 1,25$ ,  $t^* = 0,1$ ,  $p_0 = 57$  МПа;
- б)  $\varepsilon_e^* \leq 0,7$ ,  $K_d = 1,25$ ,  $t^* = 0,5$ ,  $p_0 = 72,5$  МПа

Fig. 3. Forming limit diagrams in the coordinates «major true strain – minor true strain» for the calculation parameters:

- а)  $\varepsilon_e^* \leq 0,7$ ,  $K_d = 1,25$ ,  $t^* = 0,1$ ,  $p_0 = 57$  МПа;
- б)  $\varepsilon_e^* \leq 0,7$ ,  $K_d = 1,25$ ,  $t^* = 0,5$ ,  $p_0 = 72,5$  МПа

При этом относительное время нарастания давления для каждого расчетного варианта варьировалось:  $t^* = 0,1$  и  $t^* = 0,5$ .

Для выбранных вариантов максимальные значения скоростей деформаций для характерных точек заготовки (1 – центр заготовки, 2 – вблизи радиуса закругления кромки матрицы, 3 – на краю фланца), полученные в расчетах, показаны на рис. 4.

В технологическом аспекте важной характеристикой является деформация точек заготовки в конце процесса деформирования. На рис. 5 представлена зависимость от времени эффективной пластической деформации для одного из вариантов расчета. Данная зависимость позволяет определить значения конечных величин деформаций и сравнить результаты для указанных выше вариантов расчета.

Результаты расчетов эффективной деформации  $\varepsilon_{ef}$  в характерных точках заготовки в момент ее остановки представлены в таблице.

**Величины эффективной деформации в характерных точках заготовки в момент ее остановки**

**Effective plastic strain in the points of blank at the end of the movement**

Вариант расчета и основные параметры	Время нарастания давления $t^*$ , с	Эффективная деформация $\varepsilon_{ef}$		
		в точке 1	в точке 2	в точке 3
<b>MPL1</b> $\varepsilon_e^* \leq 0,7$ , $K_d = 1,25$	0,1	0,806	0,236	0,174
	0,5	0,856	0,207	0,146
<b>MPL2</b> $\varepsilon_e^* \leq 0,4$ , $K_d = 1,25$	0,1	0,755	0,219	0,145
	0,5	0,763	0,189	0,123
<b>MPL3</b> $\varepsilon_e^* \leq 0,7$ , $P = 8,413$ , $C = 4,58 \cdot 10^8 \text{ c}^{-1}$	0,1	0,787	0,237	0,186
	0,5	0,868	0,213	0,142

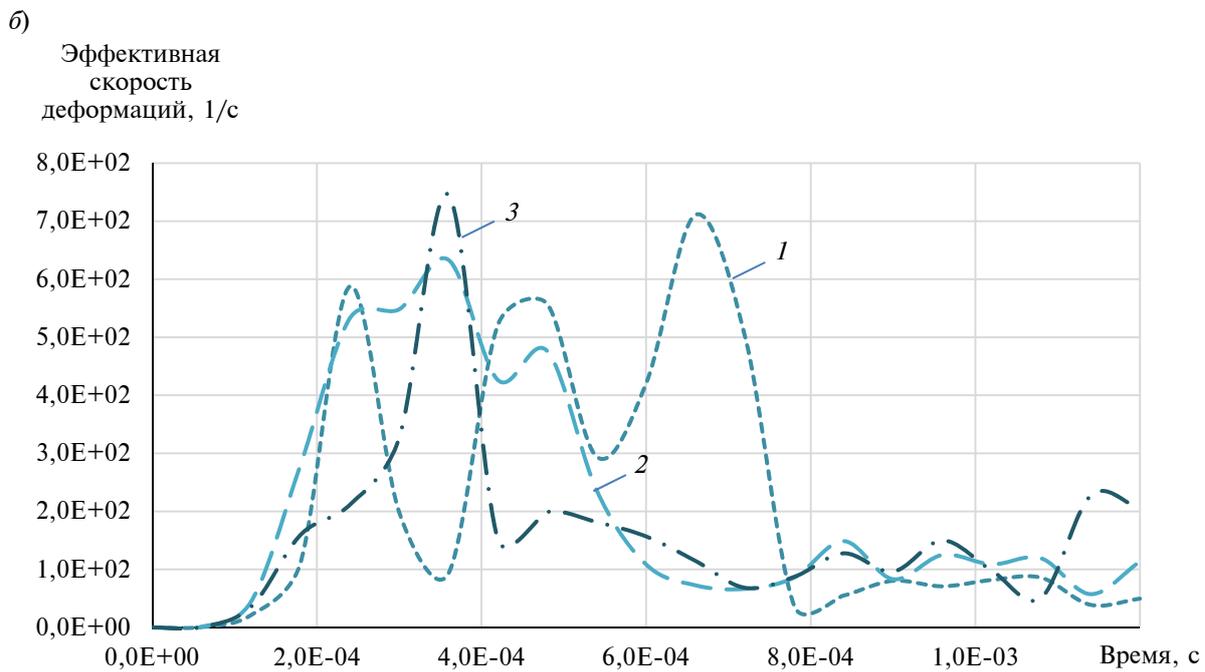
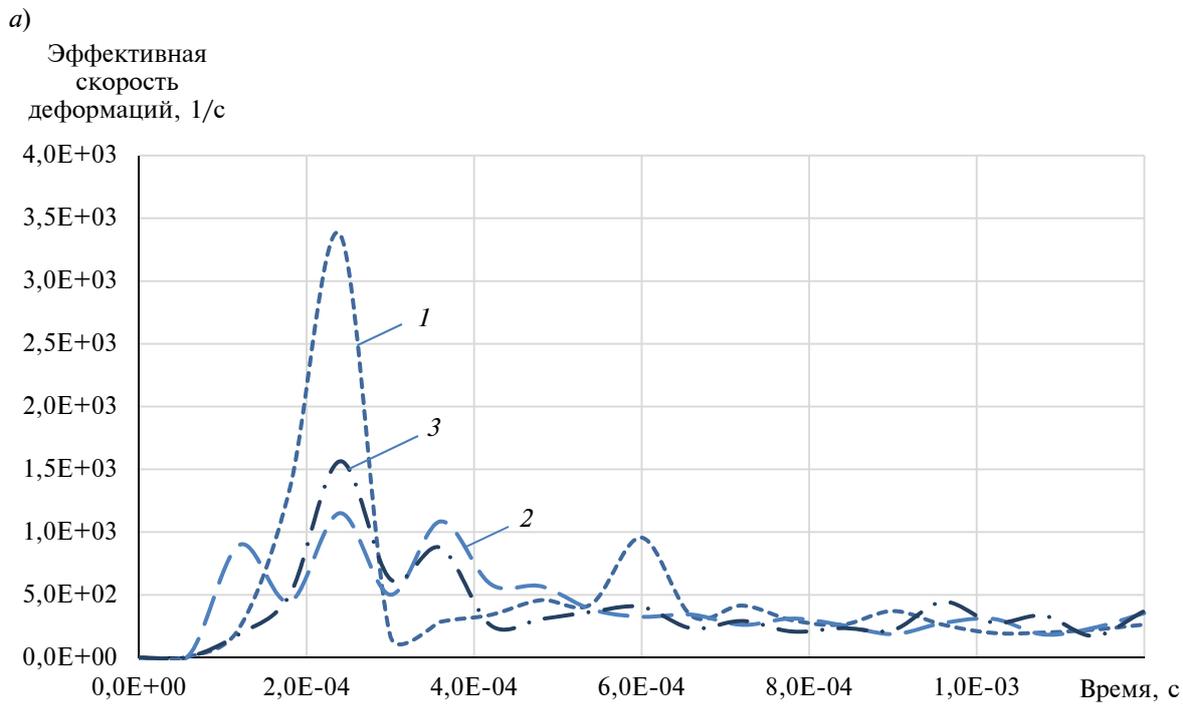


Рис. 4. Зависимость эффективных скоростей деформации характерных точек (1, 2, 3) заготовки от времени для следующих параметров расчета:

*a* –  $\varepsilon_e^* \leq 0,7$ ,  $K_d = 1,25$ ,  $t^* = 0,1$ ,  $p_0 = 57$  МПа;

*б* –  $\varepsilon_e^* \leq 0,7$ ,  $K_d = 1,25$ ,  $t^* = 0,5$ ,  $p_0 = 72,5$  МПа

Fig. 4. The dependence of effective plastic strain-rate in representative sheet metal blank points (1, 2, 3) on time for the calculation parameters:

*a* –  $\varepsilon_e^* \leq 0,7$ ,  $K_d = 1,25$ ,  $t^* = 0,1$ ,  $p_0 = 57$  МПа;

*б* –  $\varepsilon_e^* \leq 0,7$ ,  $K_d = 1,25$ ,  $t^* = 0,5$ ,  $p_0 = 72,5$  МПа

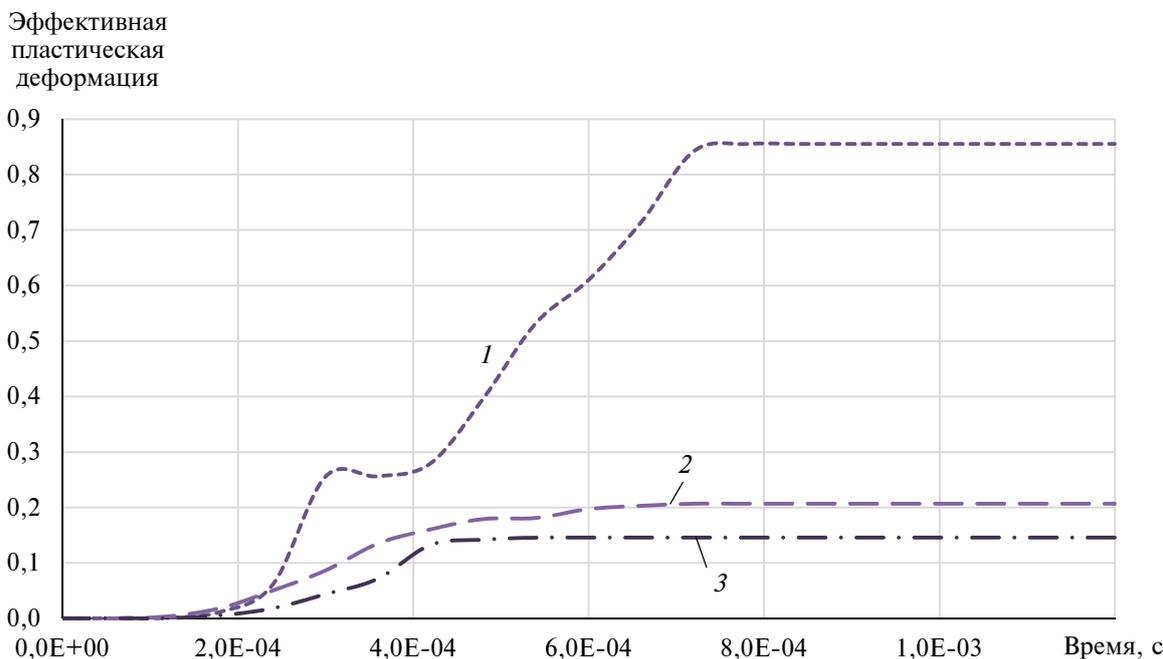


Рис. 5. Зависимость эффективных пластических деформаций характерных точек заготовки (1, 2, 3) от времени для варианта расчета с данными  $\varepsilon_e^* \leq 0,7$ ;  $K_d = 1,25$ ,  $t^* = 0,5$ ,  $p_0 = 72,5$  МПа  
 Fig. 5. The dependence of effective plastic strain in representative sheet metal blank points (1, 2, 3) on time for the calculation parameters  $\varepsilon_e^* \leq 0,7$ ;  $K_d = 1,25$ ,  $t^* = 0,5$ ,  $p_0 = 72,5$  МПа

Выполнено сравнение результатов расчетов вариантов *MPL1* и *MPL2*, полученных при постоянном коэффициенте динамического упрочнения, но при разных интервалах аппроксимации квазистатической кривой упрочнения. Судя по данным таблицы, величины эффективной деформации в центре заготовки равны  $\varepsilon_{ef} = 0,806$  при давлении с коротким фронтом  $t^* = 0,1$  и  $\varepsilon_{ef} = 0,856$  при давлении с фронтом  $t^* = 0,5$ . Данные величины находятся на границе интервала аппроксимации кривых упрочнения  $\varepsilon_e^* \leq 0,7$ . Эффективная деформация для варианта *MPL2* в центре заготовки, равная  $\varepsilon_{ef} = 0,755$  при давлении с коротким фронтом  $t^* = 0,1$  и  $\varepsilon_{ef} = 0,763$  при давлении с фронтом  $t^* = 0,5$ , отличается от варианта для *MPL1* на 6 % при  $t^* = 0,1$  и 11 % при  $t^* = 0,5$ . Так как при испытании на растяжение образцов в большинстве металлов для границы интервала аппроксимации выполняется условие  $\varepsilon_e^* \leq 0,4$ , то можно ожидать еще большей величины погреш-

ности расчета. На фланцевой части заготовки расхождение результатов может достигать 20 %.

Также выполнено сравнение результатов расчетов вариантов *MPL1* и *MPL3*, проведенных при постоянстве границы диапазона инженерной деформации  $\varepsilon_e^*$ , в котором осуществлялась аппроксимация, но при разных способах задания динамического упрочнения. Погрешность расчета для менее точного варианта расчета *MPL1* с использованием постоянного коэффициента динамичности имеет погрешности примерно 2,5 % при  $t^* = 0,1$  и 1,4 % при  $t^* = 0,5$ . С учетом более простого способа задания динамического упрочнения такие погрешности вполне допустимы при инженерных расчетах.

### Заключение

С использованием КЭ комплекса LS-DYNA 971 исследовано влияние вариантов задания параметров модели *MAT\_POWER\_LAW\_PLASTICITY* на по-



грешность расчета эффективной деформации в характерных точках листовой заготовки в условиях свободной ЭГИ вытяжки-формовки. Установлено, что при использовании кривой квазистатического деформационного упрочнения, полученной на основе испытаний образцов на растяжение, расхождение результатов расчетов по сравнению с кривой упрочнения, полу-

ченной многократной прокаткой, может превышать 10 %, а на фланцевой части заготовки может даже достигать 22 % и более. Показано, что учет динамического упрочнения постоянным коэффициентом динамичности дает погрешность расчета порядка 2,5 % по сравнению с использованием функциональной зависимости Cowper-Symonds.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Здор Г.Н., Исаевич Л.А., Качанов И.В. Технологии высокоскоростного деформирования материалов. Минск: БНТУ, 2010. 456 с.
2. Тараненко М.Е. Электрогидравлическая штамповка: теория, оборудование, техпроцессы. Харьков: Изд-во ХАИ, 2011. 272 с.
3. Чачин В.Н. Листовая штамповка с использованием импульсных нагрузок. Киев: УМК ВО, 1989. 108 с.
4. Hallquist J.O. LS-DYNA theoretical manual. Livermore Software Technology Corporation: Livermore, CA, 2006. 498 p.
5. Mamutov, A.V., Mamutov, V.S. Finite element simulation of sheet metal forming using LS-DYNA code // Proceedings of SPIE. 2005. Vol. 6253. P. 0G1–0G4.
6. Головащенко С.Ф., Мамутов А.В., Мамутов В.С. Методика компьютерного моделирования электрогидроимпульсного формоизменения тонколистовых металлов с применением программного комплекса LS-DYNA 971 // Металлообработка: научно-производственный журнал. 2012. № 3(69). С. 23–29.
7. Мамутов А.В., Мамутов В.С. Моделирование электрогидроимпульсной листовой формовки с применением комплекса LS-DYNA // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2014. № 1(190). С. 101–107.
8. Mamutov V.S., Zdor G.N. Mechanics of loading and deforming of thin-sheet blank at electro-hydraulic forming // International Review of Mechanical Engineering (I.R.E.M.E.). 2017. Vol. 11. No 5. P. 332–336.
9. Mamutov A.V., Mamutov V.S., Matveev S.A. Finite element modeling of shell wrinkling in impulse drawing of thin sheet metal // Proceedings of SPIE. 2004. Vol. 5400. P. 240–243.
10. Арсентьева К.С. Складкообразование при импульсной и квазистатической вытяжке-формовке тонколистовых деталей // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. Т. 23. № 1. С. 190–199. DOI: 10.18721/JEST.230119.
11. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1976. 488 с.
12. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. Л.: Машиностроение, 1971. 782 с.
13. Третьяков А.В., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. М.: Металлургия, 1973. 224 с.
14. Вагин В.А., Здор Г.Н., Мамутов В.С. Методы исследования высокоскоростного деформирования металлов. Минск: Наука и техника, 1990. 208 с.
15. Johnson G.R., Cook W.H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures // Eng. Fract. Mech. 1985. Vol. 21. No 1. P. 31–48.
16. Мамутов В.С., Мамутов А.В. Теория обработки металлов давлением. Компьютерное моделирование процессов листовой штамповки. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. 188 с.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**АРСЕНТЬЕВА Ксения Сергеевна** — аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: xenia.ars@gmail.com

**МАМУТОВ Вячеслав Сабайдинович** — доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: mamutov\_vs@spbstu.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 13.12.2017

## REFERENCES

- [1] **Zdor G.N., Isaevich L.A., Kachanov I.V.** Tekhnologii vysokoskorostnogo deformirovaniia materialov. Minsk: BNTU, 2010. 456 s. (rus.)
- [2] **Taranenko M.E.** Elektrogidravlicheskaia shtampovka: teoriia, oborudovanie, tekhnoprotsessy. Khar'kov: Izd-vo KhAI, 2011. 272 s. (rus.)
- [3] **Chachin V.N.** Listovaia shtampovka s ispol'zovaniem impul'snykh nagruzok. Kiev: UMK VO, 1989. 108 s. (rus.)
- [4] **Hallquist J.O.** LS-DYNA theoretical manual. Livermore Software Technology Corporation: Livermore, SA, 2006. 498 p.
- [5] **Mamutov A.V., Mamutov V.S.** Finite element simulation of sheet metal forming using LS-DYNA code. *Proceedings of SPIE*. 2005. Vol. 6253. P. 0G1–0G4.
- [6] **Golovashchenko S.F., Mamutov A.V., Mamutov V.S.** Metodika komp'iuternogo modelirovaniia elektrogidroimpul'snogo formoizmeneniia tonkolistovykh metallov s primeneniem programmnogo kompleksa LS-DYNA 971. *Metalloobrabotka: nauchno-proizvodstvennyi zhurnal*. 2012. № 3(69). С. 23–29. (rus.)
- [7] **Mamutov V.S., Shaposhnikov I.A.** Experimental estimation of efficacy of coil systems for electromagnetic stamping by polyurethane. *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 1(190)(2014) 101–107. (rus.)
- [8] **Mamutov V.S., Zdor G.N.** Mechanics of loading and deforming of thin-sheet blank at electro-hydraulic forming. *International Review of Mechanical Engineering (I.R.E.M.E.)*. 2017. Vol. 11. No 5. P. 332–336.
- [9] **Mamutov A.V., Mamutov V.S., Matveev S.A.** Finite element modeling of shell wrinkling in impulse drawing of thin sheet metal. *Proceedings of SPIE*. 2004. Vol. 5400. P. 240–243.
- [10] **Arsentyeva X.S.** Wrinkling issues in thin sheet metal during impulse and quasi-static metal forming, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 23(1)(2017) 190–199. DOI: 10.18721/JEST.230119. (rus.)
- [11] **Polukhin P.I., Gun G.Ia., Galkin A.M.** Soprotivlenie plasticheskoi deformatsii metallov i splavov. M.: Metallurgii, 1976. 488 s. (rus.)
- [12] **Romanovskii V.P.** Spravochnik po kholodnoi shtampovke. L.: Mashinostroenie, 1971. 782 s. (rus.)
- [13] **Tret'iakov A.V., Ziuzin V.I.** Mekhanicheskie svoistva metallov i splavov pri obrabotke davleniem. M.: Metallurgii, 1973. 224 s. (rus.)
- [14] **Vagin V.A., Zdor G.N., Mamutov V.S.** Metody issledovaniia vysokoskorostnogo deformirovaniia metallov. Minsk: Nauka i tekhnika, 1990. 208 s. (rus.)
- [15] **Johnson G.R., Cook W.H.** Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *Eng. Fract. Mech.* 1985. Vol. 21. No 1. P. 31–48.
- [16] **Mamutov V.S., Mamutov A.V.** Teoriia obrabotki metallov davleniem. Komp'iuternoe modelirovanie protsessov listovoi shtampovki. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2006. 188 s. (rus.)

## AUTHORS

**ARSENTEVA Xenia S.** – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university

E-mail: xenia.ars@gmail.com

**MAMUTOV Viatcheslav S.** – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university

E-mail: mamutov\_vs@spbstu.ru

Received: 13.12.2017



DOI: 10.18721/JEST.240114  
УДК 621.85

*С.И. Худорожков, Г.П. Поршнева, Е.А. Захлебаев*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ В ТРАНСМИССИЯХ КОЛЕСНЫХ И ГУСЕНИЧНЫХ МАШИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДЫ MATHWORKS SIMSCAPE**

В статье описывается методика проведения теоретических исследований динамических процессов в трансмиссиях транспортных и тяговых машин, в частности крутильных колебаний в коробке передач трактора К-744, с использованием современных программных продуктов. На примере инженерной среды MATHWORKS SIMSCAPE предлагаются алгоритмы исследования, адаптированные для инженерного применения и обеспечивающие существенное снижение объема вычислений. Выполнен пример расчета автоматизированной коробки передач, агрегатированной с двигателем ЯМЗ-5362, крутящий момент которого оказывает возмущающее внешнее воздействие и при определенных режимах способствует возникновению резонансных колебаний в коробке. Сделан анализ результатов моделирования системы «двигатель – коробка передач» в среде SIMSCAPE применительно к стендовым условиям нагружения и подтверждена эффективность предложенных алгоритмов в сравнении с альтернативными вариантами расчетов.

ТРАКТОР; КОРОБКА ПЕРЕДАЧ; КРУТИЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ; ДВИГАТЕЛЬ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ; КРУТЯЩИЙ МОМЕНТ; ВНЕШНЕЕ ВОЗМУЩЕНИЕ; СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ; РЕЗОНАНС; МОДЕЛИРОВАНИЕ; MATHWORKS.

*Ссылка при цитировании:*

С.И. Худорожков, Г.П. Поршнева, Е.А. Захлебаев. Моделирование крутильных колебаний в трансмиссиях колесных и гусеничных машин с использованием среды MATHWORKS SIMSCAPE // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 1. С. 141–153. DOI: 10.18721/JEST.240114.

*S.I. Hoodorozhkov, G.P. Porshnev, E.A. Zachlebaev*

Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

## **SIMULATION OF TORSION OSCILLATIONS IN THE TRANSMISSIONS OF WHEEL AND CRAWLER MACHINES USING THE MATHWORKS SIMSCAPE ENVIRONMENT**

The paper describes the procedure of theoretical investigations of dynamic processes in transmissions of transport and traction machines, in particular, torsional vibrations in a gear box of the K-744 tractor using modern software products. We used the MATHWORKS SIMSCAPE environment to develop algorithms tailored for engineering applications, providing a considerable reduction in computing. As an example, we have calculated an automated transmission aggregated with the ЯМЗ-5362 engine whose torque has a disturbing external influence and in certain conditions contributes to the emergence of resonance oscillations in the transmission. We have analyzed the simulation results of the engine–transmission system in the SIMSCAPE environment under testing load conditions. We have confirmed that the proposed algorithms are effective in comparison with alternative versions of the calculations.

TRACTOR; GEAR BOX; TORSIONAL OSCILLATIONS; INTERNAL COMBUSTION ENGINE; TORQUE; EXTERNAL DISTURBANCE; NATURAL FREQUENCIES; RESONANCE; MODELING; MATHWORKS.

*Citation:*

S.I. Hoodorozhkov, G.P. Porshnev, E.A. Zachlebaev. Simulation of torsion oscillations in the transmissions of wheel and crawler machines using the MATHWORKS SIMSCAPE environment, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 24(01)(2018) 141–153, DOI: 10.18721/JEST.240114.

### Введение

Возникновение крутильных колебаний в трансмиссиях транспортных и тяговых машин обусловлено наличием инерционно-упругих звеньев, которые включают в себя податливые валы, зубчатые колеса, маховик двигателя и др. К таким упругим системам приложено возмущающее внешнее воздействие со стороны двигателя, крутящий момент которого периодически изменяется. При определенных режимах работы трансмиссии в ней возможно возникновение опасных резонансных колебаний.

Исследования динамики таких систем включают в себя, как правило, синтез кинематической схемы, расчет эквивалентных (приведенных) жесткостей и моментов инерции деталей, упрощение динамической системы в виде размещения сосредоточенных масс на одном валу (цепочная система) [1, 2], формирование системы дифференциальных уравнений (как правило, в матричной форме), численное определение частот и форм собственных колебаний, расчет крутильных колебаний системы под действием момента двигателя, построение частотной диаграммы и определение резонансных режимов [3–5]. При этом выполняется большой объем сложных вычислений, и в целях облегчения инженерных расчетов производят упрощение многомассовых систем, что сказывается на точности результатов. В связи с этим применение современных алгоритмов, облегчающих исследование динамики механических систем, весьма актуально.

**Целью работы** было обоснование алгоритмов выполнения с использованием современного инженерного программного обеспечения динамических расчетов силовых передач, в частности расчета крутильных колебаний инерционно-упругих масс в трансмиссии колесного трактора.

**Методика исследования.** Современные программные средства для инженерных расчетов, в частности приложения MATHWorks – MATLAB, Simulink и Simscape,\* позволяют существенно упростить выполнение динамических расчетов силовых передач. Они предоставляют фундаментальные блоки, при помощи которых можно создать модели физических компонентов, таких, как двигатель внутреннего сгорания, фрикционная муфта сцепления, зубчатый редуктор, упругие валы, демпфирующие устройства и другие компоненты силовой передачи. По модели, которая близка по виду к кинематической схеме, Simscape автоматически составляет дифференциальные уравнения, описывающие поведение механической системы [6–8].

**Объект исследования.** В нашей работе на примере моделирования крутильных колебаний в перспективной автоматизированной коробке передач трактора К-744 рассматриваются алгоритмы и результаты применения данного приложения. Коробка передач трактора – механическая, многоступенчатая, с шестернями постоянного зацепления, с гидравлическим управлением, фрикционными, обеспечивающими переключение передач без разрыва потока мощности (16 передач переднего хода – по 8 передач в двух диапазонах – и 8 передач заднего хода).\*\*

\* См.: MATLAB® Getting Started Guide © COPYRIGHT 2007–2013 by The MathWorks, Inc. p. 272; Simscape™ User's Guide. COPYRIGHT 2007–2013 by The MathWorks, Inc. p. 203; Using SIMULINK . COPYRIGHT 2010–2016 by The MathWorks, Inc. p. 47. URL: [http://www.mathworks.com/products/simmechanics/download\\_sw2sm.html](http://www.mathworks.com/products/simmechanics/download_sw2sm.html).

\*\* См.: Официальный сайт ЗАО «Петербургский тракторный завод» [Электронный ресурс]. Режим доступа: [kirovets-ptz.com/](http://kirovets-ptz.com/); Инструкция по эксплуатации 744P-0000010ИЭ. Электронный документ ([http://szms-spb.ru/index.php?option=com\\_phocadownload&view=section&id=2&Itemid=128](http://szms-spb.ru/index.php?option=com_phocadownload&view=section&id=2&Itemid=128)); Инструкция по эксплуатации К-708.4-0000010 ИЭ. Электронный документ (<http://tracktor-kirovec.ru/files/kirovets-k-724.pdf>).

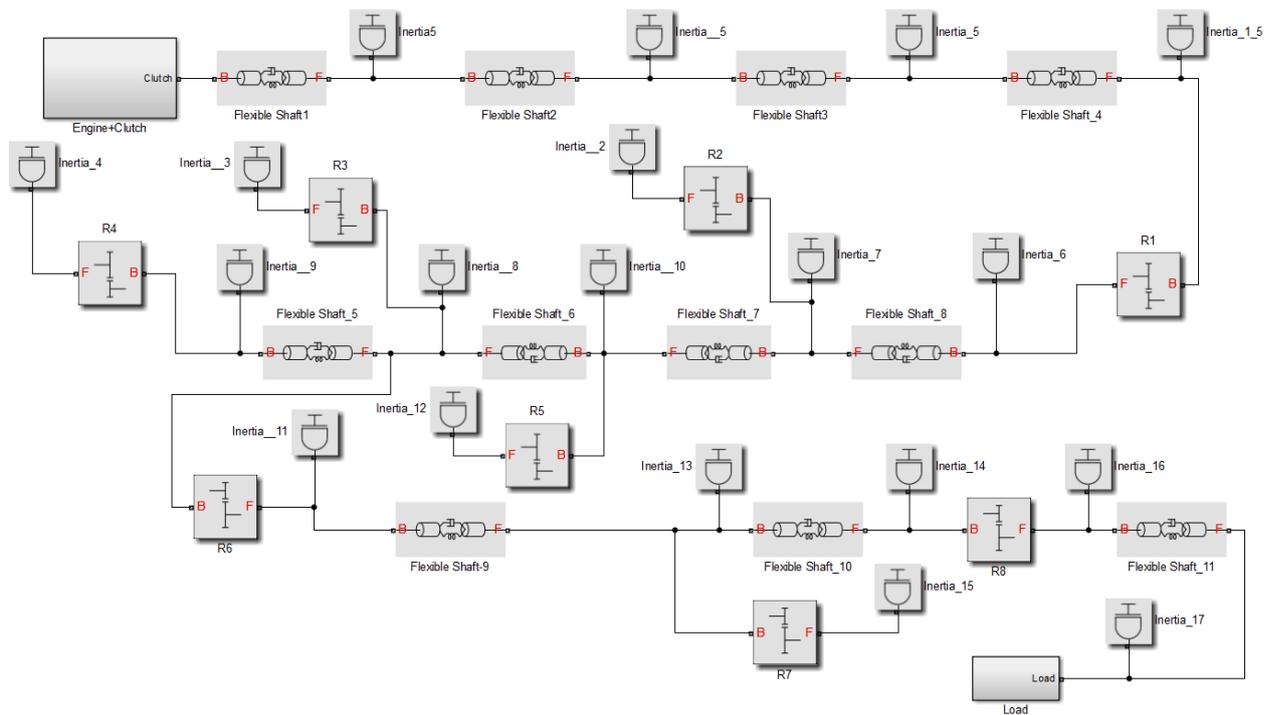


Рис. 1. Simscape-модель коробки трактора К-744 (1-я передача, 1-й режим)  
 Fig. 1. Simscape-model gear box of tractor 744 (1-st gear, 1-st mode)

**Расчетное исследование**

На основе известных кинематических, инерционно-упругих и демпфирующих параметров коробки передач разработана Simscape-модель (рис. 1) для симуляции динамических процессов, в частности крутильных колебаний под действием крутящего момента двигателя. В качестве примера Simscape-модель коробки передач с двигателем отображена в следующем состоянии: первая передача, первый диапазон, стендовый режим нагружения.

На рисунке валы коробки передач представлены в виде типовых библиотечных блоков Flexible Shaft\_1...11, описывающих упруго-демпфирующие и инерционные свойства по участкам, разбитым в точках подключения блоков Inertia\_5...17, характеризующих инерционность ведущих и ведомых масс фрикционных муфт, а также зубчатых колес, закрепленных на валах. Редукторные свойства коробки пе-

редач описываются с помощью блоков Simple Gear: R1...R8.

Моменты инерции вращающихся масс коробки передач, принятые в модели:

Обозначение массы	Момент инерции. кг·м <sup>2</sup>
Inertia_5 .....	0,23
Inertia_1_5 .....	0,23+0,25
Inertia_2 .....	0,27
Inertia_3 .....	0,29
Inertia_4 .....	0,31
Inertia_6 .....	0,1
Inertia_7 .....	0,09
Inertia_8 .....	0,06
Inertia_9 .....	0,08
Inertia_10 .....	0,06
Inertia_11 .....	0,2+0,3
Inertia_12 .....	0,07
Inertia_13 .....	0,07
Inertia_14 .....	0,01
Inertia_15 .....	0,12
Inertia_16 .....	0,5
Inertia_17 .....	20

Значения крутильной жесткости участков валов:

Обозначение вала	Крутильная жесткость, Н·м/рад
Flexible Shuft 1	390000
Flexible Shuft 2	540000
Flexible Shuft 3	1100000
Flexible Shuft 4	650000
Flexible Shuft 5	690000
Flexible Shuft 6	650000
Flexible Shuft 7	930000
Flexible Shuft 8	1370000
Flexible Shuft 9	1410000
Flexible Shuft 10	2720000
Flexible Shuft 11	190000

Передаточные числа зубчатых пар:

Зубчатая пара	Числа зубьев
R1	41/24
R2	27/38
R3	30/35
R4	33/32
R5	29/35
R6	40/23
R7	41/37
R8	56/23

Коробка передач трактора К-744 агрегируется с двигателем ЯМЗ-5362.<sup>\*\*\*</sup> В модели на рис. 1 стыковочный блок двигателя с коробкой передач представлен подсистемой «Engine+Clutch», состав которой показан на рис. 2, а. На рисунке блок «6 cylinder engine» представляет собой шестицилиндровый двигатель внутреннего сгорания с возвратно-поступательным рабочим циклом. Модель поршневого ДВС рассчитывает текущий крутящий момент, передаваемый коленчатым валом двигателя, и позволяет моделировать вибрации в трансмиссии.

Порт *B* представляет собой рабочий поршень, а порт *F* – вращающийся коленчатый вал. Усилие поршня находится под давлением в цилиндре и площади поршня. Блок получает давление сгорания, параметризованное в функции от угла поворота коленчатого вала, угловой скорости коленчатого вала, а также уровня подачи топлива.

<sup>\*\*\*</sup> Двигатели ЯМЗ-536, ЯМЗ-5361, ЯМЗ-5362, ЯМЗ-5363, ЯМЗ-5364 Руководство по эксплуатации 536.3902150 РЭ Электронный документ (<http://izh-maz.ru/data/documents/536.3902150-RE.pdf>).

Вектор формируется по данным теплового, кинематического и динамического расчетов двигателя и является полиэлементным вектором в диапазоне значений от  $-360$  до  $+360$  градусов, что соответствует четырехтактному циклу.

*N*-элементный вектор параметров подачи топлива «Throttle» принимает значения от 0 (соответствует отсутствию подачи топлива) до 1 (полная подача). При моделировании приняты следующие значения вектора: 0; 0,3; 0,8; 1.

*L*-элементный вектор угловой скорости коленчатого вала, при котором определено давление в цилиндре, принимает следующие значения: 0; 1200; 1600; 2000; 2300 об/мин.

*M-N-L*-матрицы давления в цилиндрах при соответствующих углах поворота кривошипов, подачи топлива и угловой скорости коленчатого вала формируются на основе теплового, кинематического и динамического расчетов двигателя ЯМЗ-5362, выполняемых по существующим методикам [9, 10]. Дополнительно, по результатам расчетов определяется зависимость крутящего момента в функции от угла поворота коленчатого вала с целью разложения в ряд Фурье для получения частотных характеристик спектра.

Основные геометрические параметры блока «6 cylinder engine» в модели соответствуют следующим основным техническим параметрам двигателя ЯМЗ-5362:

Число и расположение цилиндров...	L6
Диаметр цилиндра, мм	105
Ход поршня, мм	128
Рабочий объем цилиндров, л	6,65
Мощность номинальная, кВт (л.с.)	176,5 (240)
Частота вращения номинальная, об/мин	2300
Максимальный крутящий момент, Н·м (кг·м)	910 (92)
Частота при максимальном крутящем моменте, об/мин	1300–1600
Степень сжатия	17,5
Отношение радиуса кривошипа к длине шатуна	$\gamma = 0,264$
Конструктивная масса поршневой группы, кг/м <sup>2</sup>	$K_n = 240$
Конструктивная масса шатуна, кг/м <sup>2</sup>	$K_{ш} = 300$
Конструктивная масса кривошипа, кг/м <sup>2</sup>	$K_{кр} = 320$

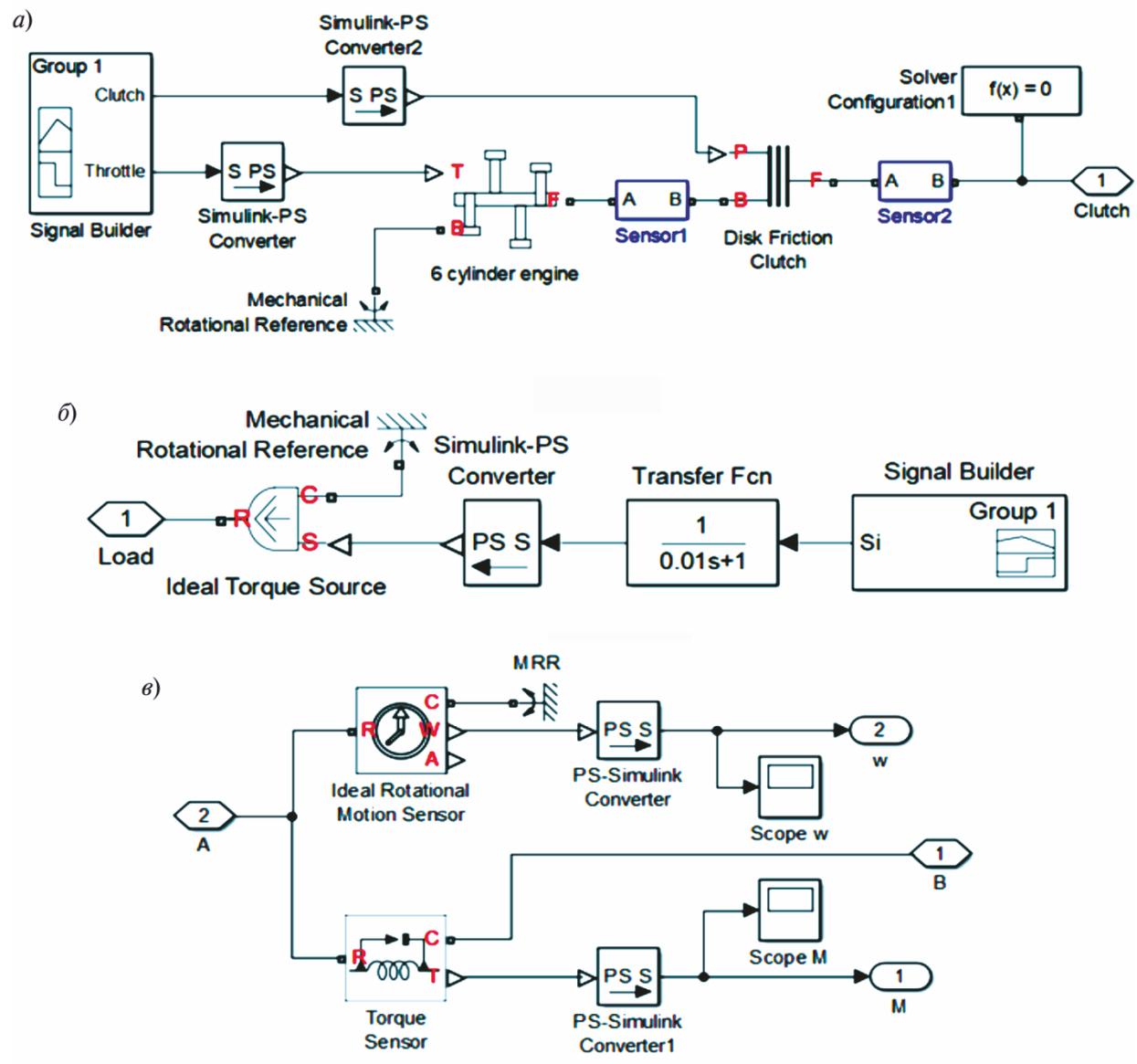


Рис. 2. Подсистемы Simscape–модели коробки передач: а) «Engine+Clutch»; б) «Load» (Нагрузка); в) «Sensor»  
 Fig. 2. Simscape-model's subsystems of gear box: a) «Engine+Clutch»; b) «Load»; c) «Sensor»

Полученные по результатам расчетов суммарные крутящие моменты двигателя за цикл работы на внешней скоростной характеристике при оборотах  $n_{дв}$ , равных 2300, 2000, 1800 и 1200 об/мин, представлены на рис. 3.

«Disk friction clutch» на рис. 2, а представляет собой фрикционную муфту с наборами фрикционных дисков, которая моделирует включение фрикциона

первой передачи при «условном» трогании с места и разгоне в стендовых условиях.

После включения муфты на поверхностях возникают моменты сил трения, которые позволяют передавать мощность между ведущими и ведомыми частями механизма. Муфта – двунаправленная, может скользить в положительном и отрицательном направлениях.

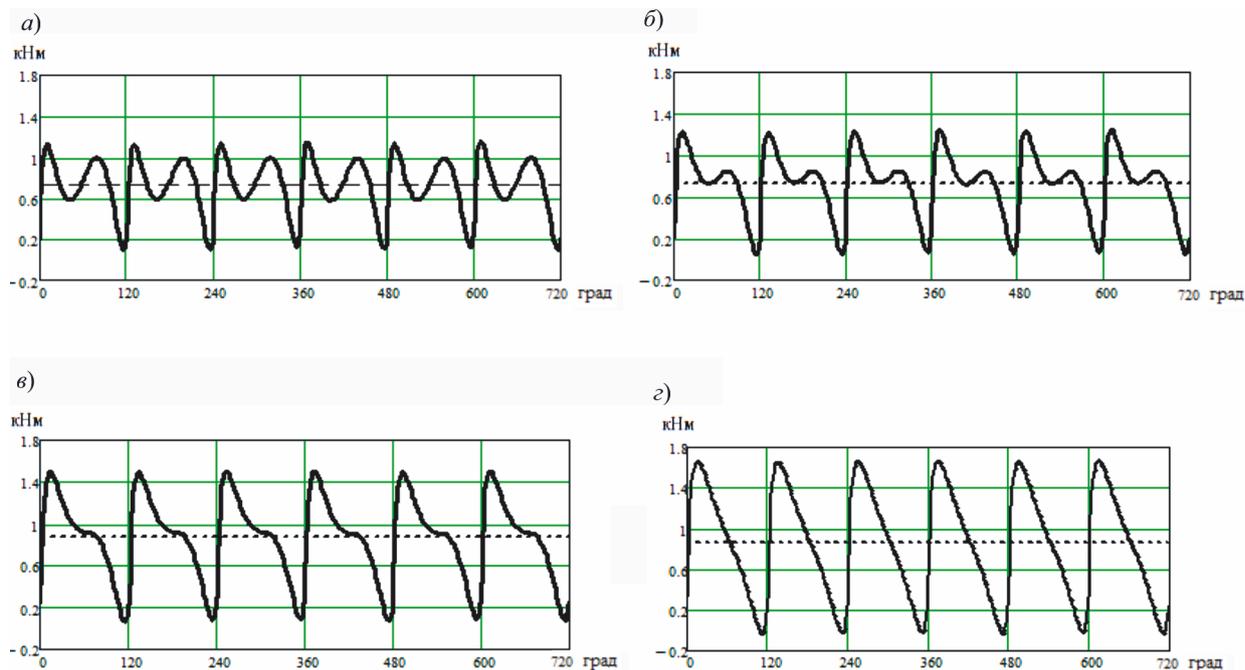


Рис. 3. Суммарный (—) и средний (---) крутящие моменты двигателя, соответствующие внешней скоростной характеристике при  $n_{дв}$ , равны 2300 (а), 2000 (б), 1800 (в) и 1200 (з) об/мин  
 Fig. 3. The total (—) and average (---) torques of the engine corresponding to external velocity characteristic when  $n_{engine} = 2300$  (a), 2000 (б), 1800 (в) and 1200 (з) rpm

Параметры муфты, соответствующие фрикциону первой передачи трактора:

«Effective torque radius» – эффективный радиус – 130 мм;

«Number of friction surfaces» – количество контактных поверхностей трения – 12 (14 у фрикциона 1-й передачи);

«Engagement piston area» – эффективная площадь давления на диски – 0,02 м<sup>2</sup>;

«Directionality» – bidirectional – фрикционная муфта двухстороннего действия;

«Friction model» – фрикционная модель линейная. Принятое начальное состояние – Unlocked (выключена).

Управляющие воздействия по подаче топлива (Throttle) и темпу включения фрикционной муфты на рис. 2, а сформированы в блоке «Signal Builder». Нагрузочное устройство на выходном валу коробки передач представлено блоком «Load», структура которого изображена на рис. 2, б. Тормозной момент, заданный блоком «Signal Builder», равен 3000 Н·м.

Визуализация и регистрация параметров нагруженности участков валов коробки передач при крутильных колебаниях под дей-

ствием крутящего момента двигателя (угловые скорости  $\omega$ , крутящие моменты  $M$ ) осуществляется с помощью блоков «Sensor», которые подключаются к любой точке Simscape-модели (см. рис. 1) и включают в себя типовые компоненты библиотеки Simulink, изображенные на рис. 2, в.

Результаты моделирования крутильных колебаний в коробке передач трактора на первой передаче и первом режиме в стендовых условиях нагружения представлены на рис. 4. При моделировании режим торможения выходного вала коробки передач и темп включения фрикциона первой передачи приняты такими, чтобы имитировать режим трогания с места и разгона с плавным увеличением частоты вращения входного вала коробки передач при увеличении оборотов двигателя с 100 до 270 рад/сек (см. рис. 4, а).

На рис. 4, б, в приведены кривые крутящего момента, Н·м, на входном «Flexible Shaft\_1» и выходном «Flexible Shaft\_4» участках входного вала (см. рис. 1) при изменении оборотов двигателя, соответствующих рис. 4, а.

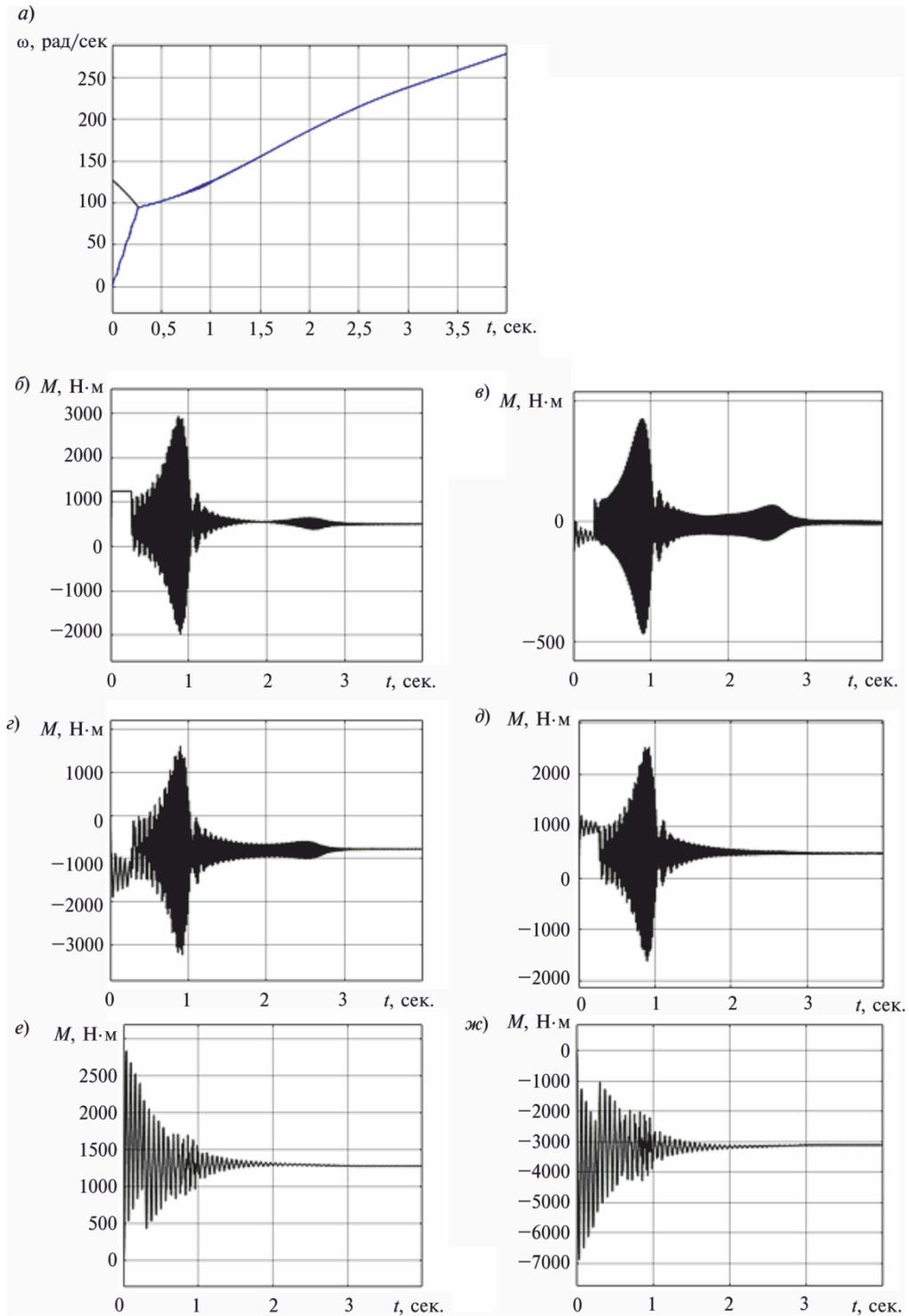


Рис. 4. Частоты вращения ведущих ( $\omega_1$ ) и ведомых ( $\omega_2$ ) масс фрикционной муфты (а) и крутящие моменты на участках валов «Flexible Shaft\_1...4» (б, в), «Flexible Shaft\_8...5» (г, д), «Flexible Shaft\_10...11» (е, ж)

Fig. 4. The frequency of rotation of the leading ( $\omega_1$ ) and driven ( $\omega_2$ ) masses of the clutch (a) and the torques on shafts sections «Flexible Shaft\_1...4» (б, в), «Flexible Shaft\_8...5» (г, д), «Flexible Shaft\_10...11» (е, ж)

На рис. 4, *з, д* приведены кривые крутящих моментов, Н·м, на входном «Flexible Shaft\_8» и выходном «Flexible Shaft\_5» участках промежуточного вала, а на рис. 4, *е, ж* – кривые крутящих моментов, Н·м, на грузовом «Flexible Shaft\_10» и раздаточном «Flexible Shaft\_11» валах коробки передач.

### Обсуждение результатов

Из графиков следует, что по окончании переходного процесса, связанного с выравниванием частот вращения ведущих и ведомых масс фрикционной муфты, стационарные составляющие крутящего момента на валах пропорциональны (с учетом передаточных чисел) моменту сопротивления на выходном валу коробки передач. При  $t = 0,9$  сек (соответствует частоте вращения двигателя  $\omega = 115$  рад/сек, см. рис. 4, *а*) наблюдается резонанс крутильных колебаний на входном и промежуточном валах (см. рис. 4, *б, в, з, д*), вызванный совпадением собственных и вынужденных частот звеньев коробки передач. При  $t = 2,7$  сек. (соответствует частоте вращения двигателя  $\omega = 217$  рад/сек) наблюдается второй резонанс на тех же валах (см. рис. 4, *б, в, з*).

Для проверки условий существования резонансных эффектов необходимо определить спектры частот собственных колебаний в коробке передач и вынужденных колебаний, обусловленных действием крутящего момента двигателя.

В первом случае целесообразно использовать инструмент линейного анализа (*LTI – Linear Time-Invariant models*) в среде программирования MATLAB. С его помощью можно получить характеристики модели, в частности собственные частоты механической системы, построенной с использованием пакета Simscape, в виде логарифмической амплитудно-частотной характеристики (диаграмма Бode), т. е. частотного отклика линейной стационарной системы в логарифмическом масштабе.

При построении диаграммы Бode необходимо установить точки входа и выхода (Open-Loop Input, Open-Loop Output) на входном и выходном валах коробки передач Simscape-модели и запустить процедуру «*Analysis – Control Design – Linear Analysis*». Результаты построения диаграммы Бode в среде MATLAB-Simulink представлены на рис. 5.

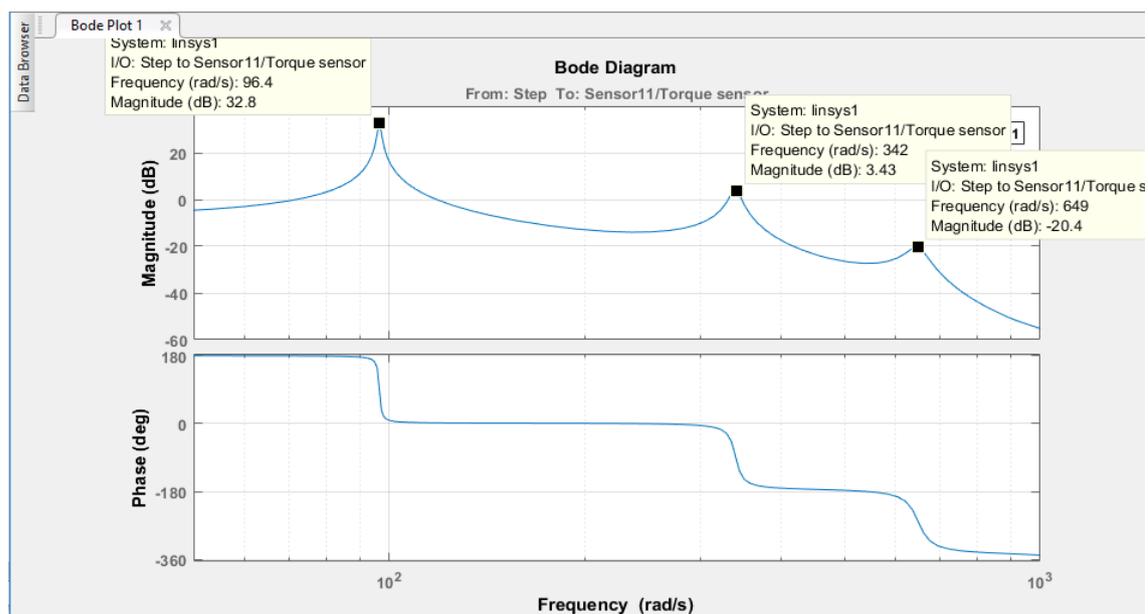


Рис. 5 Диаграмма Бode для коробки передач (Simscape-модель, 1-я передача, 1-й режим)  
 Fig. 5 Bode Diagram for the gear box (Simscape-model, 1-st gear, 1-st mode)

На графике рис. 5 по абсциссе отложена частота в логарифмическом масштабе, по оси ординат – амплитуда передаточной функции в децибелах. Максимальные резонансные амплитуды на графике соответствуют собственным частотам системы 96,4; 342 и 649 рад/сек. Остальные собственные частоты незначительны (по амплитуде).

Для частотного анализа внешнего возмущения на входном валу коробки передач, вызванного крутящим моментом двигателя, целесообразно использовать быстрое преобразование Фурье:

$$A = \text{fft}(M_{\text{sum}}), \quad (1)$$

где  $A$  – частотное представление крутящего момента двигателя;  $M_{\text{sum}}$  – суммарный крутящий момент двигателя, Н·м, в функции от угла поворота коленчатого вала в интервале от 0 до 720 град (см. рис. 3);  $\text{fft}$  – стандартная функция быстрого преобразования Фурье.

Амплитуды спектра крутящего момента определяются по формуле

$$M_{s_l} = \sqrt{\text{Re}(A_l)^2 + \text{Im}(A_l)^2}, \quad (2)$$

где  $\text{Re}(A_l)$  – действительная часть спектра;  $\text{Im}(A_l)$  – мнимая часть спектра;  $l$  – номер гармоники синтезирования крутящего момента.

Фазы спектра гармоник синтезирования

$$Q_l = \arg(A_l). \quad (3)$$

Амплитуды гармоник синтезирования:

$$M_l = c \frac{M_{s_l}}{\sqrt{\text{length}(M_{\text{sum}})}}; \quad M_0 = \frac{M_{s_0}}{c}, \quad (4)$$

где  $c = 2$  – коэффициент периодичности функции крутящего момента;  $\text{length}(M_{\text{sum}})$  – размер массива расчетных точек крутящего момента;

Результаты частотного анализа крутящих моментов двигателя при различных оборотах коленчатого вала представлены на рис. 6.

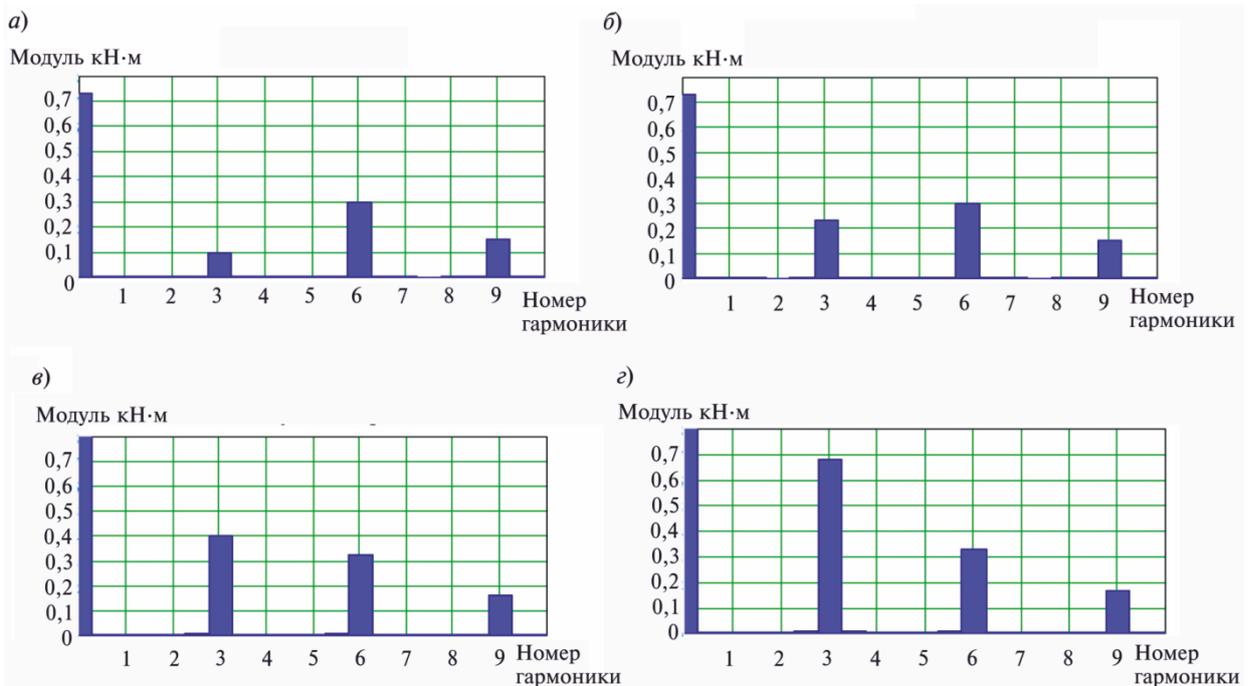


Рис. 6. Модули спектра крутящего момента двигателя при частотах вращения  $n_{\text{дв}}$  2300 (а), 2000 (б), 1800 (в), 1200 (з) об/мин на внешней скоростной характеристике

Fig. 6. The spectrum's modules of the engine torque at speeds  $n_{\text{engine}}$  2300 (a), 2000 (б), 1800 (в), 1200 (з) rpm on external velocity characteristic

**Переменные синтезируемых кривых крутящего момента двигателя ЯМЗ-5362**

**The variables of synthesized torque curves of the engine ЯМЗ-5362**

$n_{дв}$ , об/мин	$\Omega$ , рад/сек	$M_0$ , кН·м	$M_{3c}$ , кН·м	$Q_{3c}$ , рад	$M_{6c}$ , кН·м	$Q_{6c}$ , рад	$M_{9c}$ , кН·м	$Q_{9c}$ , рад
2300	241	0,731	0,099	-3	0,3	-1,87	0,151	-1,94
2000	209	0,731	0,231	-2	0,3	-1,87	0,151	-1,94
1800	188	0,866	0,402	-1,88	0,326	-1,89	0,165	-1,98
1600	168	0,903	0,518	-1,82	0,333	-1,9	0,168	-1,99
1400	147	0,903	0,606	-1,8	0,333	-1,9	0,169	-1,98
1200	126	0,854	0,66	-1,76	0,324	-1,89	0,164	-1,97

Обратное преобразование Фурье-изображения в исходные кривые крутящего момента соответствует синтезированной-му выражению

$$M(t) = \sum_l M_{c,l} \cos(l\omega t + Q_{cl}), \quad (5)$$

или с учетом только значимых амплитуд гармоник (см. рис. 7)

$$M(t) = M_0 + M_{3c} \cos(3\omega t + Q_{3c}) + M_{6c} \cos(6\omega t + Q_{6c}) + M_{9c} \cos(9\omega t + Q_{9c}). \quad (6)$$

Значения переменных синтезируемых рядов приведены в таблице.

Частотный анализ крутящего момента показывает, что, помимо постоянной составляющей с нулевой частотой  $M_0$ , спектр частот с наибольшими амплитудами включает в себя гармоники 3-го, 6-го и 9-го порядков. С ростом частоты вращения коленчатого вала с 1200 до 2300 об/мин (см. рис. 3) амплитуда 3-й гармоники  $M_{3c}$  снижается примерно в 6 раз (с 0,66 до 0,099 кН·м); остальные составляющие амплитудного спектра остаются практически без изменений.

По известным частотам собственных крутильных колебаний (см. рис. 5) и спектру крутящего момента двигателя (см. рис. 6) можно определить частоты вращения двигателя, которые будут способствовать возникновению резонансных крутильных колебаний в коробке передач трактора.

На рис. 7 представлена диаграммы частот собственных крутильных колебаний коробки передач трактора —  $\omega_{c1} = 96,4$  рад/сек,  $\omega_{c2} = 342$  рад/сек,  $\omega_{c3} = 649$  рад/сек, изображенных прямыми линиями, параллельными оси абсцисс, и лучи, соответствующие гармоникам крутящего

момента двигателя ЯМЗ-5362 на основной частоте  $n_{дв}$  и на обертонах внешней частоты 3-го, 6-го и 9-го порядков (соответственно,  $3n_{дв}$ ,  $6n_{дв}$ ,  $9n_{дв}$ ).

Пересечение лучей с постоянными линиями собственных частот позволяет определить резонансные частоты  $\omega_p$  вращения двигателя, а именно: на основной гармонике  $n_{дв}$  —  $\omega_{p1} = 96$  рад/сек; на обертоном внешней частоты 3-го порядка —  $\omega_{p2} = 115$  рад/сек и  $\omega_{p3} = 217$  рад/сек.

Приведенные данные подтверждают результаты, полученные при компьютерном моделировании Simscape-модели: наличие резонансных эффектов при крутильных колебаниях валов в коробке передач на обертоном внешней частоты двигателя 3-го порядка (при оборотах входного вала 115 и 215 рад/сек). Резонанс на основной гармонике  $n_{дв}$  не зафиксирован, поскольку начальная частота вращения входного вала коробки передач после завершения буксования фрикционной муфты при моделировании процесса трогания на 1-й передаче и 1-м режиме больше 96 рад/сек.

По описанному выше алгоритму проведено моделирование крутильных колебаний в коробке передач трактора К-744, агрегатированного с двигателем ЯМЗ-5362, на 8 передачах с автоматизированным переключением. Результаты моделирования позволили определить диапазоны собственных частот крутильных колебаний в коробке передач при переключении с 1-й по 8-ю ступень: 96–115, 350–320 и 680–580 рад/сек. Диапазоны изменения собственных частот определяются варьированием податливости участков и моментов инерции масс в коробке передач при переключении.

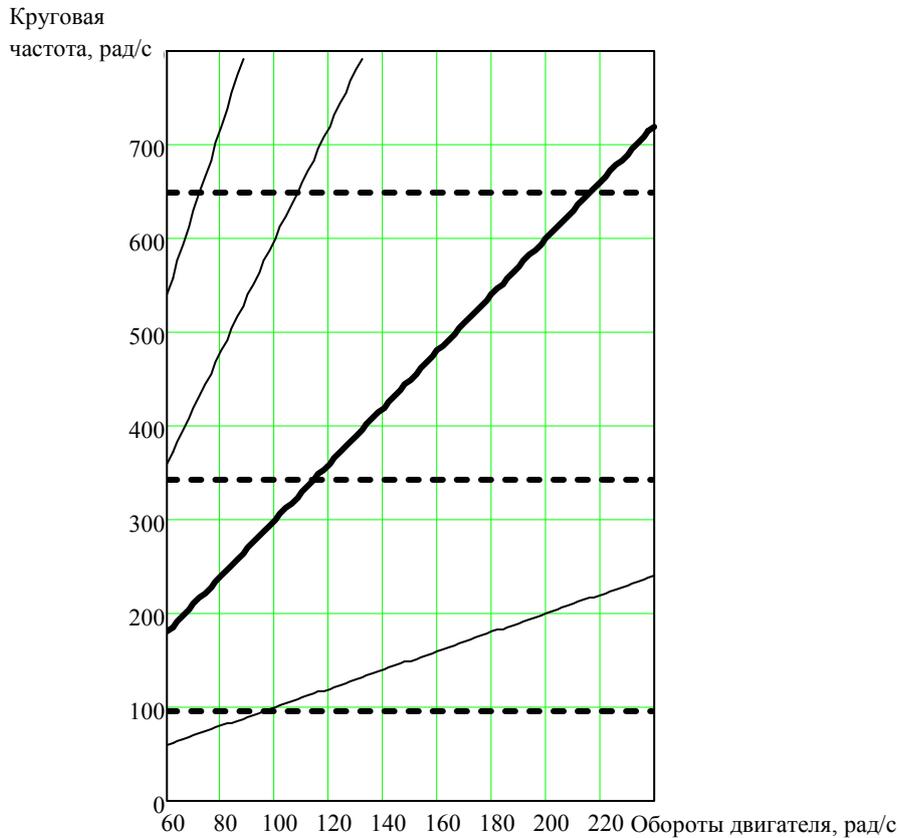


Рис. 7. Частотная диаграмма коробки передач (1-я передача, 1-й режим)

(—) —  $n_{дв}$ ; (—) —  $3n_{дв}$ ; (—) —  $6n_{дв}$ ; (—) —  $9n_{дв}$ ; (—) —  $\omega_{c1}$ ;  
 (—) —  $\omega_{c2}$ ; (—) —  $\omega_{c3}$ ;

Fig. 7. The frequency diagram of the gear box (1-st gear, the 1-st mode)

Гармоники крутящего момента двигателя ЯМЗ-5362 на основной частоте  $n_{дв}$  и на обертонах внешней частоты 3-го, 6-го и 9-го порядков могут инициировать резонансные режимы при частотах вращения двигателя 100–115, 165–175 и 190–225 рад/сек, причем доминирующей (с максимальной амплитудой резонансных колебаний) является 3-я гармоника, при которой наступает резонанс на частотах вращения двигателя 100–115 и 200–215 рад/сек.

### Выводы

В результате проведенного теоретического исследования получены следующие результаты:

1. Для моделирования крутильных колебаний в трансмиссиях транспортных и тяговых машин предложен алгоритм, исполь-

зующий возможности среды MATHWORKS SIMSCAPE и особенность алгоритма — отсутствие необходимости приводить к эквивалентным значениям упругие и инерционные параметры звеньев механических систем при размещении сосредоточенных масс на одном валу, составлять системы дифференциальных уравнений и численно решать эти системы с использованием специальных программ, проводить частотный анализ спектров крутящего момента двигателя и собственных частот механической системы, строить частотные диаграммы с целью выявления резонансных режимов, позволяющий существенно уменьшить объем и сложность вычислений.

2. На основе разработанного алгоритма проведено моделирование крутильных колебаний в перспективной коробке передач трактора К-744, агрегатированного с дви-

гателем ЯМЗ-5362, на 8 передачах с автоматизированным переключением. Результаты моделирования позволили определить диапазоны собственных частот крутильных колебаний в коробке передач при переключении с 1-й по 8-ю ступень – 96–115, 350–320 и 680–580 рад/сек.

3. Моделирование в среде SIMSCAPE динамических характеристик трансмиссий машин в единой системе с многоцилиндровыми двигателями внутреннего сгорания для возвратно-поступательного рабочего цикла позволяет рассчитывать текущий крутящий момент, передаваемый коленчатым валом двигателя, и моделировать вибрации в трансмиссии с учетом сил, параметризованных в функции от угла поворота коленчатого вала, угловой скорости коленчатого вала, а также уровня подачи топлива.

В процессе теоретического исследования установлено, что гармоники крутящего

момента двигателя ЯМЗ-5362 на основной частоте  $n_{дв}$  и на обертонах внешней частоты 3-го, 6-го и 9-го порядков могут инициировать резонансные режимы при частотах вращения двигателя в диапазонах 100–115, 165–175 и 190–225 рад/сек, причем доминирующей (с максимальной амплитудой колебаний момента) является 3-я гармоника, при которой наступает резонанс на частотах вращения двигателя 100–115 и 200–215 рад/сек.

4. Полученные результаты позволяют разработать технические предложения по снижению динамических нагрузок в трансмиссии трактора, в частности за счет подбора упруго-диссипативных характеристик деталей и узлов, моментов инерции, а также выбора интервала эксплуатационных оборотов двигателя вне точек совпадения обертона 3-го порядка (см. п.3) с собственными частотами коробки передач.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Timoshenko S., Young D.H., Weaver W., Jr. Vibration problems in engineering. New York: JOHN WILEY & SONS, Inc., 1974. 472 p.
2. Маслов Г.С. Расчеты колебаний валов: Справочник. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1980. 151 с.
3. Вульфсон И.И. Краткий курс теории механических колебаний. М.: Изд-во ВНТР, 2017. 241 с.
4. Dresig H., Holzweißig F. Dynamics of Machinery: Theory and Applications. Springer Berlin, 2013. 544 p.
5. Wilson C.E., Sadler P. Kinematics and Dynamics of Machinery. 3rd Edition. Pearson Education Limited Edinburgh, 2014. 900 p.
6. Худорожков С.И. Теория и системы автоматического управления. Анализ и синтез САУ транспортных систем в среде Simulink: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. 110 с.
7. Худорожков С.И. Теория и системы автоматического управления. Анализ и синтез в среде Simulink. Библиотека стандартных блоков. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 89 с.
8. Hoodorozhkov S.I., Zakhlebaev E.A. The mechanical stepless Impulse type transmission for advanced small-sized transport // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2015. № 3 (226). С. 152–162. DOI 10.5862/JEST.231.16.
9. Колчин А.И., Демидов В.П. Расчет автомобильных и тракторных двигателей. М.: Высш. школа, 2001. 320 с.
10. Косенок Б.Б. Расчет индикаторной диаграммы для динамического исследования двигателей внутреннего сгорания в среде КДАМ // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. Академика С.П. Королева. 2013. № 3-2 (27). С. 145–149.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ХУДОРОЖКОВ** Сергей Иванович – доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: xcu-55@mail.ru

**ПОРШНЕВ** Геннадий Павлович – доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: porshnevgr@mail.ru

**ЗАХЛЕБАЕВ** Евгений Анатольевич – аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: e-zakhlebaev@polytechnicm.com

Дата поступления статьи в редакцию: 16.01.2018



## REFERENCES

- [1] **Timoshenko S., Young D.H., Weaver W., Jr.** Vibration problems in engineering. New York: JOHN WILEY & SONS, Inc., 1974. 472 p.
- [2] **Maslov G.S.** Raschety kolebanii valov: Spravochnik. 2-e izd. M.: Mashinostroenie, 1980. 151 s. (rus.)
- [3] **Vul'fon I.I.** Kratkii kurs teorii mekhanicheskikh kolebanii. M.: Izd-vo VNTR, 2017. 241 s. (rus.)
- [4] **Dresig H., Holzweißig F.** Dynamics of Machinery: Theory and Applications. Springer Berlin, 2013. 544 p.
- [5] **Wilson C.E., Sadler P.** Kinematics and Dynamics of Machinery. 3rd Edition. Pearson Education Limited Edinburgh, 2014. 900 p.
- [6] **Khudorozhkov S.I.** Teoriia i sistemy avtomaticheskogo upravleniia. Analiz i sintez SAU transportnykh sistem v srede Simulink: ucheb. posobie. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2014. 110 s. (rus.)
- [7] **Khudorozhkov S.I.** Teoriia i sistemy avtomaticheskogo upravleniia. Analiz i sintez v srede Simulink. Biblioteka standartnykh blokov. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2013. 89 s. (rus.)
- [8] **Hoodorozhkov S.I., Zachlebaev E.A.** The mechanical stepless impulse type transmission for advanced small-sized transport. *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 3(226)(2015) 152–162, DOI: 10.5862/JEST.231.16.
- [9] **Kolchin A.I., Demidov V.P.** Raschet avtomobil'nykh i traktornykh dvigatelei. M.: Vyssh. shkola, 2001. 320 s. (rus.)
- [10] **Kosenok B.B.** Raschet indikatornoi diagrammy dlia dinamicheskogo issledovaniia dvigatelei vnutrennego sgoraniia v srede KDAM. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. Akademika S.P. Koroleva*. 2013. № 3-2 (27). S. 145–149. (rus.)

## AUTHORS

**HOODOROZHKOV** Sergei I. – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*  
E-mail: xcu-55@mail.ru

**PORSHNEV** Gennadii P. – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*  
E-mail: porshnevgp@mail.ru

**ZACHLEBAEV** Evgenii A. – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*  
E-mail: e-zachlebaev@polytechnicm.com

Received: 16.01.2018

DOI: 10.18721/JEST.240115  
УДК 625.143.4:621.882.3-592.356

*В.Г. Артюх<sup>1</sup>, А.А. Никитченко<sup>2</sup>, В.О. Мазур<sup>3</sup>,  
И.Н. Чigareва<sup>1</sup>, Н.В. Чернышева<sup>1</sup>*

1 – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

2 Научно-исследовательский центр транспортных технологий, Санкт-Петербург, Россия

3 – ООО Научно-производственное объединение «Санкт-Петербургская электротехническая  
компания», Санкт-Петербург, Россия

## **ИСПЫТАНИЯ САМОЗАТЯГИВАЮЩИХСЯ ГАЕК УЗЛОВ КРЕПЛЕНИЯ РЕЛЬСОВЫХ СТЫКОВ**

Разработка и внедрение самотормозящихся и самоподкручивающихся гаек, обеспечивающих отсутствие зазоров в соединениях, – важный путь увеличения надежности узлов крепления рельсовых стыков как магистральных, так и внутрицеховых путей. В статье дается экспериментальная оценка функциональным качествам самоподкручивающихся гаек, разработанных в ООО ТД «Агропромимпекс – 2000». Экспериментальное подтверждено, что силовым условием самозатягивания является наличие предварительной затяжки гайки с определенным усилием, зависящим в основном от предварительного натяга; геометрическое условие самозатягивания – выполнение такой конфигурации гайки, при которой после снятия начального натяга момент на ее опорной поверхности превышает момент в резьбовом соединении; эксплуатационное условие самозатягивания – наличие деформаций определенной величины. Также в статье оценено влияние энергоемкости узла на самозатягивание гайки. Исследованная гайка признана перспективной как для магистральных, так и для промышленных рельсовых путей.

ГАЙКА; РЕЛЬСОВЫЙ СТЫК; РЕЗЬБОВОЕ СОЕДИНЕНИЕ; САМОПОДКРУЧИВАНИЕ; ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ЗАТЯЖКА; ДЕФОРМАЦИЯ.

*Ссылка при цитировании:*

В.Г. Артюх, А.А. Никитченко, В.О. Мазур, И.Н. Чigareва, Н.В. Чернышева. Испытания самозатягивающихся гаек узлов крепления рельсовых стыков // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 1. С. 154–166. DOI: 10.18721/JEST.240115.

*V.G. Artiukh<sup>1</sup>, A.A. Nikitchenko<sup>2</sup>, V.O. Mazur<sup>3</sup>,  
I.N. Chigareva<sup>1</sup>, N.V. Chernysheva<sup>1</sup>*

1 – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

2 – Research and development centre for transportation technology, St. Petersburg, Russia

3 – LLC «Saint-Petersburg electrotechnical company», St. Petersburg, Russia

## **TESTS OF SELF-TIGHTENING NUTS IN RAIL JOINT FASTENING KNOTS**

Development and deployment of self-braking and self-tightening nuts providing lack of gaps in connections is an important way of increasing the reliability of rail fastening assemblies in both main and inside railway tracks. We have experimentally assessed the functional qualities of self-tightening nuts developed by Agropromimpeks-2000 LLC. The goal of the paper is to confirm experimentally that the power condition of self-tightening is the existence of preliminary tightening of the nut with a certain effort depending generally on preliminary tightness; the geometrical condition of self-tightening is in creating such a configuration of the nut that the moment on its bearing area after removal of initial tightness exceeds the moment in the threaded con-

nection; the operational condition of self-tightening is the existence of deformations of certain size. We have also evaluated the influence of power consumption of a node on nut self-tightening. The studied nut is recognized as promising for both main and industrial railways.

NUT; RAIL JOINT; THREADED CONNECTION; SELF-TIGHTENING; PRE-TIGHTENING; DEFORMATION.

*Citation:*

V.G. Artiukh, A.A. Nikitchenko, V.M. Mazur, I.N. Chigareva, N.V. Chernysheva. Tests of self-tightening nuts in rail joint fastening knots, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 24(01)(2018) 154–166, DOI: 10.18721/JEST.240115.

### Введение

Статья является второй (экспериментальной) частью комплексного полномасштабного исследования самозатягивающейся гайки узла крепления рельсовых стыков. Первая (теоретическая, расчетная) часть этого исследования была изложена в статье «Анализ работоспособности самозатягивающихся гаек узлов крепления рельсовых стыков» [1].

Разработка и внедрение самотормозящихся и самоподкручивающихся гаек, обеспечивающих отсутствие зазоров в соединениях, – важный путь увеличения надежности узлов крепления рельсовых стыков как магистральных, так и внутрицеховых железнодорожных путей. Это решение универсально и экономически более выгодно, чем установка в узел энергоемких упругих элементов [2–4].

Испытания таких гаек должны выявить условия самоподкручивания – силовые и деформационные, помочь выработать рекомендации по улучшению качества самоподкручивания, а также прочности болтов и самоподкручивающихся гаек. Самоподкручивающиеся гайки (рис. 1) для испытаний были предоставлены ООО ТД «Агропромимпекс – 2000».\* Исследования вы-

полнялись в лаборатории «Сопrotивление материалов» ФГАОУ ВО «СПбПУ».

**Целью работы** было экспериментальное изучение влияния конструктивных параметров гайки на ее функциональные свойства. Задача настоящего исследования – подтвердить следующие теоретические выводы, полученные в статье [1]:

силовым условием самозатягивания является наличие предварительной затяжки гайки с определенным усилием, зависящим в основном от предварительного натяга;

геометрическое условие самозатягивания заключается в выполнении такой конфигурации гайки, при которой после снятия начального натяга момент на ее опорной поверхности превышает момент в резьбовом соединении;

эксплуатационное условием самозатягивания – наличие деформаций определенной величины.

Кроме того, требовалось оценить влияние энергоемкости узла [5] на самозатягивание гайки.

### Материал и методика работы

Исследовался узел рельсового скрепления, состоящий из двух отрезков рельса Р65 длиной по 1,0 м каждый, и двух стандартных накладок, скрепленных четырьмя болтами М27 по общепринятой для магистральных путей схеме (рис. 2).

Для измерения усилий затяжки гаек и их контроля в процессе нагружения узла были изготовлены шесть тензометрических болтов (4 рабочих и 2 запасных). На болты (рис. 3) были наклеены тензорезисторы 2ПКБ-10-100Г с базой 10 мм и номинальным сопротивлением 100 Ом (рис. 4, а).

\* Патент 40711 А Україна, МКВ F 16 В 37/08. Гайка / Котіков Г.І., Бичін С.В., Коршунова З.З., Тер-Нерсесьянц А.Е., Бойко О.С. (Україна) // №2001063956. Заявлено 11.06.2001; Опубл. 15.08.2001. Бюл. № 7. 3 с.; Патент 2199035 РФ, МПК 7F 16B 37/12 А, 7B 21F 35/00 В, 7B 21F 3/04 В, 7B 21H 3/08 В, 7B 21D 11/06 В. Пружинная гайка и способ изготовления пружинных гаек / Котіков Г.І., Бичін С.В., Коршунова З.З., Тер-Нерсесьянц А.Е., Бойко О.С. (Україна) // №2001132104/28. Заявлено 29.11.2001; Опубл. 2003.



Рис. 1. Самозатягивающиеся гайки и головки ключей к ним  
Fig. 1. The self-joint nuts and heads of nut keys to them

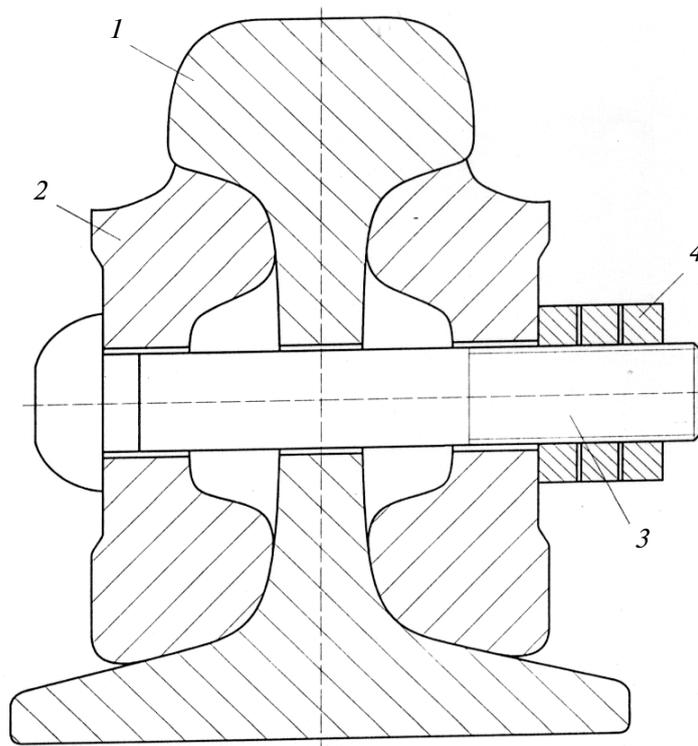


Рис. 2. Поперечное сечение узла рельсового крепления:  
1 – рельс; 2 – накладка; 3 – болт М27; 4 – исследуемая гайка  
Fig. 2. Cross section of assembly of a rail fastening:  
1 – rail; 2 – plate; 3 – fish bolt M27; 4 – test nut



Рис. 3. Тензометрические болты  
Fig. 3. Strain gauge fish bolts

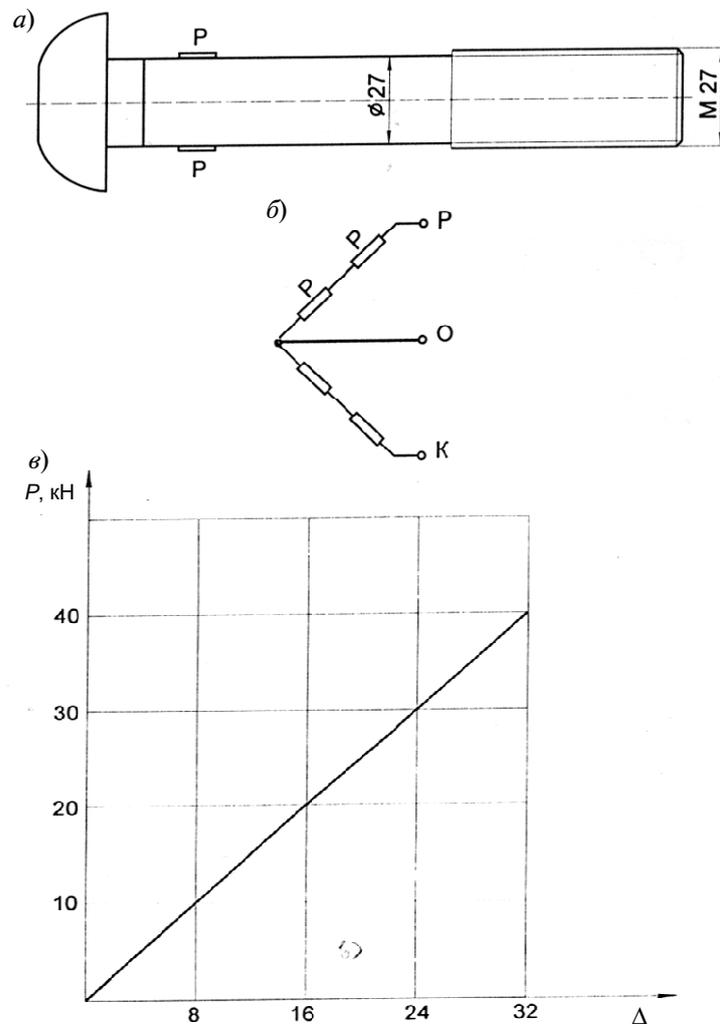


Рис. 4. Тарировка тензометрического болта:  
а) болт с датчиками; б) полумост; в) тарировочный график  
Fig. 4. Taring of strain gauge fish bolts: a) strain gauge fish bolt with tensometric sensors;  
б) half-bridge circuit; в) calibration diagram

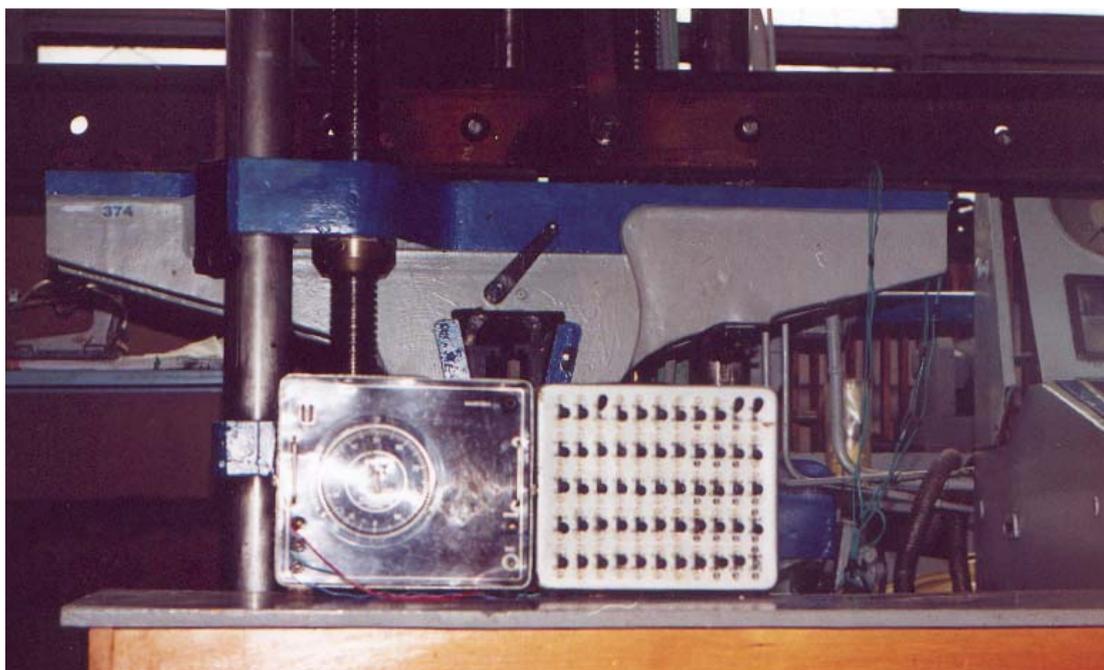


Рис. 5. Измерительная аппаратура (АИД с коммутатором)  
 Fig. 5. Measuring equipment (Automatic Measuring Instrument with commutator)

Места под наклейку тензорезисторов защищались от окалины и ржавчины, обезжиривались ацетоном, под спайки выводов наклеивалась тонкая бумага. На датчик наносился тонкий слой клея БФ-2 и — после кратковременной просушки — основной слой клея. После этого датчик резиновым валиком прикатывался к металлу болта. После 12-ти часов выдержки болты помещались в сушильный шкаф и находились там 6 часов при температуре 100–120 °С. По описанной технологии на каждый болт наклеивались два датчика с противоположных сторон диаметра (по противоизгибной схеме). При этом два датчика соединялись последовательно в одно плечо полумоста (рис. 4, б). Два компенсационных датчика соединялись последовательно и наклеивались на отдельную пластинку. После сушки датчиков собиралась схема полумоста. Вторая половина полумоста находилась в приборе АИД (автоматический измеритель деформаций). Для переключения тензорезисторов использовался прилагаемый к прибору АИД коммутатор (рис. 5).

Тарировка тензометрических болтов производилась на универсальной механической машине УММ-5 (максимальная сила 50 кН) с использованием специально сконструированных захватов [6].

Тарировочный график представлен на рис. 4, в, где по оси абсцисс отложено число делений прибора, а по оси ординат — соответствующая нагрузка. По этому тарировочному графику контролировали усилие в болтах (и, соответственно, на гайках).

**Экспериментальное исследование.** Узел рельсового скрепления был собран на тензометрических болтах и самозатягивающихся гайках. При этом контролировалась по прибору АИД сила затяжки болтов.

Использовались три уровня предварительной затяжки — 10, 15 и 20 делений, что соответствовало усилию в болтах (и силе затяжки гаек) в 12,0; 18,0 и 24 кН (отметим, что полная осадка стандартной упругой шайбы Гровера соответствует силе 12,0–15,0 кН). Другими словами, применялись реальные силы затяжки.

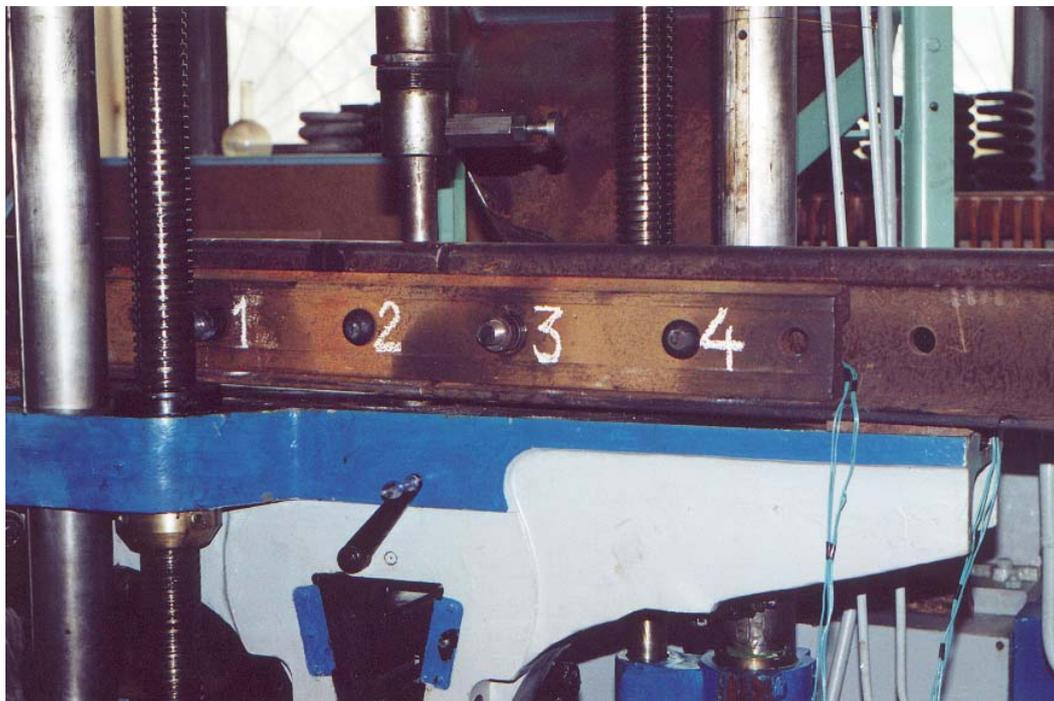


Рис. 6. Узел рельсового скрепления в испытательной машине ГРМ-1  
Fig. 6. Assembly of a rail fastening в testing machine ГРМ-1)

После этого узел нагружался сосредоточенной силой, место приложения которой изменялось. Величина сосредоточенной силы задавалась в двух вариантах – 100 и 150 кН, что соответствует нагрузке на ось 200 и 300 кН, т. е. нормальной и повышенной в 1,5 раза нагрузке.

В таблице приведены результаты этого опыта для девяти положений сосредоточенной силы и затяжки болтов на 15 делений (18 кН). Главный вывод из этого опыта заключается в том, что усилия в болтах (и на гайках, соответственно) мало изменялись при приложении внешней нагрузки. Максимальное приращение показаний датчиков составило 2–3 деления (2,4–3,6 кН). Впоследствии были проведены опыты со статическими нагрузками в 250 кН (500 кН на одну ось). Этот вариант соответствует самому тяжелому нагружению на промышленном транспорте [7]. Нагрузки на болты возросли на 4–5 кН, что не представляет никакой опасности для них ни по проч-

ности, ни по возможности появления зазоров.

Для испытания на циклическую нагрузку собранный узел рельсового скрепления устанавливался на траверсу испытательной машины ГРМ-1, которая имеет пульсатор гидравлического типа и может обеспечить частоту нагружений от 200 до 600 циклов в минуту (рис. 6). Амплитуда нагрузок может достигать до 250 кН.

Узел устанавливался на стандартных прокладках и подкладках, которые при повышенных сверх нормы нагрузках заменялись более прочными ребристыми подкладками (рис. 7) из литевых конструкционных полиуретанов [8, 9]. Расстояние между опорами узла соответствовало принятым нормам. Стык узла находился между двумя соседними опорами. Всего было установлено четыре опоры. Нагрузки на рельсовый стык соответствовали нагрузкам статического испытания, т. е. они составляли 100; 150 и 250 кН, что полностью охватывало возможный спектр эксплуатационных нагрузок.



Рис. 7. Упругие прокладки и подкладки  
Fig. 7. Elastic plates and liners

Ожидаемое самоподкручивание могло фиксироваться как по нанесенным на гайки и рельсовые накладки меткам, так и по усилию в соответствующих болтах. Для каждого уровня нагружения пульсирующим циклом (три уровня) проводили испытания на выносливость; всего было поставлено три серии опытов.

Каждая серия представляла собой три подпрограммы нагружений:

- I – нагружение  $N = 10^3$  циклами;
- II – нагружение  $N = 10^4$  циклами;
- III – нагружение  $N = 10^5$  циклами.

Основная скорость нагружения – 200 циклов в минуту. При длительных испытаниях – 600 циклов в минуту. Во всех опытах откручивания гаек не наблюдалось, самоподкручивания тоже.

Предполагаем, что самоподкручивания не происходило из-за отсутствия взаимных линейных и угловых смещений гаек относительно контактирующих с ними рельсовых накладок. Узел при всех нагружениях вел себя как жесткий. Увеличение нагрузок во всех болтах не превышало 10–30 % по сравнению с их предварительной затяжкой. Во всех этих опытах предварительная затяжка болтов составляла 18 кН, гайки имели натяг 0,4 мм на сторону.

#### Влияние силы предварительной затяжки

Для инициирования процесса самозатягивания было опробовано несколько вариантов сборки узла, отличающихся силой предварительной затяжки. Поскольку теоретически была получена [1] требуемая сила затяжки (обеспечивающая эффект самозатягивания) 24 кН, то в опыте необходимо было включить эту силу в диапазон испытываемых усилий [10, 11].

Всего исследовалось 4 варианта предварительного нагружения: 12; 18; 24 и 30 кН (один из них – ранее). Для трех дополнительных сил затяжки был реализован полный комплекс циклического нагружения, т. е. нагружения числом циклов  $10^3$ ,  $10^4$ ,  $10^5$  с осмотром положения гаек до и после нагружения и контролем силы затяжки болтов в процессе нагружения.

Все собранные с указанным предварительным нагружением узлы были жесткими, работали как единое целое. Взаимные смещения деталей были очень малыми. Самозатягивания гаек не наблюдалось, что подтверждало предварительное предположение о необходимости для этого взаимных смещений деталей узла.

Результаты статических испытаний узла  
Results of static test of assembly

Схема приложения сосредоточенной силы $P$	Величина силы $P$ , тС	Показания датчиков							
		1	$\Delta_1$	2	$\Delta_2$	3	$\Delta_3$	4	$\Delta_4$
	0	475	+2	489	+3	437	+2	463	+2
	10	477	0	492	-1	439	0	465	-1
	15	477	-	491	-	439	-	464	-
	0	471	+2	487	+1	435	+1	458	+1
	10	473	+2	488	+1	436	+1	459	+0,5
	15	475	-	489	-	437	-	459,5	-
	0	471	+1	485	+1,5	434,5	+0,5	459,5	+1
	10	472	+1	486,5	+1,5	435	0	460,5	-0,5
	15	473	-	488	-	435	-	460	-
	0	471	+1	485	+1	433	+1	458	0
	10	472	0,5	486	+0,5	434	0	458	0
	15	472,5	-	486,5	-	434	-	458	-
	0	470	+1	485	+1	433	+1,5	459	+2
	10	471	+0,5	486	+1	434,5	+0,5	461	0
	15	471,5	-	487	-	435	-	461	-
	0	471	0	485	+1	433	+1	459,5	+1,5
	10	471	0	486	0	434	+1	462	+0,5
	15	471	-	486	-	435	-	462,5	-
	0	471	0	486	0	433,5	0,5	459	+3
	10	471	-0,5	486	0	434	0	462	+1
	15	470,5	-	486	-	434	-	463	-
	0	470	0	485,5	-0,5	433,5	0	459,5	-1
	10	470	0	485	+0,5	433,5	+0,5	458,5	-0,5
	15	470	-	485,5	-	434	-	458	-
	0	471	0	487	0	434	+1	460,5	-0,5
	10	471	0	487	+0,5	435	0	460	0
	15	471	-	487,5	-	435	-	460	-

### Влияние энергоемкости узла

Для увеличения упругих деформаций узла и, как следствие этого, величины взаимных смещений его деталей решено было установить на узел энергоемкие упругие элементы. В качестве таковых были выбраны тарельчатые пружины [12, 13]:  $D = 50$  мм;  $d = 30$  мм;  $\delta = 3$  мм с максимальной силой 15 кН и максимальной осадкой 1,0 мм. Пружины, соединенные параллельно (по 1, 2 и 3 штуки), устанавливались под головки тензометрических болтов, для чего их пришлось несколько модернизировать (рис. 8). Максимальные силы на пакетах пружин – 15; 30 и 45 кН. Фактическая затяжка составляла 12; 18; 24 и 30 кН. Упругая деформация пружин (неиспользованная) составляла от 0,5 до 1,0 мм.

При внешнем нагружении узла эта деформация выбиралась, и детали узла получали взаимные смещения. Нагружение проводилось, как и все предыдущие нагружения, циклической нагрузкой (по пульсирующему циклу) с частотой 200 и 600 мин<sup>-1</sup>. Максимальные значения нагрузок составляли 100; 150 и 250 кН. При этом фиксировались положения гаек и силы в болтах.

Колебания сил в болтах были больше (4–7 делений, или 5–8 кН), чем для жесткого (без пружин) узла, где эти колебания составляли 2–3 деления, или 2,5–4 кН. Взаимные смещения деталей также возросли, однако их оказалось недостаточно для самозатягивания. Ни на одном болте самозатягивания не наблюдалось.

### Проверка условия самозатягивания гаек

Для проверки принципиальной возможности самозатягивания гаек был поставлен эксперимент, при котором под гайку была установлена шайба, жестко связанная с рычагом. Этот рычаг можно поворачивать вручную, создавая его перемещение относительно гайки (рис. 9). При этом подкручивание гайки фиксируется прибором АИД, а также по нанесенным меткам.

Для всех испытаний гаек самоподтягивание наблюдалось начиная с силы предварительной затяжки 15 кН (для гайки, имеющей натяг 0,2 мм на сторону) до 25 кН (для гайки с натягом 0,4 мм на сторону). При колебательных движениях рычага сила в болте нарастала примерно до 30–35 кН, после чего самоподтягивание прекращалось (гайка поворачивалась вместе с рычагом в обе стороны).



Рис. 8. Болты с энергоемкими упругими элементами (тарельчатые пружины)  
 Fig. 8. Fish bolts with energy absorber elements (disk springs)

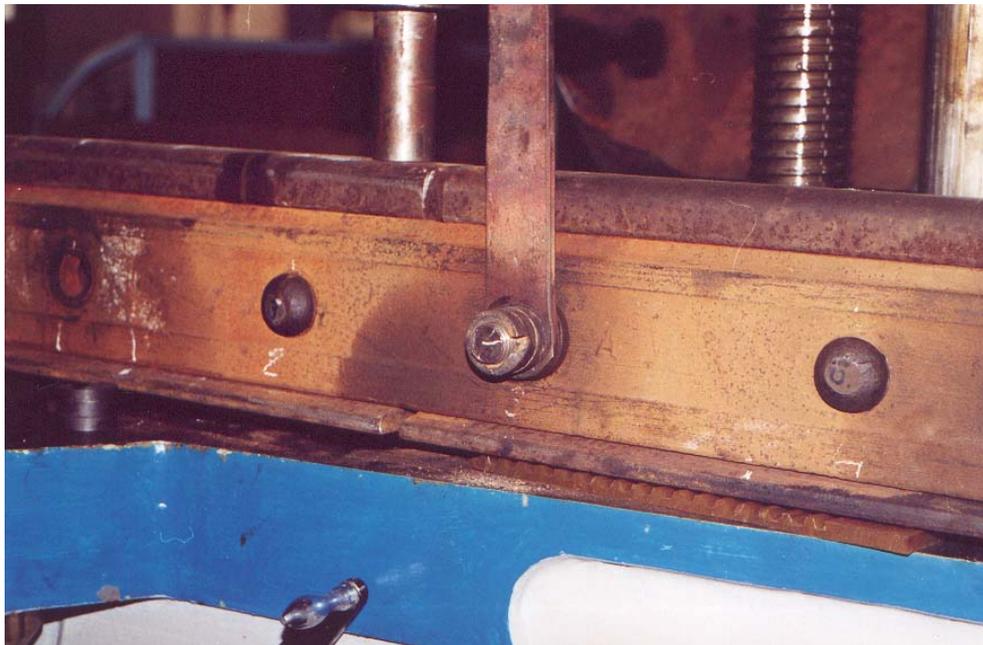


Рис. 9. Узел с подвижным рычагом под гайкой  
Fig. 9. Assembly with moved lever under nut

Для самоподтягивания необходимо, чтобы взаимное смещение гайки и контактирующей с ней шайбы (или накладки) составляло 0,5–1,2 мм, причем чем меньше натяг гайки, тем меньше требуемое взаимное смещение.

После этих испытаний была предпринята попытка воспроизвести такие условия испытаний, при которых реализуется самозатягивание гайки. Один из вариантов – попытка нагрузить рельсовый стык горизонтальной составляющей силой. В испытаниях рельсовый стык лежал на боку, нагрузка была перпендикулярной стенке рельса (т.е. она была направлена вдоль оси болта). Узел нагружался силами 100, 150 и 250 кН. При нагрузке в 250 кН одна из гаек (предварительно затянутая на 25 кН) начала самозатягиваться. Этот процесс прекратился при нагрузке 35 кН. Гайка имела натяг по 0,4 мм на сторону. Затем эту гайку поменяли на другую, у которой натяг был по 0,2 мм на сторону. Эта гайка стала подкручиваться при затяжке 18 кН и дошла до положения с силой 31 кН. Таким образом, процесс самозатягивания произошел при повышенных деформациях стыка.

В следующем опыте под головки болтов были поставлены тарельчатые пружины, и все болты, кроме одного, были прослаблены. При нагружении такого стыка силами 100; 150 и 250 кН усилия в болтах возрастали на 100–200 %, деформации отдельных частей были заметны невооруженным глазом. Гайка с нормальной затяжкой в 15 кН начала подтягиваться и остановилась при силе 30 кН.

Проведенные опыты показали, что для реализации самозатягивания необходимы взаимные деформации гайки и накладки. Величина их должна быть больше 0,6 мм.

### Обсуждение результатов

Рассмотренная в данной статье самозатягивающаяся гайка была изобретена в 2001 году [5, 6]. По результатам теоретических исследований эту гайку следует признать перспективной как для магистральных, так и для промышленных (внутрицеховых) железнодорожных путей [1, 14–16]. Экспериментальные исследования такой гайки до сих пор не проводились.

### Выводы

Поставленная цель экспериментального исследования самозатягивающейся гайки достигнута – теоретические расчетные зависимости, полученные в первой части исследования и опубликованные в статье «Анализ работоспособности самозатягивающихся гаек узлов крепления рельсовых стыков» [1], полностью подтверждены.

Подтверждено, что силовым условием самозатягивания является наличие предварительной затяжки гайки с определенным усилием, зависящим в основном от предварительного натяга.

Подтверждено, что геометрическое условие самозатягивания заключается в выполнении такой конфигурации гайки, при которой после снятия начального натяга момент на ее опорной поверхности превышает момент в резьбовом соединении. Это условие для всех испытываемых гаек было выполнено.

Подтверждено, что эксплуатационное условие самозатягивания сводится к наличию деформаций определенной величины. Смещения гайки относительно прижимной планки должны составлять: а) линейные смещения  $\Delta l = 1,0\text{--}1,2$  мм; угловые смещения  $\Delta\varphi = 0,020\text{--}0,024$  рад. для

натяга 0,4 мм на сторону; б) линейное смещение  $\Delta l = 0,6\text{--}0,7$  мм, угловое смещение  $\Delta\varphi = 0,012\text{--}0,014$  рад. для натяга 0,2 мм на сторону. Такие смещения достижимы в лабораторных условиях при существенных перегрузках и горизонтальном направлении сил, действующих на головки рельса, либо в случае узла, имеющего изначальные зазоры и несовершенства.

Можно предположить, что эксплуатационные условия самозатягивания возникают в основном в тех скреплениях, которые находятся на поворотах пути или стрелочных переводах (т.е. в местах повышенных горизонтальных нагрузок) либо в местах, где участки пути наиболее подвержены остаточным деформациям и износу.

Во всех случаях самозатягивание прекращалось при увеличении усилия. Для двух типов гаек с натягом в 0,2 и 0,4 мм на сторону самозатягивание прекращалось при усилиях 32–35 кН, что следует признать очень ценным качеством. Это усилие совершенно безопасно для узла с точки зрения его прочности.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ 16-08-00845а «Верификация и развитие моделей неупругого деформирования при пассивном нагружении».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артюх В.Г., Никитченко А.А., Подгорная Н.В., Чигарева И.Н., Чернышева Н.В. Анализ работоспособности самозатягивающихся гаек узлов крепления рельсовых стыков // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки, 2017. Т. 23. № 2. С. 223–233. DOI: 10.18721/JEST.230220.
2. Артюх В.Г., Артюх Г.В., Колосов В.Н. К вопросу модернизации рельсовых креплений // Захист металургійних машин від поломок. Маріуполь, 2002. Вип. 6. С. 104–107.
3. Popovic Z., Lazarevic L., Vatin N. Railway gauge expansion in small radius curvature // Procedia Engineering. 2015. No 117(1). P. 846–853.
4. Сергиенко Ю.В., Артюх Г.В., Чигарев В.В., Артюх В.Г. Усталостная прочность сварных рельсовых стыков // Захист металургійних машин від поломок. Маріуполь. 2000. Вип. 5. С. 190–202.
5. Loginova I.I., Artamonova D.A., Stolyarov O.N., Melnikov B.E. Effects of structure type on viscoelastic properties of geosynthetics // Magazine of Civil Engineering. 2015. No 4. P. 11–18. DOI: 10.5862/MCE.56.2.
6. Артюх В.Г., Корихин Н.В., Мельников Б.Е., Семенов А.С., Раимбердиев Т.П. Предварительное напряжение как способ уменьшения накопления повреждений при циклическом нагружении // Известия МГТУ «МАМИ», серия «Естественные науки». 2015. № 2(24). Т. 4. С. 25–33.
7. Nikitchenko A., Artiukh V., Shevchenko D., Prakash R. Evaluation of Interaction Between Flat Car and Container at Dynamic Coupling of Flat Cars // MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 73. No 04008. URL: <http://dx.doi.org/10.1051/mateccconf/20167304008>
8. Pestryakov I.I., Gumerova E.I., Kupchin A.N. Assessment of efficiency of the vibration damping



material «Teroson WT 129» // Construction of Unique Buildings and Structures. 2016. No 44. P. 46–57.

9. Ogorodov L.I., Lustina O.V. Mechanical characteristics of polyethylene // Magazine of Civil Engineering. 2017. No 6. P. 17–32. DOI: 10.18720/MCE.74.2.

10. Kitaeva D.A., Rudaev Ya.I., Ordobaev B.S., Abdykeeva Sh.S. Modeling of concrete behavior under compression // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 725–726. P. 623–628.

11. Balalayeva E., Artiukh V., Kukhar V., Tuzenko O., Glazko V., Prsyazhnyi A., Kankhva V. Researching of the Stress-Strain State of the Open-Type Press Frame Using of Elastic Compensator of Errors of «Press-Die» System // In: Murgul V., Popovic Z. (eds) International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017. EMMFT 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 692. Springer, Cham, 2018. P. 212–219. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-70987-1\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-319-70987-1_24)

12. Артюх Г.В., Артюх В.Г. Характеристики пакетов тарельчатых пружин // Захист металургійних машин від поломок. Маріуполь, 2003. Вип. 7. С. 142–148.

13. Alekseev N.N., Kovalenko I.A., Stolyarov O.N., Melnikov B.E. Viscoelastic properties of geosynthetic materials // Construction of Unique Buildings and Structures. 2017. No 5 (56). P. 17–32.

14. Kukhar V., Artiukh V., Serduik O., Balalayeva E. Form of Gradient Curve of Temperature Distribution of Lengthwise the Billet at Differentiated Heating Before Profiling by Buckling // Procedia Engineering. 2016. No 165. P. 1693–1704. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.911.

15. Nikitchenko A., Artiukh V., Shevchenko D., Murgul V. Modeling of Operation of Elastic-Frictional Draft Gear by NX Motion Software // Procedia Engineering. 2017. No 187. P. 790–796. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.441>

16. Kosenko S.A., Akimov S.S. Performance characteristics of differentially quenched rails // Magazine of Civil Engineering. 2017. No 7(75). P. 94–105.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**АРТЮХ Виктор Геннадиевич** – доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого  
E-mail: [artiukh@mail.ru](mailto:artiukh@mail.ru)

**НИКИТЧЕНКО Андрей Андреевич** – инженер Научно-исследовательского центра транспортных технологий  
E-mail: [anikita@i.ua](mailto:anikita@i.ua)

**МАЗУР Владлен Олегович** – главный специалист ООО «Научно-производственное объединение “Санкт-Петербургская электротехническая компания”»  
E-mail: [mazur@spbec.com](mailto:mazur@spbec.com)

**ЧИГАРЕВА Ирина Николаевна** – старший преподаватель Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого  
E-mail: [ya.irina231182@yandex.ru](mailto:ya.irina231182@yandex.ru)

**ЧЕРНЫШЕВА Наталия Вячеславовна** – кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого  
E-mail: [chernat0000@mail.ru](mailto:chernat0000@mail.ru)

Дата поступления статьи в редакцию: 12.02.2018

#### REFERENCES

[1] Artiukh V.G., Nikitchenko A.A., Podgornaya N.V., Chigareva I.N., Chernysheva N.V. Analysis of the working efficiency of self-leaking gauk nodes of fastening the rail jobs, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 23(02)(2017) 223–233, DOI: 10.18721/JEST.230220. (rus.)

[2] Artiukh V.G., Artiukh G.V., Kolosov V.N. K voprosu modernizatsii rel'sovykh krepnenii. *Zakhist metalurgiiinikh mashin vid polomok*. Mariupol', 2002. Vip. 6. S. 104–107. (ukr.)

[3] Popovic Z., Lazarevic L., Vatin N. Railway gauge expansion in small radius curvature. *Procedia Engineering*. 2015. No 117(1). P. 846–853.

[4] Sergienko Iu.V., Artiukh G.V., Chigarev V.V., Artiukh V.G. Ustalostnaia prochnost' svarykh rel'sovykh stykov. *Zakhist metalurgiiinikh mashin vid polomok*. Mariupol'. 2000. Vip. 5. S. 190–202. (ukr.)

[5] Loginova I.I., Artamonova D.A., Stolyarov O.N., Melnikov B.E. Effects of structure type on viscoelastic properties of geosynthetics. *Magazine of Civil*

*Engineering*. 2015. No 4. P. 11–18. DOI: 10.5862/MCE.56.2.

[6] **Artiukh V.G., Korikhin N.V., Mel'nikov B.E., Semenov A.S., Raimberdiev T.P.** Predvaritel'noe napriazhenie kak sposob umen'sheniia nakopleniia povrezhdenii pri tsiklicheskom nagruzhenii. *Izvestiia MGTU «MAMI», seriia «Estestvennye nauki»*. 2015. № 2(24). T. 4. S. 25–33. (rus.)

[7] **Nikitchenko A., Artiukh V., Shevchenko D., Prakash R.** Evaluation of Interaction Between Flat Car and Container at Dynamic Coupling of Flat Cars. *MATEC Web of Conferences*. 2016. Vol. 73. No 04008. URL: <http://dx.doi.org/10.1051/mateconf/20167304008>

[8] **Pestryakov I.I., Gumerova E.I., Kupchin A.N.** Assessment of efficiency of the vibration damping material «Teroson WT 129». *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2016. No 44. P. 46–57.

[9] **Ogorodov L.I., Lustina O.V.** Mechanical characteristics of polyethylene. *Magazine of Civil Engineering*. 2017. No 6. P. 17–32. DOI: 10.18720/MCE.74.2.

[10] **Kitaeva D.A., Rudaev Ya.I., Ordobaev B.S., Abdykeeva Sh.S.** Modeling of concrete behavior under compression. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 725–726. P. 623–628.

[11] **Balalayeva E., Artiukh V., Kukhar V., Tuzenko O., Glazko V., Prysiaznyi A., Kankhva V.** Researching of the Stress-Strain State of the Open-Type Press Frame Using of Elastic Compensator of

Errors of «Press-Die» System. In: *Murgul V., Popovic Z. (eds) International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT 2017. EMMFT 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 692. Springer, Cham, 2018. P. 212–219. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-70987-1\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-319-70987-1_24)

[12] **Artiukh G.V., Artiukh V.G.** Kharakteristiki paketov tarel'chatykh pruzhin. *Zakhist metalurgii i mashin vid polomok*. Mariupol', 2003. Vip. 7. S. 142–148. (rus.)

[13] **Alekseev N.N., Kovalenko I.A., Stolyarov O.N., Melnikov B.E.** Viscoelastic properties of geosynthetic materials. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2017. No 5 (56). P. 17–32.

[14] **Kukhar V., Artiukh V., Serduik O., Balalayeva E.** Form of Gradient Curve of Temperature Distribution of Lengthwise the Billet at Differentiated Heating Before Profiling by Buckling. *Procedia Engineering*. 2016. No 165. P. 1693–1704. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.911.

[15] **Nikitchenko A., Artiukh V., Shevchenko D., Murgul V.** Modeling of Operation of Elastic-Frictional Draft Gear by NX Motion Software. *Procedia Engineering*. 2017. No 187. P. 790–796. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.441>

[16] **Kosenko S.A., Akimov S.S.** Performance characteristics of differentially quenched rails. *Magazine of Civil Engineering*. 2017. No 7(75). P. 94–105.

#### AUTHORS

**ARTIUKH Viktor G.** – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: [artiukh@mail.ru](mailto:artiukh@mail.ru)

**NIKITCHENKO Andrei A.** – *Research and development centre for transportation technology*

E-mail: [anikita@i.ua](mailto:anikita@i.ua)

**MAZUR Vladlen O.** – *LLC «Saint-Petersburg electrotechnical company»*

E-mail: [mazur@spbec.com](mailto:mazur@spbec.com)

**CHIGAREVA Irina N.** – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: [ya.irina231182@yandex.ru](mailto:ya.irina231182@yandex.ru)

**CHERNYSHEVA Nataliia V.** – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: [chernat0000@mail.ru](mailto:chernat0000@mail.ru)

Received: 12.02.2018

Научное издание

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбПУ  
ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ИНЖЕНЕРНЫЕ НАУКИ**

**Том 24, № 1, 2018**

Учредитель – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства  
в сфере массовых коммуникаций и охраны культурного наследия  
(свидетельство о регистрации СМИ от 06.04.2017 ПИ № ФС77-69285)

Научный редактор, корректор – канд. техн. наук *Л.В. Спиридонова*

Технический секретарь – *О.А. Матенев*

Компьютерная верстка *Е.А. Корнуковой*

Телефон редакции (812) 294-22-86

E-mail: [ntv-nauka@spbstu.ru](mailto:ntv-nauka@spbstu.ru)

---

Подписано в печать 30.03.2018. Формат 60×84 1/8. Бум. тип. № 1.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 21,0. Тираж 1000. Заказ 16579b

---

Отпечатано с оригинал-макета,  
в Издательско-полиграфическом центре Политехнического университета.  
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.  
Тел.: (812) 552-77-17; 550-40-14.

## **УСЛОВИЯ ПУБЛИКАЦИИ СТАТЕЙ в журнале «Научно-технические ведомости СПбГПУ»**

### **1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

Журнал «Научно-технические ведомости СПбГПУ» является периодическим печатным научным рецензируемым изданием:  
— зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия (свидетельство о регистрации СМИ от 06.04.2017 ПИ № ФС77-69285) и распространяется по подписке через объединенный каталог «Пресса России» (индекс 18390);

— имеет международный стандартный номер сериального периодического издания (ISSN 2542-1239);

— внесен Высшей аттестационной комиссией Минобрнауки РФ в Перечень периодических научных и научно-технических изданий, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук, ученой степени кандидата наук;

— с 2009 г. входит в национальную информационно-аналитическую систему «Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)»;

— сведения о публикациях представлены в Реферативном журнале ВИНТИ РАН и включены в фонд научно-технической литературы (НТЛ) ВИНТИ РАН, а также в международную систему по периодическим изданиям «Ulrich's Periodicals Directory».

Журнал публикует результаты работ в следующих областях науки и техники: энергетика, электротехника, материаловедение, металлургия, машиностроение.

Редакция журнала соблюдает права интеллектуальной собственности и со всеми авторами научных статей заключает издательский лицензионный договор.

Публикация материалов, в том числе соискателей ученых степеней, осуществляется бесплатно.

### **2. ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕДСТАВЛЯЕМЫМ МАТЕРИАЛАМ**

#### **2.1. Представление материалов**

В статье должны быть кратко изложены новые и оригинальные результаты исследований, полученные авторами; следует избегать повторов, излишних подробностей и известных положений, подробных выводов, формул и уравнений (приводить лишь окончательные формулы, пояснив, как они получены).

При написании оригинальной научной статьи и оформлении рукописи авторы должны придерживаться следующих правил. Статья должна представлять собой описание выполненных исследований с указанием их места в соответствующей области наук и обсуждением значения выполненной работы. Рукопись должна содержать достаточное количество информации и ссылок на общедоступные источники для того, чтобы работа могла быть повторена независимо от авторов.

Название статьи должно быть кратким, но информативным. Обращаем Ваше внимание на то, что журнал издается как на русском, так и на английском языке. В связи с этим, не следует использовать аббревиатуру в названии статьи.

Аннотация должна давать читателю сжатую информацию о содержании статьи. Аннотация должна быть информативной и отражать не только основные цели статьи, но и главные результаты и выводы работы. Аннотация не является частью текста и сама по себе должна являться законченным описанием.

Ключевые слова должны отражать основную проблематику статьи и должны приводиться на русском языке для русской и на английском для англоязычной версии статьи. Количество ключевых слов – не менее трех и не более семи.

Адрес для корреспонденции должен содержать фамилию автора для корреспонденции (не обязательно первого автора), его полный почтовый адрес, телефон, факс, e-mail.

При необходимости Редакция может потребовать представления Акта экспертизы.

Представление всех материалов осуществляется в электронном виде через личный кабинет ЭЛЕКТРОННОЙ РЕДАКЦИИ по адресу: <http://journals.spbstu.ru>

Статьи подаются в формате .docx (MS Word 2007–2010). Файл статьи, подаваемый через электронную редакцию, должен содержать только сам текст, без названия, списка литературы, фамилий и данных авторов. Список литературы, название статьи, вся информация об авторах задаются при подаче через электронную редакцию в отдельных полях. В тексте статьи должны быть ссылки на все источники из списка литературы. Порядковый номер источника в тексте статьи указывается в квадратных скобках.

#### **2.2. Оформление материалов**

2.2.1. Объем статей, как правило, 15–20 страниц формата А-4. Количество рисунков и фотографий (в том числе цветных) не должно превышать 4, таблиц – 3.

2.2.2. Число авторов — не более трех от одной организации и не более пяти от разных организаций. Статья должна быть подписана всеми авторами. Авторами являются лица, принимавшие участие во всей работе или ее главных разделах. Лица, участвовавшие в работе частично, указываются в сносках.

2.2.3. Статья должна содержать следующие разделы:

номер УДК в соответствии с классификатором;

фамилии авторов на русском и английском языках;

название на русском и английском языках;

аннотация — 3–5 предложений на русском и английском языках;

ключевые слова – не менее 2 и не более 7 на русском и английском языках;

введение (актуальность, краткое обоснование существующей проблемы) — 1,0–1,5 стр.;

цель работы (краткая четкая формулировка поставленной задачи);

методика проведения исследований и расчетов, включая краткую информацию об использованных приборах, методах и точности экспериментальных измерений и теоретических расчетов и т. д.;