

2(243)/2016



# Научно-технические ведомости СПбГУ

St. Petersburg Polytechnic University Journal  
of Engineering Sciences And Technology

Санкт-Петербург. Издательство Политехнического университета

Министерство образования и науки РФ

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

# НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбПУ

## ST. PETERSBURG POLYTECHNIC UNIVERSITY

### JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES AND TECHNOLOGY

#### РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

Васильев Ю.С., научный руководитель, академик РАН;

Алфёров Ж.И., академик РАН

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

Костюк В.В., академик РАН

Лагерьков А.Н., академик РАН

Окрепилов В.В., академик РАН

Патон Б.Е., академик НАН Украины и РАН

Рудской А.И., чл.-корр. РАН

Тендлер М.Б., ин. член РАН (Швеция)

Федоров М.П., академик РАН

#### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

Васильев Ю.С., главный редактор, Президент СПбПУ, академик РАН

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

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

Башикарёв А.Я., д-р техн. наук, профессор СПбПУ

Боронин В.Н., 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

Дегтярева Р.В., д-р ист. наук, профессор СПбПУ

Иванов А.В., д-р техн. наук; СПбПУ

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

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

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

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

Журнал с 2001 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 базе Russian Science Citation Index на платформе Web of Science, международной библиографической и реферативной базе данных ProQuest, в международной наукометрической базе Index Copernicus, в международной системе по периодическим изданиям "Ulrich's Periodicals Directory".

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия (свидетельство ПИ № ФС77-25981 от 13 октября 2006 г.)

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

The journal is published under the scientific and methodical guidance of the Russian Academy of Sciences since 1995.

The journal has been included in the List of leading peer-reviewed scientific journals and other editions to publish major findings of theses for the research degrees of Doctor of Sciences and Candidate of Sciences since 2001.

The publications are presented in the VINITI RAS Abstract Journal, Russian Science Citation Index on the platform Web of Science, ProQuest, Index Copernicus, Ulrich's Periodicals Directory and Russian Science Citation Index databases.

The journal is registered with the Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Communications (ROSKOMNADZOR). Certificate ПИ № ФС77-25981 issued October 13, 2006.

The journal is distributed through the CIS countries catalogue, the «Press of Russia» joint catalogue and the «Press by subscription» Internet catalogue. The subscription index is **18390**.

#### 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. — corresponding 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, President 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

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

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

Gumenyuk V.I. — Dr.Sc. (tech.), prof. SPbPU

Degtyareva R.V. — Dr.Sc. (history), prof. SPbPU

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

Kirillov A.I. — Dr.Sc. (tech.), prof. SPbPU

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

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

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, 2016

The journal has been included in the Russian Science Citation Index (RSCI) database since 2005 © Scientific Electronic Library (<http://elibrary.ru/>).

No part of this publication may be reproduced without clear reference to the source.

The views of the authors may not represent the views of the Editorial Board.

Address: 29 Politekhnikeskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

© Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2016

## Содержание

### Энергетика

<b>Барилевич В.А., Смирнов Ю.А.</b> Пароструйный инжектор: расчет и применение в отопительных системах .....	7
<b>Гришин Н.В.</b> Уравнения режимных задач шестифазных турбогенераторов предельной мощности ..	16
<b>Аникина И.Д., Сергеев В.В., Амосов Н.Т., Лучко М.Г.</b> Тепловые насосы в схемах деаэрации подпиточной воды ТЭЦ .....	24
<b>Козин Е.Г., Кожухов Ю.В.</b> Технологический аудит пневмосистемы как этап в процессе ее реконструкции .....	34
<b>Григорьева О.А., Кривенко Т.В., Тремясов В.А.</b> Анализ надежности автономного ветродизельного комплекса .....	45

### Электротехника

<b>Мурашов Ю.В.</b> Моделирование вихревой стабилизации дугового плазмотрона .....	53
<b>Гришин Н.В.</b> Схемы замещения для решения режимных задач шестифазных турбогенераторов предельной мощности .....	62
<b>Забоин В.Н., Чесноков Г.А.</b> Оценка точности аналитических методов расчета составляющих потерь холостого хода в асинхронных двигателях .....	72
<b>Плотников А.П., Емельянов О.А.</b> Экспериментальное исследование и анализ процессов заряда–разряда нелинейных керамических конденсаторов .....	80
<b>Соколова О. Н.</b> Сравнение эффективности методов управления в энергосистемах России и Европы при геомагнитных бурях .....	88

### Металлургия и материаловедение

<b>Анастасиади Г.П., Кондратьев С.Ю., Сильников М.В.</b> Роль термокинетических диаграмм распада переохлажденного аустенита при разработке конструкционных сталей .....	99
<b>Галевский Г.В., Аникин А.Е., Руднева В.В., Галевский С.Г.</b> Применение буроугольных полукоксов в металлургии: технологическая и экономическая оценка .....	114
<b>Цеменко В.Н., Фук Д.В., Ганин С.В.</b> Определение реологических характеристик и моделирование процесса экструзии порошковых и пористых материалов. Часть 1. Порошковое тело .....	124
<b>Цеменко В.Н., Фук Д.В., Ганин С.В.</b> Определение реологических характеристик и моделирование процесса экструзии порошковых и пористых материалов. Часть 2. Пористое тело .....	134

<b>Петрович С.Ю., Андреева В.Д., Липин В.А., Каракчиев С.В., Боричева И.К.</b> <i>Количественные и качественные показатели быстроохлажденных сплавов системы Al-Zn-Mg-Si при ее модифицировании цирконием</i> .....	144
---	-----

### Машиностроение

<b>Мамутов В.С., Мамутов А.В., Курятников А.А.</b> <i>Компьютерное моделирование электрогидроимпульсной тонколистовой формовки с учетом разрыва воды</i> .....	153
<b>Нгуен А.К., Лапшин К.Л.</b> <i>Характеристики и структура потока турбинной ступени с отрицательным градиентом степени реактивности</i> .....	163
<b>Латухина А.И., Локтионова Е.А., Полупанова Ю.Р.</b> <i>Гидродинамическое сопротивление сеток в напорных водоводах</i> .....	174

### Научные школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

<b>Иванов А.В.</b> <i>Научное книгоиздание Политехнического университета</i> .....	181
<b>Фролов В. Я., Иванов И. И.</b> <i>Первый русский профессор электротехники (к 150-летию со дня рождения Михаила Андреевича Шателена)</i> .....	201
<b>Морачевский А. Г.</b> <i>Академик Николай Николаевич Семенов (К 120-летию со дня рождения)</i> .....	208
<b>Шаплыгин Н.П.</b> <i>Академик Борис Григорьевич Галеркин (К 145-летию со дня рождения)</i> .....	214



## Contents

<b>Barilovich V.A., Smirnov Yu. A.</b> <i>Steam-ejecting injector: calculation and application in heating systems ....</i>	7
<b>Grishin N.V.</b> <i>Equations for operation conditions problems of six phase turbine generators of maximum capacity .....</i>	16
<b>Anikina I.D., Sergeev V.S., Amosov N.T., Luchko G.</b> <i>Heat pumps in schemes of make-up water deaeration in a thermal power plant .....</i>	24
<b>Kozin Ye.G., Kozhukhov Y.V.</b> <i>Technological audit of a pneumatic system as a stage in its reconstruction process .....</i>	34
<b>Grigorieva O.A., Krivenko T.V., Tremyasov V.A.</b> <i>Reliability analysis of an autonomous wind-diesel complex .....</i>	45

### Electrical engineering

<b>Murashov I.V.</b> <i>Simulating the vortex stabilization of an arc plasma torch .....</i>	53
<b>Grishin N.V.</b> <i>Equivalent circuits for operation conditions problems of six phase turbine generators of maximum capacity .....</i>	62
<b>Zaboin V. N., Chesnokov G.A.</b> <i>Assessing the accuracy of analytical methods for calculating the no-load loss components in induction motors .....</i>	72
<b>Plotnikov A.P., Emelyanov O.A.</b> <i>Nonlinear ceramic capacitors in charging–discharging modes: experimental study and analytical calculations .....</i>	80
<b>Sokolova O.N.</b> <i>Comparing the effectiveness of security control methods during geomagnetic disturbances in powers systems of Russia and in Europe .....</i>	88

### Metallurgy and Materials technology

<b>Anastasiadi G.P., Kondratyev S.Yu., Sil'nikov M.V.</b> <i>The role of thermo-kinetic diagrams of the decomposition of overcooled austenite for the design of structural steels .....</i>	99
<b>Galevsky G.V., Anikin A.E., Rudneva V.V., Galevsky S.G.</b> <i>Using brown-coal semi-coke in metallurgy: technological and economic assessment .....</i>	114
<b>Tsemenko V.N., Fuk D.V., Ganin S.V.</b> <i>Determining the rheological characteristics and modeling the extrusion of powder and porous materials. Part 1. Powder body .....</i>	124
<b>Tsemenko V.N., Fuk D.V., Ganin S.V.</b> <i>Determining the rheological characteristics and modeling the extrusion of powder and porous materials. Part 2. Porous body .....</i>	134

<b>Petrovich S.P., Andreeva V.D., Lipin V. A., Karakchiev S.V, Boricheva I.K.</b> <i>Qualitative and quantitative indicators of rapidly solidified alloys of the Al-Zn-Mg-Cu system modified by zirconium</i> .....	144
---	-----

### **Mechanical engineering**

<b>Mamutov V.S., Mamutov A.V., Kuriatnikov A. A.</b> <i>Computer simulation of an electrohydraulic sheet metal pressing in view of the cavitation treshold</i> .....	153
--	-----

<b>Nguyen A.Q., Lapshin K.L.</b> <i>Characteristics and structure of the flow in a turbine stage with a negative gradient of the degree of reactivity</i> .....	163
---	-----

<b>Latuhina A.I., Loktionova E.A., Polupanova J.R.</b> <i>Hydrodynamical grid resistance in pressure conduits</i> .....	174
---	-----

### **Scientific schools of Saint Petersburg State Polytechnic University**

<b>Ivanov A.V.</b> <i>Academic publishing in the Polytechnic university</i> .....	181
---	-----

<b>Frolov V.Ya., Ivanov I.I.</b> <i>The first Russian professor of electrical engineering (dedicated to the 150th anniversary of the birth of Mikhail A. Chatelain)</i> .....	201
---	-----

<b>Morachevskij A.G.</b> <i>Academician Nikolai Semyonov (dedicated to the 120th anniversary of his birth)</i> .....	208
--	-----

<b>Shaplygin N.P.</b> <i>Academician Boris Galerkin (dedicated to the 145th anniversary of his birth)</i> .....	214
---	-----

**ПАРОСТРУЙНЫЙ ИНЖЕКТОР:  
РАСЧЕТ И ПРИМЕНЕНИЕ В ОТОПИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ***V.A. Barilovich, Yu.A. Smirnov***STEAM-EJECTING INJECTOR:  
CALCULATION AND APPLICATION IN HEATING SYSTEMS**

На основе предложенных систем дифференциальных уравнений законов сохранения выполнен в одномерной и стационарной постановке расчет пароструйного инжектора, работающего на водяном паре. Последовательно рассмотрено двухфазное течение в трех основных элементах конструкции — разгонном сопле Лавалья, камере смешения и диффузоре. Для каждого случая предложены физическая и математическая модели, проведены численные расчеты, позволяющие определить размеры проточной части инжектора и изменение основных физических параметров двухфазного потока по его длине. Результаты расчета удовлетворительно совпадают с собственными опытными данными авторов. Предложена тепловая схема с инжектором вместо подогревателя сетевой воды. Показано, что в случае применения инжектора эффективность отопительной системы значительно повышается и приводит к существенной экономии топлива и электрической энергии.

ИНЖЕКТОР; СОПЛО; КАМЕРА СМЕШЕНИЯ; ДИФFUЗОР; ПОДОГРЕВАТЕЛЬ СЕТЕВОЙ ВОДЫ; НАСОС; ЭКОНОМИЯ ТОПЛИВА.

On the basis of the system of one-dimensional stationary differential equations of conservation laws a calculation of the injector working at water vapor is executed. The main parts of the injector are considered: an accelerating Laval nozzle, a mixing camera and a diffuser with a cylindrical entrance. Calculation allows determining the characteristic sizes of a design of the injector and change of the key physical parameters of water and steam by its length. The calculation results are compared to author's own experimental data. The scheme with an injector for heating of network water is suggested and compared to existing ones. The injector usage instead of ordinary water heater with a pump leads to significant saving of fuel and electric energy.

INJECTOR; NOZZLE; MIXTURE CAMERA; DIFFUSER; HEATER OF NETWORK WATER; PUMP; ECONOMY OF FUEL.

**Введение**

Пароструйные инжекторы находили и находят применение в самых различных областях техники. Изобретенный в 1858 году Г. Джиффардом инжектор [1] использовался для подачи воды в котел паровоза, но был вытеснен появивши-

мися позднее более эффективными устройствами — насосами. В период бурного развития космонавтики возникла необходимость в компактных энергетических установках — жидкометаллических магнитогидродинамических (МГД) преобразователях для космических объектов. С этого времени вновь начались исследо-

вания как МГД установок в целом, так и инжекторов, являющихся одним из основных элементов этих устройств. В этой области работали коллективы Института высоких температур АН СССР, Энергетического научно-исследовательского института имени Г.М. Кржижановского, Московского энергетического института, Ленинградского политехнического института, Казанского авиационного института. Основные результаты расчетно-опытных исследований изложены в [2–6], [8–10]. Значительный вклад в исследование струйных аппаратов и систем на их основе внесли и зарубежные ученые [1, 7].

В настоящее время инжектор вновь привлёк внимание исследователей. Этот интерес обусловлен тем, что профессор В.В. Фисенко нашел новую область для его применения: он предложил с целью экономии топлива заменить существующие системы отопления зданий, включающие теплообменные аппараты и насосы, инжекторами [11]. Актуальность развития энергосберегающих технологий в современных условиях не вызывает сомнений.

В перечисленных выше публикациях расчет инжекторов базируется на интегральных уравнениях законов сохранения, однако они не позволяют определить форму и размеры проточной части инжектора вдоль продольной координаты.

Цель нашей работы – предложить метод расчета проточной части инжектора и оценить эффективность его применения в системах подогрева сетевой воды. В статье рассматривается расчет работающего на водяном паре инжектора, основанный на системе дифференциальных уравнений законов сохранения в одномерной и стационарной постановке. Полученные результаты сравниваются с экспериментальными данными.

Поскольку инжектор состоит из трех основных элементов – разгонного сопла, камеры смешения и диффузора с цилиндрическим входом, то в такой последовательности и рассмотрим порядок расчета.

### Разгонное сопло

Для расчета сопла инжектора, работающего на водяном паре, принята равновесная модель расширения пара с верхней пограничной кривой и учетом сил трения:

$$\begin{aligned} \frac{dw}{dz} + \frac{v}{w} \frac{dp}{dz} + \frac{2c_f w}{D} &= 0; \\ \frac{dv}{dz} - \frac{v}{w} \frac{dw}{dz} - \frac{v}{F} \frac{dF}{dz} &= 0; \\ \frac{dT}{dz} - (v'' - v') \frac{T}{r} \frac{dp}{dz} &= 0; \\ \left( \frac{\partial i}{\partial p} \right)_v \frac{dp}{dz} + \left( \frac{\partial i}{\partial v} \right)_p \frac{dv}{dz} + w \frac{dw}{dz} &= 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Разрешая эту систему уравнений относительно  $dp/dz$ , получим

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dz} &= \frac{1}{\left[ \left( \frac{\partial i}{\partial p} \right)_v - v - \frac{v^2}{w^2} \left( \frac{\partial i}{\partial v} \right)_p \right]} \times \\ &\times \left[ \frac{2c_f}{D} \left( v \left( \frac{\partial i}{\partial v} \right)_p + w^2 \right) - \frac{v}{F} \left( \frac{\partial i}{\partial v} \right)_p \frac{dF}{dz} \right]. \end{aligned}$$

Для двухфазной области

$$\begin{aligned} \left( \frac{\partial i}{\partial v} \right)_p &= T \frac{dp}{dT} = \frac{r}{v'' - v'}; \\ \left( \frac{\partial i}{\partial p} \right)_v &= c_v \frac{dT}{dp} + v = \frac{c_v T}{r} (v'' - v') + v. \end{aligned}$$

Тогда

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dz} &= \frac{w^2}{v(M^2 - 1)} \left[ \frac{2c_f}{D} \left( 1 + \frac{w^2}{vr} (v'' - v') \right) - \frac{1}{F} \frac{dF}{dz} \right] = \\ &= \frac{w^2}{v(M^2 - 1)} \left[ \frac{2c_f}{D} \left( 1 + \frac{w^2}{a_s \sqrt{c_v T}} \right) - \frac{1}{F} \frac{dF}{dz} \right]. \end{aligned}$$

Окончательно получаем

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dz} &= \frac{w^2}{v(M^2 - 1)} \left[ \frac{2c_f}{D} \left( 1 + \frac{w^2}{a_s \sqrt{c_v T}} \right) - \frac{1}{F} \frac{dF}{dz} \right]; \\ \frac{dw}{dz} &= - \left( \frac{v}{w} \right) \frac{dp}{dz} - \frac{2c_f w}{D}; \\ \frac{dv}{dz} &= \left( \frac{v}{w} \right) \frac{dw}{dz} + \frac{v}{F} \frac{dF}{dz}; \\ \frac{dT}{dz} &= (v'' - v') \frac{T}{r} \frac{dp}{dz}, \end{aligned}$$

где  $M = w/a$ ;  $a = \left( \frac{rv}{v'' - v'} \right) \frac{1}{\sqrt{c_v T}}$ ;  $F = \frac{\pi D^2}{4}$ ;

$v = (1-x)v' + xv''$ ;  $c_v = (1-x)c'_v + xc''_v$ ;  $c'_v$  и  $c''_v$  – удельные изохорные теплоемкости соответ-

ственно насыщенной жидкости и пара со стороны двухфазной области.

Для сопла, состоящего, например, из двух усеченных конусов с цилиндрической проставкой:

$$\begin{aligned} D &= D_{\text{вх}} - (D_{\text{вх}} - D_{\text{г}})z/l_{\text{ск}}, \text{ если } 0 \leq z \leq l_{\text{ск}}; \\ D &= D_{\text{г}}, \text{ если } l_{\text{ск}} < z \leq (l_{\text{ск}} + l_{\text{сц}}); \\ D &= D_{\text{г}} + (D_{\text{ср}} - D_{\text{г}})(z - (l_{\text{ск}} + l_{\text{сц}}))/l_{\text{сд}}, \text{ если } \\ &\quad (l_{\text{ск}} + l_{\text{сц}} + l_{\text{сд}}) \geq z \geq (l_{\text{ск}} + l_{\text{сц}}). \end{aligned} \quad (7)$$

Таким образом, на основе прямой задачи получена замкнутая система уравнений, позволяющая выполнить расчет сопла, работающего на сухом насыщенном паре. Численный эксперимент показывает: чтобы процесс пошел по нижней ветке кривой ( $dp/dz < 0$ ), достаточно задать расход выше критического не более чем на 1 %.

### Камера смешения

В работе [2] выполнено опытное исследование пароводяного инжектора, геометрические размеры которого приводятся. Достигнутая степень повышения давления составила всего около 1,4, что обусловлено значительной потерей кинетической энергии двухфазного потока из-за несовершенной проточной части, в частности из-за большой длины (100–200 мм) камеры смешения (КС). С увеличением коэффициента инжекции  $u = \dot{G}_{\text{хв}}/\dot{G}_{\text{п}}$  у инжектора с длинной камерой создаются условия для отрыва потока (в этом случае протяженность конденсирующейся струи меньше длины КС) и в еще большей степени возрастают гидравлические потери. При малых значениях  $u$  невозможна полная конденсация пара, что в конечном итоге не позволило авторам [2] получить высокое давление за инжектором.

Наши опыты с инжекторами, работающими на перегретой воде, близкой к состоянию насыщения (недогрев составлял 3–5°) при  $p_{\text{вх}}^* = 0,6–0,8$  МПа, показали [8], что из трех конических камер длиной 0,15, 0,1 и 0,05 м наибольшую степень повышения давления  $\pi^* = 1,8–2$  имел инжектор с самой короткой камерой, при этом максимум  $\pi^*$  с уменьшением  $l_{\text{кс}}/d_{\text{мин}}$  смещается в сторону больших значений  $u$ . Максимальное значение  $\pi^*$  было получено при

$l_{\text{кс}}/d_{\text{мин}} = 12,5$  и диаметре среза сопла Лавалья, равном 15 мм.

При расчете камеры смешения считалось, что в нее поступает равновесный поток влажного пара, имеющий объемную концентрацию горячих капель

$$n_{V_{\text{гк}}} = \frac{6(1-x)\dot{G}_{\text{кр}}}{\pi D_{\text{гк}}^3 \rho_{\text{гк}} F_C w},$$

и холодная жидкость.

Предполагалось, что в начальном сечении КС холодные и горячие капли равномерно распределены в сухом насыщенном паре, но в целом поток термически и механически неравновесен. При его движении в камере и наличии обменных процессов он будет переходить в равновесное состояние: значения температуры и скорости фаз будут близки между собой. Переход в это состояние или близкое к нему и определит длину камеры смешения. Поскольку ввод холодной жидкости в КС осуществляется, как правило, при незначительной скорости, то считается, что в результате силового взаимодействия между несущим потоком и холодными каплями происходит дробление последних, а диаметр мелких холодных капель  $D_{\text{хк}}$  определяется по формуле [12]

$$\left( \frac{D_{\text{хк}}}{D_{0\text{хк}}} \right)^{0,25} = \frac{1,9}{We_0^{0,25}} + 0,315 \left( \frac{\rho_{0\text{п}}''}{\rho_{0\text{хк}}} \right)^{1,5} c_{x0} We_0^{0,125} \ln \left( \frac{D_{0\text{хк}}}{D_{\text{хк}}} \right),$$

где  $We_0 = \frac{\rho_{0\text{п}}'' (w_{\text{п}} - w_{\text{хк}})_0^2 D_{0\text{хк}}}{\sigma_{0\text{хк}}}$  – критерий Вебера,

определяемый условиями на входе в КС;

$c_{x0} = f(\text{Re}_0)$ ;  $\text{Re}_0 = \frac{(w_{\text{п}} - w_{\text{хк}})_0 D_{0\text{хк}} \rho_{0\text{п}}''}{\mu_{0\text{п}}}$ . При этом делалось допущение, что разрушение капель происходит на участке, протяженность которого много меньше длины КС.

Ниже приводится система уравнений, позволяющая выполнить расчет КС на основе прямой задачи:

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dz} = & \frac{w_{\pi}}{\left( \frac{w_{\pi}^2}{(dp/d\rho_{\pi})} - \frac{\dot{G}_{\Gamma K}}{\dot{G}_{\pi}} \left( \frac{w_{\pi}}{w_{\Gamma K}} \right)^3 \left( \frac{\rho_{\pi}}{\rho_{\Gamma K}} \right)^2 - \frac{\dot{G}_{\chi K}}{\dot{G}_{\pi}} \left( \frac{w_{\pi}}{w_{\chi K}} \right)^3 \left( \frac{\rho_{\pi}}{\rho_{\chi K}} \right)^2 - 1 \right) f_{\pi}} \times \\ & \times \left\{ \frac{F_{\text{KC}}}{w_{\pi}} \left[ \left( 1 - \frac{w_{\pi}^2 \rho_{\pi}}{w_{\Gamma K}^2 \rho_{\Gamma K}} \right) D_{\Gamma K}^* n_{\text{vTK}} + \left( 1 - \frac{w_{\pi}^2 \rho_{\pi}}{w_{\chi K}^2 \rho_{\chi K}} \right) D_{\chi K}^* n_{\text{vXK}} \right] + \right. \\ & + \pi F_{\text{KC}} \left[ \left( 1 + \frac{w_{\pi} - w_{\Gamma K}}{w_{\pi}} - \frac{w_{\pi} \rho_{\pi}}{w_{\Gamma K} \rho_{\Gamma K}} \right) D_{\Gamma K}^2 n_{\text{vTK}} \Delta j_{(\Gamma K - \pi)} - \right. \\ & \left. \left. - \left( 1 + \frac{w_{\pi} \rho_{\pi} (w_{\pi} - w_{\chi K})}{w_{\chi K}^2 \rho_{\chi K}} - \frac{w_{\pi} \rho_{\pi}}{w_{\chi K} \rho_{\chi K}} \right) D_{\chi K}^2 n_{\text{vXK}} \Delta j_{(\pi - \chi K)} \right] \right. \\ & \left. - w_{\pi} \rho_{\pi} \frac{dF_{\text{KC}}}{dz} + \frac{\tau_w \pi D_{\text{KC}}}{w_{\pi}} \right\}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dw_{\chi K}}{dz} = & - \frac{1}{w_{\chi K} \rho_{\chi K}} \frac{dp}{dz} + \frac{6D_{\chi K}^*}{\pi D_{\chi K}^3 \rho_{\chi K} w_{\chi K}} + \\ & + \frac{(w_{\pi} - w_{\chi K})}{\dot{G}_{\chi K}} \frac{d\dot{G}_{\pi - \chi K}}{dz}; \end{aligned}$$

$$\frac{dw_{\Gamma K}}{dx} = - \frac{1}{w_{\Gamma K} \rho_{\Gamma K}} \frac{dp}{dx} + \frac{6D_{\Gamma K}^*}{\pi D_{\Gamma K}^3 \rho_{\Gamma K} w_{\Gamma K}},$$

$$\begin{aligned} \frac{dw_{\pi}}{dz} = & - \frac{1}{\dot{G}_{\pi}} \left( f_{\pi} \frac{dp}{dz} + \tau_w \pi D_{\text{KC}} + \frac{6D_{\chi K}^* \dot{G}_{\chi K}}{\pi D_{\chi K}^3 \rho_{\chi K} w_{\chi K}} + \right. \\ & \left. + \frac{6D_{\Gamma K}^* \dot{G}_{\Gamma K}}{\pi D_{\Gamma K}^3 \rho_{\Gamma K} w_{\Gamma K}} + (w_{\pi} - w_{\Gamma K}) \frac{d\dot{G}_{\pi - \chi K}}{dz} \right); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{di_{\chi K}^*}{dz} = & \left[ (i_{\pi}^{**} - i_{\chi K}^*) \Delta j_{(\pi - \chi K)} - (i_{\pi}^{**} (T_{\chi K}) - i_{\chi K}^*) \Delta j_{(\chi K - \pi)} + \alpha_{(\pi - \chi K)} (T_{\pi} - T_{\chi K}) \right] \times \\ & \times \frac{6}{w_{\chi K} \rho_{\chi K} D_{\chi K}}; \\ \frac{dT_{\chi K}}{dz} = & \left( \frac{di_{\chi K}^*}{dz} - w_{\chi K} \frac{dw_{\chi K}}{dz} \right) / c_{p\chi K} \end{aligned} \quad (14)$$

где  $D^* = c_{\chi} \pi D_{\text{KC}}^2 \rho_{\pi} (w_{\pi} - w_{\chi K}) |w_{\pi} - w_{\chi K}| / 8$  — сила сопротивления единичной капли;

$$c_{\chi} = f(\text{Re}_{\chi}); \quad \text{Re}_{\chi} = \frac{D_{\text{KC}} |w_{\pi} - w_{\chi K}| \rho_{\chi K}}{\mu_{\pi}};$$

$$\Delta j_{\pi - \chi K} = \frac{1}{\sqrt{2\pi R_{\pi}}} \left( \frac{2\chi}{2 - \chi} \right) \left( \frac{p_s}{\sqrt{T_s}} - \frac{p_{\chi K} (T_{\chi K})}{\sqrt{T_{\chi K}}} \right);$$

$$\chi = \frac{35}{p_s^{0,56}}; \quad \frac{d\dot{G}_{\pi - \chi K}}{dz} = \pi D_{\Gamma K}^2 n_{\text{vTK}} \Delta j_{\pi - \chi K} F_{\text{KC}};$$

$$\alpha = (2 + 0,6 \text{Re}_{\chi}^{0,5} \text{Pr}_{\pi}) \lambda_{\pi} / D_{\chi K}.$$

Система из шести дифференциальных уравнений позволяет произвести расчет КС на основе прямой задачи, то есть определить изменение давления, температуру пара и холодных капель, скорости пара, холодных и горячих капель по длине камеры.

Температура горячих капель определяется из уравнения энергии для адиабатического потока

$$\begin{aligned} \dot{G}_{\Gamma K} \left( i_{\Gamma K} + \frac{w_{\Gamma K}^2}{2} \right) + \dot{G}_{\pi} \left( i_{\pi} + \frac{w_{\pi}^2}{2} \right) + \dot{G}_{\chi K} \left( i_{\chi K} + \frac{w_{\chi K}^2}{2} \right) = \\ = I_{\text{см0}}^*, \end{aligned} \quad (15)$$

где  $I_{\text{см0}}^*$  — полная энтальпия смеси на входе в камеру смешения.

Секундный расход холодной воды, подаваемой в начальное сечение КС, в первом приближении определяется из уравнения теплового баланса

$$r\dot{G}_{\pi} = \dot{G}_{\chi K} \bar{c}_{p\chi K} [(t_s(p_{\pi}) - t_{\chi K0}) - \Delta t_{\text{H}}] \quad (16)$$

(здесь  $\Delta t_{\text{H}}$  — недогрев холодной воды до температуры насыщения), а затем уточняется в процессе численного эксперимента.

## Диффузор

Предполагалось, что после того, как поток достигает граничной плотности, он имеет пучковую структуру, а фазы находятся в механическом равновесии. Исходя из этих условий и на основе термически неравновесной модели выполнялся расчет диффузора, состоявшего из сопряженных цилиндрического и конического каналов. Считалось, что скачок конденсации расположен в цилиндрической части, где происходит конденсация основной массы пара.

Приведем дифференциальные уравнения, на основе которых выполнялся расчет диффузора:

$$\frac{dI}{dz} = p \frac{dF_{\text{д}}}{dz} - \tau_w \pi D_{\text{д}}; \quad (17)$$

$$\frac{dD_{\pi}}{dz} =$$

$$= 8\lambda_{\chi} c_{p\chi} \rho_{\chi} |T_{\chi} - T_s| (T_{\chi} - T_s) \chi_{\chi} / ((r\rho_{\pi})^2 D_{\pi} w); \quad (18)$$

$$\frac{d}{dz} \left( i_{\text{см}} + \frac{w^2}{2} \right) = 0, \quad (19)$$

где  $F_d = f(z)$ ;  $I = \dot{G}w + pF_d$  – полный импульс потока;  $\tau_w$  – касательное напряжение на стенке канала;  $c_k$  – коэффициент, учитывающий реальность процесса конденсации.

Определив величину полного импульса по координате  $z$ , находим текущее значение статического давления  $p = (I - \dot{G}_{\text{см}}w) / F_d$ .

### Результаты расчета инжектора

На рис. 1 показано изменения основных физических величин вдоль продольной оси инжектора, полученных в результате численного решения систем уравнений.

Из этого рисунка видно, что давление горячей воды на выходе из инжектора в пять раз превышает давление сухого насыщенного пара на входе в сопло. Между тем наши опыты показали (рис. 2), что максимальное превышение давления – около 3,6. Такое расхождение можно объяснить упрощенной моделью процесса, в которой не учитывались дробление и коагуляция капель, полидисперсность капельного потока, наличие жидкой пленки и срывные явления. Однако расчеты, выполненные на основе пред-

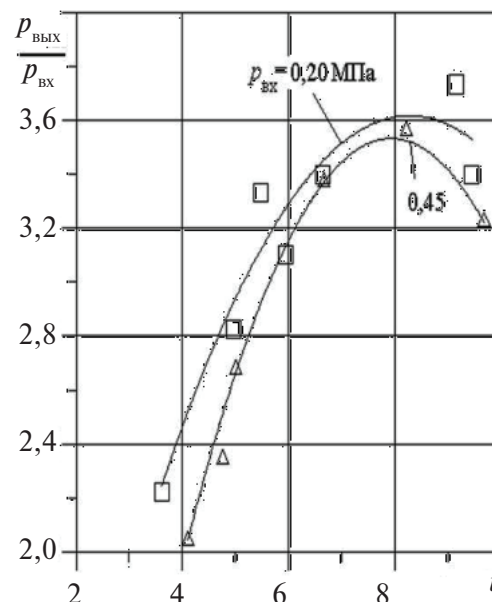


Рис. 2. Степень повышения давления в инжекторе в зависимости от коэффициента инъекции  $u$

ложенных систем дифференциальных уравнений с учетом уравнений сохранения в интегральной форме, позволяют определить геометрию и размеры проточной части инжектора и повысить его эффективность.

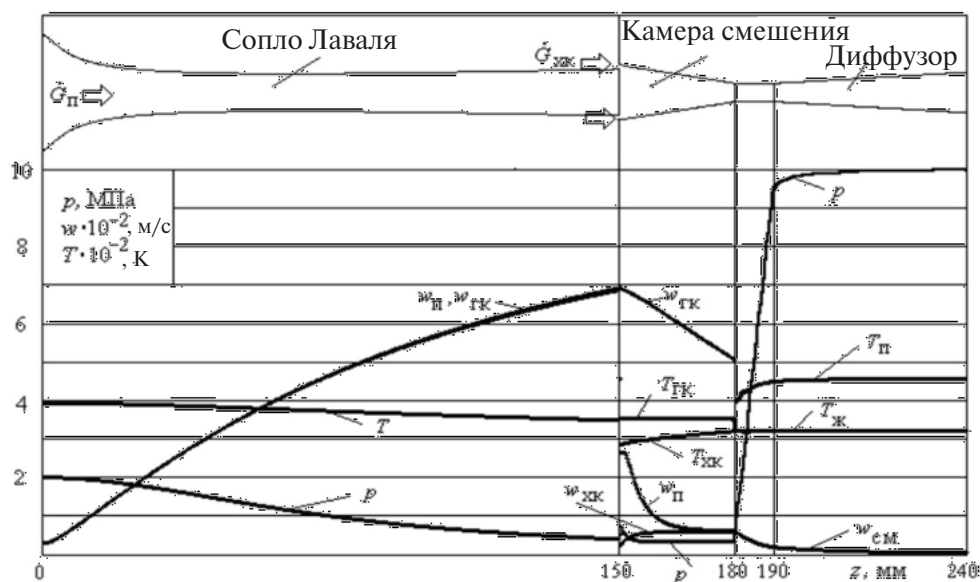


Рис. 1. Расчетные изменения давления, скоростей пара, холодных и горячих капель, смеси, температуры холодных и горячих капель по длине инжектора



## Применение инжектора в отопительных системах

Инжектор сочетает в себе компактный высокоэффективный теплообменный аппарат, где в процессе конденсации пара на холодных каплях пассивной жидкости коэффициент теплоотдачи достигает сотен тысяч Вт/(м²К) (при конденсации пара на холодных стенках  $\alpha = 7000\text{--}9000$  Вт/(м²К)), и насос, позволяющий в несколько раз повысить давление по сравнению с давлением активного агента (пар) на входе в инжектор. Поэтому естественно, что им можно заменить подогреватель сетевой воды, используемый для отопления зданий, и насос, обеспечивающий прокачку этой воды (что, как уже отмечалось, было предложено профессором В.В. Фисенко).

Далее в данной статье рассматривается использование инжектора в котельной СПбГПУ с целью экономии топлива и электрической энергии.

Последовательно определяем: необходимую производительность парового котла (парогенератора) (исходя из уравнения теплового баланса при заданном расходе сетевой воды  $G_{св}$ )

$$G_{п} = G_{св} (i_{в5} - i_{в8}) / (i_{п1} - i_{в2});$$

тепловой поток, получаемый потребителем,

$$Q_{пот} = G_{св} (i_{в5} - i_{в8});$$

расход топлива в парогенераторе

$$B_{г} = G_{п} (i_{п1} - i_{в2}) / (H_{п}^p \eta_{пг});$$

среднюю температуру воды в водоподогревателе

$$T_{вср} = (T_5 - T_8) / \ln(T_5 / T_8);$$

среднюю температуру пара в водоподогревателе

$$T_{пср} = (i_{п1} - i_{в2}) / (s_{п1} - s_{в2});$$

температурный напор в водоподогревателе

$$\Delta T_{вп} = T_{пср} - T_{вср}.$$

Так как инжектор представляет собой открытую адиабатическую систему, то можно написать  $G_{п1} i_{п1} + G_8 i_{в8} = G_{св} i_{в5}$ , где  $G_{п1}$ ,  $G_8$  – расход пара и воды через инжектор.

Вводя коэффициент инжекции  $u = G_8 / G_{п1}$

$$= \frac{(i_{п1} - i_{в5})}{(i_{в5} - i_{в8})} \text{ и учитывая, что расход сетевой воды}$$

$G_{св} = G_8 + G_{п1}$ , определим расход пара через инжектор  $G_{п1} = G_{св} / (1 + u)$  и расход топлива в схеме с инжектором  $B_{ти} = B_{гд} G_{п1} / G_{п}$ .

## Сравнение тепловой схемы с инжектором и обычной – с водоподогревателем сетевой воды

В существующей тепловой схеме перегретый пар после парогенератора дросселируется ( $i_{п1} = \text{const}$ ), а затем поступает в водоподогреватель (температура пара снижается с  $T_{п1} = 280$  °С до  $T_{пд} = 270$  °С, а давление – с 29 до 19 бар.). Средняя температура пара в водоподогревателе понизится и станет равной

$$T_{пср} = (i_{п1} - i_{в2д}) / (s_{п1д} - s_{в2д}),$$

что приведет к снижению температурного напора

$$\Delta T_{впд} = T_{пср} - T_{вср}.$$

Если считать, что при этом коэффициент теплопередачи не изменится, то это приведет к увеличению расхода пара и топлива при неизменном  $Q_{пот}$ .

$$G_{пд} = G_{п} \Delta T_{вп} / \Delta T_{впд}; B_{гд} = G_{пд} B_{г} / G_{п},$$

где  $\Delta T_{впд} = T_{п1д} - T_{вср}$ .

Расход топлива для схемы с инжектором определим по формулам  $B_{ти} = B_{гп} G_{п1} / G_{п}$ ,  $B_{гид} = B_{гд} G_{п1} / G_{пд}$ . Экономия пара и топлива составит

$$\Delta G_{п} = G_{п} - G_{п1}; \Delta G_{пд} = G_{пд} - G_{п1};$$

$$\Delta B_{г} = B_{г} - B_{г1}; \Delta B_{гд} = B_{гд} - B_{г1}.$$

Расчет тепловых схем был выполнен при следующих данных:

$$\begin{aligned} G_{св} &= 70 \text{ кг/с}; T_{п1} = 553 \text{ К}; T_{п1д} = 543 \text{ К}; \\ i_{п1} &= 2940 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}; i_{в2} = 994,4 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}; \\ i_{в2д} &= 896,6 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}; i_{в5} = 398 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}; \\ i_{в8} &= 209 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}; \eta_{пг} = 0,7; \\ H_{п}^p &= 48819 \text{ кДж/кг}; \Delta p_{св} = 3 \cdot 10^5 \text{ Па}; T_8 = 323 \text{ К}; \\ T_5 &= 368 \text{ К}; \eta_{пг} = 0,833; \mu_{г} = 16,34 \text{ кг/кмоль}; \\ p_{ос} &= 1,0133 \cdot 10^5 \text{ Па}; T_{ос} = 273 \text{ К}; \\ s_{п1} &= 6,46 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}; s_{п1д} = 6,66 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}; \\ s_{в2} &= 2,63 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}; s_{в2д} = 2,42 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}; \end{aligned}$$

В результате расчета имеем:

$$\begin{aligned} G_{п} &= 6,798 \text{ кг/с}; T_{вср} = 345 \text{ К}; N_{пг} = 30759,67 \text{ Вт}; \\ Q_{пот} &= 13230 \text{ Вт}; B_{г} = 0,325 \text{ кг/с}; B_{г1} = 0,232 \text{ кг/с}; \\ G_{пд} &= 7,14 \text{ кг/с}; \Delta G_{пд} = 0,342 \text{ кг/с}; u = 13,45; \\ G_{п1} &= 4,84 \text{ кг/с}; \Delta G_{п} = 1,955 \text{ кг/с}; \Delta B_{г} = 0,0935 \text{ кг/с}; \\ \Delta B_{гч} &= 336,76 \text{ кг/ч}; \Delta B_{гс} = 8082,2 \text{ кг/сут}. \end{aligned}$$

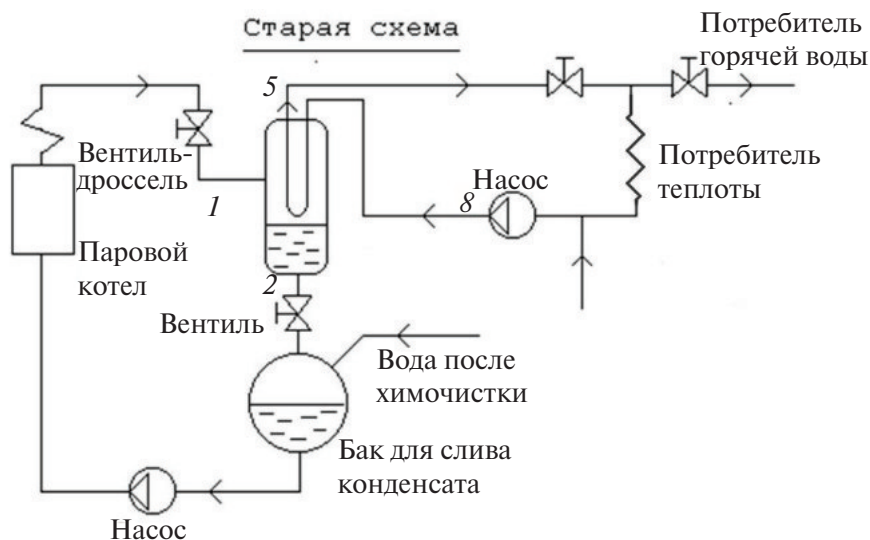


Рис. 3. Тепловая схема водоподогревателя сетевой воды с насосом

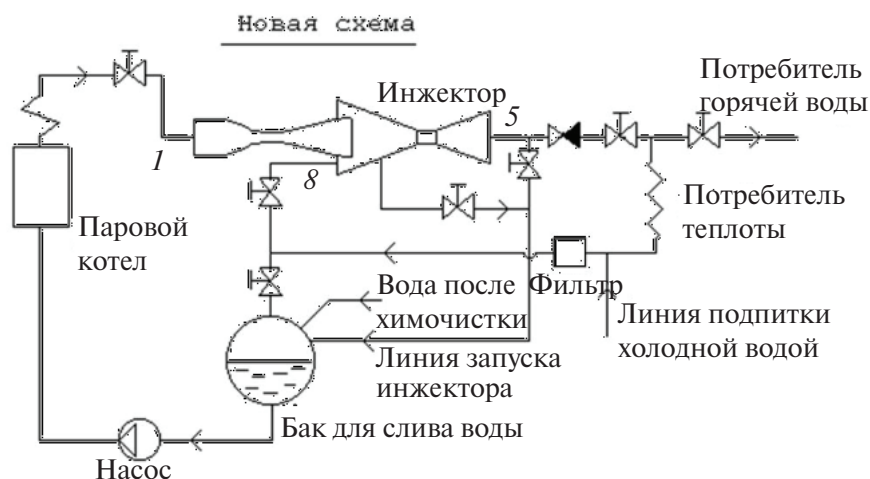


Рис. 4. Тепловая схема подогрева сетевой воды с инжектором

При нагреве сетевой воды от 50 до 95 °С с расходом 70 кг/с и установке инжектора экономится пара  $\Delta G_p = 6,798 - 4,843 = 1,95$  кг/с и топлива  $\Delta B_T = 0,3253 - 0,2317 = 0,0936$  кг/с ( $\Delta B_T \cdot 100/B_T = 28,7$  %). Таким образом, в сутки (даже при отсутствии дросселирования) экономия топлива по массе составит 8082 кг, а по объему газа, приведенного к нормальным условиям,  $\Delta B_{T_v} = \Delta B_T U_{y_{гк}} T_{oc}/P_{oc}/\mu_T = 0,128$  м³/с или 11079 м³/сутки.

Поскольку в схеме с инжектором насос для прокачки сетевой воды не требуется, то экономится и электрическая энергия. Мощность на-

соса в старой схеме  $N_H = G_{св} \Delta P_{св} / \rho_{св} / \eta_H = 30759$  Вт. Экономия в сутки составит  $2,66 \cdot 10^9$  Дж.

Рассмотрим процессы в водоподогревателе и инжекторе с позиций энтропийного и эксергетического методов. Для водоподогревателя применим энтропийный метод, как более удобный для анализа, а для инжектора — эксергетический. На основании теоремы Гюи—Стодола определим потерю потока эксергии для водоподогревателя:

$$D_{Ta} = T_{oc} \Delta S = T_{oc} \left( G_{св} c_p \ln \left( \frac{T_5}{T_8} \right) - G_p (s_1 - s_2) \right) = 3531,6 \text{ кВт.}$$

В инжекторе протекают сложнейшие процессы: ускорение и смешение потоков, сопровождающееся конденсацией и скачком давления. Чтобы избежать детального рассмотрения этих процессов, инжектор представим в виде объекта, в который входят два и выходит один поток эксергии. Тогда потерю потока эксергии определим из формулы

$$D_{\text{и}} = Ex_1 + Ex_2 - Ex_5 = 2816 \text{ кВт},$$

где  $Ex_1 = G_{\text{п и}} ((i_{\text{п и}} - i_{\text{о с}}) - T_{\text{о с}} (s_{\text{п и}} - s_{\text{о с}}))$ ;  $Ex_8 = G_8 ((i_{\text{в 8}} - i_{\text{о с}}) - T_{\text{о с}} (s_{\text{в 8}} - s_{\text{о с}}))$ ;  $Ex_5 = G_{\text{с в}} ((i_{\text{в 5}} - i_{\text{о с}}) - T_{\text{о с}} (s_{\text{в 5}} - s_{\text{о с}}))$ .

Таким образом, применение инжектора уменьшает потерю потока эксергии в процессе нагрева воды на  $\Delta D = D_{\text{та}} - D_{\text{и}} = 715,2 \text{ кВт}$ , или на 20 %.

### Выводы

Существующие методы расчета инжекторов базируются на интегральных уравнениях сохранения, которые не позволяют определить оптимальную форму и размеры проточной части инжектора.

Разработан новый метод расчета пароструйного инжектора на основе систем дифференциальных уравнений законов сохранения, записанных для двухфазного потока, что позволяет получить оптимальную проточную часть инжектора (разгонное сопло, камера смешения и диффузор) и, таким образом, создать инжектор, имеющий наибольшую степень повышения давления.

Термодинамический анализ показывает, что с точки зрения экономии топлива и электрической

энергии применение тепловых схем с инжекторами в отопительных системах значительно эффективнее по сравнению с существующими.

### Приложение

**Принятые обозначения:**  $a_s$  – термодинамическая скорость звука, м/с;  $c_p$  – удельная изобарная теплоемкость, Дж/(кгК);  $c_f$  – коэффициент трения;  $c_x$  – коэффициент сопротивления;  $F, f$  – площадь поперечного сечения, м<sup>2</sup>;  $\dot{G}$  – расход, кг/с;  $i$  – удельная энтальпия Дж/кг;  $j$  – плотность потока массы, кг/(м<sup>2</sup>с);  $\Delta j_{\text{к-п}}$  – результирующая плотность потока пара от испаряющейся капли, кг/(м<sup>2</sup>с);  $l$  – длина, м;  $M$  – число Маха;  $N$  – мощность, Вт;  $\dot{n}$  – поток капель, 1/с;  $n_v$  – объемная концентрация капель, 1/м<sup>3</sup>;  $p$  – статическое давление, Па;  $\dot{Q}$  – тепловой поток, Вт;  $R$  – радиус, м;  $R_{\text{п}}$  – газовая постоянная пара, Дж/(кгК);  $r$  – удельная теплота парообразования, Дж/кг;  $T$  – температура, К;  $t$  – температура, °С;  $v$  – удельный объем, м<sup>3</sup>/кг;  $w$  – скорость, м/с;  $x$  – степень сухости пара;  $z$  – продольная координата, м;  $a$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>К);  $l$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(мК);  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости, Па·с;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $t$  – время, с;  $\tau_w$  – касательное напряжение трения на стенке, Па.

**Подстрочные индексы:** г – горло; г к – горячие капли; д – диффузор; ж – жидкость; к – капля; кр – критический; КС – камера смешения; п – пар; с – сопло; с д – дивергентная часть сопла; с к – конвергентная часть; см – смесь; ср – срез; с ц – цилиндрическая часть сопла; х к – холодные капли.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эллиот Д. Исследование применения насосов с несущим газом в ракетных двигателях // Вопросы ракетной техники. 1964. №4. С. 88–112.
2. Данилин В.С., Дейч М.Е., Севостьянов А.П. [и др.] Экспериментальное исследование пароводяного инжектора // Симпозиум по производству электроэнергии с помощью МГД-генераторов, Варшава, 24–30 июля 1968. Доклад SM-107/143.
3. Богомолов Б.Г., Духовлинов С.Д., Черных Е.В. [и др.] Некоторые результаты изучения однокомпонентной схемы жидкометаллического МГД-преобразования энергии // Симпозиум по производству электроэнергии с помощью МГД-генераторов, Варшава. 24–30 июля 1968. Доклад SM-107/135.
4. Шпильрайн Э.Э., Якимович К.А. Термодинамика энергетической МГД-установки с парожидкостным инжектором // ТВТ. 1965. №5.
5. Калафати Д.Д., Козлов В.Б. Термодинамика циклов со смешением жидкого металла перед МГД-преобразователем // ТВТ. 1963. №3.
6. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. М.: Энергоатомиздат, 1989. 351 с.
7. Radebold [etc]. Energy conversion with liquid-metal working-fluids in the MHD-Staustahlrohr // Electricity from MHD. IAEA. Vienna. 1968. Vol. 3. P. 1439–1461.

8. Баранов Г.А., Барилевич В.А., Батуев Ш.-Б.Б., Зысин В.А. Исследование процессов в разгонном устройстве, работающем на вскипающей жидкости // ТВТ. 1972. Т.10. №3. С. 629–634.

9. Зысин В.А. [и др.] Вскипающие адиабатные потоки. М.: Атомиздат, 1976. 152 с.

10. Барилевич В.А. [и др.] Расчет жидкостного

инжектора // Труды ЛПИ. 1980. №370. С. 87–92.

11. Новожилов И.А., Фисенко В.В. Новая энерго-ресурсосберегающая технология // Энергетик. 1996. №3. С. 4–5.

12. Кириллов И.И., Яблоник Р.М. Основы теории влажнопаровых турбин. Л.: Машиностроение, 1968. 264 с.

## REFERENCES

1. Elliot D. Issledovaniye primeneniya nasosov s nesushchim gazom v raketnykh dvigatelyakh [Research of use of pumps with the bearing gas in rocket engines.]. *Voprosy raketnoy tekhniki*. 1964. №4. S. 88–112.(rus)

2. Danilin V.S., Deych M.Ye., Sevostyanov A.P. [i dr.] Eksperimentalnoye issledovaniye parovodyanogo inzhektora [Experimental investigation of vapor-water injector]. *Simpozium po proizvodstvu elektroenergii s pomoshchyu MGD- generatorov*. Varshava, 24-30 iyulya 1968. SM-107/143 (rus)

3. Bogomolov B.G., Dukhovlinov S.D., Chernykh Ye.V. [i dr.] Nekotoryye rezultaty izucheniya odnokomponentnoy skhemy zhidkometallichesкого MGD-preobrazovaniya energii [Some results of investigation of one-component scheme of liquid-metal MHD energy conversation]. *Simpozium po proizvodstvu elektroenergii s pomoshchyu MGD- generatorov*. Varshava, 24-30 iyulya 1968. SM-107/135. (rus)

4. Shpilrayn E.E., Yakimovich K.A. Termodinamika energeticheskoy MGD- ustanovki s parozhidkostnym inzhektorom [Thermodynamics of MHD power installation with vapor-liquid injector]. *TVT*. 1965. №5. (rus)

5. Kalafati D.D., Kozlov V.B. Termodinamika tsiklov so smesheniyem zhidkogo metalla pered MGD-preobrazovatelem. [Thermodynamics of cycles with

liquid-metal mixing before MHD-converto]. *TVT*. 1963. №3. (rus)

6. Sokolov Ye.Ya., Zinger N.M. Struynnye apparaty [Jet apparatus]. M.: Energoatomizdat, 1989. 351 s. (rus)

7. Radebold [etc]. Energy conversation with liquid-metal working-fluids in the MHD-Staustahlrohr. *Electricity from MHD, IAEA, Vienna*. 1968. Vol. 3. P. 1439–1461.

8. Baranov G.A., Barilovich V.A., Batuyev Sh.-B.B., Zysin V.A. Issledovaniye protsessov v razgonnom ustroystve, rabotayushchem na vskipayushchey zhidkosti [Research of processes in the accelerating device working at the boiling liquid.]. *TVT*. 1972. Т.10. №3. S. 629–634. (rus)

9. Zysin V.A. [i dr.] Vskipayushchiye adiabatnyye potoki [Boiling adiabatic streams]. М.: Atomizdat 1976. 152 s. (rus)

10. Barilovich V.A. [i dr.] Raschet zhidkostnogo inzhektora [Calculation of liquid injector]. *Trudy LPI*. 1980. №370. S. 87–92. (rus)

11. Novozhilov I.A., Fisenko V.V. Novaya energo resurs osberegayushchaya tekhnologiya [New power resource-saving technology]. *Energetik*. 1996. № 3. S. 4–5. (rus)

12. Kirillov I.I., Yablonik R.M. Osnovy teorii vlazhnoparovykh turbin [Basics of wet vapor turbines]. L.: Mashinostroyeniye, 1968. 264 s. (rus)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

**БАРИЛОВИЧ Владимир Антонович** — доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: vba\_exerg@mail.ru

**BARILOVICH Vladimir A.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: vba\_exerg@mail.ru

**СМИРНОВ Юрий Александрович** — кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: y\_a\_s@mail.ru

**SMIRNOV Yuri A.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: y\_a\_s@mail.ru

DOI 10.5862/JEST.243.2

УДК 621.313.322-81

*Н.В. Гришин*

## **УРАВНЕНИЯ РЕЖИМНЫХ ЗАДАЧ ШЕСТИФАЗНЫХ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ ПРЕДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ**

*N.V. Grishin*

### **EQUATIONS FOR OPERATION CONDITIONS PROBLEMS OF SIX PHASE TURBINE GENERATORS OF MAXIMUM CAPACITY**

В целях увеличения единичной мощности сверхмощных турбогенераторов могут применяться многофазные обмотки статора, в том числе шестифазные, которые состоят из двух сдвинутых в пространстве на 30 электрических градусов трехфазных обмоток. Мощные шестифазные турбогенераторы находят широкое применение на строящихся в настоящее время энергоблоках атомных электростанций. Такие турбогенераторы за счёт наличия индуктивной связи между трехфазными системами обмотки статора обладают рядом специфических особенностей по сравнению с трехфазными. Ряд вопросов, касающихся шестифазных генераторов предельной мощности, нашёл освещение в литературе. Вместе с тем режимные задачи и связанные с ними аспекты изучены недостаточно. В статье, используя обычные допущения, применяемые при анализе трехфазных машин, получены дифференциальные уравнения шестифазного турбогенератора в фазных координатах. Определены соотношения между индуктивностями само- и взаимной индукции контуров статора и ротора. Индуктивности рассеяния контуров статора представлены в виде суммы индуктивностей рассеяния по путям самоиндукции и взаимной индукции между трехфазными системами обмотки статора. Произведено преобразование уравнений к вращающимся синхронно с ротором координатам, что обеспечивает большую наглядность и меньшую ресурсоемкость вычислений. Выявлены отличия от известных выражений для трехфазных машин. Определено уравнение движения ротора шестифазного турбогенератора. Произведен выбор относительных единиц, позволяющий упростить полученные выражения и проводить сопоставление параметров с параметрами обычных трехфазных машин. В относительных единицах получены уравнения состояния шестифазного турбогенератора аналогичные уравнениям Парка–Горева трехфазных машин. Это позволяет по аналогии с известными методами трехфазных турбогенераторов проводить исследования режимов работы и переходных процессов шестифазного турбогенератора.

**ТУРБОГЕНЕРАТОРЫ ПРЕДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ; ШЕСТИФАЗНЫЕ ТУРБОГЕНЕРАТОРЫ; РЕЖИМНЫЕ ЗАДАЧИ; УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ; ЛИНЕЙНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ.**

Polyphase stator winding can be used for increasing the unit capacity of high-power turbine generators. This includes six-phase winding consisting of two separate three-phase windings displaced by 30 electrical degrees. The modern high-power six-phase turbine generators are widely used in the construction of nuclear power plant units. Six-phase turbine generators have some specifics compared with three-phase generators due to mutual inductive coupling between three-phase stator winding systems. Some issues regarding six-phase generators have been described in literature; however, the operation conditions and related aspects have not been studied enough. This article has obtained differential equations defining the operation conditions of a six-phase turbine generator in phase coordinates using the common assumptions from the theory of three-phase machines. The relationship between self and mutual induction of rotor and stator circuits is defined. Leakage reactance of stator circuits is presented as a sum of leakage reactance for the self and mutual induction paths between three-phase stator winding systems. The equations were converted to rotating coordinates synchronous with rotor to provide higher clarity and reduce the amount of resources required for the calculations. We have explored the differences from the well-known equations for three-phase machines. The equation for the rotor movement of the six-phase generator has been determined. We have chosen the relative units allowing to simplify the obtained expressions and compare the parameters with those of ordinary three-phase generators. By this equations of six-phase generator operation are obtained. These relative units enables us to find the equations similar to the Park-Gorev-form equations for three-phase turbine generators. Solving these equations by traditional methods known for three-phase machines allow studying the operation modes and transient processes of six-phase turbine generators.

**TURBINE GENERATORS OF MAXIMUM CAPACITY; SIX-PHASE TURBINE GENERATORS; OPERATION CONDITIONS PROBLEMS; OPERATION CONDITIONS EQUATIONS; LINEAR TRANSFORMATION.**



## Введение

Укрупнение единичной мощности вновь вводимых энергоблоков — это одно из следствий развития электроэнергетики и роста установленных мощностей.

При достигнутом техническом уровне электромашиностроения мощность трехфазных турбогенераторов ограничена главным образом долговечностью и прочностью крепления лобовых частей обмотки статора. Поэтому снижение электродинамических усилий в лобовых частях, а также снижение тока в стержне обмотки является условием увеличения мощности генераторов. В этих целях могут использоваться многофазные обмотки статора. Увеличивая количество фаз при заданном напряжении статора, можно спроектировать машину повышенной мощности при меньшем фазном токе. Это обстоятельство послужило толчком к рассмотрению применения многофазных (вплоть до 27) обмоток для турбогенераторов большой мощности [1–3].

Шестифазная обмотка статора представляет собой двойную обмотку, состоящую из двух трехфазных со смещенными в пространстве на 30 электрических градусов магнитными осями. Такая схема позволяет приблизить форму пространственного распределения поля реакции якоря к синусоидальной и тем самым снизить добавочные потери, а также паразитные электромагнитные моменты. Для генераторов предельной мощности подключение шестифазной системы к трехфазной сети, как правило, производят с помощью трехобмоточного блочного повышающего трансформатора при соединении обмоток генераторного напряжения в звезду и треугольник. Применение большего числа фаз в генераторах предельной мощности сопряжено со сложностями использования мощной преобразовательной техники, а потому не нашло применения.

Успешный опыт применения подобной схемы для генератора ТВВ-1200-2У3 мощностью 1200 МВт с шестифазной обмоткой статора на Костромской ГРЭС был использован при строительстве энергоблоков мощностью более 1000 МВт.

В то же время применению теории синхронной машины к шестифазным турбогенераторам в научно-технической литературе уделено мало

внимания [4–7], что связано с относительно небольшим их распространением. Указанные публикации затрагивают расчеты переходных режимов обособленных генераторов. При этом принятые подходы не ориентированы на описание процессов, подходящее для любых — установившихся или переходных — режимов и не ограниченное условиями наличия токов только в шести или трех фазах. В выборе базисных количеств отсутствует единый подход, что приводит к нарушению соотношений при расчетах в относительных единицах. Отсутствует построение уравнений состояния, описывающих поведение машины в эксплуатации.

Задача настоящей работы — рассмотреть и преобразовать к удобной форме уравнения состояния шестифазного турбогенератора. Это позволит в дальнейшем провести систематизацию определяющих параметров, получить схемы замещения, отражающие электромагнитные связи между контурами машины, и упростить физическую трактовку протекающих процессов.

## Объект исследования и принимаемые допущения

Рассмотрим неявнополюсный шестифазный синхронный генератор с одной парой полюсов на роторе. Ротор вращается против часовой

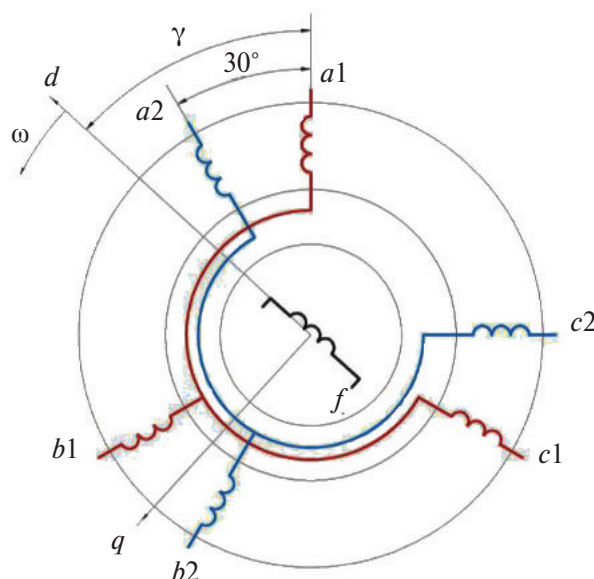


Рис. 1. Схема расположения осей фаз статора и ротора шестифазной неявнополюсной машины

стрелки и имеет обмотку возбуждения (контур  $f$ ), полностью аналогичную трехфазным турбогенераторам. Обмотка якоря образована двумя разобщенными симметричными трехфазными обмотками (фазы  $a1, b1, c1$  и  $a2, b2, c2$ ), вторая трехфазная система сдвинута относительно первой на 30 градусов по направлению вращения. Отсчет угловых координат иллюстрирует рис. 1. Кроме магнитных осей фаз статора, используются оси, определяемые магнитной симметрией ротора: продольная ( $d$ ) и поперечная ( $q$ ). Направление поперечной оси выбрано исходя из удобства записи соотношений в дальнейшем.

Используем обычные для трехфазных машин допущения. Магнитная проницаемость элементов магнитопровода постоянна. Пространственное распределение намагничивающих сил обмоток, полей самоиндукции и взаимоиндукции синусоидально. Магнитопровод и обмотки машины симметричны. В обмотках статора все фазы одинаковы по числу витков и активным сопротивлениям. Влияние ферромагнитного массива бочки ротора эквивалентизируется с помощью двух демпферных контуров (контуров  $ed$  и  $eq$ ). Для более скрупулезного исследования отдельных явлений влияние указанных допущений на результаты может учитываться дополнительно.

### Дифференциальные уравнения напряжений в фазных координатах

Для описания режимных задач синхронные машины рассматривают как некоторую электродинамическую систему, состоящую из совокупности электрических цепей и вращающегося ротора. Согласно второму закону Кирхгофа можно записать уравнения напряжений обмоток якоря ( $p$  – символ дифференцирования по времени):

$$\begin{aligned} U_{a1} &= p\Psi_{a1} - r_{a1}i_{a1}; & U_{a2} &= p\Psi_{a2} - r_{a2}i_{a2}; \\ U_{b1} &= p\Psi_{b1} - r_{b1}i_{b1}; & U_{b2} &= p\Psi_{b2} - r_{b2}i_{b2}; \\ U_{c1} &= p\Psi_{c1} - r_{c1}i_{c1}; & U_{c2} &= p\Psi_{c2} - r_{c2}i_{c2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Для роторных контуров справедливы соотношения, повторяющие аналогичные для трехфазной машины с двумя демпферными контурами:

$$\begin{aligned} U_{fd} &= p\Psi_{fd} + r_{fd}i_{fd}; \\ 0 &= p\Psi_{ed} + r_{ed}i_{ed}; \\ 0 &= p\Psi_{eq} + r_{eq}i_{eq}. \end{aligned} \quad (2)$$

На основании принятых допущений потокосцепления можно вычислять в виде суммы потокосцеплений самоиндукции и взаимоиндукции со всеми остальными рассматриваемыми контурами.

### Индуктивности само- и взаимоиндукции контуров ротора и статора

Вследствие неявнополюсности ротора и симметричности обмоток собственные индуктивности и взаимные индуктивности фаз не будут зависеть от положения ротора.

Собственные индуктивности фаз равны между собой. Взаимоиндукции фаз для каждой трехфазной системы тоже равны, что соответствует трехфазным машинам. Взаимоиндукции между фазами обеих систем могут быть равными, противоположными по знаку или равны нулю для фаз с перпендикулярными осями обмоток в зависимости от пространственного расположения фаз (см. рис. 1).

Взаимоиндукции между цепями статора и ротора зависят от положения обмотки возбуждения; выражения для них запишутся как функции угла  $\gamma$  вида  $m \cos(\gamma - \alpha)$ , где  $\alpha$  – соответствует углу между осью  $a1$  и осью статорной обмотки, взаимная индуктивность с которой определяется.

Между роторными контурами продольной оси взаимные индуктивности равны.

### Преобразование уравнений к координатам, вращающимся вместе с ротором

Часть индуктивностей выражаются гармоническими функциями времени, поэтому уравнения напряжений (1) и (2) являются дифференциальными уравнениями с переменными коэффициентами. При исследовании электрических машин сложилась практика их упрощения с помощью математических линейных преобразований координат [8, 9], с тем чтобы получить уравнения с постоянными коэффициентами.



Стоит отметить, что на современных ЭВМ можно выполнять с применением численных методов расчеты режимов работы электрических машин, не прибегая к линейным преобразованиям [10]. Однако с помощью таких расчетов трудно проследить физическую взаимосвязь между отдельными явлениями и параметрами машин; кроме того, периодические коэффициенты в уравнениях заставляют проводить дополнительные вычисления, повышая ресурсоемкость.

Воспользуемся линейным преобразованием координат  $d, q$ . Оно достаточно хорошо освещено в литературе, однако из-за присутствия шести фаз в новых координатах необходимо использовать шесть переменных. Ввиду наличия двух разоб- щенных трехфазных систем на статоре удобно рассматривать магнитное воздействие каждой системы отдельно, заменяя ее эквивалентными продольными, поперечными контурами и токами нулевой последовательности. Например, воздействие трех фаз первой системы в продольной оси машины будет эквивалентироваться контуром  $d1$ , а трех фаз второй системы — контуром  $d2$  и т.д.

В общем случае для каждой трехфазной системы можно использовать свои координатные оси  $d, q$ . Чтобы упростить уравнения и облегчить возможность сравнения с трехфазными машинами, для обеих систем будем использовать одну систему координат  $d, q$ .

Целесообразно использовать линейное преобразование для токов, применяемое для трехфазных машин. Переменные  $i_{d1}, i_{d2}, i_{q1}, i_{q2}, i_{01}, i_{02}$  имеют для каждой трехфазной системы общепринятый смысл соответственно продольного, поперечного и нулевого токов. При этом для токов  $i_{d2}, i_{q2}$  в линейных преобразованиях вместо угла  $\gamma$  должен использоваться угол  $\gamma - \pi/6$ , что связано с пространственным расположением обмоток.

Тогда потокосцепления ротора с учетом линейного преобразования токов в координатах  $d, q$  можно представить в виде

$$\begin{aligned}\Psi_{fd} &= \frac{3}{2}m_{afd}i_{d1} + \frac{3}{2}m_{afd}i_{d2} + L_{fd}i_{fd} + m_{fed}i_{ed}; \\ \Psi_{ed} &= \frac{3}{2}m_{aed}i_{d1} + \frac{3}{2}m_{aed}i_{d2} + m_{fed}i_{fd} + L_{ed}i_{ed}; \\ \Psi_{eq} &= -\frac{3}{2}m_{aeq}i_{q1} - \frac{3}{2}m_{aeq}i_{q2} + L_{eq}i_{eq}.\end{aligned}\quad (3)$$

Полученные выражения отличаются от известных для трехфазной машины наличием дополнительных членов  $3/2m_{afd}i_{d2}, 3/2m_{aed}i_{d2}, 3/2m_{aeq}i_{q2}$ , отражающих влияние второй трехфазной системы статора.

Используя линейные преобразования выражений для потокосцеплений, получим формулы для потокосцеплений первой системы в координатах  $d, q$ :

$$\begin{aligned}\Psi_{d1} &= (L_a - m_{alb1})i_{d1} + \sqrt{3}m_{ala2}i_{d2} + m_{afd}i_{fd} + m_{aed}i_{ed}; \\ \Psi_{q1} &= (L_a - m_{alb1})i_{q1} + \sqrt{3}m_{ala2}i_{q2} + m_{aeq}i_{eq}; \\ \Psi_{01} &= (L_a + 2m_{alb1})i_{01}.\end{aligned}$$

Для второй системы выражения аналогичны и получаются перестановкой индексов 1 и 2.

Как видим, индуктивности обеих трехфазных систем нулевой последовательности равны, не зависят от потокосцеплений с другой трехфазной системой и поэтому могут определяться как для обычной трехфазной обмотки.

Полученные выражения по форме отличаются от известных для трехфазных машин наличием в потокосцеплениях членов  $\sqrt{3}m_{ala2}i_{d2}, \sqrt{3}m_{ala2}i_{d1}, \sqrt{3}m_{ala2}i_{q2}, \sqrt{3}m_{ala2}i_{q1}$ , отражающих взаимные связи между трехфазными системами статора. Возникновение множителя  $\sqrt{3}$  перед взаимной индуктивностью  $m_{ala2}$  связано с выполняемым линейным преобразованием, поскольку обмотки со сдвинутыми на 30 эл.град. осями приводятся к одной оси. Соответственно изменив величину взаимной индуктивности между трехфазными системами при переходе к относительным единицам, можно избежать записи этих коэффициентов в уравнениях.

В практике исследования трехфазных машин пользуются приведенными токами и индуктивностями цепей ротора, позволяющими записать уравнение без коэффициентов  $3/2$  [11]. Необходимые преобразования обычно производятся одновременно с переходом к относительным единицам и могут быть применены при исследовании шестифазных машин.

#### Система относительных единиц

Для статора воспользуемся системой относительных единиц с широко распространенными базисными величинами [12], но со следующими отличиями.

Обычно для базисной мощности используется выражение  $P_6 = m/2 I_6 U_6$ , где  $m$  — число фаз. Однако имеет смысл за базисную мощность использовать мощность одной трехфазной системы:  $P_6 = 3/2 I_6 U_6$ . В этом случае величины соответствующих активных сопротивлений и индуктивностей, рассчитываемые для каждой системы отдельно, будут сопоставимы с параметрами обычных синхронных машин, которые приводятся в справочниках, используются для настройки релейных защит и т.д.

В этом случае при номинальной нагрузке обеих трехфазных систем момент на валу будет равен 2 о.е. (такой же будет номинальная мощность генератора).

Базисные величины для контуров ротора принято выбирать исходя из удобства исследования. В данном случае, когда по каждой из осей учитывается одна демпферная обмотка, целесообразно принимать базисные мощности всех контуров равными —  $P_6 = P_{\text{я}} = P_{\text{сб}}$ , а базисные токи такими, чтобы обеспечить равенство относительных значений взаимоиндуктивностей (так называемые базисные единицы Ранкина [8]). Для демпферного контура в поперечной оси принимаются те же базисы, что и для контура в продольной оси.

В таком случае выражения упрощаются, сокращается количество параметров, наиболее просто составляются эквивалентные схемы замещения.

#### Уравнения шестифазного турбогенератора в относительных единицах

Формально индуктивные сопротивления по продольной ( $x_d$ ) и поперечной ( $x_q$ ) осям, входящие в выражения для потокосцеплений, целесообразно представить в более удобном для физической трактовки виде: так же, как это практикуется для трехфазных машин, состоящими из двух составляющих —  $x_{ad}$ , соответствующей полю основной гармонической, связанной с ротором, и  $x_{\sigma}$ , соответствующей полям рассеяния обмотки статора.

Такой же подход удобно распространить и на соответствующее взаимной индуктивности между трехфазными системами индуктивное сопротивление  $x_{12} = x_{ad} + x_{\sigma 12}$ .

Взаимная индуктивность  $x_{ad}$  по пути основного потока и индуктивность  $x_{\sigma 12}$  по путям потоков рассеяния между трехфазными системами из-за симметричности обмоток статора для продольной и поперечной осей будут одинаковыми.

Индуктивность рассеяния каждой трехфазной системы можно представить в виде суммы собственного рассеяния  $x_{\sigma 11}$ ,  $x_{\sigma 22}$  и взаимного рассеяния с другой системой  $x_{\sigma 12}$ , то есть  $x_{\sigma 1} = x_{\sigma 11} + x_{\sigma 12}$  и  $x_{\sigma 2} = x_{\sigma 22} + x_{\sigma 12}$ .

Такое представление облегчает исследование режимов при различных нагрузках трехфазных систем.

Используя введенную систему относительных единиц и приведенные выше соображения, запишем систему уравнений состояния для контуров ротора и первой трехфазной системы статора шестифазного турбогенератора (аналогично уравнениям Парка—Горева трехфазной машины)

$$\begin{aligned} U_{d1} &= p\Psi_{d1} - \Psi_{q1}p\gamma - r i_{d1}; & U_{q1} &= p\Psi_{q1} + \Psi_{d1}p\gamma - r i_{q1}; \\ U_{01} &= p\Psi_{01} - r i_{01}; & U_{fd} &= p\Psi_{fd} + r_{fd} i_{fd}; \\ 0 &= p\Psi_{ed} + r_{ed} i_{ed}; & 0 &= p\Psi_{eq} + r_{eq} i_{eq} \end{aligned}$$

и уравнения связи токов и потокосцеплений

$$\begin{aligned} \Psi_{d1} &= x_{\sigma 11} i_{d1} + x_{\sigma 12} (i_{d1} + i_{d2}) + x_{ad} (i_{d1} + i_{d2} + i_{fd} + i_{ed}); \\ \Psi_{q1} &= x_{\sigma 11} i_{q1} + x_{\sigma 12} (i_{q1} + i_{q2}) + x_{aq} (i_{q1} + i_{q2} + i_{eq}); \\ \Psi_{01} &= x_0 i_{01}; \\ \Psi_{fd} &= x_{\sigma fd} i_{fd} + x_{ad} (i_{d1} + i_{d2} + i_{fd} + i_{ed}); \\ \Psi_{ed} &= x_{\sigma ed} i_{ed} + x_{ad} (i_{d1} + i_{d2} + i_{fd} + i_{ed}); \\ \Psi_{eq} &= x_{\sigma eq} i_{eq} + x_{aq} (i_{q1} + i_{q2} + i_{eq}). \end{aligned}$$

(5)

Для второй системы выражения аналогичны и получаются перестановкой индексов 1 и 2.

#### Уравнение движения ротора

Уравнения электрических контуров необходимо дополнить уравнением, описывающим движение вращающегося ротора. Определяя для установившегося режима электромагнитный момент генератора через сумму полной мощности и мощности электрических потерь, можно записать дифференциальное уравнение движения ротора следующим образом:

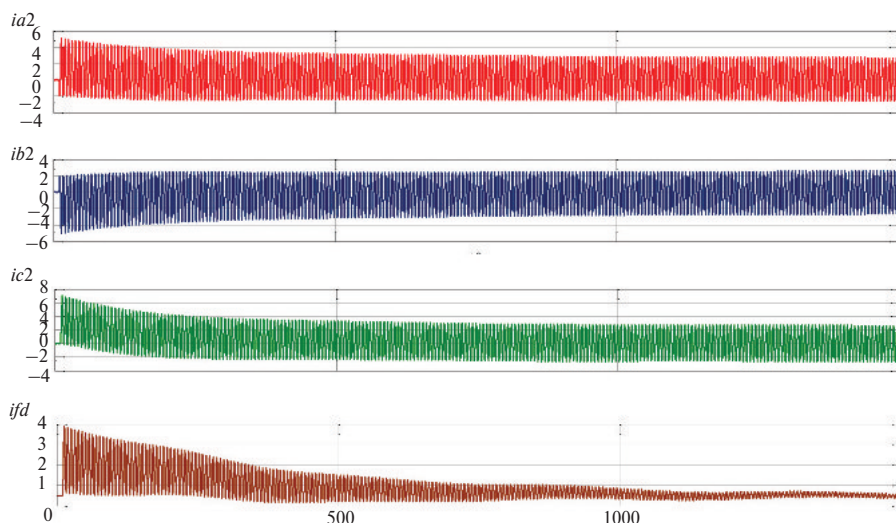


Рис. 2. Фазные токи короткозамкнутой системы и ток возбуждения

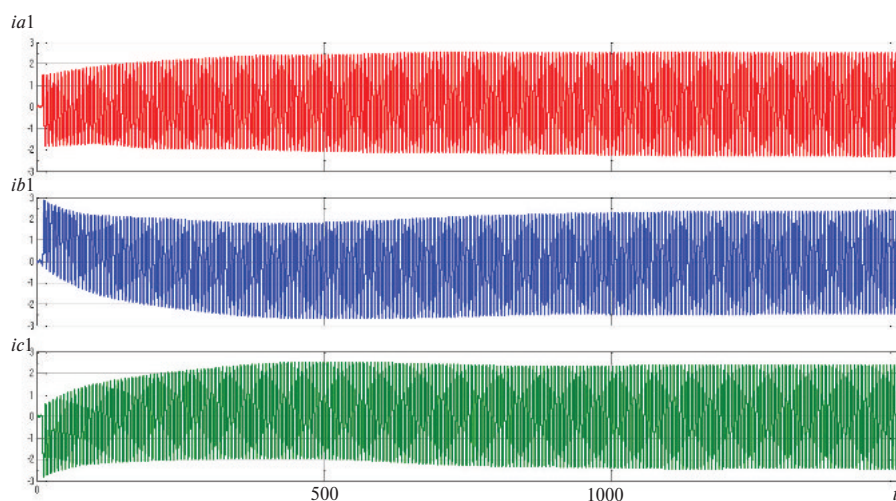


Рис. 3. Фазные токи системы, включенной на сеть

$$Jp\omega = \frac{3}{2}(\Psi_{d1}i_{q1} + \Psi_{d2}i_{q2} - \Psi_{q1}i_{d1} - \Psi_{q2}i_{d2}) + m_t.$$

### Применение полученных уравнений

Преимущества при описании электрических машин уравнениями в осях  $d, q$ , жестко связанных с ротором, известны [8]. Используя их, удобно рассматривать установившиеся режимы. В этом случае производные от потокоцеплений равны нулю, а от угла  $\gamma$  — равны единице, и тогда выражения становятся просты и наглядны.

Возьмем как пример режим установившегося трехфазного короткого замыкания первой

системы при разомкнутой второй. При пренебрежении активным сопротивлением реакция якоря будет продольная размагничивающая, и ток короткого замыкания совпадает с осью  $d$  [8], а вектор напряжения второй системы — с осью  $q$ . Таким образом, в выражениях (4) и (5) необходимо положить:  $i_{d1} = \text{const}$ ;  $i_{d2}, i_{q1}, i_{q2}$  равны нулю;  $U_{d1}, U_{d2}, U_{q1}$  также равны нулю и  $U_{q2} = \text{const}$ . После чего эти выражения сведутся к системе из двух линейных уравнений.

В случае установившегося шестифазного короткого замыкания условиями по токам будут:  $i_{d1}, i_{d2} = \text{const}$ ;  $i_{q1}, i_{q2}$  равны нулю; а по напряже-

ниям —  $U_{d1}, U_{d2}, U_{q1}, U_{q2}$  равны нулю. Тогда уравнения (4) и (5) сведутся к одному линейному уравнению.

Уравнения (4), (5) могут быть применены для анализа режимных задач путем совместного решения по аналогии с хорошо проработанными методами трехфазных генераторов. Это сводится к следующему: определению начальных условий по напряжениям внешних источников; решению системы дифференциальных уравнений состояния (4) численными методами, при этом на каждом шаге должны быть решены алгебраические уравнения связи (5); нахождению величин в фазных координатах. Величины в фазных координатах могут быть определены через переменные в  $d, q$  координатах с использованием обратных преобразований, аналогичных широко освещенным в литературе [8, 9].

Предложенный подход был реализован на базе программного комплекса Matlab Simulink; он позволяет исследовать широкий спектр эксплуатационных и аварийных режимов, в том числе при работе генератора в энергосистеме. Например, на рис. 2, 3 представлены результаты расчета внезапного трехфазного короткого замыкания второй системы генератора мощностью 1200 МВт при первой системе, включенной на сеть.

Расчетные результаты сопоставимы с опытными, полученными при приемочных испытаниях оборудования. Следует отметить, что результаты анализа существенно зависят от точности задания используемых параметров.

## Выводы

Шестифазные турбогенераторы за счет наличия индуктивной связи между трехфазными системами обмотки статора обладают рядом специфических особенностей.

Произведено преобразование уравнений шестифазного генератора к вращающимся синхронно с ротором  $d, q$  координатам, позволяющее перейти от уравнений с переменными коэффициентами к линейным. Выявлены отличия от известных уравнений для трехфазных машин.

Произведен выбор относительных единиц, позволяющих упростить полученные выражения и проводить сопоставление параметров с параметрами обычных трехфазных машин.

В относительных единицах получены уравнения состояния шестифазного турбогенератора, аналогичные уравнениям Парка–Горева, позволяющие проводить исследования режимов работы и переходных процессов методами, известными для трехфазных турбогенераторов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Роберт П., Диспо Р., Дасье Ж. Повышение коэффициента полезного действия турбогенераторов // Экспресс-информация. Электрические машины и аппараты. 1966. № 31. С. 9–25.
2. Шильдинер Л.М. К вопросу о повышении удельной мощности турбогенераторов // Электротехника. 1968. №10. С. 6–8.
3. Chan K., Oesterheld J., Walli K.-D. Flexible Turbogenerator Converter System With Enhanced Grid Support Features - Design and Applications // CIGRE. Study Committee A1 meeting and colloquium "Rotating electrical machines: requirements, operation & maintenance". September 6th -11th, 2015, Madrid, Spain.
4. Хуторецкий Г.М. Шестифазные турбогенераторы // «Электросила». 1970. №28. С. 33–40.
5. Хуторецкий Г.М. Схемы замещения шестифазной неявнополюсной машины // Известия вузов. Электромеханика. 1970. №1. С. 27–33.
6. Хуторецкий Г.М., Воронов Г. Г. Шестифазные обмотки турбогенератора // Электротехника. 1968. № 10. С. 1–6.
7. Хуторецкий Г.М. Индуктивные сопротивления шестифазных турбогенераторов при двойных двухфазных замыканиях // Электричество. 1978. №4. С. 42–47.
8. Важнов А.И. Основы теории переходных процессов синхронной машины. М., Л.: ГЭИ, 1960. 312 с.
9. Горов А.А. Переходные процессы синхронной машины. М., Л.: ГЭИ, 1950. 551 с.
10. Адалев А.С., Кучинский В.Г., Попков Е.Н., Фильчиков А.И., Чайка В.М. Имитационная модель шестифазной вентильной машины с возбуждением от постоянных магнитов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2012. № 2(147). С. 283–291.
11. Concordia C. Relations among Transformations Used in Electrical Engineering Problems // General Electric Review. 1938. July, P. 323–325.
12. Стрижков И.Г. Системы относительных единиц в теории синхронных машин с несколькими обмотками на статоре // Научный журнал КубГАУ. 2013. №91(07). С. 37–43.



## REFERENCES

1. Robert P., Dispaux Y., Dacier Y. Povishenie koeffitsienta poleznogo deistviya turbogeneratorov. [Turbogenerators efficiency improvement]. *Express-informatsiya. Elektricheskie mashiny i apparaty*. 1996. № 31. S. 9–25 (rus)
2. Shildiner L.M. K voprosu o povyshenii udelnoy moshchnosti turbogeneratorov. [Step-up of turbogenerator specific capacity]. *Elektrotehnika*. 1968. № 10. S. 6–8. (rus)
3. Chan K., Oesterheld J., Walli K.-D. Flexible Turbogenerator Converter System With Enhanced Grid Support Features - Design and Applications. *SIGRE. Study Committee AI meeting and colloquium "Rotating electrical machines: requirements, operation & maintenance"*. September 6th -11th, 2015. Madrid, SPAIN.
4. Khutoretskiy G.M., Voronov G.G. Shestifaznyye turbogeneratory. [Six-phase turbogenerators]. «*Elektrosila*». 1970. № 28. S. 33–40. (rus)
5. Khutoretskiy G.M. Skhemy zameshcheniya shestifaznoy neyavnopolyusnoy mashiny. [Six-phase non-silent pole machine equivalent circuits]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*. 1970. № 1. S. 27–33. (rus)
6. Khutoretskiy G.M., Voronov G.G. Shestifaznyye obmotki turbogenerators [Six-phase winding for turbogenerators]. *Elektrotehnika*. 1968. № 10. S. 1–6. (rus)
7. Khutoretskiy G.M. Induktivnyye soprotivleniya shestifaznykh turbogeneratorov pri dvoynnykh dvukhfaznykh zamykaniyakh [Reactance of six-phase turbogenerators during double two-phase short-circuits]. *Elektrichestvo*. 1978. № 4. S. 42–47. (rus)
8. Vazhnov A.I. Osnovy teorii perekhodnykh protsessov sinkhronnoy mashiny [Foundation of transient analysis for synchronous machines]. Moscow – Leningrad: GEI, 1960. 312 s. (rus)
9. Gorev A.A. Perekhodnyye protsessy sinkhronnoy mashiny [Transient analysis for synchronous machines] Moscow–Leningrad: GEI, 1950, 551 s. (rus)
10. Adalev A.S., Kuchinskiy V.G., Popkov Ye.N., Filchikov A.I., Chayka V.M. Imitatsionnaya model shestifaznoy ventilnoy mashiny s возбуждением от postoyannykh magnitov [Simulation model of six-phase converter-fed machine with permanent magnets excitation]. *Naychno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU*. 2012. № 2(147). T. 1. S. 283–291. (rus)
11. Concordia C. Relations among Transformations Used in Electrical Engineering Problems General. *Electric Review*. 1938, July. P. 323–325.
12. Strizhkov I.G. Sistemy otnositelnykh yedinit v teorii sinkhronnykh mashin s neskolkimi obmotkami na statore [Per unit systems in theory of synchronous machines with several windings at stator]. *Nauchnyy zhurnal KubGAU*. 2013. № 91(07). S. 37–43. (rus)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

ГРИШИН Николай Васильевич — руководитель группы, ОАО «Силовые машины».  
195009, Санкт-Петербург, ул. Ватутина, 3А.  
E-mail: kostroma44@gmail.com

GRISHIN Nikolai V. — OJSC "Power Machines".  
3A, Vatutina str., St. Petersburg, Russia, 195009.  
E-mail: kostroma44@gmail.com

DOI 10.5862/JEST.243.3

УДК 621.577.42

*И.Д. Аникина, В.В. Сергеев, Н.Т. Амосов, М.Г. Лучко*

## **ТЕПЛОВЫЕ НАСОСЫ В СХЕМАХ ДЕАЭРАЦИИ ПОДПИТОЧНОЙ ВОДЫ ТЭЦ**

*I.D. Anikina, V.V. Sergeev, N.T. Amosov, M.G. Luchko*

## **HEAT PUMPS IN SCHEMES OF MAKE-UP WATER DEAERATION IN A THERMAL POWER PLANT**

Рассматривается возможность применения установок парокомпрессионных тепловых насосов для повышения эффективности производства тепловой энергии на тепловых электрических станциях. Расчеты сделаны для тепловой электрической станции филиала «Невский» ОАО «ТГК-1» – Правобережной ТЭЦ-5. Они производились для тепловых насосов различной мощности с теплоотпуском 2 и 50 МВт. Анализ эффективности использования ТНУ в тепловой схеме ТЭЦ произведен путем детальной расчетной оценки влияния на режим работы станции с определением характеристик ТНУ при различных режимах работы ТЭЦ в целом по отпуску теплоты и электроэнергии. Предложена схема использования теплового насоса для подогрева подпиточной воды теплосети перед вакуумным деаэратором. Рекомендованный источник низкопотенциального тепла – циркуляционная вода после конденсатора паровой турбины ПГУ-блока. Рассмотрены различные варианты использования тепла от теплового насоса. При реализации схемы использования ТНУ тепловой мощностью 50 МВт для увеличения теплоотпуска от станции экономия топлива достигает 57,3 тыс. т у.т./год (3 % от суммарного годового расхода топлива), срок окупаемости такой установки – менее двух лет.

ТЕПЛОВОЙ НАСОС; ТЭЦ; ЭФФЕКТИВНОСТЬ; ПОДПИТОЧНАЯ ВОДА; РЕЖИМЫ РАБОТЫ.

The paper considers installing vapor compression heat pumps at thermal power stations with the purpose of increasing the electrical power generation efficiency. All calculations were made for the Pravobereznaya CHPP-5 thermal power station of the Nevsky branch of the TGC-1 JSC. The calculations were made for heat pumps with different heat capacities of 2 MW and 50 MW. The efficiency of the heat pump system within the heat grid of the power station was analyzed through a detailed calculated estimate of the effect on the operating mode of the station with simultaneous calculation of the heat pump characteristics. The analysis was performed for different operating modes of the station. We proposed a scheme for using the heat pump for heating the make-up water in the heat supply system before it enters the vacuum deaerator. The cooling water located after the condenser on the combined cycle power unit is recommended as a low-energy heat source. Different alternatives of using the heat from the heat pump have been analyzed and the results demonstrate that the schematic application of heat pumps with the heat capacity of 50 MW to increase the heat generation in the heat supply system is commercially viable. The reference fuel economy runs at 57.3 thousands of tons per year and the payback time will be less than 2 years.

HEAT PUMP; CHP; EFFICIENCY; MAKE-UP WATER; MODES OF OPERATION.

### **Введение**

Производство электрической и тепловой энергии на ТЭЦ сопровождается образованием значительного объема вторичных энергетических ресурсов (ВТЭР). Поэтому создание уста-

новок для утилизации ВТЭР – это перспективный способ повышения эффективности ТЭЦ. Использование теплонасосных установок (ТНУ) для утилизации ВТЭР вызывает научный интерес уже не одно десятилетие.

Переход к рыночной модели оценки экономических показателей работы энергетических объектов оказал значительное влияние на принятие решений, определяющих выбор оборудования и режимы эксплуатации теплоэлектростанций (ТЭЦ). Поэтому решение задачи повышения эффективности работы ТЭЦ требует учета технических и экономических факторов, таких, как особенности технологической схемы ТЭЦ, климатологические характеристики объекта, состояние эксплуатируемого оборудования, режимы работы ТЭЦ и особенности трейдинговой деятельности. Оценка эффективности использования ТНУ в составе ТЭЦ должна производиться с учетом всех перечисленных технических и экономических факторов.

### Цель и задачи работы

Цель нашей работы — исследовать эффективность применения парокompрессионных тепловых насосов в технологических схемах теплоэлектростанций с учетом производства и потребления тепловой энергии. Для анализа эффективности применения ТНЦ в составе работающей ТЭЦ была выбрана тепловая электрическая станция филиала «Невский» ОАО «ТГК-1» — Правобережная ТЭЦ-5.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

разработать схемные решения, повышающие эффективность процесса когенерации на ТЭЦ, т. е. произвести выбор места установки теплового насоса, источника низкопотенциального теп-

ла (ИНТ) в составе тепловой схемы ТЭЦ, а также определить варианты использования полученного тепла от ТНУ для оптимизации работы ТЭЦ;

разработать имитационную модель технологической схемы ТЭЦ-5, адекватную фактическим характеристикам станции и обладающую возможностью подключения ТНУ;

выполнить анализ влияния ТНУ различных мощностей на технико-экономические показатели работы ТЭЦ в основных режимах работы станции;

произвести оценку экономической эффективности энергосберегающих мероприятий, реализуемых с помощью теплонасосных технологий.

### Схемное решение

Анализ ИНТ по ряду характеристик (тепловая мощность, температурный уровень, часовой расход, степень концентрации примесей, условия выделения и содержание примесей в воде, химическое воздействие источника на металлы, рабочие вещества и окружающую среду [1, 2]) показал, что перспективным источником теплоты низкого потенциала на ТЭЦ-5 является охлаждающая вода конденсатора паровой турбины ПГУ-блока. На рис. 1 показано изменение теплоэнергетического потенциала этого ИНТ по месяцам за год (в октябре блок не работал). Потенциал данного источника низкопотенциальной теплоты позволяет использовать ТНУ широкого диапазона мощности — до 50 МВт тепловой мощности.

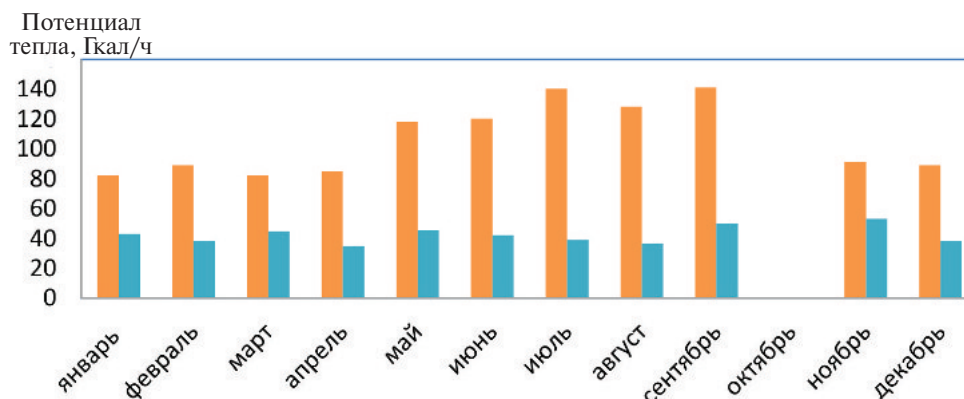


Рис. 1. Потенциал сбросного тепла циркуляционной воды ПГУ-блока ТЭЦ-5  
(■ —  $Q_{\text{ср}}$ ; ■ —  $Q_{\text{мин}}$ )



Выбор охлаждающей воды в оборотной системе технического водоснабжения в качестве ИНТ позволит:

- снизить количество сбрасываемой теплоты;
- сократить расход циркуляционной воды, поступающей на градирни, а следовательно, сократить расход электроэнергии на привод циркуляционных насосов;

- снизить температуру циркуляционной воды на входе в паровую турбину (ПТ) и, как следствие, углубить вакуум в конденсаторе ПТ;

- улучшить экологические показатели ТЭЦ.

После определения источника низкопотенциального тепла необходимо осуществить выбор потребителя тепла от ТНУ в составе ТЭЦ.

Тепло, полученное с помощью мощных ТНУ, на ТЭЦ, работающих в открытой системе теплоснабжения, можно использовать для двух целей: для подогрева подпиточной воды теплосети (подпитка); для подогрева обратной сетевой воды (ОСВ) теплосети.

Для общего теплового баланса ТЭЦ эти варианты равноценны, однако эффективность работы ТНУ зависит от величины перепада температур между источником и потребителем тепла от ТНУ [3] (чем перепад меньше, тем эффективность выше [4]). Поэтому предпочтительным вариантом использования тепловой нагрузки от ТНУ большой мощности является подогрев подпиточной воды теплосети перед системой ваку-

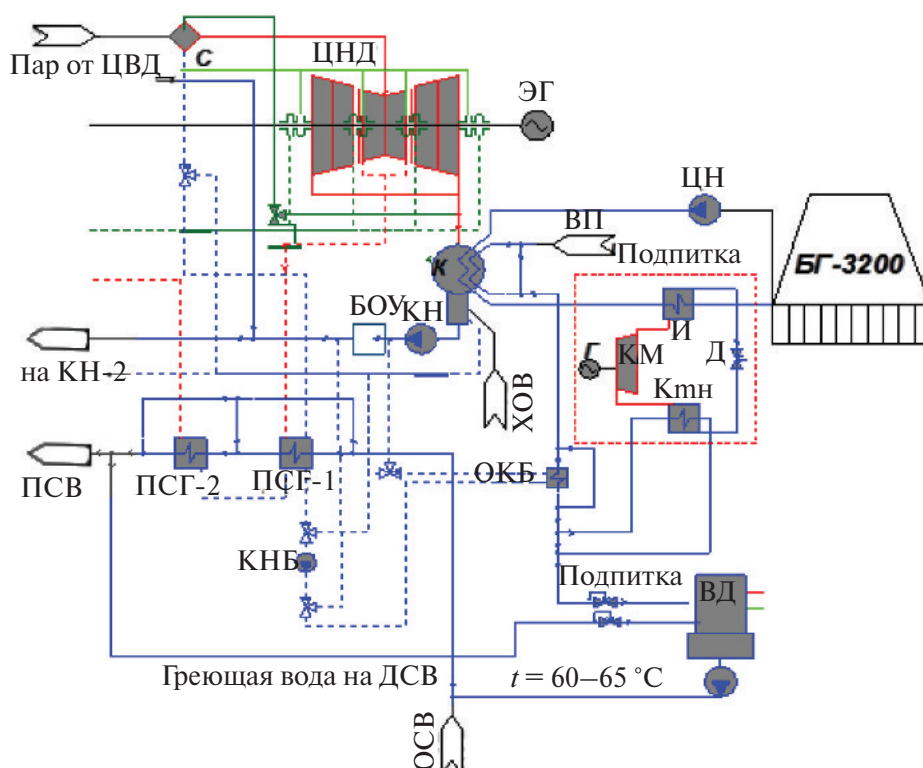


Рис. 2. Схема использования парокомпрессионного теплового насоса для подогрева подпиточной воды (подпитка) теплосети ТЭЦ-5:

ВД – цилиндр высокого давления; ЦНД – цилиндр низкого давления; ЭГ – генератор электроэнергии; К – конденсатор паровой турбины; ВП – встроенный пучок конденсатора; ЦН – циркуляционный насос; БГ – башенная градирня; КН – конденсатный насос; БОУ – блочная обессоливающая установка; ХОВ – химически очищенная вода; Г – генератор ТНУ; И – испаритель ТНУ; ТНУ – теплонасосная установка; КМ – компрессор ТНУ; К<sub>тн</sub> – конденсатор ТНУ; Д – дроссельный вентиль ТНУ; ПСВ – прямая сетевая вода; ПСГ – сетевой подогреватель горизонтального типа; ОКБ – охладитель конденсата бойлера; КНБ – конденсатный насос бойлера; ВД – вакуумный деаэратор

Исходя из вышеизложенного для ТЭЦ-5 предлагается ТНУ в составе ПГУ-блока за охладителем конденсата бойлеров (ОКБ) (рис. 2), а в качестве источника низкопотенциального тепла — охлаждающая вода после конденсаторов паровой турбины.

## Метод исследования

Методом для исследования динамики показателей работы теплоэлектроцентралей при-

Степень детализации созданной тепловой схемы в САПР «United Cycle» определялась следующим условием: математическая модель ТЭЦ должна обеспечить возможность имитации такого же разнообразия эксплуатационных режимных состояний, какими обладает реальная ТЭЦ [6, 7]. На рис. 3 показана расчетная схема ПГУ-блока, набранная в САПР «United Cycle» и являющаяся частью расчетной тепловой схемы ТЭЦ. Полная математическая модель станции состоит из паротурбинного блока с турбиной Т-180, бинарного парогазового блока 450-Т, паровой котельной и пиковой водогрейной котельной, имеющей восемь водогрейных котлов.

Проверка адекватности созданной математической модели по отношению к реальной ТЭЦ

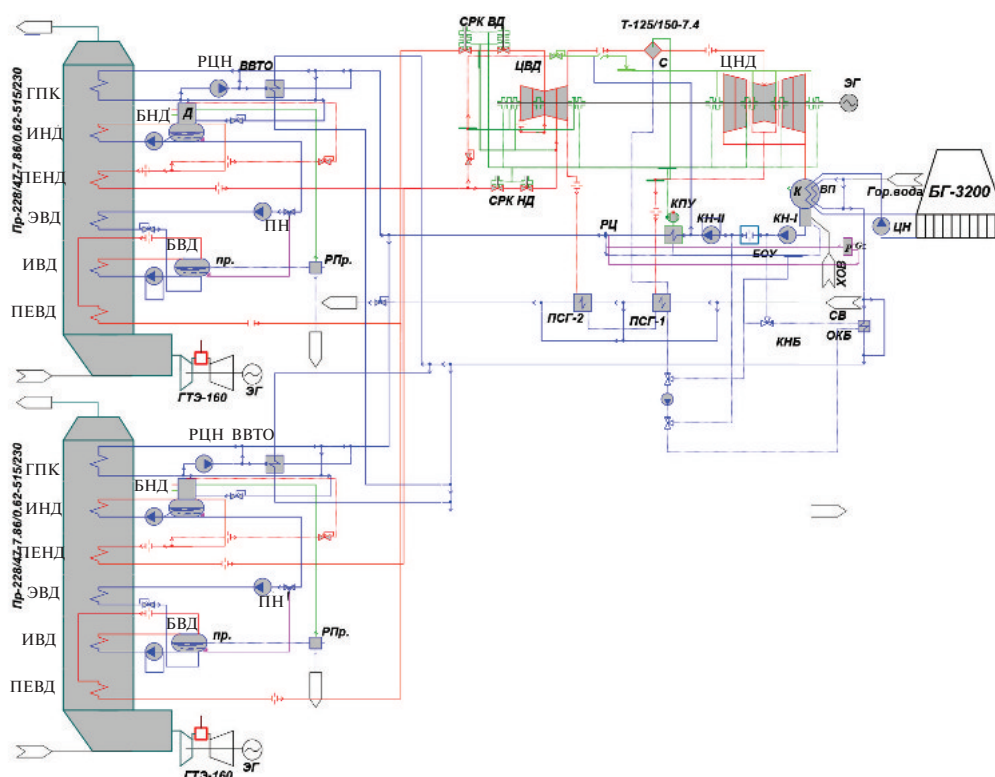


Рис. 3. Расчетная тепловая схема в САПР «United Cycle».

Таблица 1

**Сравнение контрольных (фактических) данных о работе ПГУ-блока  
с результатами расчета в САПР «United Cycle»**

Наименование параметра	Контрольное значение	Расчет UC
<i>Газотурбинная установка (ГТУ)</i>		
Температура наружного воздуха, °C	–1,8	–1,8
Давление наружного воздуха, кПа	0,1013	0,1013
Влажность наружного воздуха, %	90	90
Температура газов на выходе ГТУ, °C	535,7	535,7
Расход газов на выходе ГТУ, кг/с	529,4	529,4
Мощность ГТУ, МВт	165,3	165,3
Кпд ГТУ, %	34,07	34,05
<i>Котел-утилизатор (КУ)</i>		
Расход пара высокого давления (ВД) КУ, т/ч	233,8	236,3
Температура пара ВД на выходе КУ, °C	510,3	510,4
Расход пара низкого давления (НД) КУ, т/ч	49,6	51,8
Температура пара НД на выходе КУ, °C	232,9	232,5
<i>Паровая турбина</i>		
Расход пара ВД, т/ч	467,9	473
Температура пара ВД, °C	508,1	507
Давление пара ВД, кг/см <sup>2</sup>	75,68	75,68
Расход пара НД, т/ч	100,2	103
Температура пара НД, °C	231,3	232
Давление пара НД, кг/см <sup>2</sup>	6,61	6,61
Температура подпиточной воды, °C	5	5
Расчетное давление в конденсаторе, кг/см <sup>2</sup>	0,019	0,0232
Расход сетевой воды (СВ), т/ч	5000	5000
Температура СВ на входе в сетевые подогреватели, °C	51,0	51,0
Температура СВ на входе в сетевые подогреватели, °C	107,7	108
Мощность на клеммах генератора, МВт	113,27	115,1

производилось методом поэтапного анализа параметров режимов, рассчитанных с помощью САПР «United Cycle» (расчет UC), и контрольных параметров работы ПГУ-блока, полученных от персонала станции. Пример такого сравнения для зимнего режима работы при температуре наружного воздуха –1,8 °C показан в табл. 1; относительная величина отклонения рассчитанных параметров от контрольных составляет не более 2 %.

Важным моментом, влияющим на эффективность совместной эксплуатации ТЭЦ и теплового насоса, является выбор варианта применения полученного тепла от ТНУ. В работе рассматри-

вались три возможности использования теплоты от ТНУ для изменения режима ТЭС:

1) использование теплоты после ТНУ для дополнительного производства электрической энергии ( $\uparrow N_{\text{выр}}$ ) за счет снижения нагрузок теплофикационных отборов паровых турбин; при этом отпуск тепла от ТЭЦ и суммарный расход топлива не изменяются;

2) тепловой насос используется для увеличения отпуска теплоты  $Q_{\text{от}}$  от ТЭЦ. При этом суммарная электрическая нагрузка ТЭЦ и суммарный расход сожженного топлива остаются неизменными;

3) использование отпуска теплоты после ТНУ для снижения расхода топлива ( $\downarrow B_p$ ), сожженного в камерах сгорания ГТУ (для ПГУ-блока). При этом суммарная выработка электроэнергии и отпуск тепла от ТЭЦ остаются неизменными.

### Результаты расчетов

Расчет удельных расходов условного топлива (УРУТ) на выработку электроэнергии и отпуск теплоты производился в соответствии с РД 34.08.552-95 «Методические указания по составлению отчета электростанции и акционерного общества энергетики и электрификации о тепло-

вой экономичности оборудования» [8]. Расчет производился для двух характерных режимов работы ТЭЦ-5: зимнего (в работе два энергоблока – паротурбинный и ПГУ) и летнего (с одним работающим ПГУ-блоком).

Изменение удельных расходов условного топлива на выработку электроэнергии и на отпуск тепла для Правобережной ТЭЦ-5 по трем вариантам использования тепла от ТНУ большой мощности ( $Q_{\text{ТНУ}} = 50 \text{ МВт}$ ) для зимнего и летнего режима работы станции представлено соответственно на рис. 4, а и б. Наибольшая экономия условного топлива достигается при использовании ТНУ для увеличения отпуска теплоты ( $\uparrow Q$ ) от станции.

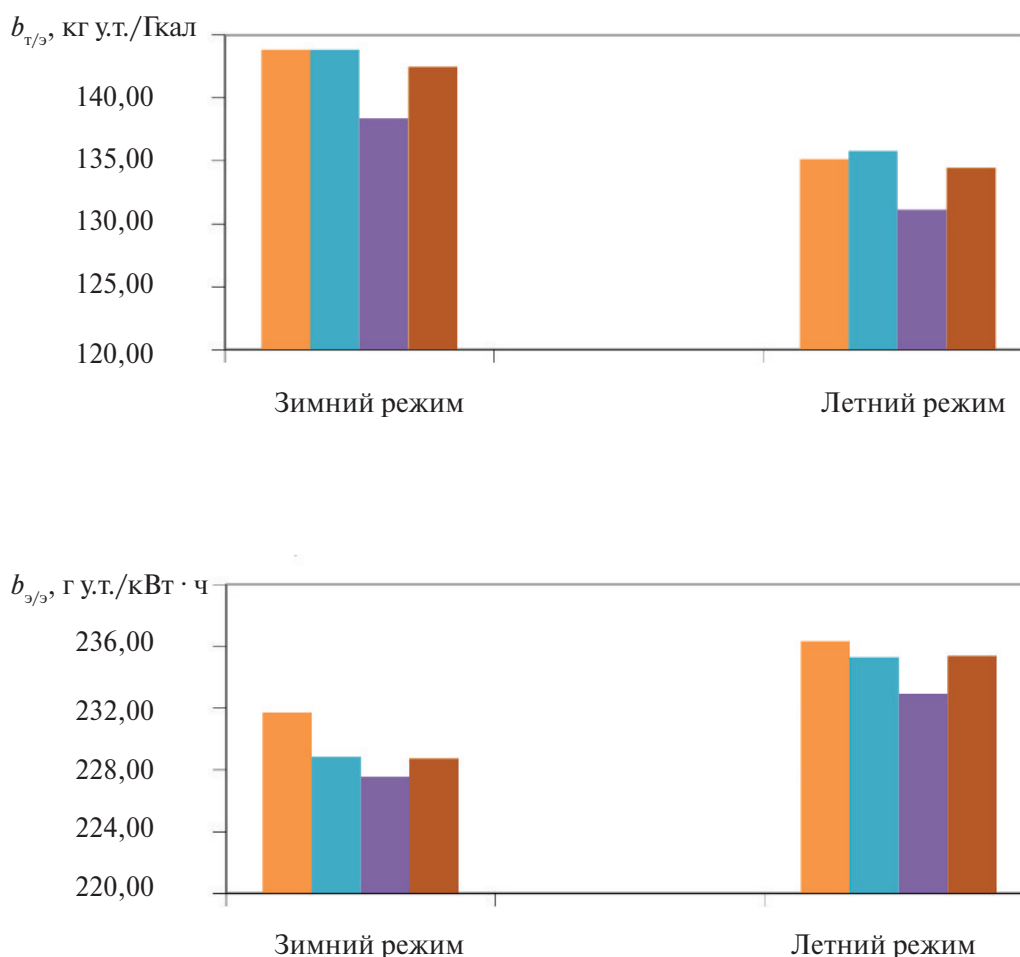


Рис. 4. Удельные расходы условного топлива для зимнего и летнего режимов при использовании теплонасосной установки с тепловой мощностью  $Q = 50 \text{ МВт}$  на ТЭЦ-5 в различных вариантах использования тепла от ТНУ:

а) удельный расход на отпуск тепла ( $b_{т/3}$ ); б) удельный расход на выработку электроэнергии ( $b_{э/3}$ )  
 (■ – факт; ■ –  $\uparrow N_{\text{выр}}$ ; ■ –  $\uparrow Q_{\text{от}}$ ; ■ –  $\downarrow B_p$ )

Анализ результатов расчета для ТНУ малой мощности показал, что применение ТНУ с теплоотпуском 2 МВт позволит снизить удельные расходы условного топлива на ТЭЦ по отпуску тепла до 0,3 кг у.т./Гкал а на выработку электроэнергии – до 0,4 г у.т./кВт·ч.

Годовая экономия топлива на ТЭЦ-5 для различных вариантов использования тепла от ТНУ составит:

при использовании ТНУ с  $Q = 50$  МВт для дополнительной выработки электроэнергии ( $\uparrow N_{\text{выр}}$ ) – 26,3 тыс.т у.т./год (1,4 % от общего расхода топлива);

при использовании ТНУ ( $Q = 50$  МВт) для дополнительного производства теплоты ( $\uparrow Q_{\text{от}}$ ) – 57,3 тыс.т у.т./год (3,0 % от общего расхода топлива);

при использовании ТНУ ( $Q = 50$  МВт) для экономии расхода топлива ( $\downarrow B_p$ ) – 12,1 тыс.т у.т./год (0,65 % от общего расхода топлива);

при использовании ТНУ с  $Q = 2$  МВт для производства теплоты хозяйственных и собственных нужд станции – 2,7 тыс.т у.т./год (0,19 % от общего расхода топлива).

Расчет для сопоставления вариантов производился при условии совместной работы основного оборудования и ТНУ для следующих исходных данных (табл. 2):

максимальная продолжительность эксплуатации – 7594 час/год;

максимальное число часов эксплуатации в зимнем режиме – 4666 часов;

Таблица 2

Исходные данные для расчета экономической эффективности использования тепловых насосов на ТЭЦ-5

Вариант использования ТНУ	Отпуск тепловой энергии, тыс. Гкал	Производство электроэнергии, млн кВт ч	Расход электроэнергии на собств нужды, млн кВт · ч	УРУт на выработку электроэнергии, г/кВт · ч	УРУТ на отпуск тепловой энергии, кг/Гкал
Без ТНУ	1597,4	4076,2	198,6	233,5	142,1
$Q_{\text{ТНУ}} = 50$ МВт:					
$\uparrow N_{\text{выр}}$	1597,4	4180,9	270,2	231,2	142,8
$\uparrow Q_{\text{от}}$	1877,4	4075,9	260,7	229,6	136,8
$\downarrow B_p$	1599,2	4076,8	264,5	231,2	141,4
ТНУ с $Q_{\text{ТНУ}} = 2$ МВт для хоз. и собств нужд ТЭЦ	1610,5	4076,2	199,6	233,2	141,8

Таблица 3

Оценка экономической эффективности использования ТНУ

Вариант использования ТНУ	Инвестиции, млн руб.	Срок окупаемости (РВ), лет	Дисконтированный срок окупаемости (ДРВ), лет	Чистый дисконтированный доход (NPV), млн руб.	Внутренняя норма доходности (IRR), %	Индекс рентабельности инвестиций (PI)	Средняя норма рентабельности (ARR)
$Q_{\text{ТНУ}} = 50$ МВт:							
$\uparrow N_{\text{выр}}$	425,1	8,30	9,98	95,3	0,19	1,22	0,12
$\uparrow Q_{\text{от}}$	425,1	1,85	2,45	1210,3	0,85	3,85	0,54
$\downarrow B_p$	425,1	более 15 лет	более 15 лет	—	—	—	—
ТНУ $Q_{\text{ТНУ}} = 2$ МВт для хоз. и собств нужд ТЭЦ	36,8	2,60	3,33	69,46	0,56	2,89	0,39

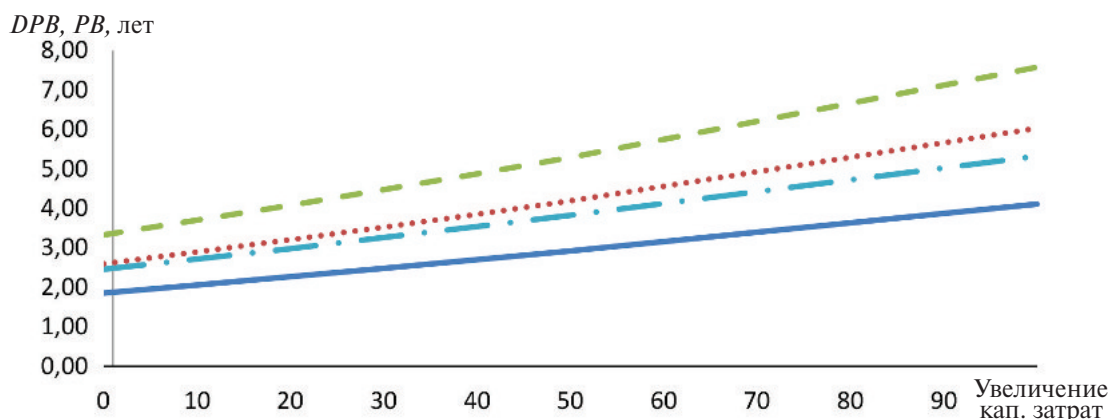


Рис. 5. Чувствительность проекта к увеличению капитальных затрат проектов:  
 - · - · -  $DPB Q_{\text{ТНУ}} = 50$  МВт; — — — —  $PB Q_{\text{ТНУ}} = 50$  МВт; · · · · · —  $DPB Q_{\text{ТНУ}} = 2$  МВт;  
 - - - - -  $PB Q_{\text{ТНУ}} = 2$  МВт

максимальное число часов эксплуатации в летний период — 2928 часов.

По результатам расчетов производства и реализации электрической и тепловой энергий, а также топливных издержек получены основные показатели эффективности использования ТНУ на ТЭЦ для всех рассматриваемых вариантов (табл. 3). Принято, что финансирование проекта будет осуществляться за счет собственных средств ОАО «ТГК-1», так как при использовании кредитных средств большая доля издержек идет на обслуживание кредита [9]. Наилучшие показатели экономической эффективности имеют два варианта применения ТНУ в составе ТЭЦ-5: использование для дополнительного производства теплоты на ТЭЦ-5 ТНУ с тепловой мощностью 50 и 2 МВт.

Основными рисками для реализации предложенных технических решений являются:

- изменение темпов роста цен на ОРЭМ;
- изменение темпов роста тарифа на тепловую энергию;
- изменение темпов роста цен на топливо;
- увеличение капитальных затрат [10].

Оценка потенциальных рисков производилась для двух указанных наиболее эффективных вариантов использования ТНУ. Анализ чувствительности показателей эффективности проектов к последнему виду риска показал, что даже при увеличении капитальных затрат в два раза сроки окупаемости составляют менее 8 лет (рис. 5). Оценка остальных рисков составляющих по-

казала их слабое влияние на основные экономические показатели эффективности проекта. Вариант использования ТНУ большой мощности с теплоотпуском 50 МВт наиболее устойчив к рискам, связанным с реализацией технического решения по установке теплового насоса на ТЭЦ.

### Выводы

Сравнительный анализ схем внедрения ТНУ для Правобережной ТЭЦ-5 показал, что использование ТНУ в составе ПГУ-блока для подогрева подпиточной воды теплосети перед системой вакуумных деаэраторов целесообразно с технической и экономической точки зрения.

Произведено исследование влияния на основные технико-экономические показатели ТЭЦ вариантов использования тепла от ТНУ, а также мощности ТНУ. Наибольшую экономичность показала схема использования ТНУ большой мощности (теплоотпуск 50 МВт) для увеличения отпуска тепла от ТЭЦ.

Экономия условного топлива при использовании такой установки на ТЭЦ составит 57,3 тыс. т у.т./год, что составляет 3,0 % от суммарного годового расхода топлива на ТЭЦ.

Срок окупаемости ТНУ составляет 1,85 лет; чистый дисконтированный доход — 1210,3 млн руб.

Анализ чувствительности показал, что даже при увеличении капитальных затрат в два раза срок окупаемости проекта составит менее 5 лет.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Молодкина М.А.** Повышение технико-экономических показателей парогазовых тепловых электростанций путем утилизации низкопотенциальной теплоты с использованием тепловых насосов: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук / СПб. СПбГПУ. 2012. 16 с.
2. **Амосов Н.Т.** Теплофикация и теплоснабжение: Учебное пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 236 с.
3. **Аникина И.Д.** Повышение эффективности процесса когенерации на тепловых электрических станциях с использованием теплонасосных установок // Сб.: Эффективная энергетика – 2015: материалы научно-практической конференции. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. С. 7–13.
4. **Горшков В.Г.** Тепловые насосы: Аналитический обзор // Справочник промышленного оборудования ВВТ. 2004. № 2. С. 47–80.
5. **Боровков В.М., Демидов О.И., Кутахов А.Г., Романов С.Н.** Тепловые схемы ПГУ: автоматизация конструирования и расчета // Электрические станции. 1994. № 7. С. 36–40.
6. **Демидов О.И., Жук Н.И., Иванов В.А., Корень В.М., Кутахов А.Г., Романов С.Н.** САПР “Тепловая
- схема”: комплексная автоматизация разработки, расчета и оптимизации тепловых схем энергоблоков ТЭС и АЭС // Труды СПбГТУ. Энергетические машины и установки. 1999. № 481. С. 115–123.
7. **Romanov S., Kutakhov A., Zhuk N., Demidov O., Romanov K.** Software ‘United Cycle’ for simulation of flow sheets of power plants// ECOS-2003. Kopenhagen. 2003. P. 1691–1696.
8. **РД 34.08.552-95.** Методические указания по составлению отчета электростанции и акционерного общества энергетики и электрификации о тепловой экономичности оборудования. М.: Изд-во СПО ОРГРЭС, 1995. 122 с.
9. **Буров В.Д., Дудолин А.А., Ильина И.П., Олейникова Е., Седлов А., Тимошенко Н.** Оценка эффективности применения тепловых насосов на парогазовых ТЭС// Вестник МЭИ. 2013. №3. С. 44–50.
10. **Аникина И.Д., Сергеев В.В., Амосов Н.Т., Лучко М.Г.** Использование тепловых насосов в технологических схемах генерации тепловой энергии ТЭЦ// Альтернативная энергетика и экология. 2016. № 3–4 (191–192). С. 39–49.

## REFERENCES

1. **Molodkina M.A.** Povysheniye tekhniko-ekonomicheskikh pokazateley parogazovykh teplovykh elektrostantsiy putem utilizatsii nizkopotentsialnoy teploty s ispolzovaniyem teplovykh nasosov: Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [The increasing of technical-and-economic indexes of CHP on the basis of heat pumps application]. St.Petersburg: SPbGPU Publ.,2012. – 16 s (rus)
2. **Amosov N.T.** Teplofikatsiya i teplosnabzheniye: Uchebnoye posobiye. [District heating cogeneration and heat supply system: Study guide]. SPb.: Izd-vo Politekhicheskogo un-ta, 2010. 236 s.
3. **Anikina I.D.** Povysheniye effektivnosti protsessa kogeneratsii na teplovykh elektricheskikh stantsiyakh s ispolzovaniyem teplonasosnykh ustanovok [Heat pumps application for icreasing the efficiency of the cogeneration at thermal power plants]. Effektivnaya energetika – 2015: materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Efficient Energetics - 2015: materials of scientificpractical conference]. St. Petersburg: SPbGPU Publ.,2015. S. 7–13. (rus)
4. **Gorshkov V.G.** Teplovyye nasosy. Analiticheskiy obzor [Heat pumps. Analytical review]. *Spravochnik promyshlennogo oborudovaniya VVT*. 2004. № 2. S. 47–80 (rus)
5. **Borovkov V.M., Demidov O.I., Kutakhov A.G., Romanov S.N.** Teplovyye skhemy PGU: avtomatizatsiya konstruirovaniya i rascheta [The flow sheet: the automation of design and calculation]. *Elektricheskiye stantsii*. 1994. № 7. S. 36–40. (rus)
6. **Demidov O.I., Zhuk N.I., Ivanov V.A., Koren V.M., Kutakhov A.G., Romanov S.N.** SAPR “Teplovaya skhema”: kompleksnaya avtomatizatsiya razrabotki, rascheta i optimizatsii teplovykh skhem energoblokov TES i AES [All-round automation of design, calculation and optimization of flow sheet of power unit on TPP and NPP]. *Trudy SPbGTU. Energeticheskiye mashiny i ustanovki*. 1999. № 481. S. 115–123. (rus)
7. **Romanov S., Kutakhov A., Zhuk N., Demidov O., Romanov K.** Software ‘United Cycle’ for simulation of flow sheets of power plants. *ECOS-2003*. Kopenhagen. 2003. P. 1691–1696.
8. **RD 34.08.552-95.** Metodicheskiye ukazaniya po sostavleniyu otcheta elektrostantsii i aktsionernogo obshchestva energetiki i elektrifikatsii o teplovoy ekonomichnosti oborudovaniya» [[Guidance Document 34.08.552–95. Procedural guidelines for writing reports of electric power generating stations and energy utility and electrification corporations on thermal efficiency of equipment]. Moscow: Izd-vo ORGRES, 1995. 122 s. (rus)
9. **Burov V.D., Dudolin A.A., Ilina I.P., Oleynikova Ye., Sedlov A., Timoshenko N.** Otsenka effektivnosti primeneniya teplovykh nasosov na parogazovykh TES. [Efficiency Evaluation of Heat Pump Implementation in Combined Cycle Power Plants ]. *Vestnik MEI*. 2013. №3. S. 44–50 (rus)



10. **Anikina I.D., Sergeyev V.V., Amosov N.T., Luchko M.G.** Ispolzovaniye teplovykh nasosov v tekhnologicheskikh skhemakh generatsii teplovoy energii TES. [Heat pumps application in flow-sheet of heat generation at thermal power plants]. *Alternativnaya energetika i ekologiya*. 2016. № 3–4 (191–192). S. 39–49 (rus)

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

**АНИКИНА Ирина Дмитриевна** — ассистент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

E-mail: ia.88@mail.ru

**ANIKINA Irina D.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

E-mail: ia.88@mail.ru

**СЕРГЕЕВ Виталий Владимирович** — доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского государственного политехнического университета Петра Великого.

E-mail: sergeev\_vitaly@mail.ru

**SERGEEV Vitalii V.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnical University addressworken.

E-mail: sergeev\_vitaly@mail.ru

**АМОСОВ Николай Тимофеевич** — кандидат технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

E-mail: nwp\_amossov@mail.ru

**AMOSOV Nikolai T.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

E-mail: nwp\_amossov@mail.ru

**ЛУЧКО Мария Геннадьевна** — руководитель проектов повышения эффективности ОАО «ТГК-1».

197198, РФ, Санкт-Петербург, БЦ «Арена Холл», пр. Добролюбова, 16, корп.2, литера А.

E-mail: Luchko.MG@tgc1.ru

**LUCHKO Mariia G.** — JSC “TGC-1”.

16 Dobroljubova Pr. Corp. 2, Litera A, Arena Hall Business Centre, St. Petersburg, Russia, 197198.

E-mail: Luchko.MG@tgc1.ru

DOI 10.5862/JEST.243.4

УДК 62.133.54: 62.986: 66.5

*Е.Г. Козин, Ю.В. Кожухов*

## **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ АУДИТ ПНЕВМОСИСТЕМЫ КАК ЭТАП В ПРОЦЕССЕ ЕЁ РЕКОНСТРУКЦИИ**

*E.G. Kozin, Yu.V. Kozhukhov*

### **TECHNOLOGICAL AUDIT OF A PNEUMATIC SYSTEM AS A STAGE IN ITS RECONSTRUCTION PROCESS**

Описана методика проведения и результаты пневмоаудита централизованной пневмосистемы с потребителями различного уровня требований к сжатому воздуху по давлению и классу очистки. Объектом исследования в представленной работе был комплекс действующей пневмосистемы для технических нужд потребителей площадки депо «Невское» ГУП «Петербургский метрополитен». Приведены данные обследования и экспериментальные характеристики объекта исследования при различных режимах эксплуатации, описаны недостатки существующей пневмосистемы. На основании многопараметрического анализа разработана принципиальная схема перспективной энергоэффективной пневмосистемы, которая взята за основу в разрабатываемом проекте технического перевооружения. Схема обеспечивает требования к технологическому процессу и повышению надежности пневмосистемы. Результаты работы применимы при техническом перевооружении, эксплуатации, проведении ремонтных работ и обслуживании пневмосистем депо.

**ПНЕВМОАУДИТ; ПНЕВМОСИСТЕМА; КОМПРЕССОР; ДЕПО МЕТРОПОЛИТЕНА; СЖАТЫЙ ВОЗДУХ; ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ.**

The article describes a technique for assessing a centralized pneumatic system with consumers with various levels of requirements to compressed air regarding pressure and class of cleaning, and presents the results of this assessment. The object of study is the working pneumatic system for the technical needs of the consumers of the platform of the Nevskoye depot of St Petersburg Metro SUE. The experimental characteristics of the object have been inspected under different modes of operation; the shortcomings of the existing pneumatic system are described. A schematic diagram of a potential power-effective pneumatic system is designed through multiple parameter analysis, and taken as a basis for the modernization project currently under development. The designed scheme provides requirements for the technological process and the increase in the reliability of the pneumatic system. The results of the study can be used for modernization, operation, repair and service of pneumatic depot systems.

**PNEUMATIC AUDIT; PNEUMATIC SYSTEM; COMPRESSOR; DEPOT SUBWAY; COMPRESSED AIR; INCREASE OF EFFICIENCY.**

Технологический аудит пневмосистемы (называемый также пневмоаудитом) является неотъемлемым этапом при её реконструкции, при восстановлении нормальной работоспособности существующей или строительстве новой пневмосистемы. Сущность пневмоаудита заключается в проведении комплексного детального инструментального и статистического обследования

состояния и эффективности работы пневмосистемы в целом и её объектов в частности с учётом их совместной работы в единой системе. На основе такого аудита предлагаются мероприятия по улучшению работы существующей пневмосистемы либо разрабатывается новая принципиальная схема воздухообеспечения и воздухоподготовки, которая обеспечит повышение

надежности и энергоэффективности пневмосистемы с учётом особенностей работы потребителей сжатого воздуха.

Цель данной работы — продемонстрировать эффективность разработанной методики пневмоаудита, включающего экспериментальные исследования рабочих процессов и режимов работы действующей пневмосистемы, и показать, как по результатам пневмоаудита формируется принципиальная схема реконструкции пневмосистемы. Работа выполнена на примере действующего объекта метрополитена г. Санкт-Петербург — депо «Невское».

### Постановка задачи

Работы по обновлению оборудования системы генерации сжатого воздуха начались с замены в компрессорной станции (КС), расположенной на территории депо, четырех поршневых компрессоров, изготовленных в советский период, на современные винтовые компрессоры. Проектом замены не учитывались повышенные требования к сжатому воздуху, подаваемому для заправки тормозной системы вагонов нового подвижного состава. В связи с этим, несмотря на выполненную замену двух поршневых компрессоров на винтовые, с момента начала обслуживания линии составами нового поколения удельное энергопотребление на производство сжатого воздуха компрессорной станцией возросло примерно на 20 %. Причиной роста потребления электроэнергии стало обеспечение установленных требований эксплуатации нового подвижного состава и, как следствие, необходимость сжатия всего вырабатываемого КС воздуха, подаваемого в единую пневмосеть, в том числе и на те ее участки, где повышать давление не требовалось. Это было вызвано действовавшей на тот момент схемой распределения сжатого воздуха, поскольку магистрали отдельных потребителей не изолировались друг от друга. Кроме того, в связи с изношенностью трубопроводов и запорной арматуры повышенное давление вызвало рост утечек, что привело к необоснованной генерации для восполнения потерь в пневмосети. Анализ совокупности выявленных негативных факторов продиктовал необходимость проведения пневмоаудита всей пневмо-

системы электродепо «Невское» и выработки рекомендаций для корректировки проекта по замене компрессоров и реконструкции системы распределения и потребления сжатого воздуха [1, 2]. Актуальность пневмоаудита объясняется тем, что одним из наиболее энергоёмких ресурсов в технологических процессах данного предприятия является сжатый воздух [3].

### Методика исследования

В ходе пневмоаудита было намечено провести экспериментальное исследование рабочих процессов и режимов работы действующей пневмосистемы и на основании этого выполнить разработку оптимальной модели энергоэффективной пневмосистемы депо метрополитена с последующей её реализацией в рамках комплексного технического перевооружения. Визуальные и инструментальные наблюдения проводились согласно программе и методике обследования [4], основой которых служат положения, изложенные в источниках [5, 6]. Эта методика предполагает проведение серии инструментальных замеров параметров работы пневмосистемы на различных режимах и анализ баланса генерации и потребления сжатого воздуха при условии гарантированного обеспечения нужд потребителей ресурса. Измерялись значения давлений в контрольных точках пневмосистемы, определялись значения расходов, фиксировалась динамика изменения давлений при изменении режимов работы по различным веткам потребления системы.

Технологический аудит представляет собой первый этап комплексного технического перевооружения систем генерации, распределения и потребления сжатого воздуха, расположенных на площадке депо. На втором этапе проводится детальная предпроектная проработка пневмосистемы с использованием имитационного математического моделирования для определения оптимальной конфигурации сети для всех режимов работы. На третьем этапе выполняется проектирование всех составляющих пневмосистемы на основе решений, предложенных по результатам первого и второго этапов. Четвертый этап включает закупку нового оборудования и проведение строительно-монтажных работ. Реше-

ния, определяющие облик и эффективность пневмосистемы, закладываются на первом и втором этапах, т.е. в процессах обследования (или, используя широко применяемый термин, пневмоаудита) и имитационного математического моделирования.

В ходе технологического аудита были проведены следующие основные мероприятия:

1. Статистическое обследование параметров пневмосистемы, а именно: собраны и проанализированы документальные данные о потреблении энергоресурсов компрессорными установками, о расходе воздуха, о технических параметрах воздуха, о режимах (сезонности) эксплуатации, которые необходимо учитывать при расчете эффективности пневмосистемы.

2. Визуальное и инструментальное обследование пневмосистемы: визуальная оценка с фотофиксацией фактического износа пневмосистемы, измерение и регистрация характеристик пневмосистемы с помощью стационарных и портативных приборов на заданных режимах работы в соответствии с принятыми программой и методикой проведения инструментального обследования.

3. Разработка рекомендаций и мероприятий по повышению надежности функционирования и энергоэффективности всей действующей пневмосистемы, от компрессорной станции до потребителей.

В течение года пневмосистема депо «Невское» эксплуатируется в различных режимах среднемесячной загрузки в зависимости от климатических условий. Распределение среднемесячной загрузки пневмосистемы находится в диапазоне, ограниченном двумя основными режимами: максимальным — в снежный период; минимальным — при отсутствии снега.

Важным показателем при оценке проекта пневмосистемы служит режим максимальной пиковой загрузки пневмосистемы, когда включены одновременно все потребители сжатого воздуха: 1 — вагонное депо; 2 — мотопедеп (мойка); 3 — путевый веер в автоматическом и ручном режиме обдувки одновременно.

### Результаты исследования

По результатам визуального обследования удовлетворительным признано состояние тру-

бопроводов от КС до ввода в здание вагонного депо, на мойку и до путевого веера, которое характеризуется отсутствием утечек. Неудовлетворительное состояние трубопроводов выявлено в здании вагонного депо с постоянными значительными утечками порядка  $8 \text{ м}^3/\text{мин}$  вследствие негерметичности части присоединительных устройств пневмосети к тормозной системе электропоездов. Также неудовлетворительным признано состояние электропневматических клапанов в системе автоматического обдува стрелок с постоянной величиной утечек, определить которую затруднительно в связи с отсутствием запорной арматуры.

Режимы, на которых производилось обследование инструментальным способом системы генерации и распределения сжатого воздуха для нужд депо «Невское», были следующие:

*Режим №1.* Потребитель — только здание депо; измерялись величина давления на входе в здание депо и выходе из компрессорной станции, а также расход от утечек в здании депо. График падения давления изображён на рис. 1.

*Режим №2.* Потребитель — утечки в здании депо. Измерялись величины давления на входе в здание депо и на выходе из компрессорной станции, определялся объём утечек (по расходу) в здании депо, подача воздуха в депо прекращена. В течение 10 минут давление падает с 7,0 до 6,0 бар.

*Режим №3.* Потребитель — утечки в здании мойки. Измерялись величина давления на входе в мойку и расход. Подача воздуха на мойку прекращена. В течение 5 минут давление падает с 6,3 до 5,6 бар.

*Режим №4.* Потребитель — здание депо и путевой веер без обдува стрелок. Измерялись величины давления на входе в здание депо, выходе из компрессорной станции, на путевом веере и расход. График падения давления изображён на рис. 2.

*Режим №5.* Потребитель — здание депо, путевой веер при включенном автоматическом обдуве стрелок. Измерялись величины давления на входе в здание депо, выходе из компрессорной станции, на путевом веере и расход. График падения давления изображён на рис. 2.

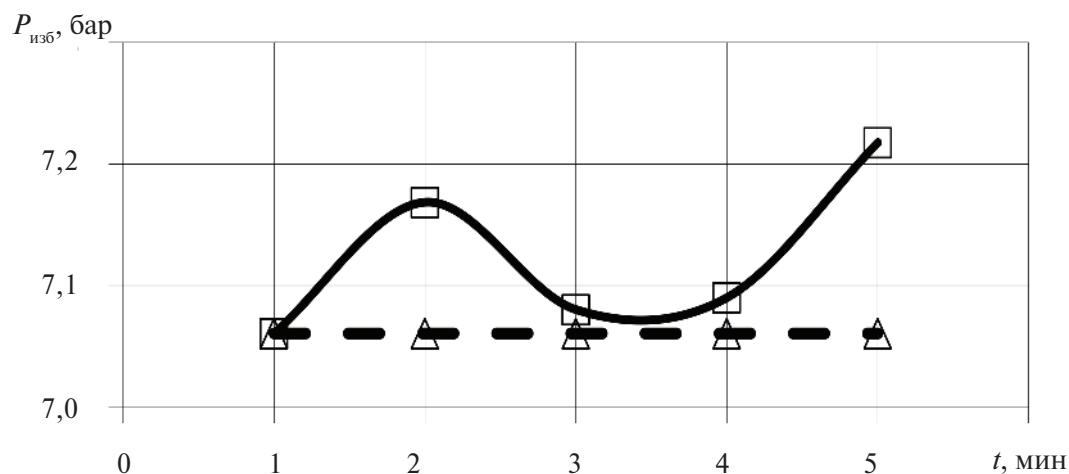


Рис. 1. Падение давления на режиме №1: потребитель — только здание депо:

- — давление на выходе из компрессорной станции;
- △— — давление на входе в депо заправки вагонов

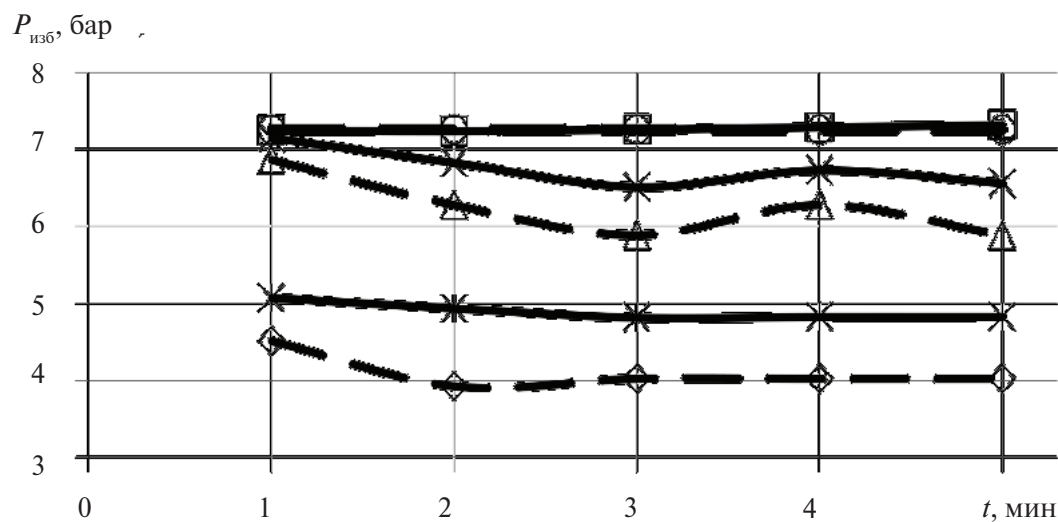


Рис. 2. Падение давления на режимах №4 (утечки на путевом веере), №5 (путевой веер при автоматической обдувке), №6 (путевой веер при ручной и автоматической обдувке):

- — режим 4. Давление на выходе из КС. Обдув стрелок не проводится;
- — режим 4. Давление на веере путей. Обдув стрелок не проводится;
- ×— — режим 5. Давление на выходе из КС. Обдув стрелок в автоматическом режиме;
- △— — режим 5. Давление на веере путей. Обдув стрелок в автоматическом режиме;
- \*— — режим 6. Давление на выходе из КС. Обдув стрелок в ручном и автоматическом режиме;
- ◇— — режим 6. Давление на веере путей. Обдув стрелок в ручном и автоматическом режиме



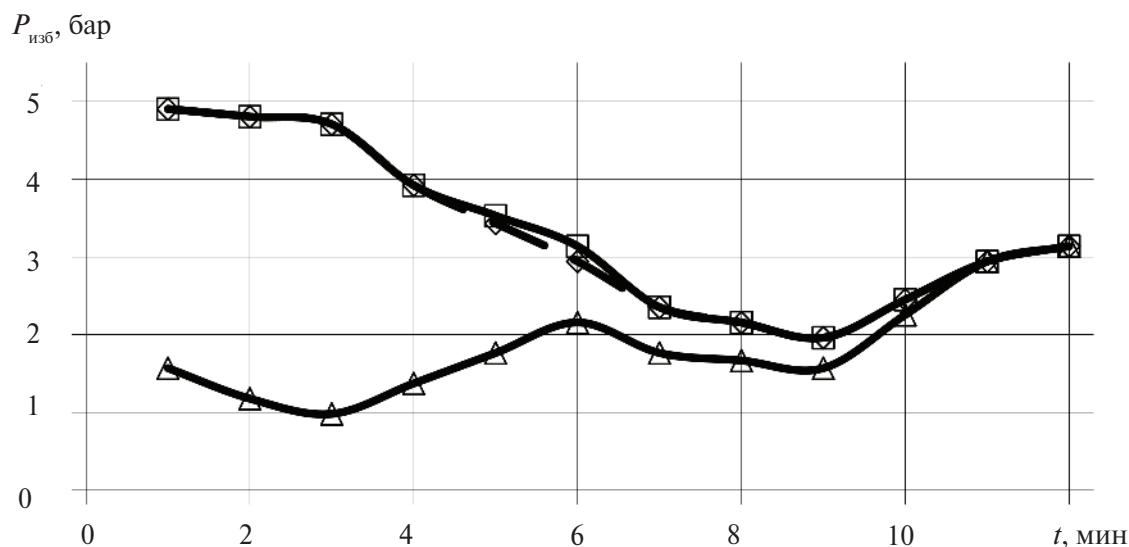


Рис. 3. Падение давления на режиме № 7 (путевой веер при автоматической обдувке стрелок и работе от одного компрессора с подключенным воздухохранилищем емкостью 3,2 куб.м):

- — давление на входе мойки;
- ◇— — давление на входе в депо для заправки вагонов;
- △— — давление на веере путей

**Режим № 6.** Потребитель — здание депо, путевой веер при включенном автоматическом и ручном обдуве стрелок. Измерялись величины давления на входе в здание депо, выходе из компрессорной станции, на путевом веере, а также расход. График падения давления изображён на рис. 2.

**Режим № 7.** Потребитель — здание депо, путевой веер при включенном автоматическом обдуве стрелок, подключенный новый ресивер объемом 3,2 м<sup>3</sup>. Измерялись величины давления на входе в здание депо, выходе из компрессорной станции, на путевом веере и расход. График падения давления изображён на рис. 3.

**Режим № 8.** Потребитель — здание депо и мойка. Измерялись величины давления на входе на мойку и расход. В течение 7 минут давление падает с 7,0 до 6,0 бар.

#### Выводы и предложения по результатам исследования

Из анализа представленных графиков можно сделать следующие выводы:

1. Согласно имеющимся общим рекомендациям значение падения давления на участке трубопровода от компрессорной станции до потре-

бителя не должно превышать 0,1 бар. На исследованных участках превышение этого значения зафиксировано при включении веера обдува стрелок и составляет от 0,5 до 1,0 бар (см. рис. 2). Для ветки депо падение давления — в пределах 0,1 бар (см. рис. 1). В ветке мойки манометра непосредственно у потребителя не было в связи с отсутствием установочного штуцера в трубопроводе. Однако по оценке показаний манометра, установленного для ветки мойки сразу после ответвления на мойку, падение давления на данной части пневмопровода между манометрами меньше 0,1 бар.

2. При максимальном потреблении воздуха на путевой веер давление во всей сети падает ниже нормы на значительную величину — порядка 2–5 бар в зависимости от комбинации включенных потребителей (см. рис. 3). Это не позволяет полноценно заправить тормозную систему вагона.

3. На всех пневмопроводах потребителей, за исключением мойки, зафиксированы утечки воздуха.

Из данного анализа следует, что система пневмопроводов веера обдува создает сопротивление выше рекомендуемых значений, а органи-

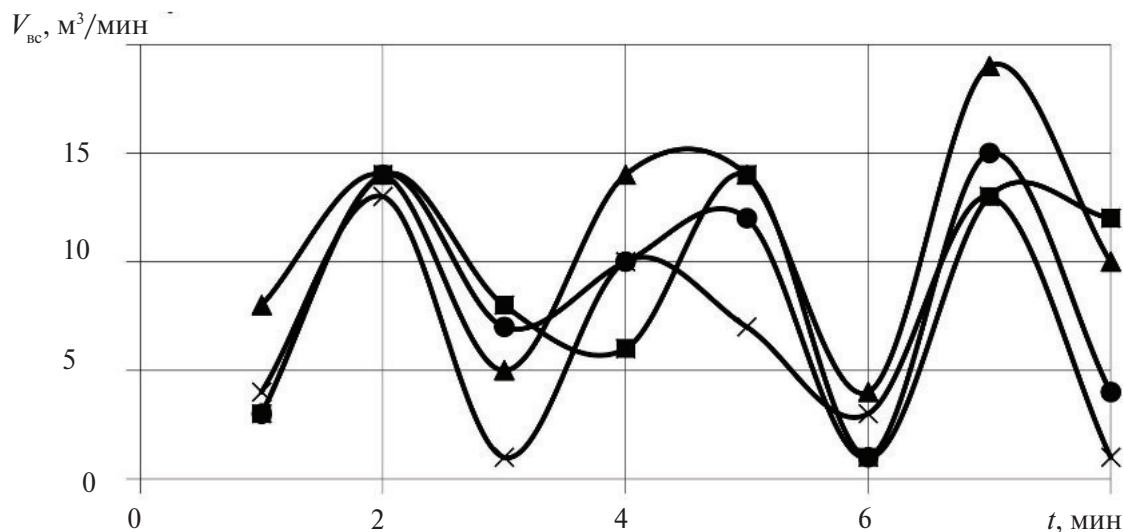


Рис. 4. Цикловая диаграмма генерации при работе на депо (мойка не работает, веер отключен):

■ — интервал от 1 до 8 мин; ● — интервал от 8 до 16 мин;  
▲ — интервал от 16 до 24 мин; × — интервал от 24 до 32 мин

зация пневмосистемы не учитывает особенности технологий использования ресурса потребителем и предъявляемые требования к параметрам сжатого воздуха.

На рис. 4 приведена временная циклическая зависимость выработки сжатого воздуха компрессорной станцией в режиме, когда мойка не работает, веер отключен, а депо загружено не на полную мощность (не на 100 %). Данные записаны через каждую минуту.

Графики на рис. 4 показывают что на этом режиме значения расхода имеют пульсационный характер с прослеживающейся циклической закономерностью. Такой вид кривой можно объяснить тем, что в сети имеются значительные утечки, среднее значение которых составляет порядка 8 м³/мин. Известно, что в воздушных сетях общего назначения наличие в трубопроводе только одного отверстия диаметром около 5 мм приводит к утечкам до 2 м³/мин. и потерянной мощности 10 кВт [4].

Значение утечек, приведенных к условиям всасывания, можно определить по формуле

$$V_{\text{утеч}} = \frac{V_p (p_{\text{max}} - p_{\text{min}})}{t},$$

где  $V_p$  — общий объем сети, определяемый объемом трубопроводов, м³;  $p_{\text{max}}$ ,  $p_{\text{min}}$  — максималь-

ное и минимальное давления в системе, ати;  $t$  — продолжительность процесса стравливания, мин.

Таким образом, из рис. 4 следует, что пневмосистема работает в следующем режиме. Компрессор подает сжатый воздух в сеть до установленного давления; в виду отсутствия (полностью или частично) потребителей сжатого воздуха компрессор переходит на режим регулирования со сбросом сжатого воздуха в атмосферу. Поскольку в сети имеются значительные утечки, давление очень быстро падает (по данным замеров давление в сети из-за утечек снижается на 0,2 бар). После того как давление в сети снизится до величины минимально установленной в компрессоре, последний переходит на номинальный режим генерации и снова подает воздух в сеть. По графику (см. рис. 4) периодичность такой работы составляет примерно 2–3 минуты. Таким образом, продолжительное время сжатый воздух расходуется только на восполнение утечек.

На рис. 5 приведены графики потребления электроэнергии компрессорной станцией за четырехлетний период с 2010-го по 2013 год.

Из графиков на рис. 5 видно, что в зависимости от сезона месячное потребление электрической энергии может различаться в несколько

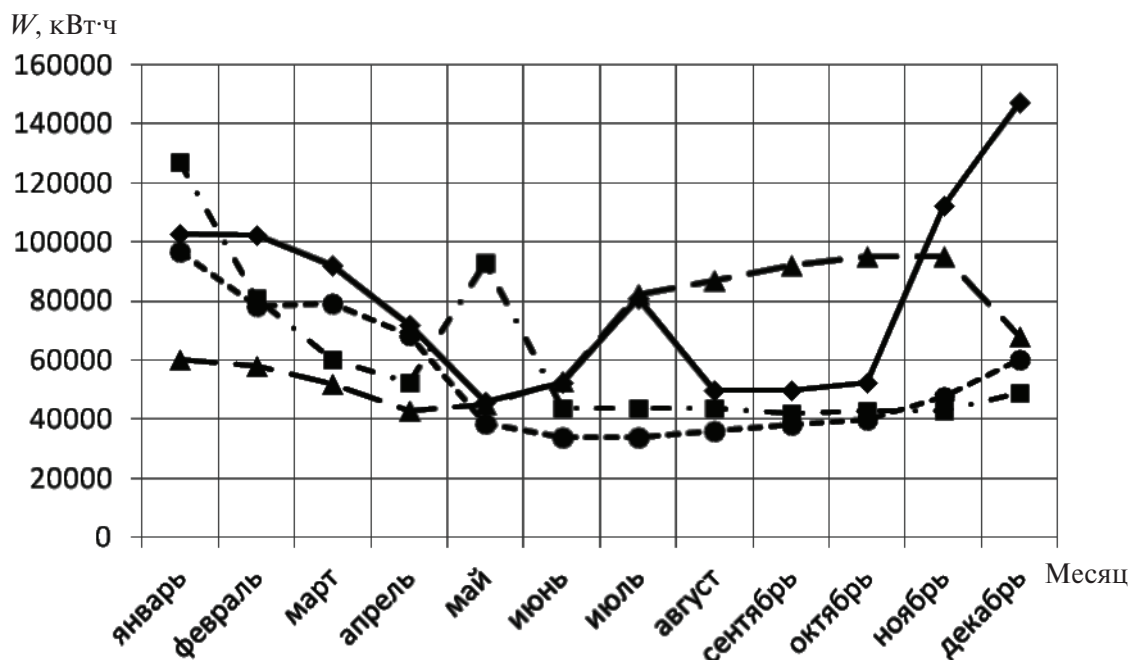


Рис. 5. Потребление электроэнергии компрессорной станцией в течение года (по месяцам):

—◆— 2010 г.; —■— 2011 г.; —▲— 2012 г.; —●— 2013 г.

раз. При этом количество одновременно работающих компрессоров меняется по месяцам и может быть рассчитано на основе данных рис. 5 по формуле

$$\mathcal{C} = \mathcal{E} / \mathcal{E}_k,$$

где  $\mathcal{C}$  — число компрессоров;  $\mathcal{E}$  — фактическое потребление электроэнергии;  $\mathcal{E}_k$  — номинальное потребление электроэнергии одним компрессором ( $\mathcal{E}_k = 110 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$  · число дней в месяце · 24 часа в сут.).

Расчет показывает, что в основном работает один компрессор, а в зимний период иногда включается второй. Это связано с повышенным потреблением воздуха на веер в снежное время.

Доукомплектование компрессорной станции депо «Невское» предполагается производить винтовыми компрессорами. Это вызвано рядом преимуществ винтовых компрессоров перед поршневыми. Основное из них — больший ресурс, как общий, так и межсервисный. Это обес-

Таблица 1

#### Максимальный среднечасовой расход воздуха

Потребитель	Характер использования	Максимальный расход, м <sup>3</sup> /час (м <sup>3</sup> /мин)
Вагонное депо	Заправка тормозных систем электропоездов, технологические нужды. Не допускается падение избыточного давления ниже 6,5 бар; высокие требования к чистоте воздуха	480 (8)
Путейский веер	Обдув стрелочных переводов	1800 (30)
Мотодепо	Сушка вагонов, технологические нужды	1020 (17)
Итого: потребляемый расход воздуха		3300 (55)
Итого: с учетом перспектив развития депо и резерва		4320 (72)

Таблица 2

Предлагаемая комплектация КС компрессорными установками

Потребитель	Тип компрессоров	Максимальная производительность, м <sup>3</sup> /мин	Мощность привода, кВт	Система регулирования
Вагонное депо	ДЭН -75ШОПТИМ	12	75	Частотный преобразователь
Путейский веер	ДЭН-160ШМ ОПТИМ	29	160	Частотный преобразователь периодические пуски и остановки
Мотодепо	ДЭН-110Ш ОПТИМ	19	110	Частотный преобразователь периодические пуски и остановки
Резервный	ДЭН-110Ш	19	110	Без частотного преобразователя. Периодические пуски и остановки

печивается отсутствием возвратно-поступательных движений и, как следствие, сил инерции первого и второго порядка. Преимуществами являются и меньшие массогабаритные показатели, отсутствие водяного охлаждения, меньший шум и относительная простота в эксплуатации и ремонте, невозможность гидравлических ударов при попадании влаги в рабочую полость [7].

Основанием для выбора параметров винтовых компрессоров служат величина необходимого конечного давления и полученный в результате обследования пневмосистем и потребителей депо «Невское» максимально возможный расход сжатого воздуха, складывающийся из технологического расхода, расхода на восполнение утечек, увеличения расхода при перспективном развитии депо, а также зарезервированного расхода, составляющего не менее 10 % от максимального для всех потенциальных потребителей. На основании этих данных получены максимально возможные среднечасовые расходы сжатого воздуха по трем потребителям (табл. 1) и предложена комплектация КС (табл. 2).

Для регулирования работы КС рекомендуется использовать систему центрального регулирования (СЦР), обладающую функцией согласования работы компрессоров между собой. При обеспечении рационального производства и потребления сжатого воздуха и устранения утечек экономически обоснованным считается тариф, когда удельная стоимость сжатия до избыточно-

го давления  $P_{изб} = 7$  бар (при параметрах на входе  $T_n = 20^\circ \text{C}$  и  $p_n = 1$  бар) и перемещения сжатого воздуха расходом 1 м<sup>3</sup>/мин не превышает 150–170 тыс. руб. при круглосуточной работе компрессорного оборудования.

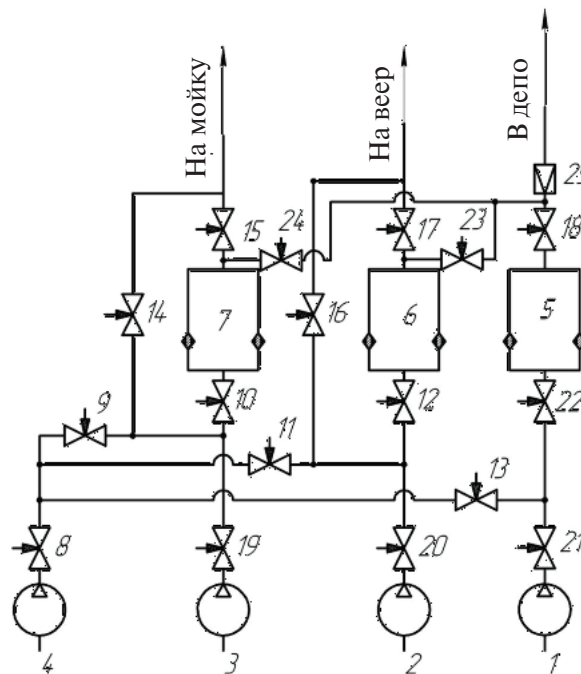


Рис. 6. Принципиальная схема компрессорной станции: 1, 2, 3 – основные компрессорные установки с частотными преобразователями, встроенными охладителями и маслосепараторами; 4 – резервная компрессорная установка; 5, 6, 7 – блоки осушки с фильтрами тонкой очистки; 8–24 – запорные вентили; 25 – обратный клапан

С учетом всех требований к работе пневмосистемы депо и её особенностей эксплуатации предложена следующая принципиальная схема реконструкции этой системы (рис. 6).

В соответствии с нормативными документами [9–11] реализация описанного решения в рамках технического перевооружения позволяет локализовать контуры трубопроводов всех компрессоров в едином обслуживаемом помещении, обеспечивая при этом нужный класс чистоты воздуха для каждого потребителя и гибкость управления пневмосистемой в целом.

### Заключение

Результатом работы стала методика проведения пневмоаудитов для централизованных пневмосистем с несколькими потребителями, имеющими различные требования по давлению и классу очистки воздуха, при воздухомоснабжении от единой компрессорной станции. Разработанная методика показала на примере депо «Невское» свою применимость и эффективность в решении задач реконструкции сложных пневмосистем. На основе научного подхода при пневмоаудите получены результаты, обеспечивающие

повышение энергоэффективности и надежности работы пневмосистемы объекта [7]. Разработана энергоэффективная модель сложной с точки зрения переменных режимов работы и требований к параметрам (давление, качество) сжатого воздуха пневмосистемы площадки депо метрополитена. Она учитывает режимы потребления воздуха, включая работу при пиковых нагрузках. На основании многопараметрического анализа разработана принципиальная схема перспективной энергоэффективной пневмосистемы. Она взята за основу в проекте технического перевооружения, который разрабатывается в настоящее время. Задачи по реконструкции сложных технологических объектов должны решаться комплексно, с обязательным учётом реинжиниринга бизнес-процессов генерации, распределения и потребления сжатого воздуха, автоматизации управленческого учета, контроллинга и ценообразования [11], включая архитектурные решения в информационно-технологической области [12, 13]. На основе полученных данных мероприятия в рамках комплексного подхода успешно проводятся на ряде технологических объектов ГУП «Петербургский метрополитен».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козин Е.Г., Ледяев А.П. Соединительные ветки Петербургского метрополитена в системе транспортного обслуживания // Транспорт Российской Федерации. 2014. № 4 (53). С. 20–27.
2. Козин Е.Г., Кононова Н.С. Современное состояние и перспективы развития нормативно-технической базы по содержанию, ремонту и реконструкции сооружений Петербургского метрополитена // Тр. III Междунар. конф. «Проектирование, строительство и эксплуатация комплексов подземных сооружений». Тоннельная ассоциация России. Екатеринбург, 2010.
3. Болдырев Ю.Я., Данилишин А.М., Кожухов Ю.В., Лебедев А.А., Рубцов А.О., Чеглаков И.В. Моделирование нестационарных процессов в турбомашинах на основе нелинейно-гармонического NLH-метода с использованием суперкомпьютеров // Труды международной конференции «Суперкомпьютерные дни в России» (28–29 сентября 2015 г., г. Москва). М.: Изд-во МГУ, 2015. 844 с. С. 273–279.
4. Вейраух А.Н., Измайлов Р.А., Фотин Б.С. Компрессорные станции: Уч. пособие // Ленинградский политехнический институт. Л., 1990. 84 с.
5. Садовский Н.И., Кожухов Ю.В. Теория, расчет и конструирование компрессоров динамического действия. Испытание компрессоров при параллельной и последовательной работе. Совместная работа компрессоров: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. 40 с.
6. Страхович К. И., Френкель М.И., Кондряков И.К., Рис В.Ф. Компрессорные машины: учебник для технологических вузов по специальности «Холодильные и компрессорные машины и установки». Москва: Госторгиздат, 1961. 600 с.
7. Галеркин Ю.Б., Кожухов Ю.В., Соколов К.К. Приближённый метод оценки эффективности низконапорных центробежных компрессоров при предварительных испытаниях // Компрессорная техника и пневматика. 2010. №1. С. 9–14.
8. ГОСТ 28567-90. Межгосударственный стандарт. Компрессоры. Термины и определения. [Compressors. Terms and definitions]. 30 л.
9. ПБ 03-581-03. Правила устройства и безопасности эксплуатации стационарных компрессорных установок, воздухопроводов и газопроводов.



10. **ПБ 03-576-03.** Правила устройства и безопасности эксплуатации сосудов, работающих под давлением. 89 л.

11. **Козин Е.Г., Протесеня А.Г., Огородников Ю.Н., Деменков П.А., Карасев М.А., Лебедев М.О., Потемкин Д.А.** Механика подземных сооружений. Пространственные модели и мониторинг // Санкт-Петербургский гос. горный ун-т; Междунар. акад. наук экологии, безопасности человека и природы. СПб., 2011.

12. **Ильин И.В., Левченко Ю.Л., Лёвина А.И.** Вопросы формирования архитектуры инжиниринговых компаний // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. 2013. № 1-2 (163). С. 48–54.

13. **Ланхорст М.** Архитектура предприятия в деятельности. Спрингер-Верлаг. Берлин – Гейдельберг, 2013. 338 с.

## REFERENCES

1. **Kozin Ye.G., Ledyayev A.P.** Soyedinitelnyye vetki Peterburgskogo metropolitena v sisteme transportnogo obsluzhivaniya. [Connecting branches of the Petersburg subway in system of transport service]. *Transport Rossiyskoy Federatsii*. 2014. № 4 (53). S. 20–27. (rus)

2. **Kozin Ye.G., Kononova N.S.** Sovremennoye sostoyaniye i perspektivy razvitiya normativno-tekhnicheskoy bazy po sodержaniyu, remontu i rekonstruktsii sooruzheniy Peterburgskogo metropolitena. [Current state and prospects of development of normative and technical base in the contents, repair and reconstruction of constructions of the Petersburg subway]. Tr. III Mezhdunar. konf. «*Proyektirovaniye, stroitelstvo i ekspluatatsiya kompleksov podzemnykh sooruzheniy*». [Works III of the International conference «Design, Construction and Operation of Complexes of Underground Constructions»] / Tonnelnaya assotsiatsiya Rossii. Yekaterinburg, 2010. (rus)

3. **Boldyrev Yu.Ya., Danilishin A.M., Kozhukhov Yu.V., Lebedev A.A., Rubtsov A.O., Cheglakov I.V.** Modelirovaniye nestatsionarnykh protsessov v turbomashinakh na osnove nelineynno-garmonicheskogo NLH-metoda s ispolzovaniyem superkompyuterov [Modeling of non-stationary processes in turbomachines on the basis of a nonlinear and harmonious NLH method with use of supercomputers]. *Trudy mezhdunarodnoy konferentsii «Superkompyuternyye dni v Rossii»* (28–29 sentyabrya 2015 g., g. Moskva). [Works of the international conference «Supercomputer Days in Russia» (on September 28–29, 2015, Moscow)]. M.: Izd-vo MGU, 2015. S. 273–279. (rus)

4. **Veyraukh A.N., Izmaylov R.A., Fotin B.S.** Kompessornyye stantsii: Uch. posobiye. [Compressor stations: Manual] / Leningrad polytechnical institute — L., 1990. 84 s. (rus)

5. **Sadovskiy N.I., Kozhukhov Yu.V.** Teoriya, raschet i konstruirovaniye kompressorov dinamicheskogo deystviya. Ispytaniye kompressorov pri parallelnoy i posledovatelnoy rabote. Sovmestnaya rabota kompressorov: Ucheb. posobiye. [Theory, calculation and designing of compressors of dynamic action. Test of compressors during the parallel and consecutive work. Collaboration of compressors: manual]. SPb.: SPbGPU Publ., 2014. 40 s. (rus)

6. **Strakhovich K. I., Frenkel M.I., Kondryakov I.K., Ris V.F.** Kompessornyye mashiny: uchebnik dlya tekhnologicheskikh vuzov po spetsialnosti «Kholodilnyye i kompressornyye mashiny i ustanovki». [Compressors: the textbook for technological higher education institutions in «Refrigerating and compressor cars and installations»]. Moscow : Gostorgizdat, 1961. 600 s. (rus)

7. **Galerkin Yu.B., Kozhukhov Yu.V., Sokolov K.K.** Priblizhennyy metod otsenki effektivnosti nizkonapornykh tsentrobezhnykh kompressorov pri predvaritelnykh ispytaniyakh. [Approximate method of an assessment of efficiency of low pressure centrifugal compressors at preliminary tests]. *Kompessornaya tekhnika i pnevmatika*. 2010. №1. S. 9–14. (rus)

8. **GOST 28567-90.** Mezhdgosudarstvennyy standart. Kompessor. Terminy i opredeleniya. [Interstate standard. Compressors. Terms and definitions]. 30 s. (rus)

9. **ПБ 03-581-03.** Правила устройства и безопасности эксплуатации стационарных компрессорных установок, воздухопроводов и газопроводов. [Rules of the device and safety of operation of stationary compressor installations, air ducts and gas pipelines]. (rus)

10. **ПБ 03-576-03.** Правила устройства и безопасности эксплуатации сосудов, работающих под давлением. [Rules of the device and safety of operation of the vessels working under pressure]. 89 p. (rus)

11. **Kozin Ye.G., Protesenya A.G., Ogorodnikov Yu.N., Demenkov P.A., Karasev M.A., Lebedev M.O., Potemkin D.A.** Mekhanika podzemnykh sooruzheniy. Prostranstvennyye modeli i monitoring. [Mechanics of underground constructions. Spatial models and monitoring]. Sankt-Peterburgskiy gos. gornyy un-t; Mezhdunar. akad. nauk ekologii, bezopasnosti cheloveka i prirody. SPb., 2011. (rus)

12. **Ilin I.V., Levchenko Yu.L., Levina A.I.** Voprosy formirovaniya arkhitektury inzhiniringovykh kompaniy. [Questions of formation of architecture of the engineering companies]. *St.Petersburg State Politechnical Universiti Journal. Economic sc.* 2013. № 1-2 (163). P. 48–54. (rus)

13. **Lankhorst M.** Enterprise Architecture at work. Springer-Verlag. Berlin–Heidelberg, 2013. 338 p.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

**КОЗИН Евгений Германович** — кандидат технических наук первый заместитель начальника ГУП «Петербургский метрополитен»

190013, Санкт-Петербург, Московский пр., д.28.

E-mail: nz1@metro.spb.ru

**KOZIN Evgenii G.** — State unitary enterprise “Petersburg metropoliten”.

190013, St.-Petersburg, Moskovskiy pr., 28.

E-mail: nz1@metro.spb.ru

**КОЖУХОВ Юрий Владимирович** — кандидат технических наук заведующий кафедрой компрессорной, вакуумной и холодильной техники Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

E-mail: kozhukhov\_yv@mail.ru

**KOZHUKHOV Yuri V.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

E-mail: kozhukhov\_yv@mail.ru

## **АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ АВТОНОМНОГО ВЕТРОДИЗЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА**

*О.А. Grigorieva, T.V. Krivenko, V.A. Tremyasov*

### **RELIABILITY ANALYSIS OF AN AUTONOMOUS WIND-DIESEL COMPLEX**

Использование ветродизельных комплексов в автономных системах электроснабжения позволяет заместить часть дорогостоящего дизельного топлива возобновляемым источником энергии. Основной недостаток возобновляемых источников энергии — нестабильность, зависимость их функционирования от природных ресурсов, что влияет на надежность работы системы электроснабжения. Актуален анализ надежности работы систем генерации на основе возобновляемых источников энергии. В работе предложен логико-вероятностный метод для оценки надежности автономного ветродизельного комплекса, учитывающий его особенности и условия функционирования. Произведен расчет надежности ветродизельного комплекса, расположенного на севере Красноярского края.

**ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ; ВЕТРОДИЗЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС;  
НАДЕЖНОСТЬ; ДЕРЕВО ОТКАЗОВ; ОТКАЗ; ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ**

Using wind-diesel complexes in autonomous electricity supply systems allows to substitute the expensive part of diesel fuel by renewable energy sources. The renewable energy sources, however, are unstable energy sources whose behavior differs much from the conventional ones. They rely in their functioning on nature resources, which affects the stable operation of the electric supply system. Therefore, analyzing the reliability of generation systems based on renewable energy sources is of immediate interest. The logical and probabilistic method has been suggested for evaluating the reliability of an autonomous wind-diesel complex considering the specifics and conditions of its functioning. The reliability of a wind-diesel complex located at the north of the Krasnoyarsk Krai is computed.

**RENEWABLE ENERGY SOURCE; WIND-DIESEL COMPLEX; RELIABILITY; FAULT TREE;  
FAILURE; RELIABILITY INDICATORS.**

Большая часть обширной территории России с малой плотностью населения до сих пор не присоединена к централизованным энергетическим системам: по статистическим данным не подключены к электрическим сетям около 10 млн населения, живущего на Северных территориях, Дальнем Востоке и в некоторых других регионах. Население этих регионов получает энергию в основном от дизельных генераторов (ДГ). Однако электроснабжение от ДГ децентрализованных областей обладает рядом недостатков. К ним относят малый ресурс и высокий износ энергооборудования, загрязнение окружающей

среды. Кроме того, необходимое топливо для ДГ завозится в отдаленные населенные пункты по зимникам, водными путями, а иногда даже авиацией, что делает производство электроэнергии очень дорогим [1]. Решением этой проблемы является применение автономных ветродизельных комплексов (ВДК). Применение в децентрализованных областях ветроэнергетических установок (ВЭУ) совместно с ДГ позволяет частично заместить дорогостоящее дизельное топливо возобновляемым источником энергии (ВИЭ).

Однако ВИЭ — это источники, мощность которых зависит от потенциала природных ре-

сурсов. Так, функционирование ВЭУ определяется режимом поступающего ветрового потока и зависит от его энергетических характеристик. Основными энергетическими характеристиками ветрового потока являются скорость ветра и годовой ход среднемесячных скоростей ветра [2]. Из-за изменчивости скорости ветра нестабильность выработки электроэнергии такими установками влияет на надежность системы электроснабжения. Анализ надежности систем генерации на основе ВИЭ — новая и актуальная задача.

Цель нашей работы — развитие логико-вероятностного метода на основе дерева отказов (ДО) для анализа надежности автономного ветродизельного комплекса (ВДК).

Для анализа надежности ВИЭ применяются различные методы [3–9]: аналитические; метод пространства состояний (марковские процессы); метод статистического моделирования (метод Монте-Карло).

Однако эти методы имеют недостатки применительно к оценке показателей надежности систем генерации на основе ВИЭ. Аналитические методы не учитывают стохастический характер природных ресурсов. Основная сложность при использовании метода пространства состояний связана с высокой размерностью математической модели. В общем случае число  $R$  возможных состояний, в которых может находиться система, равно

$$R = \sum_{i=1}^k M_i^{N_i},$$

где  $k$  — число групп с различными возможными состояниями элементов;  $M_i$  — число возможных состояний элементов  $k$ -й группы;  $N_i$  — число элементов в  $k$ -й группе. Поэтому при анализе надежности систем генерации с большим количеством элементов применение данного метода требует составления сложного графа с большим количеством состояний, что существенно усложняет процедуру анализа.

Метод статистического моделирования (метод Монте-Карло) требует специального программного обеспечения. В большинстве случаев этот метод может быть использован в качестве эталонного.

Логико-вероятностный метод расчета надежности с использованием ДО является дедуктив-

ным методом и применяется в тех случаях, когда число различных видов отказов системы невелико [10]. Метод заключается в построении логической блок-схемы (дерево отказов), в которой используются элементы, подразделяющие и связывающие большое число событий и условий: логические символы и символы событий. События и условия формулируются специалистами на основе технического проекта системы генерации с помощью анализа ее поведения (при возникновении различных отказов и режимов) и записи в виде конъюнкций ( $\cap \equiv \cdot$ ) и дизъюнкций ( $\cup \equiv +$ ).

Количественная оценка показателей надежности систем генерации на основе ВИЭ с помощью ДО может быть произведена различными способами. Для анализа надежности ВДК предлагается использовать логико-вероятностную модель на основе формирования логической функции отказа (ФО). Модель учитывает восстановление и профилактику элементов системы [10].

Метод ДО на основе формирования логической ФО позволяет дифференцировать отказы на кратковременные и длительные. Кратковременные отказы (КО) — это кратковременное отключение на время оперативных переключений, а длительные отказы (ДО) — это отключение на время аварийного ремонта или замены оборудования. К кратковременным отключениям приводят отказы коммутационных аппаратов (КА), отходящих линий и элементов, которые могут быть отсоединены от распределительного устройства (РУ) с помощью рубильников и разъединителей. К длительным отключениям приводят отказы генерирующего оборудования, преобразовательных и аккумулирующих установок, коммутационной аппаратуры, а также элементов, не имеющих разъединителей или рубильников между ними и РУ.

Метод ДО учитывает элементарные события, приводящие к отказу ВДК, а также такие сложные события, как отказ одного элемента во время аварийного ремонта другого или отказ элемента при аварийном ремонте другого и событии отказа в срабатывании коммутационного аппарата.

С помощью предложенного метода учитываются ветровые условия, влияющие на работу ВДК. При построении ДО для ВДК учитывают-

ся состояния, когда наблюдается расчетная скорость ветра  $v_{\min} < v < v_{\max}$ , при которой ВЭУ развивает мощность от нуля до номинальной, и случаи нерасчетной скорости ветра  $v_{\max} \leq v$ ;  $v \leq v_{\min}$ , при которой установка остановлена и не вырабатывает электроэнергию. Отказы по причине ветровых условий обозначаются символом ( $V$ ).

Чтобы получить выражение ФО для конечного события необходимо построить ДО. Формирование ФО происходит путем выполнения указанных в ДО операций логического сложения («или») и умножения («и») над символами первичных элементарных событий и состояний начиная с нижнего уровня. В результате ФО для конечного события будет представлена логической суммой (дизъюнкцией) конъюнкций первого порядка (элементарные события), конъюнкций второго порядка (произведение события отказа и события отказа в срабатывании, произведения события и состояния отказа) и конъюнкций третьего порядка (произведение состояний, событий отказов и событий отказов в срабатывании):

$$\text{ФО} = \bigcup_i y_i \bigcup_k (y_i \cap x_{ок k}) \bigcup_{ij} (y_i \cap \tilde{y}_j) \bigcup_{ij} (y_j \cap \tilde{y}_i) \times \\ \times \bigcup_{ijk} (y_i \cap \tilde{y}_j \cap x_{ок k}),$$

где  $y_i, y_k, y_j$  — элементарные события (отказы элементов  $i, j, k$ );  $x_{ок k}$  — события отказов в срабатывании КА, устройств релейной защиты и автоматики (РЗиА) для элемента  $k$ ;  $\tilde{y}_i, \tilde{y}_j$  — состояние элементов (аварийные ремонты), в обозначении которых используется тильда («волна») над буквой.

Здесь каждая комбинация символов в дизъюнкции представляет собой сечение отказов или условие его возникновения в виде конъюнкции первого, второго или третьего (и более высоких) порядков.

Полученная ФО подвергается сокращению по правилам алгебры логики. Так сокращаются одинаковые конъюнкции и конъюнкции, содержащие в себе конъюнкции более низкого порядка. Сокращаются также конъюнкции четвертого и пятого порядка, если в ФО содержатся конъюнкции третьего, второго и первого порядков.

Логическая ФО позволяет получить выражения для аналитического расчета частоты  $\Lambda$  и вероятности  $q$  отказа системы по известным частотам и вероятностям отказов ее элементов. Для перехода от логической ФО к выражениям для расчета частоты и относительной длительности отказа, необходимо заменить знаки логического умножения  $\cap$  и сложения  $\cup$  на знаки умножения ( $\cdot$ ) и суммирования ( $+$ ) соответственно, а символы событий  $y$  заменить символами частоты  $\lambda(y)$ , символы событий  $x_{ок k}$  — символами условной вероятности  $Q(x_{ок k})$ , символы состояний  $\tilde{y}$  — символами вероятности состояний  $q(\tilde{y})$ . При этом вероятность состояния простого элемента системы равна

$$q(\tilde{y}) = \lambda(y) \tau(\tilde{y}),$$

где  $\lambda(y)$  — интенсивность отказа элемента системы;  $\tau(\tilde{y})$  — среднее время восстановления функционирования элемента системы.

Выражение для оценки частоты отказа имеет вид

$$\Lambda_{\text{ВДК}} = \sum_i \lambda(y_i) + \sum_k \lambda(y_k) Q(x_{ок k}) + \\ + \sum_{ij} \lambda(y_i) q(\tilde{y}_j) + \sum_{ji} \lambda(y_j) q(\tilde{y}_i) + \\ + \sum_{ijk} \lambda(y_i) q(\tilde{y}_j) Q(x_{ок k})$$

где  $i, j, k$  — элементы системы;  $\lambda(y_i), \lambda(y_k)$  — интенсивность отказов элементов системы;  $Q(x_{ок k})$  — условная вероятность отказа срабатывания КА и устройств РЗиА.

Выражение для оценки вероятности (относительная длительность) состояния отказа имеет вид

$$q_{\text{ВДК}} = \sum_i \lambda(y_i) \tau(\tilde{y}_i) + \sum_k \lambda(y_k) Q(x_{ок k}) \tau(y_k \cap x_{ок k}) + \\ + \sum_{ij} \lambda(y_i) q(\tilde{y}_j) \tau(y_i \cap \tilde{y}_j) + \sum_{ji} \lambda(y_j) q(\tilde{y}_i) \tau(y_j \cap \tilde{y}_i) + \\ + \sum_{ijk} \lambda(y_i) q(\tilde{y}_j) Q(x_{ок k}) \tau(\tilde{y}_i),$$

где  $\tau(y_k \cap x_{ок k})$  — среднее время восстановления функционирования при отказе в отключении повреждения на присоединении;  $\tau(y_i \cap \tilde{y}_j)$  — среднее время восстановления функционирования при совпадении отказа одного элемента системы с аварийным ремонтом другого элемента.



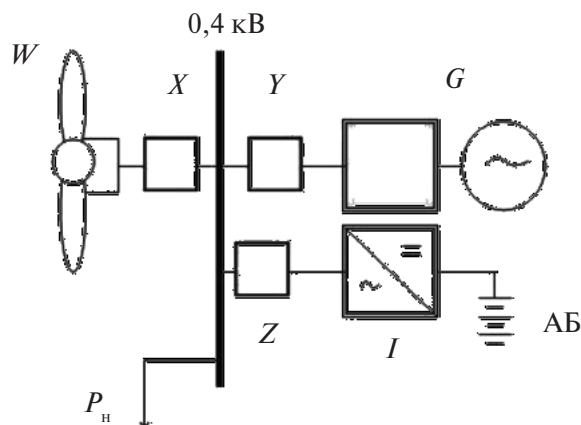


Рис. 1. Расчетная схема автономного ветродизельного комплекса:

$W$  – ветроэнергетическая установка;  $G$  – дизельный генератор;  $I$  – инвертор; АБ – аккумуляторная батарея;  $X, Y, Z$  – выключатели;  $P_n$  – нагрузка

В качестве примера применения предложенного метода рассмотрим схему ВДК (рис. 1), функционирующего в северных районах Красноярского края, с учетом характеристик ветра [2].

В состав автономного энергокомплекса входят ветроэнергетическая установка и дизельный генератор. Также в ВДК включена аккумуляторная батарея (АБ), которая позволяет сглаживать

возможные колебания мощности ВЭУ, связанные с переменным характером скорости ветра. ДО для оценки надежности электроснабжения ВДК приведено на рис. 2. ДО построено для конечного события – отказа функционирования всей системы ВЭУ–ДГ–АБ.

При расчетной скорости ветра формулируются элементарные события, которые приводят к отказу системы в зависимости от того, какой отказ (длительный или кратковременный), а также сложные события (отказ одного элемента во время аварийного ремонта другого и при учете отказа в срабатывании КА).

Как указывалось выше, при анализе надежности ВИЭ необходимо учитывать зависимость их функционирования от поступления природных ресурсов. В ДО (рис. 2) отражено влияние ветровых условий на работу ветроустановки посредством логического знака «запрет» (шестиугольник). Применение в ДО логического знака «запрет» позволяет учесть событие, которое происходит с какой-то определенной вероятностью [10]. На рис. 2 входным событием  $V$ , помещенным под знаком «запрет», является простой ВЭУ по причине ветровых условий (отсутствие ветра, ураган и др.). Условное событие  $Q$ , расположен-

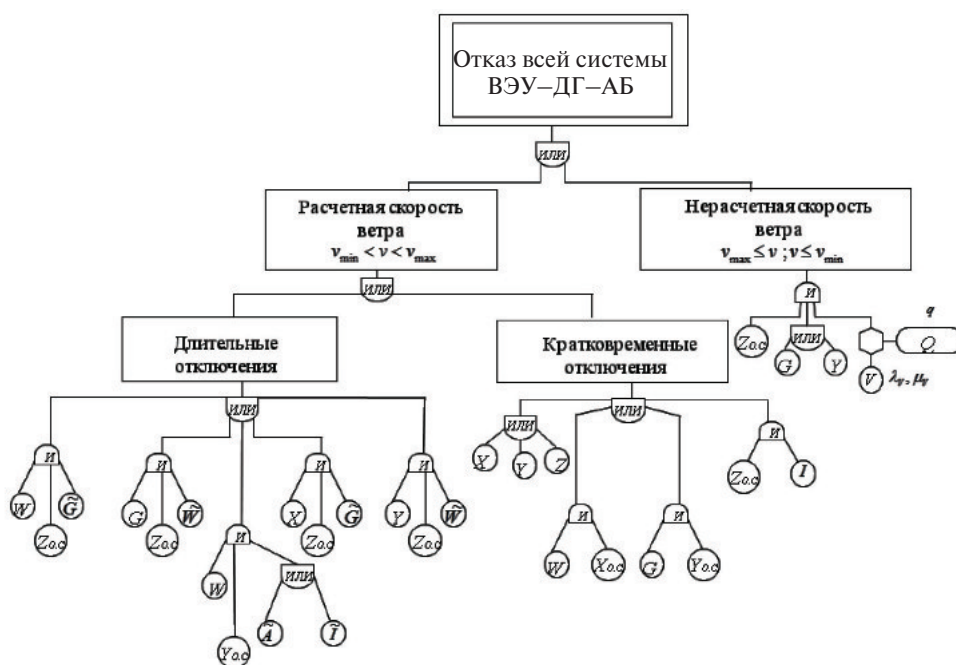


Рис. 2. Дерево отказов для оценки надежности автономного ВДК

ное на рис. 2 сбоку от логического знака, — это ограничительное условие, которое представляет собой вероятностный весовой фактор. Ограничительное условие характеризуется величиной  $q$  условной вероятности нерасчетной скорости ветра. Величина вероятности нерасчетной скорости ветра определяется с помощью гистограммы распределения скоростей ветра в месте расположения ВДК. Гистограмма распределения скоростей ветра характеризует повторяемости скоростей ветра за исследуемый период [2]. Она показывает, какую часть времени в течение рассматриваемого периода ветер имел определенную скорость.

Функция отказа для события «Отказ системы ВЭУ—ДГ—АБ» имеет следующий вид:

$$\text{ФО(ВДК)}_{\text{ДО}} = W\tilde{G}Z_{\text{OC}} + G\tilde{W}Z_{\text{OC}} + X\tilde{G}Z_{\text{OC}} + Y\tilde{W}Z_{\text{OC}} + W(\tilde{A} + \tilde{I})Y_{\text{OC}};$$

$$\text{ФО(ВДК)}_{\text{КО}} = X + Y + Z + WX_{\text{OC}} + GY_{\text{OC}} + IZ_{\text{OC}};$$

$$\text{ФО(ВДК)}_V = (G + Y)VZ_{\text{OC}},$$

где  $G, W, A, I$  — коды отказавшего элемента в соответствии со схемой ВДК;  $\tilde{G}, \tilde{W}, \tilde{A}, \tilde{I}$  — коды элемента, находящегося в аварийном ремонте;  $X, Y, Z$  — отказ автоматических выключателей;  $X_{\text{OC}}, Y_{\text{OC}}, Z_{\text{OC}}$  — отказ выключателей системы при появлении заявки на срабатывание;  $V$  — отказ ветроустановки по причине ветровых условий.

Для учета отказа ветроустановки по причине ветровых условий необходимо определить вероятность

$$q_V^* = q_V q,$$

где  $q_V$  — коэффициент простоя ВЭУ по причине погодных условий;  $q$  — условная вероятность появления нерасчетной скорости ветра.

Коэффициент простоя ВЭУ по причине погодных условий определяется по формуле

$$q_V = \frac{\lambda_V}{\lambda_V + \mu_V} \left[ 1 - e^{-(\lambda_V + \mu_V)t} \right],$$

где  $\lambda_V = 1/T_0$ , год<sup>-1</sup>, — интенсивность появления нерасчетной скорости ветра;  $\mu_V = 1/T_N$ , год<sup>-1</sup>, — интенсивность восстановления расчетной скорости ветра [11];  $T_0$  и  $T_N$  — периоды погоды соответственно с нерасчетной и расчетной скоростью ветра [2].

По ФО составлены расчетные выражения для показателей надежности:

для частоты отказов ВДК

$$\Lambda(\text{ВДК})_{\text{ДО}} = \lambda_W q_G Q_{\text{OCZ}} + \lambda_G q_W Q_{\text{OCZ}} + \lambda_X q_G Q_{\text{OCZ}} + \lambda_Y q_W Q_{\text{OCZ}} + \lambda_W (q_A + q_I) Q_{\text{OCY}};$$

$$\Lambda(\text{ВДК})_{\text{КО}} = \lambda_X + \lambda_Y + \lambda_Z + \lambda_W Q_{\text{OCX}} + \lambda_G Q_{\text{OCY}} + \lambda_I Q_{\text{OCZ}};$$

$$\Lambda(\text{ВДК})_V = (\lambda_G + \lambda_Y) q_V^* Q_{\text{OCZ}};$$

для относительной длительности отказов ВДК

$$q(\text{ВДК})_{\text{ДО}} = \lambda_W \tau_W q_G Q_{\text{OCZ}} + \lambda_G \tau_G q_W Q_{\text{OCZ}} + \lambda_X \tau_X q_G Q_{\text{OCZ}} + \lambda_Y \tau_Y q_W Q_{\text{OCZ}} + \lambda_W \tau_W (q_A + q_I) Q_{\text{OCY}};$$

$$q(\text{ВДК})_{\text{КО}} = \lambda_X \tau_X + \lambda_Y \tau_Y + \lambda_Z \tau_Z + \lambda_W \tau_W Q_{\text{OCX}} + \lambda_G \tau_G Q_{\text{OCY}} + \lambda_I \tau_I Q_{\text{OCZ}};$$

$$q(\text{ВДК})_V = (\lambda_G \tau_G + \lambda_Y \tau_Y) q_V^* Q_{\text{OCZ}}.$$

Суммарная частота отказов ВДК

$$\Lambda(\text{ВДК}) = \Lambda_{\text{ДО}} + \Lambda_{\text{КО}} + \Lambda_V.$$

Суммарная относительная длительность состояния отказа ВДК

$$q(\text{ВДК}) = q_{\text{ДО}} + q_{\text{КО}} + q_V.$$

Чтобы получить численное значение показателей надежности ВДК, необходимо в полученные формулы подставить исходные данные для ВДК, представленные в табл. 1, 2 [10, 12]. Необходимые данные для учета в ДО влияния ветровых условий на работу ВДК для северных районов Красноярского края следующие:

$q$ .....	0,05
$T_0$ .....	0,42
$T_N$ .....	0,58
$\lambda_V$ , 1/год .....	2,38
$\mu_V$ , 1/год .....	1,72
$q_V$ .....	0,57
$q_V^*$ .....	0,0285

Результаты расчета показателей надежности

по вышеприведенным формулам:

$$\Lambda(\text{ВДК})_{\text{ДО}} = 3,1 \cdot 10^{-7} \text{ 1/год};$$

$$\Lambda(\text{ВДК})_{\text{КО}} = 3,59 \cdot 10^{-3} \text{ 1/год};$$

$$\Lambda(\text{ВДК})_V = 3,14 \cdot 10^{-5} \text{ 1/год};$$

$$q(\text{ВДК})_{\text{ДО}} = 1,49 \cdot 10^{-9};$$

$$q(\text{ВДК})_{\text{КО}} = 2,51 \cdot 10^{-6};$$

$$q(\text{ВДК})_V = 5,7 \cdot 10^{-9}.$$

Окончательно получаем

$$\Lambda(\text{ВДК}) = 3,62 \cdot 10^{-3} \text{ 1/год};$$

$$q(\text{ВДК}) = 2,52 \cdot 10^{-6}.$$

Таблица 1

Показатели надежности элементов ВДК

Код элементов	Элементы ВДК	Значения показателей надежности		
		$\lambda(y)$ , 1/год	$\tau(\tilde{Y})$ , год	$q(\tilde{y})$
<i>W</i>	Ветроустановка Vestas V27 225 кВт	1,1	$3,28 \cdot 10^{-3}$	$3,61 \cdot 10^{-3}$
<i>G</i>	Дизельный генератор	$(2 \pm 0,5) \cdot 10^{-2}$	$(1 \pm 0,5) \cdot 10^{-2}$	$(2 \pm 0,5) \cdot 10^{-4}$
<i>I</i>	Инвертор	$(5 \pm 4) \cdot 10^{-2}$	$(2 \pm 1) \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$
<i>A</i>	Аккумуляторная батарея	$(2 \pm 1) \cdot 10^{-3}$	$(1 \pm 0,5) \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-6}$
<i>X, Y, Z</i>	Автоматический выключатель	$(1 \pm 0,5) \cdot 10^{-3}$	$(2 \pm 1) \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-7}$

Таблица 2

Условная вероятность отказа срабатывания элементов

Код элемента	Элемент ВДК	Отказы автоматических выключателей:	Условная вероятность отказа срабатывания ( $Q_{ок}$ )
<i>X, Y, Z</i>	Автоматический выключатель	В отключении КЗ Во включении	$(5 \pm 2) \cdot 10^{-4}$ $(1 \pm 0,5) \cdot 10^{-3}$

### Выводы

Предложен логико-вероятностный метод дерева отказов для анализа надежности ВДК, который позволяет учесть особенности функционирования комплекса и погодные условия.

Сформулирована целесообразность дифференциации отказов ВДК на кратковременные, длительные и отказы по причине изменения ветровых условий.

Метод учитывает такие сложные события, происходящие в ВДК, как отказ одного элемента энергокомплекса во время аварийного ремонта другого с учетом отказа в срабатывании КА.

Надежность ВДК определяется с помощью следующих показателей: интенсивности отказа ( $\lambda$ ) и относительной длительности отказа ( $q$ ). Эти показатели могут быть использованы при выборе оптимального варианта структуры ВДК.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куликова Л.В., Меновщиков Ю.А. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. Барнаул: Изд-во АлтГУ, 2005. 365 с.
2. Старков А.Н., Ландберг Л., Безруких П.П., Борисенко М.М. Атлас ветров России. М.: Можайск–Терра, 2000. 560 с.
3. Abouzahr I., Ramakumar R. Loss of power supply probability of stand-alone wind electric conversion systems: A closed form solution approach // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 1990. Vol. 5, № 3. P. 445–451.
4. Abouzahr I., Ramakumar R. An approach to assess the performance of utility-interactive wind electric conversion systems // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 1991. Vol. 6, № 4. P. 627–638.
5. Bakirtzis A.G. A probabilistic method for the evaluation of the reliability of stand-alone wind energy systems // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 1992. Vol. 7, № 1. P. 99–107.
6. Leite A.P., Borges C.L.T., Falcao D.M. Probabilistic wind farms generation model for reliability studies applied to Brazilian sites // *IEEE Transactions on Power Systems*. 2006. Vol. 21, № 4. P. 493–501.
7. Billinton R., Bagen, Cue Yu. Reliability evaluation of small stand-alone wind energy conversion systems using a time series simulation model. *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*. 2003. Vol. 150, № 1. P. 96–100.
8. Billinton R., Bagen B. A sequential simulation method for the generating capacity adequacy evaluation of small stand-alone wind energy conversion systems //

IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering CCECE. 2002. Vol. 1. P. 72–77.

9. Li W.Y, Bagen B. Reliability evaluation of integrated wind/diesel/storage systems for remote locations // IEEE 11th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS). 2010. P. 791–795.

10. Гук Ю.Б., Синенко М.М., Тремясов В.А. Расчет надежности схем электроснабжения. Л.: Энер-

гоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1990. 208 с.

11. Бобров А.В., Тремясов В.А. Ветро дизельные комплексы в децентрализованном электроснабжении. Красноярск: Изд-во Сиб. федер. ун-та, 2012. 216 с.

12. Sienergy [Электронный ресурс] // URL: <http://www.sienergy.co.uk/WT/downloads/Reliability-and-Condition-Monitoring-of-Wind-Turbines.pdf> (дата обращения 07.02.2016).

## REFERENCES

1. Kulikova L.V., Menovshchikov Yu.A. Netraditsionnye i vozobnovlyayemye istochniki energii [Nonconventional and renewable energy sources] / Altai state technical university name of I. I. Polzunov. Barnaul: ASU Publ., 2005. 365 s. (rus)

2. Starkov A.N., Landberg L., Bezrukikh P.P., Borisenko M.M. Atlas ветров России [Wind atlas of Russia] Moscow: Mozhaik-Terra, 2000. 560 s. (rus)

3. Abouzahr I., Ramakumar R. Loss of power supply probability of stand-alone wind electric conversion systems: A closed form solution approach. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 1990. Vol. 5, № 3. P. 445–451.

4. Abouzahr I., Ramakumar R. An approach to assess the performance of utility-interactive wind electric conversion systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 1991. Vol. 6, № 4. P. 627–638.

5. Bakirtzis A.G. A probabilistic method for the evaluation of the reliability of stand-alone wind energy systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 1992. Vol. 7, № 1. P. 99–107.

6. Leite A.P., Borges C.L.T., Falcao D.M. Probabilistic wind farms generation model for reliability studies applied to Brazilian sites. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2006. Vol. 21, № 4. P. 493–501.

7. Billinton R., Bagen, Cue Yu. Reliability evaluation of small stand-alone wind energy conversion systems using a time series simulation model. *IEEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, 2003. Vol. 150, № 1. P. 96–100.

8. Billinton R., Bagen B. A sequential simulation method for the generating capacity adequacy evaluation of small stand-alone wind energy conversion systems, *IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering CCECE*. 2002. Vol. 1. P. 72–77.

9. Li W.Y, Bagen B. Reliability evaluation of integrated wind/diesel/storage systems for remote locations. *IEEE 11th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS)*, 2010. P. 791–795.

10. Guk Yu. B., Sinenko M.M., Tremyasov V.A. Raschet nadezhnosti skhem elektrosnabzheniia [Reliability calculation of schemes power supply]. Leningrad: Energoatomizdat, 1990. 208 s. (rus)

11. Bobrov A.V., Tremyasov V.A. Vetrodizelnye komplekсы v detsentralizovannom elektrosnabzhenii [Wind-diesel complexes in the decentralized power supply]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2012. 216 s. (rus)

12. Sienergy. Available: <http://www.sienergy.co.uk/WT/downloads/Reliability-and-Condition-Monitoring-of-Wind-Turbines.pdf> (Accessed 07.02.2016)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

**ГРИГОРЬЕВА Ольга Анатольевна** — кандидат технических наук доцент, начальник управления аспирантуры, докторантуры и АНПК Сибирского федерального университета. 660041, Россия, г. Красноярск, пр. Свободный, 79. E-mail: Grigorieva.00@mail.ru

**GRIGORIEVA Olga A.** — Siberian Federal University. 79, Svobodny Prospect, Krasnoyarsk, Russia, 660041. E-mail: Grigorieva.00@mail.ru

**КРИВЕНКО Татьяна Витальевна** — аспирант Сибирского федерального университета. 660041, Россия, г. Красноярск, пр. Свободный, 79. E-mail: tanya-1991mir@mail.ru

**KRIVENKO Tatiana V.** — Siberian Federal University. 79, Svobodny Prospect, Krasnoyarsk, Russia, 660041. E-mail: tanya-1991mir@mail.ru

**ТРЕМЯСОВ Владимир Анатольевич** — кандидат технических наук профессор Сибирского федерального университета.

660041, Россия, г. Красноярск, пр. Свободный, 79.

E-mail: emf\_tva@mail.ru

**TREMYASOV Vladimir A.** — Siberian Federal University.

79, Svobodny Prospect, Krasnoyarsk, Russia, 660041.

E-mail: emf\_tva@mail.ru



## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИХРЕВОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ДУГОВОГО ПЛАЗМОТРОНА

Iu.V. Murashov

### SIMULATING THE VORTEX STABILIZATION OF AN ARC PLASMA TORCH

Статья посвящена численному моделированию формирователя вихревой стабилизации электрической дуги и анализу характера потока газа. Рассмотрены математическая модель ламинарного течения и условие турбулизации потока с учетом варьирования расхода плазмообразующего газа. Трехмерная нестационарная математическая модель разработана для реальной геометрии плазматрона и позволяет получить полиномиальные функции распределения скоростей, необходимых для задания граничных условий двухмерной осесимметричной задачи. Цель — создать уточненную математическую модель дугового плазматрона для нанесения покрытий с учетом вихревой стабилизации электрической дуги. Полиномиальные функции позволяют получить распределения скоростей в зависимости от расхода плазмообразующего газа. По результатам моделирования было определено время формирования установившегося потока. Получены значения числа Рейнольдса для плазматрона постоянного тока при варьировании величины расхода плазмообразующего газа.

ПЛАЗМОТРОН; ВИХРЕВАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ; МОДЕЛИРОВАНИЕ; ЛАМИНАРНЫЙ ПОТОК; ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПОТОК.

The article is dedicated to numerically simulating the formation of vortex stabilization of an electric arc and to analyzing the gas flow behavior. The three-dimensional model of transient laminar flow is designed for the actual geometry of the plasma torch. Reynolds numbers are presented for varying values of gas flow consumption. The formation time of a steady flow is determined by creating an automatic start algorithm of the plasma torch. The three-dimensional model allows to obtain the distribution of velocities needed for setting the boundary conditions of a two-dimensional axisymmetric task. The general goal of the study is creating a mathematical model of a plasma torch with vortex stabilization of the electric arc.

PLASMA TORCH; VORTEX STABILIZATION; SIMULATION; LAMINAR FLOW; TURBULENT FLOW.

#### Введение

Плазмотроны — устройства генерации плазмы, получившие широкое применение в разных областях промышленности за счет эффективной передачи тепла материалам, уникальных свойств и возможностей плазмы [1, 2]. В зависимости от области применения и целевого назначения выделяют следующие типы плазмотронов [3]:

плазменный инструмент (устройства для сварки, резки, напыления и т.д.);

металлургические плазмотроны (переплавка тугоплавких материалов, получение монокристаллов, дисперсных материалов и т.д.);

плазменные нагреватели (сжигание и переплавка отходов, розжиг топок котлов и т.д.);

плазмохимические реакторы (осуществление химических реакций в плазме).

Разнообразие требований, предъявляемых к плазмотронам и генерируемому плазменному потоку, обусловлено широкой областью применения.

### Особенности технологии плазменного напыления

Технология плазменного напыления — один из основных примеров применения плазмотронов в промышленности. Главные критерии качества напыляемого покрытия — пористость и адгезия [4, 5] — зависят от свойств наносимых материалов и параметров плазменного потока. Обеспечение высокого рабочего ресурса и оптимального плазменного потока — основная технологическая задача при разработке новейших установок плазменного напыления.

Одним из способов стабилизации электрической дуги и управления параметрами плазменного потока является применение газовой стабилизации. Различают два типа газовой стабилизации: осевую и вихревую.

Вихревая стабилизация дуги и плазменного потока реализована в плазмотроне с межэлектродными вставками (МЭВ) ПН-В1 (см. рис. 1, а).

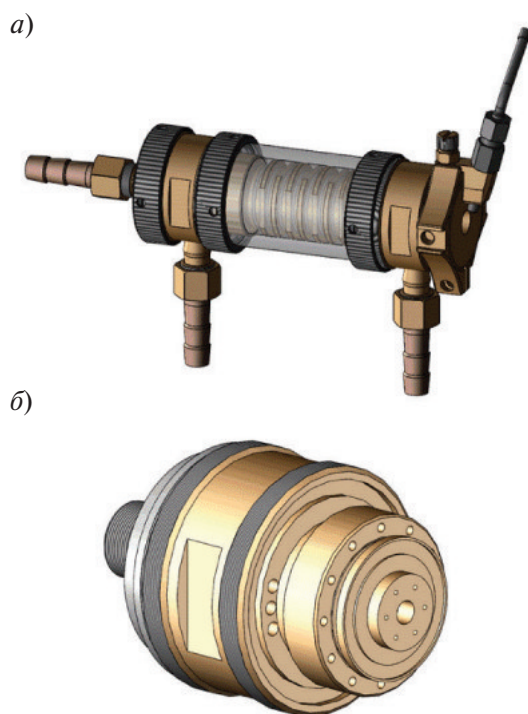


Рис. 1. Конструкция плазмотрона ПН-В1 с межэлектродными вставками: а — внешний вид плазмотрона; б — катодный узел плазмотрона

Формирование тангенциальной закрутки осуществляется с помощью четырехзаходной резьбы в катодной части плазмотрона (см. рис. 1, б).

Тангенциальная закрутка не только позволяет обеспечить стабилизацию дуги, но и выполняет роль заградительного охлаждения, цель которого — изолировать поверхности составных частей конструкции плазмотрона от высокотемпературного газового потока [6–8].

### Электромагнитная газодинамика плазмотрона

Плазмотрон представляет собой систему для выполнения нагрева газового потока, основные подсистемы которой применительно к электромагнитной газодинамической задаче — это электромагнитная и газовая. Три главных фактора отличия моделей электромагнитной газодинамики от уравнений обычной газодинамики [9]: появление нового вида объемных сил (сила Лоренца); выделение джоулева тепла; перенос энтальпии электронами.

Тем самым моделирование плазменных процессов представляет собой мультифизическую задачу, включающую совместное решение задач газодинамики, теплопередачи и электромагнетизма. Кроме представленной явной связи через джоулев нагрев и силу Лоренца, соответствующие уравнения связаны термодинамическими и транспортными свойствами в неявном виде. Данная мультифизическая задача требует значительных вычислительных ресурсов. В случае плазмотрона ПН-В1 можно, исключив катодный узел, использовать осевую симметрию при задании геометрии расчетной области, что значительно снижает требования к вычислительным ресурсам, но для корректного решения задачи необходимо определить граничные условия. В статье с целью корректного задания граничных условий осуществляется моделирование газового потока, формируемого в катодном узле плазмотрона. Данная задача является трехмерной и нестационарной. В качестве программного обеспечения для численного моделирования используется Comsol Multiphysics.

### Моделирование с использованием Comsol Multiphysics

Основная составляющая современного моделирования физических процессов — исполь-

зование методов численного моделирования. Эффективным методом численного моделирования мультифизических процессов служит метод конечных элементов (МКЭ) [10, 11].

Comsol Multiphysics – надежный инструмент для численного исследования, использующий МКЭ с точными линейными решателями.

Математическая модель основана на решении уравнения Навье–Стокса для ламинарного потока, дополненного уравнением непрерывности:

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = \nabla \cdot \left[ -pI + \mu (\nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T) \right] + \vec{F}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $\vec{v}$  – скорость потока, м/с;  $p$  – давление, Па;  $I$  – единичная матрица;  $\mu$  – динамическая вязкость, Па·с;  $\vec{F}$  – внешние силы, действующие на поток, Н;

$$\rho \nabla \cdot (\vec{v}) = 0. \quad (2)$$

Применимость модели ламинарного потока обусловлена малым значением числа Рейнольдса (меньше критических значений  $Re_{кр}$  [12, 13]).

Геометрия расчетной области, представляющей собой воздух, заключенный в объеме прикатодной части плазмотрона, и расчетная сетка изображены на рис. 2.

Число конечных элементов сетки – 924493.

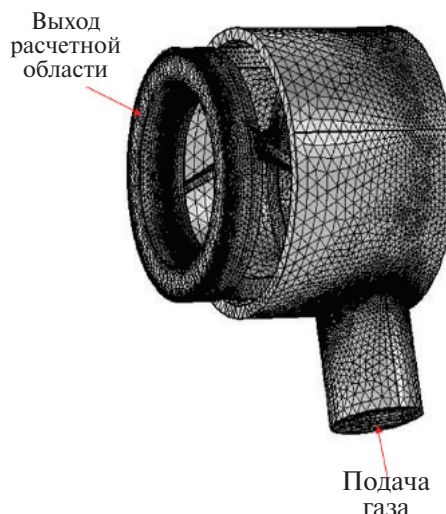


Рис. 2. Геометрия расчетной области

Модель исследовалась при варьировании расхода газа (воздуха) от 0,4 до 2,4 г/с.

Моделируемое время – 2 мс, что достаточно для формирования установившегося потока применительно к данной геометрии.

### Результаты моделирования

По результатам моделирования получены распределения скорости и давления при раз-

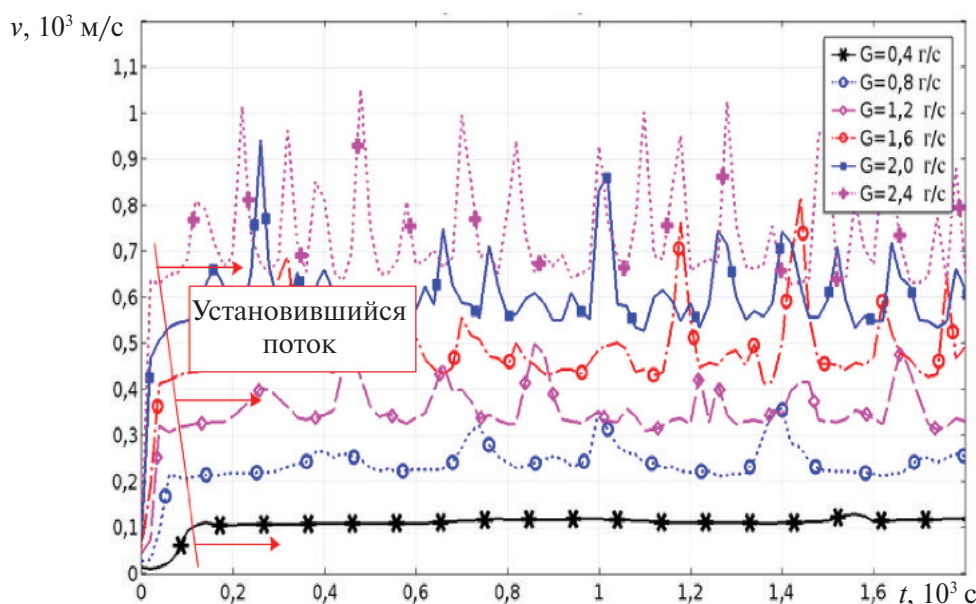


Рис. 3. Графики зависимости максимальной скорости на выходе расчетной области от времени

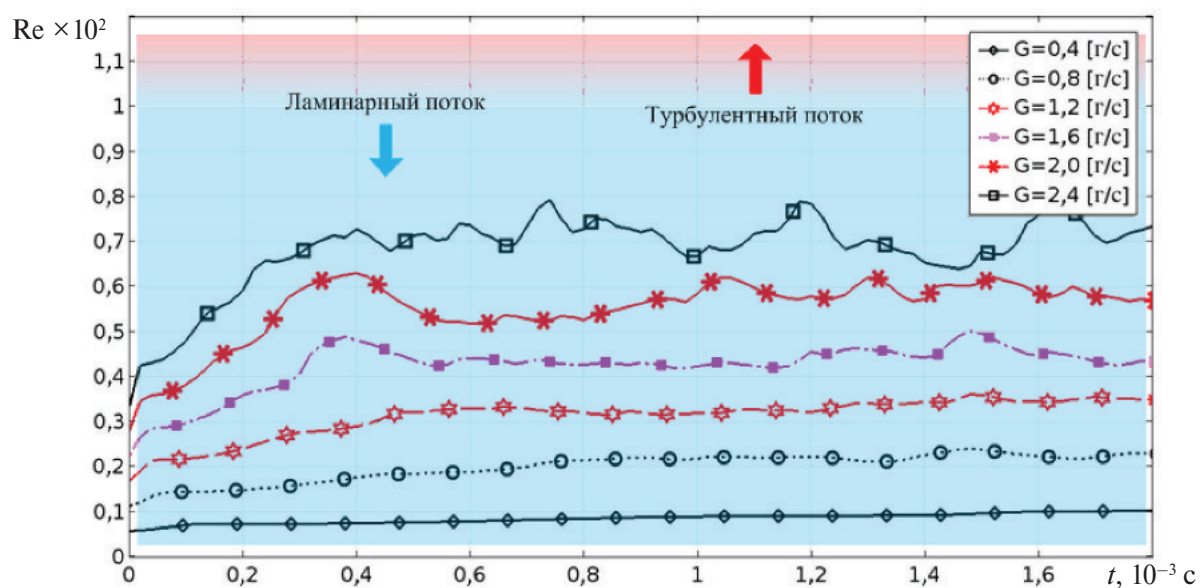


Рис. 4. Графики зависимости числа Рейнольдса от времени

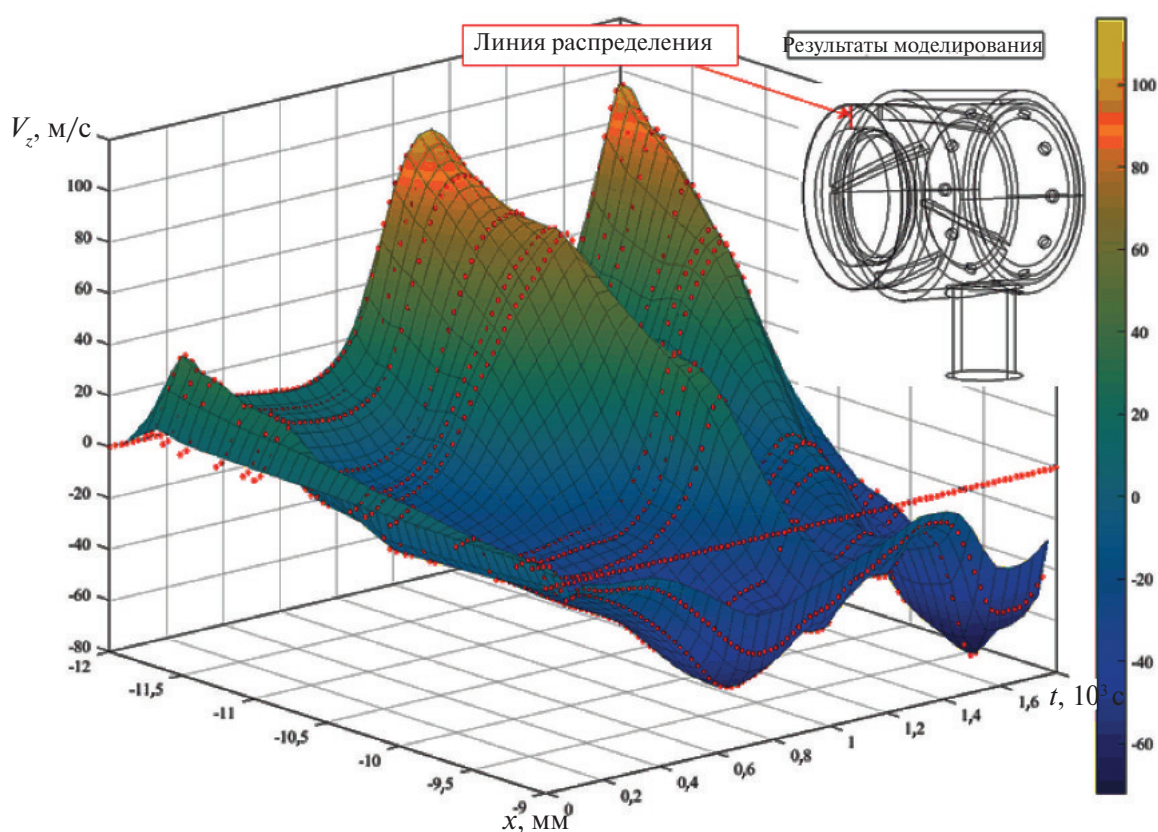
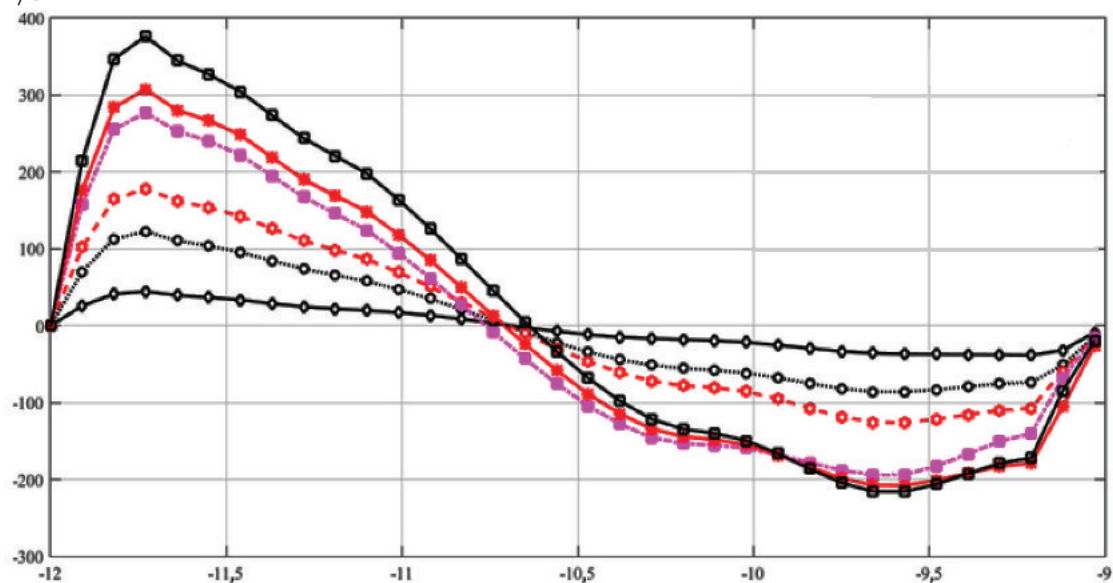


Рис. 5. График распределения скорости  $v_z$  при расходе газа 0,4 г/с



а)  $V_z$ , м/с



б)  $V_y$ , м/с

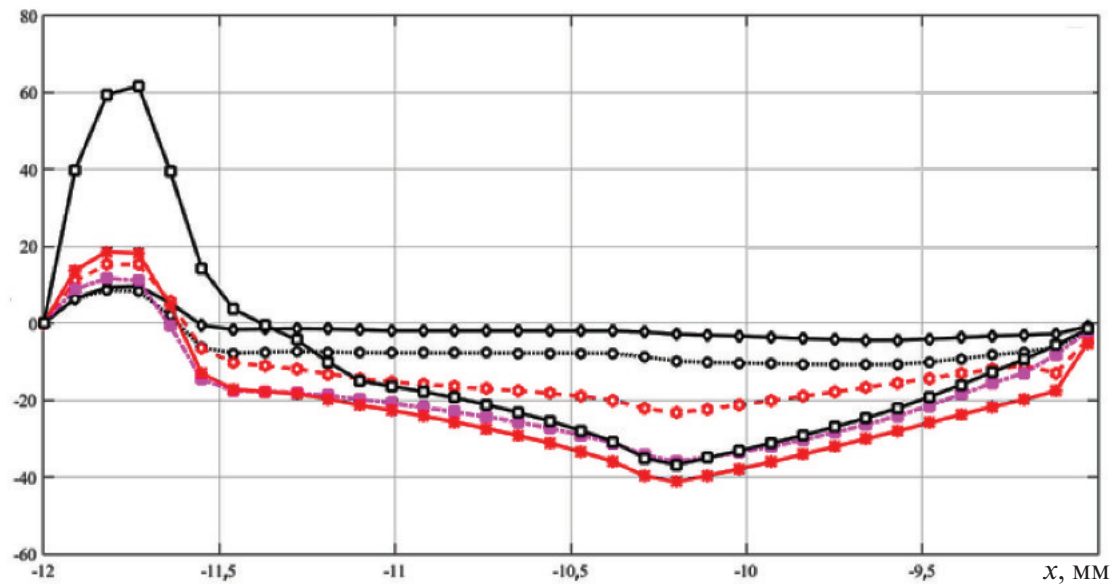


Рис. 6. Графики распределения скоростей  $v_z$  (а) и  $v_y$  (б) при разных расходах газа  $G$ , г/с:  
 $\blacklozenge$   $G = 0,4$ ;  $\circ$   $G = 0,8$ ;  $\bigcirc$   $G = 1,2$ ;  $\blacksquare$   $G = 1,6$ ;  $\ast$   $G = 2,0$ ;  $\boxplus$   $G = 2,4$

личных расходах газа в зависимости от времени. Оценка максимальной скорости на выходе расчетной области (рис. 3) позволяет получить значение времени формирования установившегося потока, которое при минимальном расходе газа составляет 0,1 мс.

Время формирования установившегося потока — важнейший параметр для процесса создания системы автоматического поджига плазмотрона.

С целью оценки корректности выбора математической модели был построен график зависимости числа Рейнольдса от времени (рис. 4), из которого видно, что поток в катодном узле плазмотрона является ламинарным.

Основная задача моделирования — получить распределения осевой и радиальной скоростей как граничных условий для моделирования двухмерной осесимметричной задачи. Осевая скорость плазмотрона в рамках данной задачи —  $v_z$ , а радиальная скорость —  $v_y$  для двухмерной осесимметричной задачи.

Пример распределения скорости  $v_z$  вдоль линии распределения в зависимости от координаты  $x$  и времени при расходе газа 0,4 г/с представлен на рис. 5.

Из графика распределения скорости  $v_z$  (см. рис. 5) видно, что для использования данных условий в качестве граничных для моделирования плазмотрона требуется усреднение по времени. Графики скоростей  $v_z$  и  $v_y$  в зависимости от координаты при разных расходах газа представлены на рис. 6.

Распределение скорости  $v_z$  может быть интерполировано полиномом пятой степени:

$$v_z = a_1x^5 + a_2x^4 + a_3x^3 + a_4x^2 + a_5x + a_6. \quad (3)$$

Коэффициенты полинома для скорости  $v_z$  представлены в табл. 1.

Зависимость коэффициентов полинома для скорости  $v_z$  от расхода газа может быть описана полиномом второй степени

$$a_n = b_1G^2 + b_2G + b_3, \quad (4)$$

где  $G$  — расход газа, г/с. Коэффициенты полинома для выражения (4) представлены в табл. 2.

По аналогии со скоростью  $v_z$  скорость  $v_y$  может быть интерполирована полиномом седьмой степени:

Таблица 1

Коэффициенты полинома для скорости  $v_z$

$G$ , г/с	$a_1$	$a_2$	$a_3 \cdot 10^2$	$a_4 \cdot 10^3$	$a_5 \cdot 10^4$	$a_6 \cdot 10^4$
0,4	20,7	1087,0	227,4	237,6	123,9	258,1
0,8	41,8	2178,0	452,8	470,1	243,8	505,0
1,2	62,2	3239,0	673,9	700,4	363,5	753,8
1,6	80,5	4164,0	861,0	889,3	458,9	946,3
2,0	102,1	5306,0	1102,0	1143,0	592,0	1225,0
2,4	112,1	5814,0	1205,0	1247,0	644,7	1332,0

Таблица 2

Коэффициенты полинома для выражения (4)

$a_n$	$b_1$	$b_2$	$b_3$
$a_1$	−5,6	62,6	−4,1
$a_2$	−289,2	3234,0	−194,9
$a_3$	−5942,0	6680,0	−3732,0
$a_4$	−6126,0	689700,0	−35710,0
$a_5$	−315200,0	3557000,0	−170000,0
$a_6$	−647200,0	7328000,0	−321500,0



Таблица 3

Коэффициенты полинома для скорости  $v_y$

$G, \text{ г/с}$	$c_1$	$c_2$	$c_3 \cdot 10^2$	$c_4 \cdot 10^3$	$c_5 \cdot 10^4$	$c_6 \cdot 10^5$	$c_7 \cdot 10^5$	$c_8 \cdot 10^5$
0,4	8,0	577,6	179,5	309,3	319,2	197,4	676,8	992,9
0,8	11,6	842,4	262,2	452,7	468,2	290,0	996,4	1465,0
1,2	21,0	1529,0	477,4	826,8	857,6	532,8	1836,0	2707,0
1,6	20,8	1513,0	471,7	815,7	844,8	524,0	1803,0	2653,0
2,0	29,6	2162,0	675,8	1171,0	1216,0	756,4	2609,0	3851,0
2,4	38,1	2765,0	858,7	1479,0	1526,0	942,6	3230,0	4736,0

Таблица 4

Коэффициенты полинома для выражения (6)

$C_n$	$e_1$	$e_1$
$c_1$	14,6	1,0
$c_2$	1063,0	76,9
$c_3$	33080,0	2444,0
$c_4$	570900,0	43190,0
$c_5$	5903000,0	455100,0
$c_6$	36550000,0	2889000,0
$c_7$	125500000,0	10150000,0
$c_8$	184400000,0	15220000,0

$$v_y = c_1x^7 + c_2x^6 + c_3x^5 + c_4x^4 + c_5x^3 + c_6x^2 + c_7x + c_8. \tag{5}$$

Коэффициенты полинома для скорости  $v_y$  представлены в табл. 3.

Зависимость коэффициентов полинома для скорости  $v_y$  от расхода газа по аналогии со скоростью  $v_z$  может быть описана полиномом первой степени

$$c_n = e_1G + e_2. \tag{6}$$

Коэффициенты полинома для выражения (6) представлены в табл. 4.

### Заключение

Численное моделирование формирователя вихревой стабилизации дуги позволяет определить характер потока и граничные условия для

моделирования двухмерной осесимметричной мультифизической задачи. Было установлено, что во всем используемом диапазоне расходаемого газа от 0,4 до 2,4 г/с поток является ламинарным.

Результаты моделирования позволяют определить время формирования установившегося потока, которое необходимо знать при создании алгоритма пуска плазмотрона.

Получены усредненные во времени зависимости  $v_z$  и  $v_y$  от координаты. Использование полученных интерполяционных полиномиальных функций позволяет определить распределения  $v_z$  и  $v_y$  при любом значении расходаемого газа из диапазона 0,4–2,4 г/с. Разработанная трехмерная нестационарная модель дает возможность учесть вихревую стабилизацию электрической дуги в прикатодной области.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фролов В.Я., Дресвин С.В., Лисенков А.А.** Электротехнологические промышленные установки. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2010. 752 с.
2. **Донской А.В., Клубник В.С.** Электроплазменные процессы и установки в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1979. 221 с.
3. **Эсибиян Э.М.** Плазменно-дуговая аппаратура. Киев: Техника, 1971. 164 с.
4. **Юшин Б.А.** Разработка воздушно-плазменной электротехнологии нанесения защитно-декоративных покрытий: Дисс. ... канд. техн. наук. / СПбГПУ, 2010. 168 с.
5. **Frolov V., Petrov G., Yushin B., Dubov M., Churkin I., Ivanov D.** Research and development of plasma technologies of spraying of coatings //Proc. 18th Symposium on Physics of Switching Arc. Nové Město na Moravě, Czech Republic. 2009. P. 162–165.
6. **Фролов В.Я.** Техника и технологии нанесения покрытий. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2008. 387 с.
7. **Жуков М.Ф.** Экспериментальные исследования плазмотронов. Новосибирск: Наука, 1977. 392 с.
8. **Аньшаков А.С., Жуков М.Ф., Косинов В.А., Рудакова В.А., Янковский А.И.** Исследование массообмена дуги, стабилизированной вихрем, с окружающим газом // Генераторы низкотемпературной плазмы: VII всесоюз. конф.: Алма-Ата, 1977. Т. 1. С. 179–182.
9. **Калихман Л.Е.** Элементы магнитной газодинамики. М.: Атомиздат, 1964. 423 с.
10. **Красников Г.Е., Нагорнов О.В., Старостин Н.В.** Моделирование физических процессов с использованием пакета Comsol Multiphysics. М.: Изд-во НИЯУ МИФИ, 2012. 184 с.
11. **Сегерлинд Л.** Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979. 393 с.
12. **Жуков М.Ф.** Физика дугового разряда (сборник трудов). Новосибирск. 1972. 157 с.
13. **Белов И.А., Исаев С.А.** Моделирование турбулентных течений. СПб.: Изд-во Балт. гос. техн. ун-та, 2001. 108 с.

## REFERENCES

1. **Frolov V.Ya., Dresvin S.V., Lisenkov A.A.** Elektrotekhnologicheskiye promyshlennyye ustanovki. [Electrotechnological industrial installations.] St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2010. 752 s. (rus)
2. **Donskoy A.V., Klubnikin V.S.** Elektroplazmennyye protsessy i ustanovki v mashinostroyenii. [Electro-plasma processes and installations in mechanical engineering]. Leningrad: Mashinostroyeniye, 1979. 221 s. (rus)
3. **Esibiyani E.M.** Plazmenno-dugovaya apparatura. [Plasma arc equipment]. Kiyev: Tekhnika, 1971. 164 s. (rus)
4. **Yushin B.A.** Razrabotka vozduшно-plazmennoy elektrotekhnologii naneseniya zashchitno-dekorativnykh pokrytiy: Diss. ... kand.tekhn.nauk [Development of air-plasma technology of spraying of protective and decorative coatings.] St.Petersburg: SPbGPU Publ., 2010. 168 s. (rus)
5. **Frolov V., Petrov G., Yushin B., Dubov M., Churkin I., Ivanov D.** Research and development of plasma technologies of spraying of coatings. *Proc. 18th Symposium on Physics of Switching Arc. Nové Město na Moravě, Czech Republic.* 2009 P. 162–165.
6. **Frolov V.Ya.** Tekhnika i tekhnologii naneseniya pokrytiy. [Coating technique and technology]. St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2008. 387 s. (rus)
7. **Zhukov M.F.** Eksperimentalnyye issledovaniya plazmotronov. [Experimental studies of plasma torches]. Novosibirsk: Nauka, 1977. 392 s. (rus)
8. **Anshakov A.S., Zhukov M.F., Kosinov V.A., Rudakova V.A., Yankovskiy A.I.** Issledovaniye massoobmena dugi, stabilizirovannoy vikhrem, s okruzhayushchim gazom. [Study of mass arc transfer, vortex stabilized, with the surrounding gas.]. *Generatory nizkotemperaturnoy plazmy: VII vsesoyuz. konf.* Alma-Ata, 1977. T.1. S. 179–182. (rus)
9. **Kalikhman L.Ye.** Elementy magnitnoy gazodinamiki. [Elements of magnetic gas dynamics]. Moscow: Atomizdat, 1964. 423 s. (rus)
10. **Krasnikov G.Ye., Nagornov O.V., Starostin N.V.** Modelirovaniye fizicheskikh protsessov s ispolzovaniyem paketa Comsol Multiphysics. [Simulation of physical processes using Comsol Multiphysics package]. Moscow: Izd-vo NIYaU MIFI, 2012. 184 s. (rus)
11. **Segerlind L.** Primeneniye metoda konechnykh elementov. [Application of Finite Element Method]. Moscow: Mir, 1979. 393 s. (rus)
12. **Zhukov M.F.** Fizika dugovogo razryada (sbornik trudov). [Arc physics (Proceedings)]. Novosibirsk, 1972. 157 s. (rus)
13. **Belov I.A., Isayev S.A.** Modelirovaniye turbulentnykh techeniy. [Simulation of turbulent flows]. St.Petersburg: Izd-vo BSTU, 2001. 108 s. (rus)

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS**

**МУРАШОВ Юрий Васильевич** – ассистент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.  
195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.  
E-mail: iuriimurashov@gmail.com

**MURASHOV Iurii V.** – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.  
E-mail: iuriimurashov@gmail.com

DOI 10.5862/JEST.243.7

УДК 621.313.322-81

*Н.В. Гришин*

## **СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ РЕЖИМНЫХ ЗАДАЧ ШЕСТИФАЗНЫХ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ ПРЕДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ**

*N.V. Grishin*

### **EQUIVALENT CIRCUITS FOR OPERATION CONDITIONS PROBLEMS OF SIX PHASE TURBINE GENERATORS OF MAXIMUM CAPACITY**

В современной российской энергетике при постройке энергоблоков мощностью больше 1000 МВт находят применение шестифазные турбогенераторы. Режимные вопросы эксплуатации шестифазного турбогенератора могут быть рассмотрены по аналогии с трехфазными машинами на базе уравнений состояния по двум взаимно перпендикулярным осям типа уравнений Парка—Горева, записанным для идеализированной машины. Исследование упрощается, если действительную машину, обмотки ротора и статора которой связаны электромагнитно, эквивалентировать схемами замещения, элементы которых связаны только электрически. Используя изображение переменных в векторной форме и рассматривая установившийся, переходный и сверхпереходный режимы, можно получить схемы замещения, имеющие общую структуру и различающиеся параметрами. При этом появляется возможность рассматривать широкий спектр задач — установившихся и переходных, в том числе при различной нагрузке трехфазных систем. Кроме того, схемы замещения могут применяться для анализа режимов работы энергоблока, для рассмотрения режимных вопросов энергосистемы и т.д. В качестве примера рассмотрены режимы установившихся коротких замыканий. Результаты согласуются с опытными значениями, полученными в ходе испытаний серийного оборудования.

**ТУРБОГЕНЕРАТОРЫ ПРЕДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ; ШЕСТИФАЗНЫЕ ТУРБОГЕНЕРАТОРЫ; РЕЖИМНЫЕ ЗАДАЧИ; УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ; СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ.**

Six-phase turbine generators are commonly used in the modern Russian power industry when constructing power-generating units of more than 1000 MW. Issues of operation conditions of a six-phase turbine generator could be studied by analogy with three-phase machines based on equations of state for two mutually perpendicular axes of the Park-Gorev type written for an idealized machine. The investigation is simplified if the real machine whose rotor and stator windings are electromagnetically coupled is replaced by equivalent circuits with only electrical coupling between its components. Equivalent circuits could be created by representing the variables in vector form and investigating the steady-state, transient and sub-transient conditions. These circuits have a common structure and differ only by their parameters. In this case, a broad range of steady-state and transient problems could be studied, including those with different loads of three-phase systems. In addition, equivalent circuits could be used for studying the operation conditions of power-generating units, the operation problems of energy systems, and so on. The conditions of steady short circuits of a turbine generator are considered as an example. The obtained results correspond with the experimental values found from serial production tests.

**TURBINE GENERATORS OF MAXIMUM CAPACITY; SIX-PHASE TURBOGENERATORS; CONDITIONS PROBLEMS; OPERATION CONDITIONS EQUATIONS; EQUIVALENT CIRCUITS.**

#### **Введение**

Одно из решений при постройке энергоблоков мощностью выше 1000 МВт сводится к при-

менению шестифазных двухполюсных турбогенераторов. Подобный опыт впервые был реализован для генератора ТВВ-1200-2УЗ мощ-

ностью 1200 МВт на Костромской ГРЭС [1] и продолжает воплощаться сейчас на ряде АЭС.

Шестифазная обмотка статора представляет собой двойную обмотку, состоящую из двух трехфазных систем со смещенными в пространстве на 30 электрических градусов магнитными осями (системы 1 и 2). Такая схема статорной обмотки позволяет приблизить форму пространственного распределения поля реакции якоря к синусоидальной и тем самым снизить добавочные потери и паразитные электромагнитные моменты, повысить использование машины [2]. Для генераторов предельной мощности подключение шестифазной системы к трехфазной сети, как правило, осуществляется с помощью трехобмоточного блочного повышающего трансформатора за счет соединения обмоток генераторного напряжения в звезду и треугольник.

Шестифазный турбогенератор при одинаковой нагрузке трехфазных обмоток может исследоваться с помощью обычно приводимых в каталогах параметров — продольной, переходной и сверхпереходной реактивностей и ЭДС, т.е. эквивалентированием трехфазной машиной. В более общем случае нагрузка трехфазных систем различна. Из-за электромагнитной связи между трехфазными обмотками общие режимы работы шестифазного турбогенератора не могут быть рассмотрены с достаточной точностью методами трехфазных машин.

Исследование работы машины упрощается, если действительную машину, обмотки ротора и статора которой связаны электромагнитно, эквивалентировать схемами замещения, элементы которых связаны только электрически [3].

Цель излагаемой работы — предложить схемы замещения шестифазного турбогенератора, отражающие особенности электромагнитных связей и позволяющие анализировать установившиеся и переходные процессы при обычных принимаемых в теории электрических машин допущениях [4].

### Методика решения поставленной задачи

На основе уравнений состояния шестифазного турбогенератора типа уравнений Парка—Горева могут быть составлены схемы замещения, отличающиеся тем, что входящие в них параме-

тры неизменны и не зависят от рассматриваемых режимов (в отличие от [2, 5, 6]).

Используя представление переменных в комплексной форме, из рассмотрения установившегося, переходного и сверхпереходного режимов по данным уравнениям можно получить схемы замещения для анализа установившихся, переходных и сверхпереходных процессов шестифазного турбогенератора с использованием симметричных составляющих по аналогии с хорошо разработанными методами трехфазных машин.

### Уравнения состояния шестифазного турбогенератора

Режимные вопросы эксплуатации шестифазного турбогенератора могут быть рассмотрены по аналогии с трехфазными машинами на базе уравнений состояния по двум взаимно перпендикулярным осям подобно уравнениям Парка—Горева, записанным для идеализированной машины [7],

$$\begin{aligned} U_{d1} &= p\Psi_{d1} - \Psi_{q1}p\gamma - r_{d1}i_{d1}; \\ U_{q1} &= p\Psi_{q1} + \Psi_{d1}p\gamma - r_{q1}i_{q1}; \\ U_{01} &= p\Psi_{01} - r_{01}i_{01}; \\ U_{fd} &= p\Psi_{fd} + r_{fd}i_{fd}; \\ 0 &= p\Psi_{ed} + r_{ed}i_{ed}; \\ 0 &= p\Psi_{eq} + r_{eq}i_{eq}, \end{aligned} \quad (1)$$

и уравнений связи токов и потокосцеплений

$$\begin{aligned} \Psi_{d1} &= x_{\sigma 11}i_{d1} + x_{\sigma 12}(i_{d1} + i_{d2}) + x_{ad}(i_{d1} + i_{d2} + i_{fd} + i_{ed}); \\ \Psi_{q1} &= x_{\sigma 11}i_{q1} + x_{\sigma 12}(i_{q1} + i_{q2}) + x_{aq}(i_{q1} + i_{q2} + i_{eq}); \\ \Psi_{01} &= x_{01}i_{01}; \\ \Psi_{fd} &= x_{\sigma fd}i_{fd} + x_{ad}(i_{d1} + i_{d2} + i_{fd} + i_{ed}); \\ \Psi_{ed} &= x_{\sigma ed}i_{ed} + x_{ad}(i_{d1} + i_{d2} + i_{fd} + i_{ed}); \\ \Psi_{eq} &= x_{\sigma eq}i_{eq} + x_{aq}(i_{q1} + i_{q2} + i_{eq}). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь и далее для краткости будем приводить выражения только для первой трехфазной системы шестифазного неявнополюсного генератора; для второй системы выражения аналогичны и получаются перестановкой индексов 1 и 2. Отличительной особенностью предлагаемого подхода является представление рассеяния трехфазной системы в виде суммы собственного рассеяния  $x_{\sigma 11}$  и рассеяния  $x_{\sigma 12}$  по путям взаимной индукции с другой трехфазной системой.

### Схемы замещения при динамических режимах

Согласно структуре уравнений (1) и (2) при рассмотрении режимных задач шестифазный турбогенератор может быть представлен двумя электромагнитно и механически связанными трехфазными синхронными машинами. Для уравнений по продольной оси схема замещения представлена на рис. 1.

Потокосцепления  $\Psi_{d1}, \Psi_{d2}$  определяются напряжениями между точками  $a1-0, a2-0$ :

$$u_{a10} = \frac{d\Psi_{d1}}{d\tau}; \quad u_{a20} = \frac{d\Psi_{d2}}{d\tau}.$$

Аналогичная схема для уравнений поперечной оси, отличающаяся отсутствием цепи возбуждения, напряжениями ( $U_{q1}, U_{q2}$  вместо  $U_{d1}, U_{d2}$ ), параметрами ( $x_{aq}, x_{\sigma eq}, r_{eq}$  вместо  $x_{ad}, x_{\sigma ed}, r_{ed}$ ),

$r_{ed}$ ) и ЭДС вращения ( $\omega\Psi_{d1}, \omega\Psi_{d2}$  вместо  $-\omega\Psi_{q1}, -\omega\Psi_{q2}$ ) представлена на рис. 2.

Подобным образом могут быть синтезированы схемы замещения для различных условий работы машины.

### Установившийся режим прямой последовательности

В установившемся режиме в уравнениях токи успокоительных контуров отсутствуют; при равенстве нулю производных и пренебрежении активным сопротивлением статора составляющие напряжений первой трехфазной системы обмотки статора равны (для второй получаются заменой индексов 1 на 2):

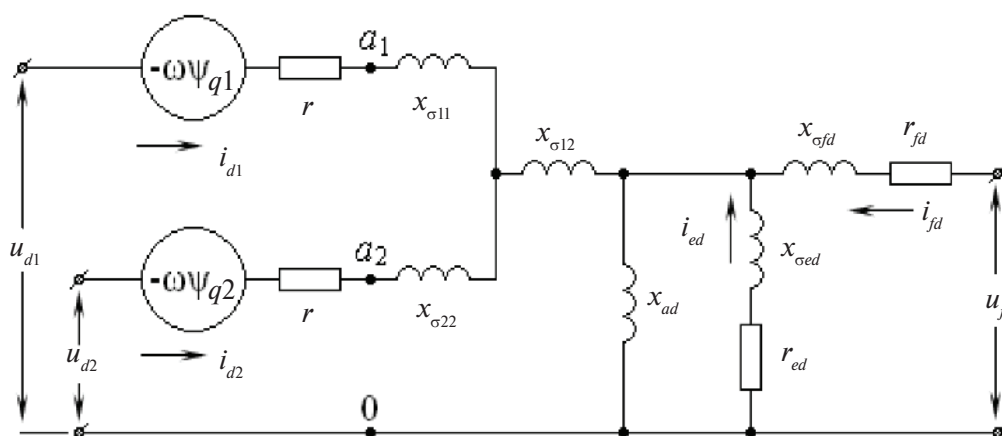


Рис. 1. Схема замещения по продольной оси

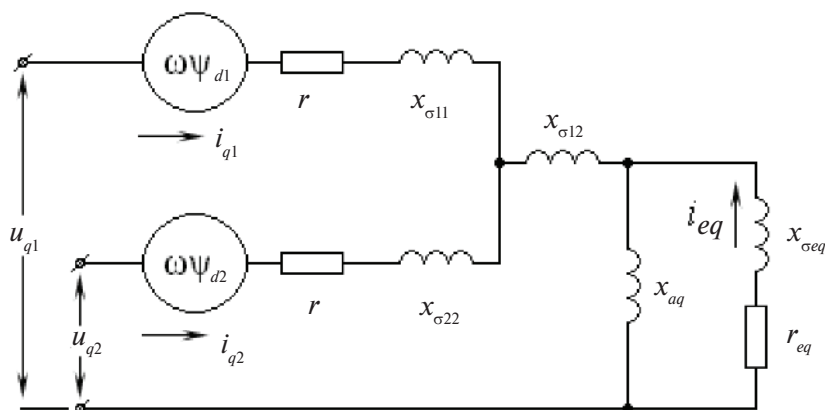


Рис. 2. Схема замещения по поперечной оси



$$\begin{aligned}
 U_{d1} &= -\omega x_{\sigma 11} i_{q1} - \omega x_{\sigma 12} (i_{q1} + i_{q2}) - \omega x_{aq} (i_{q1} + i_{q2}) = \\
 &= -\omega x_{\sigma 11} i_{q1} - \omega x_{q3} (i_{q1} + i_{q2}); \\
 U_{q1} &= \omega x_{\sigma 11} i_{d1} + \omega x_{\sigma 12} (i_{d1} + i_{d2}) + \omega x_{ad} (i_{d1} + i_{d2} + i_{fd}) = \\
 &= \omega x_{\sigma 11} i_{d1} + \omega x_{d3} (i_{d1} + i_{d2}) + \omega x_{ad} i_{fd}.
 \end{aligned}$$

Эти выражения можно представить в комплексной форме. Координаты  $d, q$  совмещаются соответственно с вещественной и мнимой осями комплексной плоскости. При  $x_{ad} = x_{aq}$ , введя обозначения

$$\dot{U}_1 = U_{d1} + jU_{q1}; \quad \dot{U}_2 = U_{d2} + jU_{q2};$$

$$\dot{I}_1 = i_{d1} + ji_{q1}; \quad \dot{I}_2 = i_{d2} + ji_{q2}; \quad \dot{E} = -j\omega x_{ad} i_{fd},$$

получим

$$\begin{aligned}
 \dot{U}_1 &= -\dot{E} + j\omega x_{\sigma 11} \dot{I}_1 + j\omega x_{d3} (\dot{I}_1 + \dot{I}_2), \\
 \dot{U}_2 &= -\dot{E} + j\omega x_{\sigma 22} \dot{I}_2 + j\omega x_{d3} (\dot{I}_1 + \dot{I}_2).
 \end{aligned} \quad (3)$$

### Переходный режим прямой последовательности

Рассматривая переходные процессы в энергосистеме, зачастую можно пренебречь трансформаторными ЭДС и активным сопротивлением обмотки статора:

$$\frac{d\Psi_{d1}}{d\tau} = \frac{d\Psi_{d2}}{d\tau} = \frac{d\Psi_{q1}}{d\tau} = \frac{d\Psi_{q2}}{d\tau} = 0; \quad r = 0.$$

Тогда запишем для первой системы (для второй — аналогично с заменой индексов 1 на 2):  $U_{d1} = -\Psi_{q1}\omega$ ;  $U_{q1} = \Psi_{d1}\omega$ .

Токи успокоительных контуров ротора быстро затухают, поэтому для переходного режима  $i_{ed} = i_{eq} = 0$ . Используя принцип постоянства потокосцепления с обмоткой возбуждения, можно записать согласно (2)

$$\begin{aligned}
 \Psi_{fd} \frac{x_{ad}}{x_{fd}} &= x_{ad} i_{fd} + \frac{x_{ad}^2}{x_{fd}} (i_{d1} + i_{d2}) = \\
 &= x_{ad} i_{fd0} + \frac{x_{ad}^2}{x_{fd}} (i_{d10} + i_{d20}).
 \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь  $i_{fd0}, i_{d10}, i_{d20}$  — начальные значения переменных, соответствующие исходному режиму при возникновении возмущения. Определяя из этого уравнения ток возбуждения и подставляя его в потокосцепления (2), определим

$$\begin{aligned}
 U_{d1} &= -\omega x_{\sigma 11} i_{q1} - \omega x_{q3} (i_{q1} + i_{q2}), \\
 U_{q1} &= \omega x_{\sigma 11} i_{d1} + \omega x'_{d3} (i_{d1} + i_{d2}) + E'_d.
 \end{aligned}$$

Здесь переходная ЭДС равна  $E'_d = \Psi_{fd} \frac{x_{ad}}{x_{fd}} = E_0 + (x_{d3} - x'_{d3})(i_{d10} + i_{d20})$  при начальном значении ЭДС  $E_0 = \omega x_{ad} i_{fd0}$  и продольных составляющих токов статора  $i_{d10}, i_{d20}$ . Переходное сопротивление по продольной оси

$$x'_{d3} = x_{\sigma 12} + \frac{x_{ad} x_{\sigma fd}}{x_{ad} + x_{\sigma fd}}. \quad (5)$$

В векторной форме по аналогии с (3) для установившегося режима получаем

$$\begin{aligned}
 \dot{U}_1 &= -\dot{E}'_d + j\omega x_{\sigma 11} \dot{I}_1 + j\omega x'_{d3} (\dot{I}_1 + \dot{I}_2); \\
 \dot{U}_2 &= -\dot{E}'_d + j\omega x_{\sigma 22} \dot{I}_2 + j\omega x'_{d3} (\dot{I}_1 + \dot{I}_2).
 \end{aligned} \quad (6)$$

### Сверхпереходный режим прямой последовательности

Сверхпереходным считается переходный режим при постоянстве потокосцеплений  $\Psi_{fd} = \text{const}$ ;  $\Psi_{ed} = \text{const}$ ;  $\Psi_{eq} = \text{const}$ .

При этом условии можно связать приращения токов  $\Delta i_{fd} = i_{fd} - i_{fd0}$ ;  $\Delta i_{d1} = i_{d1} - i_{d10}$ ;  $\Delta i_{d2} = i_{d2} - i_{d20}$ ;  $\Delta i_{d1} = i_{d1} - i_{d10}$ ;  $\Delta i_{d2} = i_{d2} - i_{d20}$  при изменении режима:

$$\begin{aligned}
 x_{fd} \Delta i_{fd} + x_{ad} (\Delta i_{d1} + \Delta i_{d2}) + x_{ad} i_{ed} &= 0; \\
 x_{ed} i_{ed} + x_{ad} (\Delta i_{d1} + \Delta i_{d2}) + x_{ad} \Delta i_{fd} &= 0; \\
 x_{eq} i_{eq} + x_{aq} (\Delta i_{q1} + \Delta i_{q2}) &= 0.
 \end{aligned}$$

Записывая в приращениях потокосцепление первой системы в продольной оси, получаем

$$\begin{aligned}
 \Psi_{d1} &= \Psi_{d10} + \Delta \Psi_{d1} = \\
 &= \Psi_{d10} + x_{\sigma 11} \Delta i_{d1} + x'_{d3} (\Delta i_{d1} + \Delta i_{d2})
 \end{aligned}$$

и напряжение в поперечной оси

$$U_{q1} = \omega \Psi_{d1} = E''_d + \omega x_{\sigma 11} i_{d1} + \omega x''_{d3} (i_{d1} + i_{d2}).$$

Сюда входят сверхпереходная продольная ЭДС

$$E''_d = E_0 + \omega (x_{d3} - x''_{d3})(i_{d10} + i_{d20})$$

и сверхпереходная продольная реактивность

$$x''_{d3} = x_{\sigma 12} + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{\sigma fd}} + \frac{1}{x_{\sigma ed}}}.$$

Аналогично можно получить выражения для напряжений продольной оси:

$$U_{d1} = -\omega \Psi_{q1} = -E_q'' - \omega x_{\sigma 11} i_{q1} - \omega x_{q3}'' (i_{q1} + i_{q2}).$$

Здесь – сверхпереходная поперечная ЭДС

$$E_q'' = \omega (x_{q3} - x_{q3}'') (i_{q10} + i_{q20})$$

и сверхпереходная поперечная реактивность

$$x_{q3}'' = x_{\sigma 12} + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{\sigma ed}}}.$$

В комплексной форме, полагая  $x_{d3}'' = x_{q3}''$ , получаем напряжения

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}'' + j\omega x_{\sigma 11} \dot{I}_1 + j\omega x_{d3}'' (\dot{I}_1 + \dot{I}_2); \quad (7)$$

$$\dot{U}_2 = -\dot{E}'' + j\omega x_{\sigma 22} \dot{I}_2 + j\omega x_{d3}'' (\dot{I}_1 + \dot{I}_2)$$

и ЭДС

$$\begin{aligned} \dot{E}' &= \dot{E}_0 - j\omega (x_{d3} - x_{d3}'') (i_{d10} + i_{d20}) - \\ &- j\omega (x_{q3} - x_{q3}'') (i_{q10} + i_{q20}). \end{aligned}$$

### Схема замещения для прямой последовательности

Полученные выражения (3), (6) и (7) по форме аналогичны друг другу; в зависимости от рассматриваемого режима изменяются индуктивные сопротивления и ЭДС. Для анализа установившегося режима используются  $x_{d3}$  и  $E$ , рассчитанная по току возбуждения; для исследования переходного режима – переходные параметры  $x_{d3}'$  и  $E_d'$ ; при рассмотрении сверхпереходного режима – сверхпереходные  $x_{d3}''$  и  $E''$ .

В приведенных выражениях указанные параметры  $x_{d3}$ ,  $x_{d3}'$ ,  $x_{d3}''$  отличаются от аналогичных

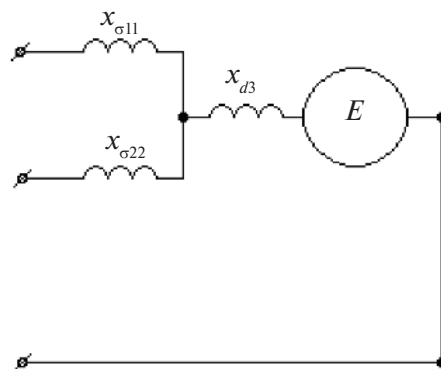


Рис. 3. Схема замещения шестифазного турбогенератора для установившегося режима прямой последовательности

общепринятых для трехфазных машин, потому что определяются без учета собственного рассеяния статорных обмоток  $x_{\sigma 11}$ ,  $x_{\sigma 22}$ .

По уравнениям (3), (6) и (7) могут быть построены схемы замещения для анализа режимных задач шестифазного турбогенератора, которые, в отличие от схем на рис. 1, 2, характеризуют связь между комплексными переменными.

Схема замещения для установившегося режима прямой последовательности приведена на рис. 3.

Данная схема может быть использована для анализа режимов энергоблока «шестифазный турбогенератор–трансформатор», при этом блочный повышающий трехобмоточный трансформатор представляется лучевой схемой замещения (рис. 4) [8].

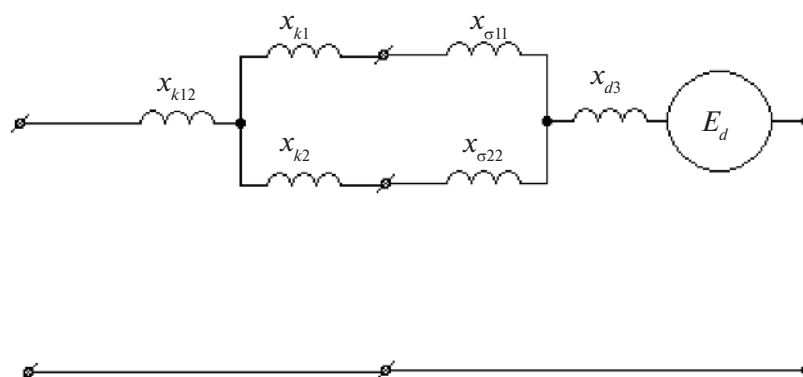


Рис. 4. Схема замещения энергоблока «шестифазный турбогенератор–трансформатор»

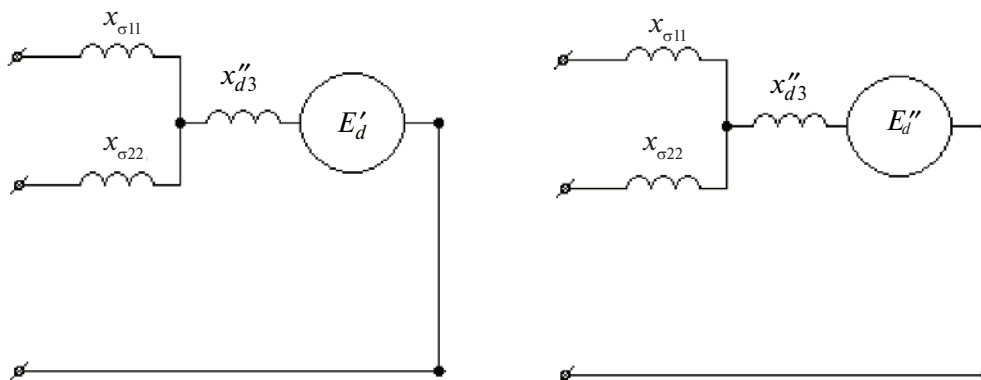


Рис. 5. Схемы замещения для переходного и сверхпереходного режимов прямой последовательности

Схемы замещения, соответствующие выражениям (6) и (7), приведены на рис. 5.

#### Схема замещения для обратной последовательности

Токи обратной последовательности создают магнитное поле, вращающееся в сторону противоположную направлению вращения ротора. При этом, как и для прямой последовательности, часть потока статора соответствует собственному рассеянию трехфазных систем статорной обмотки, а часть — взаимному рассеянию. Особенность режима обратной последовательности обусловлена тем, что ЭДС возбуждения относится только к прямой последовательности, а основной поток перемещается относительно ротора с двойной скоростью, индуцируя в демпферных контурах и обмотке возбуждения токи двойной частоты.

В случае синусоидальных напряжений статора и несинусоидальных токов сопротивление обратной последовательности трехфазной машины определяется [9] так:

$$x_2 = \frac{2x''_d x''_q}{x''_d + x''_q},$$

а в обратном случае — при несинусоидальных напряжениях статора и синусоидальных токах, что соответствует включенным последовательно индуктивным сопротивлениям (трансформаторы, линии электропередач) — согласно выражению

$$x_2 = \frac{x''_d + x''_q}{2}.$$

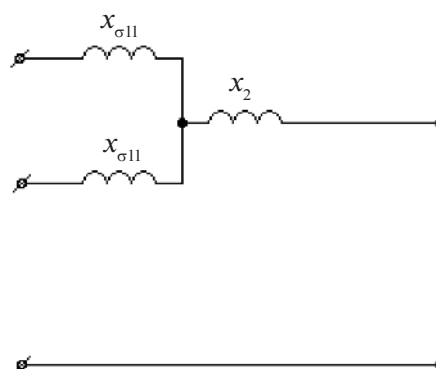


Рис. 6. Схема замещения шестифазного турбогенератора для обратной последовательности

В целом при наличии массивного ротора, обладающего значительными демпфирующими свойствами, для турбогенератора можно принять  $x''_d = x''_q$ , и, значит, как следует из представленных выше выражений,  $x_2 \approx x''_d$  [9].

В случае  $x_{\sigma 11} = x_{\sigma 22}$  для составляющих обратной последовательности можно использовать схему замещения рис. 6, при этом параметр этой последовательности равен  $x_2 = x''_{d3} - \frac{x_{\sigma 11}}{2}$ .

#### Схема замещения нулевой последовательности

Поскольку, как следует из (1) и (2), первые гармоники для потоков нулевой последовательности каждой трехфазной системы не взаимодействуют между собой, напряжения  $U_{01}$ ,  $U_{02}$  уравниваются падением напряжения на сопротивлениях нулевой последовательности  $x_{01}$ ,  $x_{02}$  от токов  $i_{01}$ ,  $i_{02}$ .

## Обсуждение результатов

В отечественной научно-технической литературе схемы замещения шестифазных турбогенераторов рассмотрены в серии статей. В [2, 5] приводятся отдельные схемы при шестифазном коротком замыкании из режима холостого хода. При этом каждая трехфазная система эквивалентруется своей схемой. Однако, схемы не отражают электромагнитных связей между контурами машины, сложны для использования при составлении эквивалентных схем энергоблока, узла энергосистемы и ориентированы на один переходный режим генератора. На их основе в [6] для симметричного установившегося режима интуитивно построены схемы замещения отдельных трехфазных систем и общая для генератора. Указанные схемы рассматривают лишь узкую совокупность симметричных шестифазных режимов, наглядность физической трактовки явлений с использованием этих схем неоднозначна, с их помощью не проследить влияние определяющих параметров.

В зарубежной практике шестифазные обмотки якоря не нашли применения в сверхмощных турбогенераторах и рассматриваются применительно к синхронным [10] и асинхронным машинам [11, 12], работающим с устройствами преобразования частоты. Возникающие при этом режимные задачи существенно отличаются от задач, характерных для турбогенераторов мощных энергоблоков.

Полученные в настоящей статье схемы замещения, во-первых, обладают существенной наглядностью и упрощают физическую трактовку протекающих процессов. Например, с их помощью легко объяснить факт снижения ударных токов и токов установившихся режимов при сравнении шестифазных и трехфазных коротких замыканий, ибо данные режимы различаются параллельным включением двух собственных индуктивностей рассеяния: две индуктивности в первом случае против одной во втором.

Во-вторых, эти схемы позволяют использовать современные схемно-ориентированные программные продукты (PSpice, KTechLab, TkGate и др.), не прибегая к непосредственному решению дифференциальных уравнений, как

это в настоящее время практикуется при проектировании электростанций и сетей.

В-третьих, при известных параметрах появляется возможность синтезировать схемы замещения для анализа широкого спектра задач. Преимущество изложенного метода заключается в возможности не изменять параметры машины в зависимости от рассматриваемых режимов и при заданных единожды параметрах исследовать любые режимы, в том числе установившиеся и переходные, симметричные и несимметричные, учитывать неодинаковые сопротивления ветвей блочного трансформатора, различные нагрузки трехфазных систем от собственных нужд станции и т.д.

В-четвертых, схемы замещения позволяют достаточно наглядно проследить основное влияние отдельных контуров на параметры машины в целом и иллюстрируют, какие дополнительные сведения можно получить из опытов при промышленных испытаниях шестифазных турбогенераторов, при этом нет необходимости проводить преобразования уравнений.

Например, схема рис. 3 показывает, что величина собственной индуктивности рассеяния может быть определена из опыта установившегося трехфазного короткого замыкания, т.к. напряжение на открытой трехфазной системе будет равно напряжению на этой индуктивности. Кроме того, как следует из схемы, индуктивное сопротивление собственного рассеяния может быть определено как удвоенная разность продольных индуктивных сопротивлений установившихся режимов трех- и шестифазных коротких замыканий.

**Пример.** В качестве примера рассмотрим режим установившегося трехфазного короткого замыкания. При этом  $\dot{U}_1 = 0$ ,  $\dot{I}_2 = 0$ ; при пренебрежении активным сопротивлением векторы  $\dot{U}_2$  и  $\dot{E}$  направлены по поперечной оси,  $\dot{I}_1$  совпадает с продольной осью. Тогда согласно (3) имеем

$$0 = j\omega x_{ad} \dot{I}_{fd} + j\omega x_{\sigma 11} \dot{I}_1 + j\omega x_{\sigma 12} \dot{I}_1 + j\omega x_{ad} \dot{I}_1;$$

$$\dot{U}_2 = j\omega x_{ad} \dot{I}_{fd} + j\omega x_{\sigma 12} \dot{I}_1 + j\omega x_{ad} \dot{I}_1.$$

Из первого выражения при известных параметрах можно построить характеристику трехфазного короткого замыкания. На рис. 7 приведена расчетная и опытная характеристики для

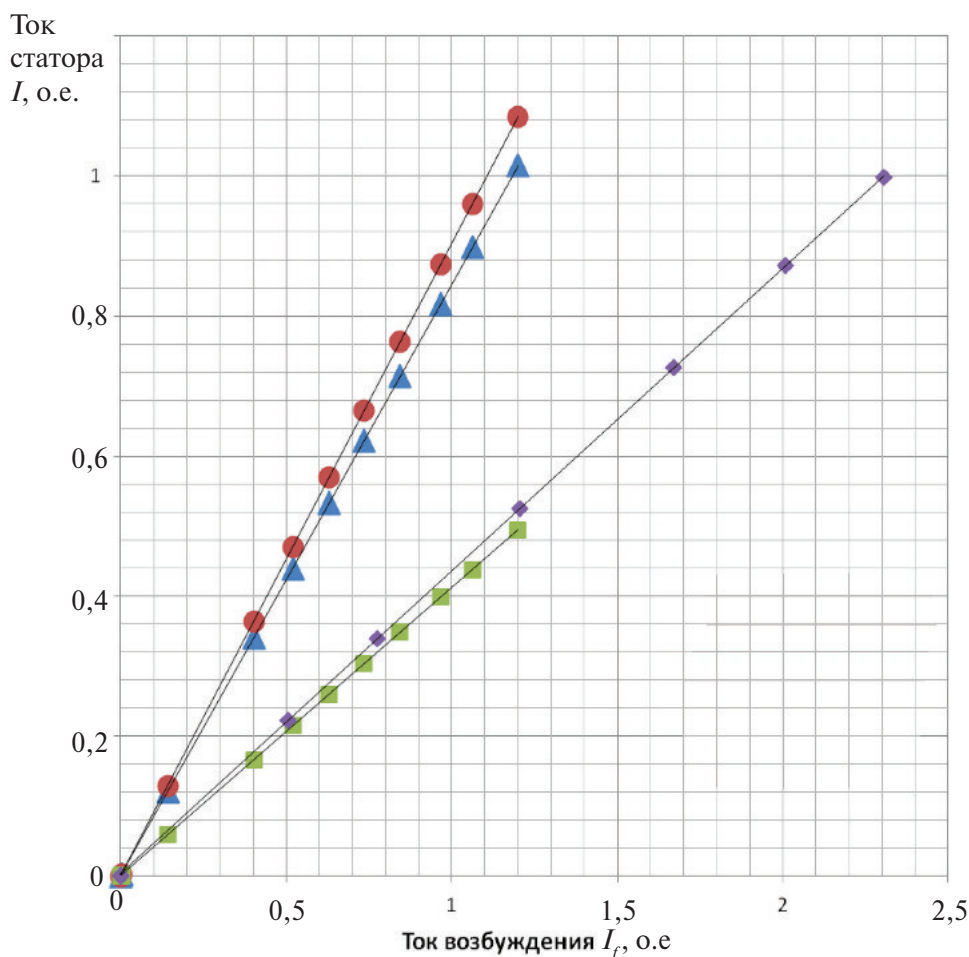


Рис. 7. Опытные и расчетные характеристики трехфазного (▲ — опыт; • — расчет) и шестифазного (◆ — опыт; ■ — расчет) коротких замыканий шестифазного турбогенератора

турбогенератора мощностью 1200 МВт, при этом максимальное различие между ними составило меньше 7%.

Как следует из схемы рис. 3, для шестифазного короткого замыкания собственные индуктивности рассеяния  $x_{\sigma 11}$  и  $x_{\sigma 22}$  обмотки статора включены параллельно, и при  $x_{\sigma 11} = x_{\sigma 22}$  суммарная собственная индуктивности рассеяния обмотки статора будет составлять  $0,5x_{\sigma 11}$ . Построенная на основании указанных соображений характеристика установившегося шестифазного короткого замыкания приведена на рис. 7; максимальное отклонение от опытных данных составляет менее 6 %.

Следует отметить, что результаты анализа существенно зависят от точности используемых

параметров; вопрос определения параметров будет рассмотрен в дальнейших публикациях.

### Выводы

1. Полученные на базе уравнений вида Парка—Горева схемы замещения позволяют рассматривать режимы работы шестифазного турбогенератора для широкого спектра задач: при различной нагрузке трехфазных систем, при различном распределении токов по отдельным фазам статора и т.д.

2. Схемы замещения обладают достаточной наглядностью, иллюстрируя реальные магнитные связи между трехфазными системами, позволяют проследить взаимосвязь параметров машины и проводить анализ с помощью



схемно-ориентированных программ без решения системы дифференциальных уравнений.

3. Эти схемы могут быть использованы как составные части в схемах замещения энергоблока и энергосистемы.

4. Расчетные результаты согласуются с опытными данными, полученными во время испытаний серийного оборудования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дроздова Л.А., Курилович Л.В., Фомин И.Ф., Хуторецкий Г.М. Результаты испытаний первого двухполюсного турбогенератора мощностью 1200 МВт на стенде завода «Электросила» // Сб. «Электросила». 1979. №32. С. 52–54.
2. Хуторецкий Г.М., Воронов Г.Г. Шестифазные турбогенераторы // Сб. «Электросила». 1970. № 28. С. 33–40.
3. Данилевич Я.Б., Домбровский В.В., Казовский Е.Я. Параметры электрических машин переменного тока. М., Л.: Наука, 1965. 339 с.
4. Важнов А.И. Основы теории переходных процессов синхронной машины. М., Л.: ГЭИ, 1960. 312 с.
5. Хуторецкий Г.М. Схемы замещения шестифазной неявнополюсной машины // Известия вузов. Электромеханика. 1970. №1. С. 27–33.
6. Хуторецкий Г.М., Воронов Г.Г. Схемы замещения, диаграммы и параметры шестифазного неявнополюсного генератора в установившихся режимах // Электромеханика. 1982. №11. С. 34–38.
7. Гришин Н.В. Уравнения режимных задач шестифазных турбогенераторов предельной мощности. // НТВ СПбГПУ. 2016. № 2 (243). С. 16–23. DOI 10.5862/JEST.243.2
8. Отчёт Б-ГЭ-5-76 по теме «Исследование сложных коротких замыканий в турбогенераторах» / карагандинский политехнический институт. Караганда, 1978. 166 с.
9. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия. 1974. 840 с.
10. Jatskevich J., Pekarek S. Six-phase synchronous generator-rectifier parametric average value modeling considering operational modes // HAIT Journal of Science and Engineering. 2005. Vol. 2, Is. 3–4. С. 365–385.
11. Singh G.K. Multi-phase induction machine drive research – a survey // Electric Power Systems Research. 2002. №61. С. 139–147.
12. Lipo T.A. A d–q model for six-phase induction machine // Proceedings on International conference. Electric machines. Athens. Greece. 1980. С. 860–867.

## REFERENCES

1. Drozdova L.A., Kurilovich L.V., Fomin I.F., Khutoretsky G.M. Rezultaty ispytaniy pervogo dvukhpolyusnogo turbogeneratora moshchnostyu 1200 MVt na stende zavoda «Elektrosila» [First two-pole turbine generator capacity 1200 MW Electrosila shop-tests results]. Collection «Elektrosila». 1979. № 32, S. 52–54. (rus)
2. Khutoretsky G.M., Voronov G.G. Shestifaznyye turbogeneratory. [Six-phase turbogenerators]. Collection «Elektrosila». 1970. № 28. S. 33 – 40. (rus)
3. Danilevich Ya.B., Dombrovskiy V.V., Kazovskiy Ye.Ya. Parametry elektricheskikh mashin peremennogo toka [Alternating current electrical machines parameters]. Moscow – Leningrad: Nauka, 1965. 339 p. (rus)
4. Vazhnov A.I. Osnovy teorii perekhodnykh protsessov sinkhronnoy mashiny [Foundation of transient analysis for synchronous machines]. Moscow – Leningrad: GEI, 1960. 312 s. (rus)
5. Khutoretsky G.M. Skhemy zameshcheniya shestifaznoy neyavnopolyusnoy mashiny. Izvestiya vuzov. Elektromekhanika. 1970. №1. S. 27–33. (rus.)
6. Khutoretsky G.M., Voronov G.G. Skhemy zameshcheniya, diagrammy i parametry shestifaznogo neyavnopolyusnogo generatora v ustanovivshikhsya rezhimakh [Equivalent circuits, diagrams and parameters of six-phase non-silentpole generators at steady state conditions]. Elektromekhanika. 1982. № 11. S. 34–38. (rus)
7. Grishin N.V. Uravneniia rezhimnykh zadach chestifaznykh turbogeneratov predelnoii moshnosti. [Equivalent circuits for operation conditions problems of six phase turbine generations of maximum capacity]. NTV SPbGPU. 2016. № 2. S. 16–23. DOI 10.5862/JEST.243.2. (rus)
8. Otchet B-GE-5-76 po teme «Issledovaniye slozhnykh korotkikh замыканий v turbogeneratorakh» [Difficult turbine generators short circuits research report] / Karagandinskiy politekhnicheskii institut. Karaganda, 1978. 166 s. (rus)
9. Voldek A.I. Elektricheskiye mashiny [Electrical machines]. Leningrad: Energiya, 1974. 840 s. (rus)
10. Jatskevich J., Pekarek S. Six-phase synchronous generator-rectifier parametric average value modeling considering operational modes. HAIT Journal of Science and Engineering. 2005. Vol. 2, Is.3–4. P. 365–385.
11. Singh G.K. Multi-phase induction machine drive research – a survey. Electric Power Systems Research. 2002. № 61. P. 139–147.
12. Lipo T.A. A d–q model for six-phase induction machine. Proceedings on International conference. Electric machines. Athens. Greece. 1980. P. 860–867.



#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS**

**ГРИШИН Николай Васильевич** – руководитель группы, ОАО «Силовые машины».  
195009, Санкт-Петербург, ул. Ватутина, 3А..  
E-mail: kostroma44@gmail.com

**GRISHIN Nikolai V.** – OJSC “Power Machines”.  
3A, Vatutina str., St.Petersburg, Russia, 195009..  
E-mail: kostroma44@gmail.com

DOI 10.5862/JEST.243.8

УДК 621.313.333.2

*В.Н. Забоин, Г.А. Чесноков*

## **ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ АНАЛИТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА СОСТАВЛЯЮЩИХ ПОТЕРЬ ХОЛОСТОГО ХОДА В АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ**

*V.N. Zaboin, G.A. Chesnokov*

## **ASSESSING THE ACCURACY OF ANALYTICAL METHODS FOR CALCULATING THE NO-LOAD LOSS COMPONENTS IN INDUCTION MOTORS**

В статье рассматриваются пути снижения потерь холостого хода в мощных асинхронных двигателях с целью повышения их энергоэффективности для соответствия требованиям современных стандартов и потребителей. Для асинхронных двигателей проведен сопоставительный анализ опытных потерь холостого хода с результатами расчетного разделение их на потери в обмотке статора, в стали и добавочные по двум различным аналитическим методикам. К потерям в стали отнесены как основные потери в стали, так и добавочные пульсационные. Отдельно рассмотрены добавочные потери в клетке ротора от токов зубцовой частоты статора, вызванных зубчатым строением сердечника статора. Показано, что существующие расчетные методики определения составляющих потерь холостого хода не обладают приемлемой точностью, необходимой для принятия обоснованных инженерных решений по их уменьшению.

**АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ; ПОТЕРИ ХОЛОСТОГО ХОДА; ПОТЕРИ В СТАЛИ; ДОБАВОЧНЫЕ ПОТЕРИ; ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ.**

This article discusses the methods for reducing the idling losses in high-power induction motors as an opportunity for increasing their efficiency to meet the requirements of modern standards and customers. We have performed a comparative analysis of the tested no-load losses of three induction motors with the calculation results separated into stator copper losses, steel losses and stray losses by two different analytical approaches. Steel losses are supposed to consist of main steel losses and stray pulsation steel losses. Stray losses in a copper rotor cage, caused by stator's slot frequency currents due to the slotted structure of the stator, are examined separately. The existing approaches to calculating no-load loss components have been proved to be insufficiently accurate for making reasonable engineering decisions aimed at decreasing no-load losses.

**INDUCTION MOTOR; NO LOAD LOSS; STEEL LOSS; STRAY LOSS; EFFICIENCY.**

### **Введение**

Повышение энергоэффективности вновь создаваемых электродвигателей — характерная тенденция в развитии современного электромашиностроения. Класс энергоэффективности IE (International Energy-efficiency Class) определяется путем сопоставления номинального значения КПД двигателя  $\eta_N$  с нормированным значением  $\eta_n$  для соответствующего класса [1].

В период 2015–2017 годов все двигатели, выпускаемые в странах Евросоюза, обязаны согласно директиве ЕС 2005/32/ЕЕС и регламенту 640/2009/ЕС иметь класс энергоэффективности IE3 (Премиум), что позволит увеличить потенциал электросбережения в среднем на 15–20 % за счет увеличения  $\eta_N$  двигателей, а также совершенствования и оптимизации систем их управления и регулирования [1]. В Российской

Федерации с целью стимулирования повышения энергоэффективности с 18 ноября 2009 года действует Федеральный закон №261–ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности...» [2].

Повышение  $\eta$  при требуемой нагрузке двигателя возможно уменьшением суммы  $\Delta P$  отдельных потерь энергии в нем или их перераспределением. При  $\eta_N \geq 92\text{--}94\%$  для перевода асинхронного двигателя в другой класс IE необходимо уменьшить его суммарные потери на 12–16 % [1]. В асинхронных двигателях (АД) малой мощности, как правило, преобладают электрические потери в обмотках статора и ротора  $P_m$  (80–85 % от  $\Delta P$ ), однако в двигателях средней и большой мощности суммарные потери холостого хода  $P_0$  соизмеримы с переменными потерями  $P_m$  и равны приблизительно 3–4 %. Поэтому перевод АД в другой класс IE представляется возможным лишь за счет уменьшения составляющих  $P_0$ . Вот почему в настоящее время, наряду с совершенствованием методов расчета и измерения основных потерь в стали асинхронных машин [3–7], уточняются существующие и разрабатываются новые методы расчета добавочных потерь холостого хода в АД [8–11].

Сопоставлению методов расчетного и опытного определения составляющих  $P_0$  с целью оценки их практической значимости и необходимости учета на стадии проектирования АД и посвящена настоящая статья.

### Опытное исследование потерь холостого хода

Существующие стандарты [12, 13] требуют подразделять потери холостого хода  $P_0$  на потери в обмотке статора  $P_{m10}$ , потери в стали  $P_{ст}$  и механические потери  $P_{мех}$ . Причем в ГОСТ Р МЭК 60034-2-1-2009 [13] под  $P_{ст}$  предписывается понимать (п.3.4.2.2) лишь «потери в активных частях стали и дополнительные потери холостого хода в других металлических деталях». Действовавший до 01.01.2011 аналогичный ГОСТ 25941-83 [14] в п.2.2 давал более глубокую формулировку этих потерь, раскрывая по сути их структуру и физический смысл: «потери на гистерезис и вихревые токи при перемагничивании сердечника якоря, а также на вихревые токи на поверхностях

сердечников от разного рода пульсаций магнитного поля при отсутствии нагрузки машины и на вихревые токи во всех прочих частях машины, активных и конструктивных, от потоков рассеяния при холостом ходе». Таким образом,  $P_{ст}$  равны сумме основных потерь в стали якоря  $P_c$  на частоте  $f_1$  и добавочных потерь  $P_{д0}$ , к которым следует относить пульсационные поверхностные потери в стали зубцового слоя статора и ротора, электрические потери в клетке ротора от зубцовых гармонических тока в нем и потери на вихревые токи в элементах конструкции двигателя от магнитных потоков рассеяния.

Определение  $P_{д0}$  представляет значительные трудности, а поэтому часто в практике проектирования АД их наличие учитывается увеличением технологического коэффициента  $C_{Fc}$  в формулах для расчета  $P_c$ , как правило до 2,7–3. Однако еще К.И. Шенфер показал, что пульсационные поверхностные потери в стали не только соизмеримы, но могут и превосходить  $P_c$  [15], а поэтому даже в редком случае совпадения опытных и расчетных значений  $P_{ст}$  нельзя судить о преобладающем значении или отсутствии  $P_c$  и  $P_{д0}$ . Более того, при наличии разности между опытным значением  $P_{ст}$  и расчетной величиной  $P_c$  можно лишь утверждать, что  $P_{д0}$  существуют, но для принятия обоснованных инженерных решений по их уменьшению нужно, конечно, знать количественную структуру этих потерь.

О возможности и необходимости количественной оценки отдельных составляющих  $P_{д0}$  и их суммы можно судить путем сопоставления опытных значений  $P_{ст}$  с результатами расчетов  $P_c$  и  $P_{д0}$  по существующим аналитическим методикам, выполненным для трех асинхронных двигателей производства ОАО «Силовые машины» завода «Электросила»:

АД1 – асинхронного двигателя мощностью  $P_n = 1200$  кВт с  $n_n = 750$  мин<sup>-1</sup>,  $U_n = 550$  В и  $\eta_N = 92,3\%$ ;

АД2 – асинхронного двигателя мощностью  $P_n = 700$  кВт с  $n_n = 510$  мин<sup>-1</sup>,  $U_n = 700$  В и  $\eta_N = 95,0\%$ ;

АД3 – асинхронного двигателя мощностью  $P_n = 275$  кВт с  $n_n = 786$  мин<sup>-1</sup>,  $U_n = 500$  В и  $\eta_N = 91,36\%$ .

В соответствии с требованиями ГОСТ Р 53472-2009 на испытательном стенде завода

«Электросила» были получены, а затем обработаны результаты опыта холостого хода каждого из этих двигателей (табл. 1). В частности, из опытных значений  $P_0$  вычитались потери в меди статора  $P_{м10}$ , строилась зависимость  $(P_0 - P_{м10})$  от  $U^2$  и определялись механические потери  $P_{мех}$

«путем экстраполяции нижней прямолинейной части этой зависимости на нулевое значение приложенного напряжения» [12]. Полученная в результате величина  $P_{ст} = P_0 - P_{м10} - P_{мех}$  использовалась в дальнейшем для сопоставления с расчетными значениями  $P_c$  и  $P_{д0}$ . Она же по-

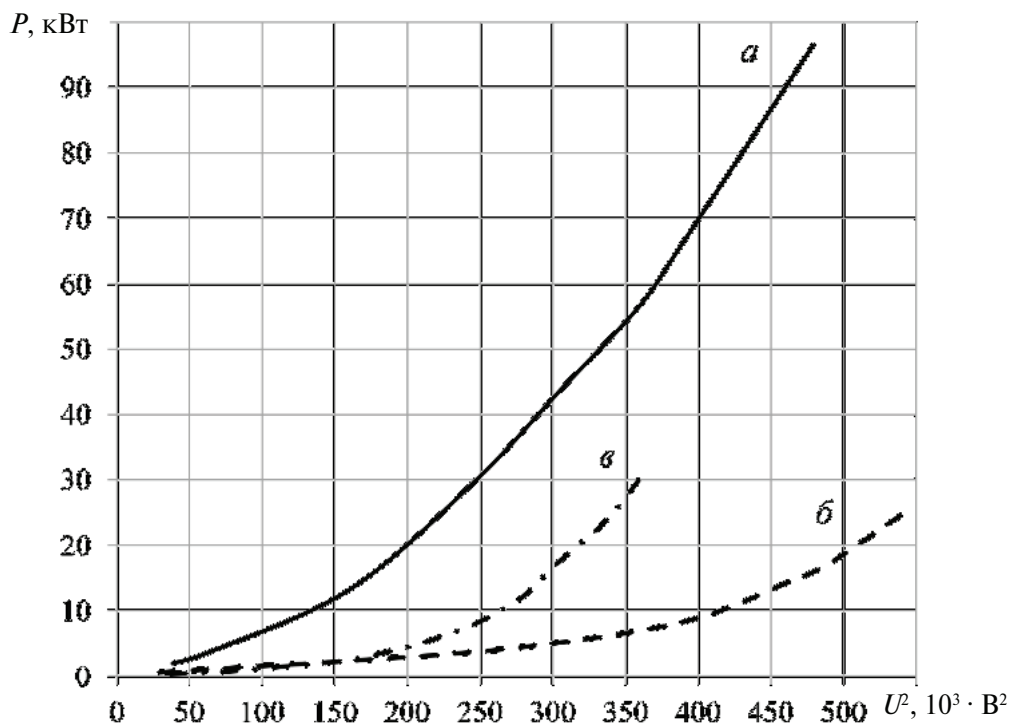


Рис. 1. Зависимости опытных значений потерь в стали  $P_{ст} = f(U^2)$ : а – АД-1, б – АД-2, в – АД-3

Таблица 1

Потери холостого хода

АД-1, ( $P_n = 1200$ кВт, $U_n = 550$ В)			АД-2 ( $P_n = 700$ кВт, $U_n = 700$ В)			АД-3 ( $P_n = 275$ кВт, $U_n = 500$ В)		
$U$ , В	$P_0$ , кВт	$P_{ст}$ , кВт	$U$ , В	$P_0$ , кВт	$P_{ст}$ , кВт	$U$ , В	$P_0$ , кВт	$P_{ст}$ , кВт
692	134,4	96,4	734	31,0	24,5	599	36,5	29,9
624	81,6	66,3	<b>700</b>	<b>22,0</b>	<b>17,2</b>	580	29,0	23,7
600	67,2	56,7	682	18,8	14,6	552	21,5	17,6
<b>552</b>	<b>49,9</b>	<b>43,6</b>	625	11,0	8,3	528	15,0	12,0
496	33,6	29,7	526	6,0	4,4	520	13,6	10,9
400	15,4	13,2	394	3,1	2,2	507	11,6	9,1
248	4,8	3,4	310	2,2	1,5	<b>500</b>	<b>10,7</b>	<b>8,4</b>
196	3,1	1,9	159	0,8	0,5	486	9,0	7,0

строена на рис. 1 в функции от  $U^2$  для наглядной иллюстрации наличия, а также величины добавочных потерь холостого хода  $P_{д0}$ .

Из анализа опытных данных, представленных в табл. 1 и на рис. 1, следует, что потери в стали  $P_{ст}$  в исследованных двигателях мощностью от 275 до 1200 кВт действительно составляют 3–4 % (при  $U_n$ ) и, главное, существенно непропорциональны  $U^2$  (за исключением АД-2), что однозначно свидетельствует о наличии значительных добавочных потерь  $P_{д0}$  в режиме холостого хода двигателей АД-1 и АД-3.

### Расчетное исследование $P_c$ и составляющих добавочных потерь $P_{д0}$

Для оценки возможности суммарного учета потерь  $P_{д0}$  в выражениях для определения  $P_c$  они были рассчитаны по принятой в инженерной практике методике:

$$P_c = C_{Fe} q_{1,50} (G_z B_z^2 + G_a B_a^2) \left( \frac{f_1}{50} \right)^{1,3}, \quad (1)$$

где  $q_{1,50}$  – удельные потери в стали при индукции 1 Тл и частоте 50 Гц, Вт/кг;  $G_z$  – масса зубцов статора, кг;  $G_a$  – масса ярма статора, кг;  $B_z$  – индукция в зубце на расстоянии половины высоты зубца от его основания Тл;  $B_a$  – индукция в спинке статора, Тл;  $f_1$  – частота питания машины, Гц;  $C_{Fe}$  – технологический коэффициент, учитывающий увеличение потерь в стали, вызванное технологией изготовления статора и пульсационными потерями в стали его зубцов (для машин с прямоугольными пазами рекомендуется принимать  $C_{Fe} = 2,7–3$ ).

Таблица 2

Потери в стали

АД-1			АД-2			АД-3		
$U, В$	$P_{ст}$ (опыт)	$P_c$ (расчет)	$U, В$	$P_{ст}$ (опыт)	$P_c$ (расчет)	$U, В$	$P_{ст}$ (опыт)	$P_c$ (расчет)
692	96,4	15,3	734	24,5	6,07	599	29,9	4,3
624	66,3	12,4	<b>700</b>	<b>17,2</b>	<b>5,52</b>	580	23,7	4,0
600	56,7	11,5	682	14,6	5,24	552	17,6	3,6
<b>552</b>	<b>43,6</b>	<b>9,7</b>	625	8,3	4,4	528	12,0	3,3
496	29,7	7,9	526	4,4	3,12	520	10,9	3,2
400	13,2	5,1	394	2,2	1,75	507	9,1	3,0
248	3,4	2,0	310	1,5	1,08	<b>500</b>	<b>8,4</b>	<b>3,0</b>
196	1,9	1,2	159	0,5	0,28	486	7,0	2,8

Из рассмотрения представленных в табл. 2 данных следует, что опытные значения  $P_{ст}$  в 3–4 раза превосходят расчетные, а следовательно, на долю добавочных потерь  $P_{д0}$  приходится порядка 70–80 % от суммарных потерь  $P_{ст} = P_c + P_{д0}$ , и корректный, физически обоснованный учет составляющих  $P_{д0}$  простым увеличением  $C_{Fe}$  в (1) просто невозможен. Тем не менее, полагая, что пульсационные поверхностные потери в стали в какой-то мере уже учтены в  $C_{Fe}$ , в инженерной практике обычно рассчитывают вторую составляющую  $P_{д0}$  – электрические потери в клетке ротора  $P_{дм2}$ , обусловленные пульсацией индукции магнитного потока в воздушном зазоре, которая вызвана зубчатостью статора.

Для машин без скоса пазов, к которым относятся рассматриваемые двигатели,  $P_{дм2}$  в инженерной практике определяют по формуле, полученной на основе решения задачи расчета магнитного поля в зубцовой зоне ротора методом конформных отображений:

$$P_{дм2} = \frac{9Z_2 l_b \rho_b}{q_b} \left( t_1 \beta_0 K_\delta \frac{B_\delta}{0,2} \right)^2 \times \left[ K_{f1} \left( \frac{\alpha_1 (1 - \cos(\alpha))}{\lambda_\delta + 2\lambda_{n1 f_{z1}} (1 - \cos \alpha)} \right)^2 + K_{f2} \left( \frac{\alpha_2 (1 - \cos(2\alpha))}{\lambda_\delta + 2\lambda_{n2 f_{z1}} (1 - \cos(2\alpha))} \right)^2 \right], \quad (2)$$

где  $Z_2$  – число пазов ротора;  $l_b$  – длина стержня ротора между короткозамыкающими кольцами, м;  $\rho_b$  – удельное электрическое сопротивление, Ом·мм<sup>2</sup>/м;  $q_b$  – сечение стержня ротора, см<sup>2</sup>;  $t_1$  – зубцовое деление статора, мм;  $K_\delta$  – коэффициент воздушного зазора;  $B_\delta$  – индукция в воздушном зазоре, Тл;  $K_{f1}$  и  $K_{f2}$  – коэффициенты Фильда для стержней ротора соответственно при  $f_{z1} = Z_2 f_1 / p$  и  $f_{z2} = 2f_{z1}$ ;  $f_1$  – частота питания машины, Гц;  $\alpha = 2\pi Z_1 / Z_2$  – фазовый угол между соседними стержнями;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – относительные значения амплитуд первой и второй зубцовых гармонических индукции магнитного поля в предположении о трапецидальном характере ее распределения в зазоре под пазом статора;  $\beta_0$  – коэффициент, равный отношению минимальной индукции в воздушном зазоре под пазом статора к максимальной индукции в зазоре, определяемый как

$$\beta_0 = \frac{1+u^2-2u}{2(1+u^2)}; \quad u = \frac{b_{\pi}}{2\delta} + \sqrt{1 + \left(\frac{b_{\pi}}{2\delta}\right)^2}.$$

Входящие в (2) коэффициенты магнитных проводимостей для воздушного зазора  $\lambda_{\delta}$  и для полей рассеяния  $\lambda_{n1fz1}$  и  $\lambda_{n2fz1}$  рассчитываются по формулам

$$\lambda_{\delta} = \frac{t_2 - b_{s2}}{\delta K_{\delta} K_{\mu}};$$

$$\lambda_{n1fz1} = \frac{h_{z2}}{3b_{n2}K_{f1}} + \frac{h_{s2}}{b_{s2}} + 0,2;$$

$$\lambda_{n2fz1} = \frac{h_{z2}}{3b_{n2}K_{f2}} + \frac{h_{s2}}{b_{s2}} + 0,2,$$

где  $t_2$  – зубцовое деление ротора, мм;  $b_{s2}$  – ширина шлица ротора, мм;  $h_{s2}$  – высота шлица ротора, мм;  $\delta$  – воздушный зазор, мм;  $b_{n2}$  – ширина паза ротора, мм;  $h_{z2}$  – высота паза ротора, мм;  $K_{\delta}$  – коэффициент воздушного зазора;  $K_{\mu}$  – коэффициент насыщения магнитной системы машины.

Расчет  $P_{\text{дм2}}$  по (2) показал, что эти потери соизмеримы с  $P_c$  лишь при  $U > U_n$ , а при  $U < U_n$  их совместный с  $P_c$  вклад в  $P_{\text{ст}}$  мал. Так, в частности, в АД-1 при  $U = U_n$  будет  $P_{\text{дм2}} = 3,1$  кВт,  $P_c = 9,7$  кВт, а их сумма  $P_s = 12,8$  кВт составляет всего 29,4 % от опытного значения  $P_{\text{ст}} = 43,6$  кВт. Аналогичные расчеты для АД-2 показали, что в них  $P_{\text{дм2}} = 3,78$  кВт,  $P_c = 5,52$  кВт, и  $P_s = 9,3$  кВт – 54,1 % от  $P_{\text{ст}} = 17,2$  кВт, а в АД-3  $P_{\text{дм2}} = 1,1$  кВт,  $P_c = 3,0$  кВт, соответственно  $P_s = 4,1$  кВт – 48,8 % от  $P_{\text{ст}} = 8,4$  кВт.

Обобщая приведенные данные, можно утверждать, что существующая инженерная методика определения  $P_c$  и  $P_{\text{дм2}}$  имеет весьма значительную погрешность: суммарная величина

$P_s = P_c + P_{\text{дм2}}$  составляет всего 30–50 % от опытного значения  $P_{\text{ст}}$ . Причем эта погрешность обусловлена, конечно, погрешностью расчета  $P_{\text{дм2}}$ , иначе следовало бы увеличить  $C_{\text{Fe}}$  в (1) до 6–7 или признать в структуре  $P_{\text{ст}}$  существенным значение потерь в конструктивных элементах от полей рассеяния.

Как видно из (2), ошибка в определении  $P_{\text{дм2}}$  может быть вызвана: погрешностью расчета проводимостей  $\lambda_{\delta}$ ,  $\lambda_{n1fz1}$  и  $\lambda_{n2fz1}$ , которые зависят от геометрии и степени насыщения путей рассеяния магнитного потока; погрешностью расчета  $\beta_0$  и  $K_{\delta}$ ; допущением о бесконечной магнитной проницаемости стали ( $\mu = \infty$ ); погрешностью определения коэффициентов Фильда  $K_{fz1}$  и  $K_{fz2}$ ; а также погрешностью расчета коэффициентов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , которые в методике определены с большими допущениями. Одним из наиболее существенных факторов, конечно, является погрешность расчета магнитных проводимостей без учета степени насыщения соответствующих ферромагнитных участков.

Учет насыщения при расчете  $P_{\text{дм2}}$  по (2) выполнен лишь через коэффициент насыщения магнитной характеристики машины  $K_{\mu}$  и только при определении  $\lambda_{\delta}$ . Однако в монографии [16] убедительно показано, что насыщение по путям основного рабочего потока практически не влияет на проводимости потоков дифференциального рассеяния, а учет локального насыщения (дифференциальной магнитной проницаемости), например зубцов ротора, может привести к увеличению  $P_{\text{дм2}}$  до 70 % [16, с. 258]. Именно поэтому было принято решение рассчитать  $P_{\text{дм2}}$  по предложенным в [16] выражениям и сравнить их с данными, полученными по существующей методике. Для наглядной иллюстрации характе-

Таблица 3

Составляющие опытных потерь в стали

Двигатель	Опыт	Расчет (существующая методика)				Расчет (методика [16])		
	$P_{\text{ст}}$ , кВт	$P_c$ , кВт	$P_{\text{дм2}}$ , кВт	$P_s$ , кВт	$P_s/P_{\text{ст}}$ , %	$P_{\text{дм2}}$ , кВт	$P_s$ , кВт	$P_s/P_{\text{ст}}$ , %
АД-1	43,6	9,7	3,10	12,8	29,4	21,8	31,5	72,2
АД-2	17,2	5,5	3,78	9,3	54,1	12,6	18,1	105,2
АД-3	8,4	3,0	1,10	4,1	48,8	4,3	7,3	86,9



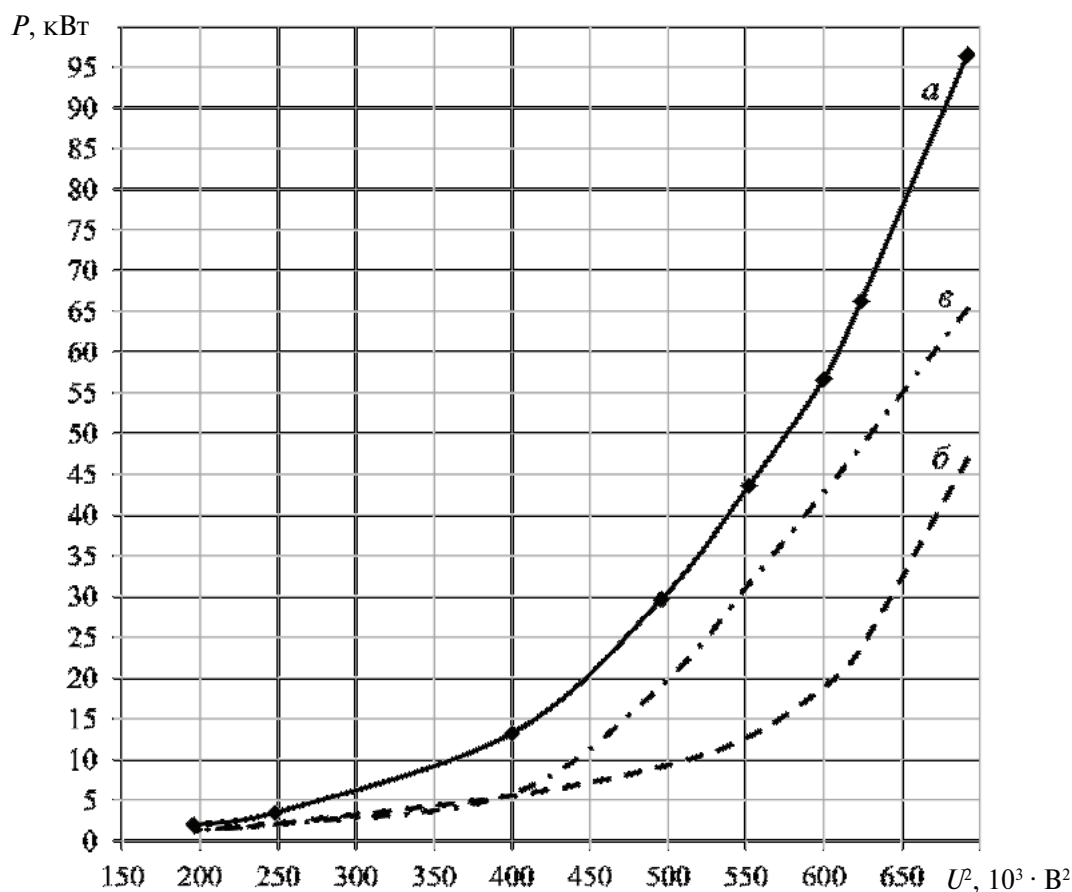


Рис. 2. Зависимости опытных и расчетных значений потерь в стали  $P_{\text{ст}} = f(U)$  для АД-1: а – опыт; б – расчет по существующей методике; в – расчет по методике [16]

ра изменения потерь на рис. 2 представлены опытная зависимость  $P_{\text{ст}} = f(U)$  и рассчитанные по двум методикам зависимости  $P_S = (P_c + P_{\text{дм2}}) = f(U)$  для АД-1, а в таблицу 3 сведены все опытные и расчетные значения потерь  $P_{\text{ст}}$ ,  $P_c$  и  $P_{\text{дм2}}$  для трех двигателей при  $U_n$ .

Из анализа данных, представленных на рис. 2 и в табл. 3, следует, что определение  $P_{\text{дм2}}$  по методике [16] позволяет не только качественно, но и количественно приблизить результаты аналитических расчетов к опытным данным: в АД-1 погрешность определения  $\Delta P_{\text{ст}}$  в диапазоне изменения  $U$  от 400 до 600 В составляет 25–30 % (см. рис.1), а для  $U_n$  потери  $\Delta P_{\text{ст}}$  во всех трех двигателях соответственно равны 27,8, 5,2 и 13,1 % (см. табл. 3). При  $U > U_n$  расхождение опытных и расчетных значений начинается существенно

увеличиваться, что указывает на недостаточный учет в [16] уменьшения проводимостей для потоков дифференциального рассеяния и соответствующих индуктивных сопротивлений при возрастании насыщения зубцов ротора и статора.

### Выводы

1. Повышение класса энергоэффективности IE мощных асинхронных двигателей возможно за счет уменьшения основных потерь в стали  $P_c$  и добавочных потерь холостого хода  $P_{\text{д0}}$ , поскольку их общая сумма составляет 3–4 % от номинальной мощности  $P_n$ .

2. Существующие расчетные методики определения основных потерь в стали  $P_c$  на частоте  $f_1$  и отдельных составляющих добавочных потерь холостого хода  $P_{\text{д0}}$  не обладают точностью, не-

обходимой для принятия обоснованных инженерных решений по их уменьшению.

3. Корректный учет локального насыщения и реальной геометрии элементов зубцового слоя при расчете  $P_c$  и  $P_{до}$  может быть сделан лишь с помощью численного моделирования методом

конечных элементов электромагнитного поля в двигателях, что позволит не только уточнить методику расчета  $P_{дм2}$ , но и оценить уровень третьей составляющей  $P_{до}$  — потерь на вихревые токи в элементах конструкции двигателя от магнитных потоков рассеяния в его торцевой зоне.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 54413-2011. Машины электрические вращающиеся. Часть 30. Классы энергоэффективности односкоростных трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором (код IE). М.: Стандартинформ, 2012. 14 с.
2. Российская федерация. Федеральный закон №261-ФЗ. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации / Принят Гос. Думой 11 ноября 2009 г. : одобрен Советом Федерации 18 ноября 2009 г.
3. Gyselinck J., Dupré L., Vandevelde L., Melkebeek J. Calculation of no-load induction motor core losses using the rate-dependent Preisach model // IEEE. Transactions on magnetics. 1998. Vol. 34(6). P. 3876–3881.
4. Gyselinck J., Vandevelde L., Makaveev D., Melkebeek J. Calculation of no load losses in an induction motor using an inverse vector Preisach model and an eddy current loss model. Part 1 // IEEE. Transactions on magnetics. 2000. Vol. 36(4). P. 856–860.
5. Komeza K., Dems M. Finite-Element and Analytical Calculations of No-Load Core Losses in Energy-Saving Induction Motor // IEEE. Transactions on Industrial Electronics. 2012. Vol. 59(7). P. 2934–2946.
6. Hsu J.S., Liou H.P., Lin B.T., Weldon W.F. Losses Influenced by Third-Harmonic Flux in Induction Motors // IEEE. Transactions on Energy Conversion. 1991. Vol. 6(3). P. 461–468.
7. Hai-Rong Wang, Jian-Hua Wu. Calculation of Iron Losses in Inverter-fed Induction Motors Based on Time-stepping FEM // Journal of International Conference on Electrical Machines and Systems. 2013. Vol. 2. № 3. P. 283–287.
8. Nakahara A., Kikuchi S., Nishihama K., Miyoshi T., Kaihatsu K. High-Frequency Interbar Current Losses in Cage Induction Motors Under No-Load Condition // IEEE. Transactions on Energy Conversion. 2014. Vol. 29(3). P. 698–705.
9. Engelbretson S.C. Induction Machine Stray Loss from Inter-bar Currents Engelbretson: PhD Thesis / MIT. 2009. 178 p.
10. Carlson R., C.A. da Silva, Sadowski N., Lajoie-Mazenc M. An Analysis of Inter-bar Currents on a Polyphase Cage Induction Motor // Revista Controle & Automacao. 2004. Vol. 15, № 4. P. 476–484.
11. Kral C., Haumer A., Kubicek B., Winter Q. Model of a Squirrel Cage Induction Machine with Interbar Conductances // Proceedings 7th Modelica Conference. Como, Italy. Sep. 20–22, 2009. P. 861–867.
12. ГОСТ Р 53472-2009. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2011. 42 с.
13. ГОСТ Р МЭК 60034-2-1-2009. Стандартные методы определения потерь и коэффициента полезного действия вращающихся электрических машин (за исключением машин для подвижного состава). М.: Стандартинформ, 2011. 53 с.
14. ГОСТ 25941-83 (МЭК 34-2-72, МЭК 34-2A-74). Машины электрические вращающиеся. Методы определения потерь и коэффициента полезного действия. М.: ИПК Издательство стандартов, 1984. 30 с.
15. Шенфер К.И. Асинхронные машины. М. — Л.: Государственное объединенное научно-техническое издательство, 1938. 412 с., ил.
16. Геллер Б., Гамата В. Высшие гармоники в асинхронных машинах / Пер. с англ. под ред. З.Г. Каганова. М.: Энергия, 1981. 352 с., ил.

## REFERENCES

1. GOST R 54413-2011. Mashiny elektricheskiye vrashchayushchiyesya. Chast 30. Klassy energoeffektivnosti odnoskorostnykh trekhfaznykh asinkhronnykh dvigateley s korotkozamknutym rotorom (kod IE). [State standart specification. Rotating electrical machines. Part 30. Efficiency classes of single-speed, three-phase, cage-induction motors (IE-code).] Moscow: Standartinform, 2012. 14 p. (rus)
2. Rossiyskaya federatsiya. Federatsii Federalnyy zakon №261-FZ Ob energosberezhenii i o povyshenii energeticheskoy effektivnosti i o vnesenii izmeneniy v otdelnyye zakonodatelnyye akty Rossiyskoy : prinyat Gos. Dumoy 11 noyabrya 2009: odobren Sovetom Federatsii 18 noyabrya 2009. [Russian Federation. Laws. About energysaving and increasing energyefficiency. Federal Law №261-FZ. (rus)]
3. Gyselinck J., Dupré L., Vandevelde L., Melkebeek J. Calculation of no-load induction motor core losses using the rate-dependent Preisach model. *IEEE*.

*Transactions on magnetics*. 1998. Vol. 34(6). P. 3876–3881.

4. **Gyselinck J., Vandevelde L., Makaveev D., Melkebeek J.** Calculation of no load losses in an induction motor using an inverse vector Preisach model and an eddy current loss model. Part 1. *IEEE. Transactions on magnetics*. 2000. Vol. 36(4). P. 856–860.

5. **Komez A., Deme M.** Finite-Element and Analytical Calculations of No-Load Core Losses in Energy-Saving Induction Motor. *IEEE. Transactions on Industrial Electronics*. 2012. Vol. 59(7). P. 2934–2946.

6. **Hsu J.S., Liou H.P., Lin B.T., Weldon W.F.** Losses Influenced by Third-Harmonic Flux in Induction Motors. *IEEE. Transactions on Energy Conversion*. 1991. Vol. 6(3). P. 461–468.

7. **Hai-Rong Wang, Jian-Hua Wu.** Calculation of Iron Losses in Inverter-fed Induction Motors Based on Time-stepping FEM. *Journal of International Conference on Electrical Machines and Systems*. 2013. Vol. 2. № 3. P. 283–287.

8. **Nakahara A., Kikuchi S., Nishihama K., Miyoshi T., Kaihatsu K.** High-Frequency Interbar Current Losses in Cage Induction Motors Under No-Load Condition. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2014. Vol. 29(3). P. 698–705.

9. **Engelbreton S.C.** Induction Machine Stray Loss from Inter-bar Currents Engelbreton: PhD Thesis / MIT, 2009. 178 p.

10. **Carlson R., C.A. da Silva, Sadowski N., Lajoie-Mazenc M.** An Analysis of Inter-bar Currents on a Polyphase Cage Induction Motor. *Revista Controle & Automacao*. 2004. Vol. 15, № 4. P. 476–484.

11. **Kral C., Haumer A., Kubicek B., Winter Q.** Model of a Squirrel Cage Induction Machine with Interbar Conductances. *Proceedings 7th Modelica Conference*. Como, Italy. Sep. 20–22, 2009, P. 861–867.

12. **GOST R 53472-2009.** Mashiny elektricheskoye vrashchayushchiy. Dvigateli asinkhronnyye. Metody ispytaniy. [State standart specification. Rotating electrical machines. Asynchronous motors. Test methods.] Moscow: Standartinform, 2011. 42 p. (rus)

13. **GOST R IEC 60034-2-1-2009.** Standartnyye metody opredeleniya poter i koeffitsiyenta poleznogo deystviya vrashchayushchikh elektricheskikh mashin (za isklyucheniye mashin dlya podvizhnogo sostava). [State standart specification. Rotating electrical machines. Part 2-1. Standart methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles).] Moscow: Standartinform, 2011. 53 p. (rus)

14. **GOST 25941-83 (IEC 34-2-72, IEC 34-2A-74).** Mashiny elektricheskoye vrashchayushchiy. Metody opredeleniya poter i koeffitsiyenta poleznogo deystviya. [State standart specification. Rotating electrical machines. Methods for determining losses and efficiency.] Moscow: IPK Izdatelstvo standartov, 1984. 30 p. (rus)

15. **Shenfer K.I.** Asinkhronnyye mashiny. [Induction machines]. Moscow – Leningrad: Gosudarstvennoye obyedinennoye nauchno-tehnicheskoye izdatelstvo, 1938. 412 p., il. (rus)

16. **Heller B., Hamata V.** Vysshieye garmoniki v asinkhronnykh mashinakh / Per. s angl. pod red. Z.G. Kaganova. Moscow: Energiya, 1981. 352 p., il. [Harmonic Field Effects in Induction Machines. Amsterdam: Elsevier Scientific Pub. Co. 1977.]

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

**ЗАБОИН Валерий Николаевич** — доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.  
195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.  
E-mail: zabv@rambler.ru

**ZABOIN Valerii N.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.  
E-mail: zabv@rambler.ru

**ЧЕШОКОВ Григорий Алексеевич** — руководитель группы ОАО «Силовые машины».  
195009, Санкт-Петербург, ул. Ватутина, 3А..  
E-mail: G.A.Chesnokov@gmail.com

**CHESNOKOV Grigori A.** — OJSC “Power Machines”.  
3A, Vatutina str., St. Petersburg, Russia, 195009..  
E-mail: G.A.Chesnokov@gmail.com

DOI 10.5862/JEST.243.9

УДК 537.226.4: 621.319.1

*А.П. Плотников, О.А. Емельянов*

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ЗАРЯДА–РАЗРЯДА НЕЛИНЕЙНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ**

*A.P. Plotnikov, O.A. Emelyanov*

## **NONLINEAR CERAMIC CAPACITORS IN CHARGING-DISCHARGING MODES: EXPERIMENTAL STUDY AND ANALYTICAL CALCULATIONS**

Целью работы является экспериментальное и теоретическое исследование современных коммерчески доступных многослойных керамических конденсаторов с диэлектриками, относящимися к различным группам температурной стабильности емкости, — X7R, Y5V, Z5U, H90. Экспериментально получены зависимости емкости конденсаторов от величины приложенного постоянного напряжения. Предложена нелинейная модель, адекватно описывающая изменение емкости, а также определены параметры модели для различных типов нелинейного диэлектрика. Исследованы частотные характеристики и импульсные процессы заряда–разряда керамических конденсаторов с высокой плотностью запасаемой энергии — на уровне 1 Дж/см<sup>3</sup>. Предложена методика оценки диэлектрических потерь в импульсном режиме, основанная на усреднении частотного спектра эквивалентного последовательного сопротивления конденсатора. Полученные точные амплитудно-временные характеристики процессов соответствуют данным проведенных экспериментов и могут быть применены для непосредственного расчета переходных процессов заряда-разряда нелинейного конденсатора. СЕГНЕТОЭЛЕКТРИК; КЕРАМИЧЕСКИЙ КОНДЕНСАТОР; НЕЛИНЕЙНОСТЬ; ИМПУЛЬСНЫЙ РЕЖИМ; АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ.

The goal of the paper is in studying modern high-energy density multilayer ceramic capacitors (MLCCs) with nonlinear dielectrics such as X7R, Y5V, Z5U. The charging-discharging modes of MLCCs as well as the frequency spectra of dielectric characteristics such as admittance and equivalent series resistance (ESR) have been investigated. We have proposed an approach to estimating the dielectric loss in pulsed modes based on ESR frequency spectrum averaging. The capacitance dependencies on DC bias voltage have been obtained. A mathematical model for analytical calculation of the circuit electrical parameters is proposed. The model takes into account the capacitance dependence on applied voltage. The adequacy of the model is confirmed by the numerical calculations and experimental studies results.

FERROELECTRIC; CERAMIC CAPACITOR; NONLINEAR; PULSED MODE; ANALYTICAL SOLUTION.

### **Введение**

Электрические конденсаторы с высокой — на уровне 0,5 Дж/см<sup>3</sup> и выше — плотностью  $w_s$  запасаемой энергии входят в состав мощных импульсных накопителей энергии, систем лазерной накачки, импульсных модуляторов, дефибрилляторов и т. д. Значение  $w_s$  импульсных конденсаторов зарубежного производства (Германия, США, Япония) уже доведено до уровня 1–1,5 Дж/см<sup>3</sup> для

серийных образцов. Разработки конденсаторной техники развиваются в нескольких направлениях. Одно из них связано с созданием новых типов электродных систем высоковольтных пленочных полимерных конденсаторов, обладающих свойством самовосстановления. При этом рабочие значения напряженности электрического поля в конденсаторах с органическим диэлектриком уже приближаются к пределу электрической

прочности самих полимерных материалов, например для полипропилена теоретическая предельная энергия находится на уровне  $\sim 4,5 \text{ Дж/см}^3$  [1–3].

Другое направление повышения энергоэффективности конденсаторов — разработка новых типов диэлектриков. Сюда следует отнести как синтез новых полимерных и керамических материалов, так и создание композиционных диэлектриков на основе микро- и нанонаполнителей. Новые типы керамических диэлектриков обладают чрезвычайным разнообразием электрических свойств, в их числе: сильная полевая нелинейность и частотная зависимость (дисперсия) значений диэлектрической проницаемости  $\varepsilon(E, \omega)$  (10–10000 и более), высокий коэффициент теплопроводности и др. Последние тенденции создания энергоемких диэлектриков в лабораториях позволяют достичь  $w$ , уровня десятков  $\text{Дж/см}^3$  [4–7].

Совершенствование технологии производства многослойных керамических конденсаторов на основе сегнетоэлектриков привело к выпуску изделий, некоторые типы которых уже обладают плотностью запасаемой энергии на уровне  $1\text{--}3 \text{ Дж/см}^3$ . К ним относятся известные марки зарубежных диэлектриков X7R (титанаты Ba, Sr с добавками Pb, Nb и др.), Z5U, Y5V и отечественный H90 (релаксорные диэлектрики на основе титанатов и цирконатов Ba, магнийниобата Pb и др.) [8, 9]. В числе тенденций последнего десятилетия — постепенное расширение использования обсуждаемых типов конденсаторов в изделиях импульсной техники, где раньше традиционно рассматривались только пленочные конденсаторы [10–12].

Одно из существенных свойств рассматриваемых конденсаторов — сильная зависимость емкости от приложенного напряжения, что приводит к нелинейности режимов электрической цепи, анализ которых обычно проводят на основе численного моделирования. Вместе с тем особенности зависимости емкости некоторых конденсаторов от напряжения позволяют предложить сравнительно простую модель, позволяющую получить точные аналитические решения для режимов заряда и разряда, а также оценить временные и энергетические параметры указанных процессов. Адекватность предложенной модели подтверждена экспериментальными исследова-

ниями нескольких типов современных многослойных керамических конденсаторов зарубежного и отечественного производства. Насколько нам известно, подобные результаты пока не нашли отражения в научно-технической литературе.

### Экспериментальная часть

Были исследованы керамические выводные многослойные конденсаторы разных групп температурной стабильности емкости (ТСЕ), как импортного (Murata Manufacturing — X7R, Z5U; Megatone Electronics Corp. — Y5V), так и отечественного (Монолит — H90) производства номинальной емкостью  $1 \text{ мкФ}$ , с рабочим напряжением от 50 до 100 В. С помощью измерителя импеданса E7-20 были измерены емкость и тангенс угла диэлектрических потерь в диапазоне частот  $100 \text{ Гц}$  —  $1 \text{ МГц}$  при напряжении смещения до 120 В включительно. Найденные зависимости относительной емкости от величины постоянного напряжения конденсаторов удовлетворительно описываются функциональным соотношением вида

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{1 + b(U_c - U_0)^2}, \quad (1)$$

где  $b$  — коэффициент,  $1/\text{В}^2$ ;  $U_0$  — напряжение, при котором емкость имеет максимум;  $C_0$  — величина емкости при нулевом напряжении смещения. Значения коэффициента  $b$ , а также начальные значения емкости  $C_0$ , тангенса угла потерь  $\text{tg}\delta_0$  и напряжения  $U_0$  представлены в таблице. Следует отметить, что в публикациях предложен ряд феноменологических моделей полевой зависимости диэлектрической проницаемости различных сегнетоэлектриков [13–15], а температурная зависимость проницаемости наиболее корректно учтена в [16]. В нашем случае температурными эффектами в выбранных режимах исследования (однократные импульсы заряда–разряда) можно пренебречь. Зависимость (1) вполне согласуется с моделью, приведенной в [13].

Параметры исследуемых конденсаторов

Конденсатор	$b \cdot 10^{-6}, 1/\text{В}^2$	$C_0, \text{мкФ}$	$\text{tg}\delta_0 \cdot 10^{-4}$	$U_0, \text{В}$
X7R	854	1,018	137	5
Y5V	2466	0,969	320,5	0
Z5U	2195	0,903	191	5
H90	4382	1,619	135,5	0



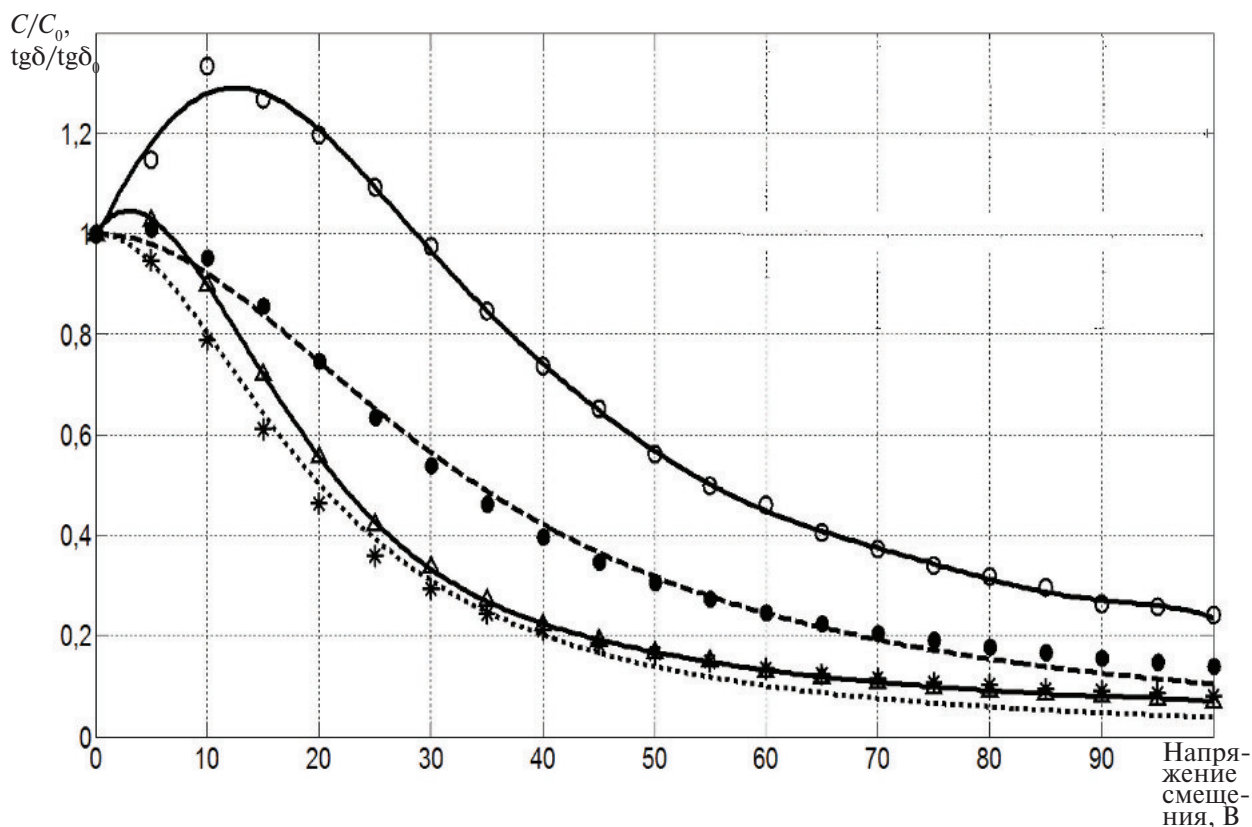


Рис. 1. Пример нормированных зависимостей  $C$  и  $\operatorname{tg} \delta$  для конденсаторов X7R и Y5V и их аппроксимации в соответствии с (1):

• — X7R (емкость); \* — Y5V (емкость);  $\Delta$  — Y5V (тангенс угла потерь);  $\circ$  — X7R (тангенс угла потерь); ■■■ — аппроксимирующая кривая при R-square = 0,98; - - - аппроксимирующая кривая при R-square = 0,99

На рис. 1 в качестве примера представлен график зависимости емкости и тангенса угла потерь на частоте  $f = 1$  кГц от напряжения смещения для конденсаторов X7R и Y5V. Кривые нормированы на начальное значение при нулевом напряжении смещения. Приведены аппроксимирующие кривые изменения емкости, точность аппроксимации оценивалась коэффициентом детерминации (R-square): чем ближе параметр к единице, тем точнее аппроксимация.

Были получены частотные спектры полной проводимости  $Y = f(\omega)$  и фазового угла  $\theta = f(\omega)$  в диапазоне частот 0,1 Гц–5 МГц, амплитуда измерительного сигнала — 1 В. Измерения производились с помощью измерителей импеданса Hioki IM3570 и Hioki IM3533. На основе анализа конструкций конденсаторов определялось значение относительной диэлектрической про-

ницаемости диэлектрика  $\epsilon_r$ . Принимая емкость  $C_0 \sim 1$  мкФ по формулам  $Y_a = |\dot{Y}(\omega)| \cos \theta$ ;  $Y_r = |\dot{Y}(\omega)| \sin \theta$ ;  $\epsilon' = Y_r / \omega C_\infty$ ;  $C_\infty = C_0 / \epsilon_r$  были рассчитаны частотные зависимости активной  $Y_a = f(\omega)$  и реактивной  $Y_r = f(\omega)$  компонент полной проводимости и относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon = f(\omega)$ , а также  $C_\infty$  — геометрическая емкость конденсатора. На рис. 2 приведен пример частотных характеристик конденсатора Murata ( $\epsilon_r \sim 3000$ ).

Анализ спектра показывает, что резонансная частота конденсатора приблизительно равна 3,5 МГц. Можно заметить также, что до частот  $10^5$ – $10^6$  Гц относительная диэлектрическая проницаемость практически не испытывает изменений, что соответствует обычному линейному росту реактивной проводимости на семь порядков. Вместе с тем активная проводимость конденсатора также возрастает на семь порядков,

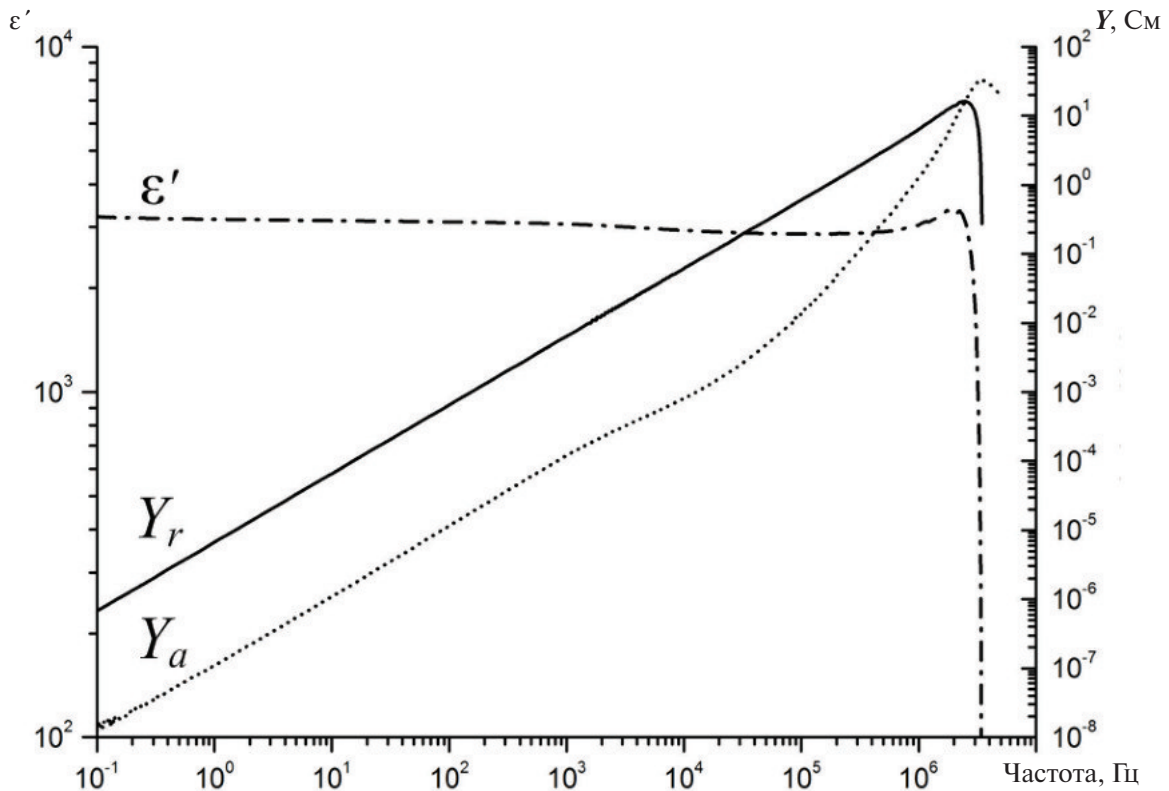


Рис. 2. Частотные спектры диэлектрических характеристик конденсатора X7R

что трудно объяснить на основе традиционных эквивалентных схем замещения конденсатора. По-видимому, имеет место прыжковая электропроводность керамического диэлектрика, характеризующаяся частотной зависимостью  $\sim \omega^s$ , где  $s \sim 0,9$ .

### Математическая модель

Для получения аналитического решения уравнений заряда–разряда конденсатора была использована последовательная схема замещения в условиях

$$\begin{aligned} \max\left(\frac{1}{C} \frac{dC}{dU}\right) &\gg \max\left(\frac{1}{ESR} \frac{d(ESR)}{dU}\right); \\ \max\left(\frac{d \ln C}{d \ln U}\right) &\gg \max\left(\frac{d \ln ESR}{d \ln f}\right), \end{aligned} \quad (2)$$

что подтверждается экспериментом.  $ESR$  для конденсатора X7R изменяется от 2 до 4 Ом во всем диапазоне напряжения (при  $f = 1$  кГц), а значение диэлектрической проницаемости немного ( $\sim$  на 15 %) возрастает с частотой, в то

время как емкость (диэлектрическая проницаемость) в диапазоне рабочего напряжения снижается на порядок. В таком случае уравнение, описывающее режимы заряда–разряда для схемы, приведенной на рис. 3, имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{C_0}{1+b(U_c-U_0)^2} \frac{dU_c}{dt} R + U_c &= \\ &= \begin{cases} E_0 & \text{при заряде;} \\ 0 & \text{при разряде,} \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

где  $R = ESR + R_{\text{ext}}$  – сумма эквивалентного последовательного сопротивления конденсатора и сопротивления в его внешней цепи.

$ESR$  можно оценить на основе усреднения частотного спектра эквивалентного последовательного сопротивления конденсатора с учетом того, что оно независимо от выбранной схемы замещения представляет собой действительную часть импеданса:  $ESR = \text{Re}(\dot{Z}(\omega)) = \cos\theta/|\dot{Y}(\omega)|$ . Так как фазовый угол слабо изменяется в области до резонанса, а  $Y \sim \omega$ , то  $ESR \sim \omega^{-1}$ .  $ESR$  в области

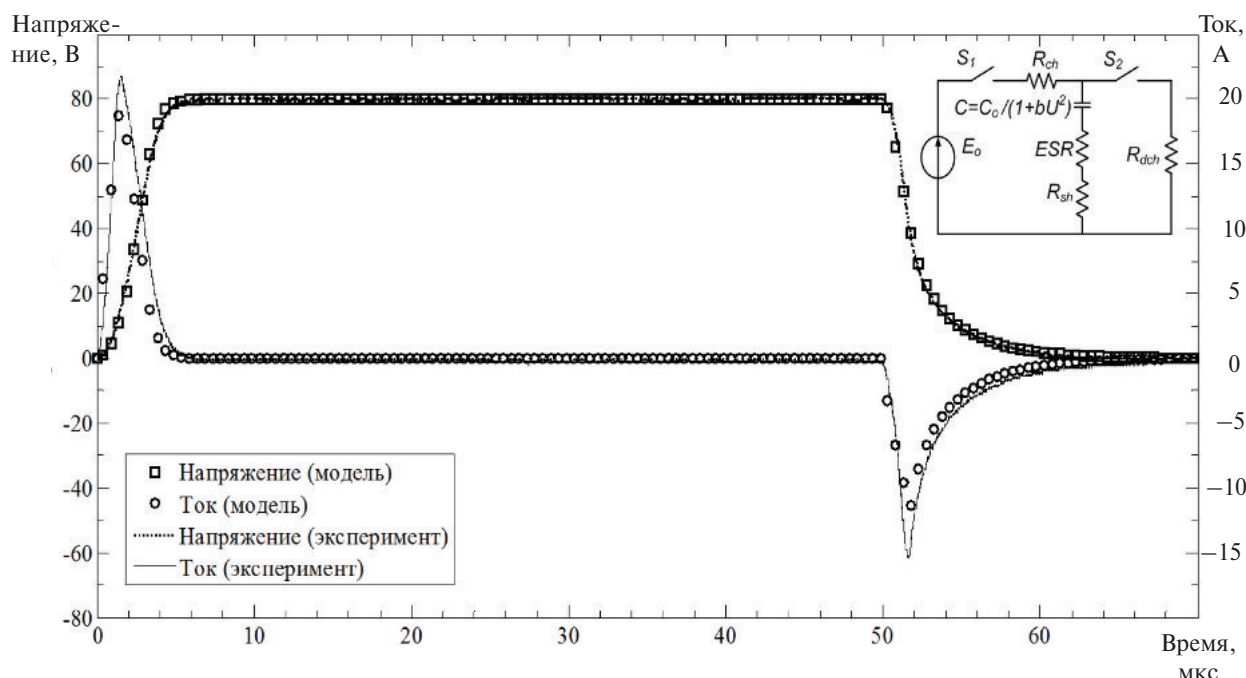


Рис. 3. Напряжения и токи конденсатора X7R при заряде и разряде (на вставке приведена схема модельной цепи)

частот до резонанса успешно аппроксимируется зависимостью вида  $ESR(\omega) = A/\omega$ , где  $A$  – константа, Ом/с. Усредняя частотную характеристику  $ESR(\omega)$ , получим для некоторой характерной для процесса частоты  $\omega^*$

$$ESR(\omega^*) = \frac{1}{\omega^*} \int_0^{\omega^*} ESR(\omega) d\omega. \quad (4)$$

Характерную частоту процесса определим как величину, обратную характерной длительности процесса:  $\omega^* = 1/\tau = 1/RC_0$ . На практике усреднять целесообразно от некоторой малой, но доступной для измерения частоты, например  $\omega = 1$  рад/с. Измерение следует производить при амплитуде измерительного сигнала, не превышающей характерного масштаба проявления нелинейности характеристик X7R.

Точные решения дифференциальных уравнений (3) были получены в неявном виде для заряда и в явном виде для разряда конденсаторов.

I. Для разряда конденсаторов Z5U и X7R:

$$U_{dch}(t) = U_0 + \frac{E_0 - U_0}{\sqrt{e^{\frac{2t}{\tau}} \{1 + b(E_0 - U_0)^2\} - b(E_0 - U_0)^2}}; \quad (5)$$

$$I_{dch}(t) = -\frac{E_0 - U_0}{R} \frac{1}{\sqrt{e^{\frac{2t}{\tau}} \{1 + b(E_0 - U_0)^2\} - b(E_0 - U_0)^2}}. \quad (6)$$

II. Для заряда конденсаторов Z5U и X7R:

$$t(U_{ch}) = \frac{\tau}{1 + b(E_0 - U_0)^2} \times \left\{ \ln \left( \frac{(E_0 - U_0) \sqrt{1 + b(U_{ch} - U_0)^2}}{E_0 - U_{ch} - 2U_0} \right) + \sqrt{b(E_0 - U_0)^2} \arctan \left( \sqrt{b(U_{ch} - U_0)^2} \right) \right\}; \quad (7)$$

$$i_{ch}(t) = \frac{C_0}{1 + b(U_{ch} - U_0)^2} \frac{dU_{ch}(t)}{dt} = \frac{C_0}{1 + b(U_{ch} - U_0)^2} \left\{ \frac{dt(U_{ch})}{dU_{ch}} \right\}^{-1}, \quad (8)$$

где  $\tau = RC_0$ , а обозначения  $dch$  и  $ch$  соответствуют режимам разряда и заряда.

При  $U_0 = 0$  (для конденсаторов Y5V и H90) выражения упрощаются.

III. Для разряда конденсаторов Y5V и H90:

$$U_{dch}(t) = \frac{E_0}{\sqrt{e^{\frac{2t}{\tau}} (1 + bE_0^2) - bE_0^2}};$$

$$I_{dch}(t) = -\frac{E_0}{R} \frac{1}{\sqrt{e^{\frac{2t}{\tau}} (1 + bE_0^2) - bE_0^2}}. \quad (9)$$

IV. Для заряда конденсаторов Y5V и H90:

$$t(U_{ch}) = \frac{\tau}{1 + bE_0^2} \times$$

$$\times \left\{ \ln \left( \frac{E_0 \sqrt{1 + bU_{ch}^2}}{E_0 - U_{ch}} \right) + \sqrt{bE_0^2} \arctan \left( \sqrt{bU_{ch}^2} \right) \right\}; \quad (10)$$

$$i_{ch}(t) = \frac{C_0}{1 + bU_{ch}^2} \left\{ \frac{dt(U_{ch})}{dU_{ch}} \right\}^{-1}. \quad (11)$$

Полученные аналитические решения могут быть применены для непосредственного расчета переходных процессов заряда–разряда нелинейного конденсатора.

### Результаты и их обсуждение

Для проверки адекватности полученных решений и предложенной методики расчета *ESR* был осуществлен эксперимент, в ходе которого конденсатор заряжался и разряжался прямоугольным импульсом напряжения через сопротивление  $R_{ch} = R_{dch} = 2,6$  Ом; в цепи также присутствовал токовый низкоиндуктивный шунт Caddock  $R_{sh} = 0,1$  Ом. Импульсы напряжения генерировались формирователем, собранным по схеме емкостного ключа на основе MOSFET-транзистора IRFPS43N50K, управляемого драйвером IR2125. Параметры выходного импульса

напряжения могут варьироваться в диапазоне 10–500 В при длительности фронтов на уровне 0,2 мкс. Достоверность результатов моделирования была предварительно подтверждена путем сопоставления результатов расчета в MathCad с полученными аналитическими решениями. На рис. 3 приведены осциллограммы, иллюстрирующие экспериментальную и аналитическую временные зависимости разрядного напряжения и тока. Видно, что аналитическое решение хорошо совпадает с результатами эксперимента.

Следует отметить, что для симметричных фронтов воздействующего напряжения длительности заряда и разряда (переключения) различаются, что обусловлено влиянием нелинейности емкости исследованных конденсаторов. Действительно, рассматривая 90-процентные уровни заряда и разряда конденсатора,

$$\frac{E_0}{U_{dch}} = 10; \quad \frac{E_0}{E_0 - U_{ch}} = 10;$$

$$1 + bE_0^2 = 10; \quad \sqrt{bE_0^2} = \sqrt{3bU_{ch}^2} = 3, \quad (12)$$

получаем соотношение времен переключения при разряде и заряде:

$$\frac{t_{dch}}{t_{ch}} \approx (1 + bE_0^2) \times$$

$$\ln \left( \frac{E_0}{U_{dch}} \frac{1}{\sqrt{1 + bE_0^2}} \right)$$

$$\times \frac{1}{\ln \left( \frac{E_0}{E_0 - U_{ch}} \sqrt{1 + bE_0^2} \right) + \sqrt{bE_0^2} \arctan \left( \sqrt{bU_{ch}^2} \right)} \approx$$

$$\approx 1,7, \quad (13)$$

что неплохо согласуется с экспериментальными результатами.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang H., Blaabjerg F. Reliability of Capacitors for DC-Link Applications in Power Electronic Converters — An Overview // IEEE Trans. Ind. Appl. 2014. Vol. 50. № 5. P. 3569–3578.
2. Jow T.R., MacDougall F.W. [et al.] Pulsed power capacitor development and outlook // IEEE Pulsed Power Conference. Austin, TX. 2015. P. 1–7.
3. 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. P. 024509.
4. Hao X. A review on the dielectric materials for high energy-storage application // J. Adv. Dielectr. 2013. Vol. 3. № 1. P. 1330001
5. Ogihara H., Randall C. A., Trolrier-McKinstry S. High-Energy Density Capacitors Utilizing 0.7 BaTiO<sub>3</sub>-0.3 BiScO<sub>3</sub> Ceramics // J. Am. Ceram. Soc. 2009. Vol. 92. № 8. P. 1719–1724.

6. Xie Z., Peng B. [et al.]. High-Energy-Storage Density Capacitors of Bi(Ni<sub>1</sub>/2Ti<sub>1</sub>/2)O<sub>3</sub>–PbTiO<sub>3</sub>Thin Filmswith Good Temperature Stability // *J. Am. Ceram. Soc.* 2013. Vol. 96. № 7. P. 2061–2064.
7. Tang H., Sodano H.A. High energy density nanocomposite capacitors using non-ferroelectric nanowires // *Appl. Phys. Lett.* 2013. Vol. 102, № 6. P. 063901
8. Ротенберг Б.А. Керамические конденсаторные диэлектрики / СПб.: НИИ Гириконт. 2000. 246 с.
9. Pan M-J., Randall C. A. A brief introduction to ceramic capacitors // *IEEE Electr. Insul. Mag.* 2010. Vol. 26. № 3. P. 44–50.
10. Dai L., Lin F., Zhu Z., Li J. Electrical characteristics of high energy density multilayer ceramic capacitor for pulse power application // *IEEE Trans. Magn.* 2005. Vol. 41. № 1. P. 281–284.
11. Matthews E., Kristiansen M., Neuber A. Capacitor Evaluation for Compact Pulsed Power // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2010. Vol. 38. № 3. P. 500–508.
12. Domonkos M. T., Heidger S. [et al.] Submicrosecond Pulsed Power Capacitors Based on Novel Ceramic Technologies // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2010. Vol. 38. № 10. P. 2686–2693.
13. Rupprecht G., Bell R. O., Silverman B. D. Nonlinearity and Microwave Losses in Cubic Strontium-Titanate // *Phys. Rev.* 1961. Vol. 123. № 1. P. 97.
14. Johnson K. M. Variation of Dielectric Constant with Voltage in Ferroelectrics and Its Application to Parametric Devices // *J. Appl. Phys.* 1962. Vol. 33. № 9. P. 2826.
15. Campbell C. K., Van Wyk J. D. [et al.] Relaxation effects in high-voltage barium titanate nonlinear ceramic disk capacitors // *IEEE Trans. Compon., Hybrids, Manuf. Technol.* 1993. Vol. 16. № 4. P. 418–423.
16. Vendik O. G., Zubko S. P. Modeling the dielectric response of incipient ferroelectrics // *J. Appl. Phys.* 1997. Vol. 82. № 9. P. 4475–4483.
1. Wang H., Blaabjerg F. Reliability of Capacitors for DC-Link Applications in Power Electronic Converters — An Overview. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2014. Vol. 50. № 5. P. 3569–3578.
2. Jow T.R., MacDougall F.W. [et al.]. Pulsed power capacitor development and outlook. *IEEE Pulsed Power Conference. Austin, TX.* 2015. P. 1–7.
3. 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. P. 024509.
4. Hao X. A review on the dielectric materials for high energy-storage application. *J. Adv. Dielectr.* 2013. Vol. 3. № 1. P. 1330001
5. Ogihara H., Randall C. A., Trolrier-McKinstry S. High-Energy Density Capacitors Utilizing 0.7 BaTiO<sub>3</sub>-0.3 BiScO<sub>3</sub> Ceramics. *J. Am. Ceram. Soc.* 2009. Vol. 92. № 8. P. 1719–1724.
6. Xie Z., Peng B. [et al.]. High-Energy-Storage Density Capacitors of Bi(Ni<sub>1</sub>/2Ti<sub>1</sub>/2)O<sub>3</sub>–PbTiO<sub>3</sub>Thin Filmswith Good Temperature Stability. *J. Am. Ceram. Soc.* 2013. Vol. 96. № 7. P. 2061–2064.
7. Tang H., Sodano H. A. High energy density nanocomposite capacitors using non-ferroelectric nanowires. *Appl. Phys. Lett.* 2013. Vol. 102, № 6. P. 063901
8. Rotenberg B.A. Керамические конденсаторные диэлектрики. СПб.: НИИ Гириконт, 2000. 246 с. (rus)
9. Pan M-J., Randall C.A. A brief introduction to ceramic capacitors. *IEEE Electr. Insul. Mag.* 2010. Vol. 26. № 3. P. 44–50.
10. Dai L., Lin F., Zhu Z., Li J. Electrical characteristics of high energy density multilayer ceramic capacitor for pulse power application. *IEEE Trans. Magn.* 2005. Vol. 41. № 1. P. 281–284.
11. Matthews E., Kristiansen M., Neuber A. Capacitor Evaluation for Compact Pulsed Power. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2010. Vol. 38. № 3. P. 500–508.
12. Domonkos M. T., Heidger S. [et al.] Submicrosecond Pulsed Power Capacitors Based on Novel Ceramic Technologies. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2010. Vol. 38. № 10. P. 2686–2693.
13. Rupprecht G., Bell R. O., Silverman B. D. Nonlinearity and Microwave Losses in Cubic Strontium-Titanate. *Phys. Rev.* 1961. Vol. 123. № 1. P. 97.
14. Johnson K.M. Variation of Dielectric Constant with Voltage in Ferroelectrics and Its Application to Parametric Devices. *J. Appl. Phys.* 1962. Vol. 33. № 9. P. 2826.
15. Campbell C. K., Van Wyk J. D. [et al.] Relaxation effects in high-voltage barium titanate nonlinear ceramic disk capacitors. *IEEE Trans. Compon., Hybrids, Manuf. Technol.* 1993. Vol. 16. № 4. P. 418–423.
16. Vendik O. G., Zubko S. P. Modeling the dielectric response of incipient ferroelectrics. *J. Appl. Phys.* 1997. Vol. 82. № 9. P. 4475–4483.

## REFERENCES

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

**ПЛОТНИКОВ Андрей Павлович** — аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.  
195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.  
E-mail: andreyplotnikow@gmail.com



**PLOTNIKOV Andrey P.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.  
E-mail: andreyplotnikow@gmail.com

**ЕМЕЛЬЯНОВ Олег Анатольевич** — кандидат технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.  
195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.  
E-mail: oaemel2@gmail.com

**EMELYANOV Oleg A.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.  
E-mail: oaemel2@gmail.com



DOI 10.5862/JEST.243.10

УДК 621.311

*О.Н. Соколова*

## **СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ РОССИИ И ЕВРОПЫ ПРИ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЯХ**

*O.N. Sokolova*

### **COMPARING THE EFFECTIVENESS OF SECURITY CONTROL METHODS DURING GEOMAGNETIC DISTURBANCES IN POWER SYSTEM OF RUSSIA AND IN EUROPE**

Требования к качеству электроснабжения схожи в ЕЭС России и ENTSO-E, но принципы управления разнятся, что обусловлено различной архитектурой энергосистем. В энергосистеме Европы преобладают короткие линии электропередач, в то время как ЕЭС России представлена длинными линиями электропередач и слабыми межсистемными связями. Проект по объединению Единой энергосистемы России (ЕЭС России) и ENTSO-E стартовал более 10 лет назад. Одним из требований является использование одинаковых принципов управления. Геомагнитные бури — явления, характеризующиеся низкой вероятностью большим прямым и косвенным ущербом. Их особенность в том, что они носят глобальный характер и приводят к единовременному отключению нескольких сетевых элементов. В статье дается анализ преимуществ и недостатков методов управления в ЕЭС и ENTSO-E с целью предотвращения межсистемных аварий, вызванных геомагнитными бурями.

ЭНЕРГОСИСТЕМА; НАДЕЖНОСТЬ; УПРАВЛЕНИЕ; ГЕОМАГНИТНАЯ БУРЯ; УПРАВЛЯЮЩИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ; ОПЕРАЦИОННЫЕ ЛИМИТЫ.

The quality standards for power supply are nearly the same in ENTSO-e and UPS of Russia, but the control principles are different. The differences are basically originating from the architecture of the power grids. The European grid mainly consists of short transmission lines. The UPS of Russia is characterized by the prevalence of long and weak interconnections. The project concerning the possibility of integrating ENTSO-e and UPS of Russia started more than 10 years ago. Such integration requires using the same or nearly the same control principles. Geomagnetic disturbances are the so-called high-impact low-frequency events. They affect large geographic areas and provoke simultaneous outage of several network elements. The strengths and weaknesses of the control methods employed by ENTSO-E and UPS of Russia for ensuring stability during geomagnetic disturbances have been analyzed in the article.

POWER SYSTEM; SECURITY; CONTROL; GEOMAGNETIC DISTURBANCE; CONTROL ACTIONS; OPERATION LIMITS.

#### **Введение**

Характерная особенность режимов работы энергосистем (ЭС) — наличие непрерывного потока возмущений, часть из которых представляет угрозу для устойчивой работы ЭС. Под возмущением понимается изменение состояния сетевого элемента, которое не могло быть преду-

смотрено заранее. Возмущения, удовлетворяющие оптимальному уровню надежности электроснабжения, называются нормативными. Их перечень приведен в [1]. Опыт эксплуатации ЭС позволил составить нормативную базу стандартов и требований по проектированию и диспетчеризации ЭС.

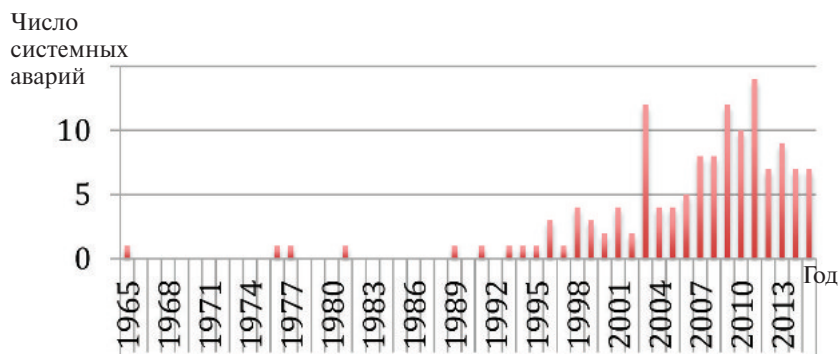


Рис. 1. Статистика числа системных аварий за последние 50 лет

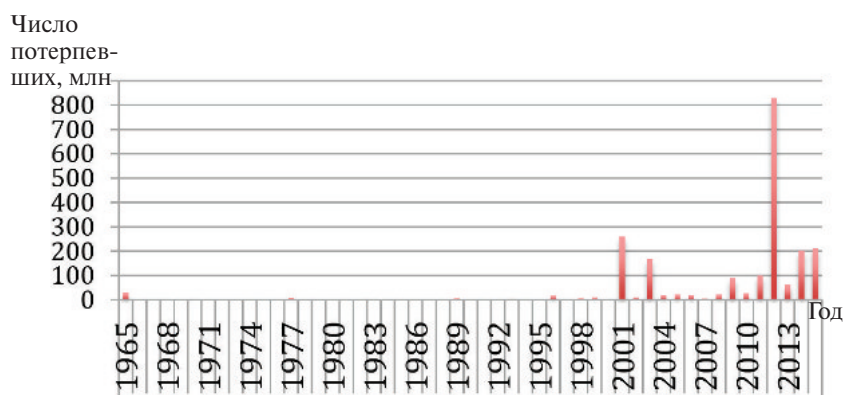


Рис. 2. Число людей (млн чел.), потерпевших от недоотпуска электроэнергии

Анализ системных аварий за последние 50 лет наглядно свидетельствует не только о росте числа аварий (рис. 1), но и об увеличении процента населения, пострадавшего от недоотпуска электроэнергии (рис. 2).

Введение в эксплуатацию новых средств контроля и защиты также сопровождается ростом интенсивности отказов вводимых средств (табл. 1), обусловленных недостаточной магнитной совместимостью этих средств с энергетическим оборудованием [2]. Естественно, число отказов новых технических средств также снижает надежность ЭС.

Одним из видов возмущений природного характера являются геомагнитные бури (ГМБ). Современная электроэнергетика пока имеет малый опыт эксплуатации ЭС при воздействии геомагнитных бурь, в отличие от других возмущений природного характера (молнии, ледяной дождь, землетрясения и т.д.), что увеличивает сложность разработки базы управляющих воз-

действий для минимизации влияния ГМБ на режим работы ЭС. Наиболее характерно воздействие ГМБ на ЭС, расположенные в северных широтах (Канада, США, Скандинавия, Россия). Примерами энергоаварий, вызванных геомагнитными бурями, являются: Railroad storm (13 мая 1921), Hydro Quebec blackout (13/14 марта 1989), Halloween storm (29/30 октября 2003) и др..

В настоящей статье дается сравнительный анализ управляющих воздействий (УВ), используемых Единой энергетической системой России (ЕЭС России) и Европейским сообществом операторов магистральных электрических сетей в области электроэнергетики (ENTSO-E) для обеспечения устойчивой работы ЭС, и их эффективности при минимизации влияния ГМБ на режим работы ЭС. Этот анализ представляет особый интерес в связи с началом несколько лет назад проекта по возможному объединению ЕЭС России и ENTSO-E [3] и оценкой устойчивости виртуальной объединенной ЭС.

Таблица 1

**Рост интенсивности отказов с введением в эксплуатацию новых типов компонент**

Начало ввода в эксплуатацию	Вид реле	Общее количество реле	Повреждение					
			Общее количество		Относительное количество, %*		Среднегодовое относительное количество, %**	Годовая интенсивность повреждений***
			2007 г.	2008 г.	2007 г.	2008 г.		
1970–1975	Электрохимические различных типов	2312	1	4	0,043	0,173	0,11	1
1975–1980	Статические различных типов	2745	8	8	0,291	0,291	0,291	2,6
1990–1995	Микропроцессорные, тип 1	1423	19	25	1,33	1,76	1,54	14
2000–2005	Микропроцессорные, тип 2	342	6	5	1,75	1,46	1,61	14,6
2003–2005	Микропроцессорные, тип 3	49	3	1	6,12	2,04	4,08	37
2005–2008	Микропроцессорные, тип 4	10	3	1	30	10	20	182

\*Относительное количество повреждений — отношение количества повреждений реле данного типа к общему количеству реле этого типа, находящихся в эксплуатации.

\*\*Среднегодовое количество повреждений — среднее за два года (2007–2008) количество относительных повреждений.

\*\*\*Годовая интенсивность отказов — отношение среднегодового относительного количества повреждений реле различных видов к относительному количеству повреждений за единицу времени.

**Операционные лимиты**

Режим, реализуемый в энергосистеме, характеризуется рядом параметров, в числе которых активные и реактивные мощности станций ( $P_{ст}$ ,  $Q_{ст}$ ) и потребителей ( $P_{п}$ ,  $Q_{п}$ ), перетоки мощностей  $P_p$ ,  $Q_p$ , токи  $I_i$  элементов электрической сети, напряжения  $U_i$  узлов. Для обеспечения надлежащего уровня надежности электроснабжения при работе оборудования в длительно допустимых режимах набор  $M$  этих величин ( $U$ ,  $P$ ,  $I$ , и т. д.) регламентируется для характерных и наиболее вероятных режимов ЭС с учетом технических ограничений эксплуатации.

Минимально допустимые снижения напряжения в ЭС определяются условиями устойчивой работы генераторов и устойчивостью узлов нагрузки и составляют порядка 10–15 % в послеаварийном режиме. Выбор наибольшего рабочего напряжения диктуется условиями надежной эксплуатации изоляции сетевого оборудования

[4], так как повышение напряжения сверх допустимого вызывает ускоренное старение изоляции и выход оборудования из строя:

Номинальное напряжение, кВ	Наибольшее рабочее напряжение, кВ
220	245** / 252*
330*	363
400**	420
500*	525
750*	787

\* Класс напряжения, принятый в ЕЭС России.

\*\* Класс напряжения, принятый в ENTSO-E.

Из этих данных видно, что значения максимально допустимого рабочего напряжения в ЕЭС России выше, чем в Европе, что объясняется архитектурой сети и большей протяженностью линий электропередач.

Максимальная токовая загрузка сетевых элементов регламентируется [7] в ЕЭС России и в ЭС Европы [5]. Согласно [11] при определении допустимой токовой загрузки силовых трансформаторов учитываются только погодные условия и температура окружающего воздуха. В то время как в [12] регламентируется учет сверх этого таких параметров, как тип изоляции, температура масла и срок эксплуатации силового трансформатора. В случае недопустимой токовой перегрузки в ENTSO-E предусмотрена подача команды на отключение перегруженного сетевого элемента. В отечественной практике применяется более гибкое управление: многоступенчатое устройство противоаварийного управления по контролируемому току с выдержкой по времени, осуществляющее ввод последующих ступеней по току/времени до достижения в контролируемом элементе сети длительно допустимого значения тока.

Частота энергосистемы — один из основных параметров, определяющих условия устойчивой работы генераторов электростанций. Принципы управления и контроля частоты и допустимые пределы отклонения параметра существенно различаются в ЕЭС России и ENTSO-E. В [5] предусмотрен контроль частоты средствами первичного (primary control), вторичного (secondary control), третичного (tertiary control) и временного (time control) контроля. Отклонение частоты от номинального значения (50 Гц) на величину  $\pm 0,2$  Гц приводит в действие систему первичного контроля. При снижении частоты

ниже 49,0 Гц подается команда на отключение нагрузки. При меньшем колебании частоты используются системы регулирования генераторов электрических станций. Через 15–30 секунд после срабатывания системы первичного контроля частоты активируются средства вторичного контроля для восстановления установленных (договором по покупке/продаже электроэнергии) перетоков мощности. Задачами системы третичного контроля являются: обеспечение резерва генерации для целей вторичного контроля, распределение между генераторами управляющих воздействий (УВ) системы вторичного контроля по условиям экономичности режима. Система временного контроля обеспечивает синхронизацию всех устройств контроля частоты в ЭС по времени. Центр управления находится в Лауфенбурге, Швейцария. Согласно [5] допустимыми колебаниями частоты в течение месяца считаются, когда в 90–99 % измерений отклонение частоты получалось не более 0,04–0,06 Гц.

В ЕЭС России контроль частоты в ЭС организуется в соответствии с [6], его обеспечивают следующие подсистемы: автоматический частотный ввод резерва (АЧВР) при снижении частоты ниже минимально допустимых значений, но до верхних уставок АЧР; автоматическая частотная разгрузка (АЧР) при снижении частоты ниже 49,0 Гц; дополнительная автоматическая частотная разгрузка (ДАР) при местных дефицитах активной мощности с большой скоростью снижения частоты; перевод электростанций (энер-

Таблица 2

Сравнительный анализ параметров контроля частоты в ЕЭС России и ENTSO-E

Параметр	ENTSO-E	ЕЭС России
Минимально допустимое значение частоты, Гц	49,0	49–49,2
Первая ступень АЧР, Гц	48,7 (48,5)*	48,8
Вторая ступень АЧР, Гц	48,4 (48,0)*	48
Выделение электростанций на питание собственных нужд или на сбалансированную нагрузку в случае неэффективности действия АЧР, Гц	47,5	46
Автоматическое повторное включение отключенных потребителей при нормализации частоты, Гц	49,8	49–49,5

\*Grid code of France [9].

глоболов) на питание собственных нужд или на сбалансированную нагрузку с помощью частотной делительной автоматики (ЧДА) в случае неэффективности действия АЧР; частотное автоматическое повторное включение (ЧАПВ) отключенных потребителей при нормализации частоты. В табл. 2 приведен сравнительный анализ частот по ступеням ОН.

Показатели качества частоты напрямую влияют на качество электроснабжения, что предъявляет высокие требования к управляющим воздействиям, эффективность которых должна быть подтверждена многочисленными тестовыми расчетами.

### **Принципы обеспечения устойчивой работы энергосистем. Виды и принципы применения управляющих воздействий**

Различия методов управления в ЕЭС России и в ENTSO-E обусловлены разной архитектурой ЭС, принятой на стадии их проектирования и строительства. В ЭС Европы преобладают короткие линии электропередач, в то время как ЕЭС России представлена длинными линиями электропередач и слабыми межсистемными связями, что приводит к невозможности использования принципа « $N-1$ » (« $N-1$  principle»). Принцип работы ЭС « $N-1$ » гарантирует, что в случае аварийного отключения одного сетевого элемента устойчивость ЭС не нарушится и значения параметров режима не превысят допустимых значений (с учетом возможных управляющих воздействий). Устойчивая работа ЕЭС России регламентируется [1] и основывается на использовании коэффициентов запаса по активной мощности ( $K_p$ ) и по напряжению ( $K_u$ ) и обеспечивается при воздействии трёх групп нормативных возмущений.

Нормативные возмущения подразделены на группы исходя из степени тяжести их воздействия на режим ЭС. В нормальном режиме УВ выбираются с целью восстановления сбалансированного режима ЭС после воздействия всех трёх групп нормативных возмущений, в ремонтных — только первой и второй группы. Анализ крупных системных аварий ЕЭС России показывает, что это требование может быть ужесто-

чено, так как большинство нарушений устойчивой работы произошло в ремонтных режимах. В [5] возмущения также разделены на три группы в соответствии со степенью их тяжести, но степень тяжести возмущения определяется в соответствии с региональными особенностями ЭС и может различаться в разных региональных диспетчерских управлениях (РДУ). Таким образом, возмущения разделены на следующие группы: нормативные (normal), особые (exceptional) и ненормативные (out-of-range). Список особых возмущений составляется каждым РДУ в дополнение к перечню нормативных возмущений (общих для всей ENTSO-E) в соответствии с принципом отсутствия лавины напряжения и частоты за границами зоны диспетчеризации. В Приложении приведен сравнительный перечень нормативных возмущений (цветом выделены возмущения, которые в [4] относятся к особым).

Для обеспечения устойчивой работы ЭС в ENTSO-E используется два вида УВ: восстанавливающие (curative remedial actions) и предупреждающие (preventive remedial actions). Объем и место действия восстанавливающих УВ должны быть определены заранее, а их эффективность — доказана тестовыми расчетами. Они применяются сразу после воздействия нормативного возмущения с целью восстановления сбалансированного режима ЭС. После нормативного возмущения режим  $N'$  характеризуется тем, что не все его параметры находятся в области допустимых значений. Таким образом, восстанавливающие УВ используются для обеспечения нового нормального режима  $N_{\text{нов}}$  ЭС, отвечающего всем требованиям по надежности эксплуатации и качеству электроснабжения. Предупреждающие УВ применяются в случае неэффективности или невозможности применения восстанавливающих УВ.

УВ влияют на потокораспределение мощностей в ЭС, восстанавливая тем самым сбалансированный режим ЭС. В табл. 3 приведен сравнительный анализ УВ, их характеристик и сферы применения в ENTSO-E (первая строка) и ЕЭС России (вторая строка).



Таблица 3

Сравнительный анализ управляющих воздействий в ЕЭС России и ENTSO-E

Тип УВ	Время действия	УВ		Контролируемый параметр сети
		В/П*	А/Р**	
1	2	3	4	5
Деление сети	Несколько секунд	В/П	Р	Мощность, напряжение
		—	А/Р	
Фазовое управление мощностью электропередач переменного тока	Несколько минут	В/П	А/Р	Мощность, напряжение
		—	Р	Напряжение
Форсировка возбуждения синхронных машин	Несколько минут	—	Р	Мощность, напряжение
		—	А/Р	
Ввод резерва генерирующей мощности	Зависит от типа генератора	П	Р	Мощность, напряжение
		—	А/Р	
Отключение генераторов	Несколько секунд	П	Р	Мощность, напряжение
		—	А/Р	
Отключение нагрузки	Несколько миллисекунд	В	А/Р	Мощность, напряжение
		—	А/Р	
Ограничение продажи электроэнергии	Несколько минут	П	Р	Мощность, напряжение
		—	—	—
Форсировка устройств продольной компенсации ЛЭП, включение / отключение шунтирующих реакторов	Несколько минут	П	Р	Напряжение
		—	А/Р	

\* В/П — восстанавливающие/ предупредительное УВ.

\*\* А/Р — автоматическое/ ручное управление.

**Характер влияния геомагнитных бурь на режим работы ЭС**

Природные геомагнитные бури связаны с нерегулярными процессами в солнечном ветре и на Солнце. Каждая геомагнитная буря уникальна по своим индивидуальным характеристикам. Тем не менее в поведении геомагнитных бурь отмечается ряд статистических закономерностей [13]. Токовые системы в форме геомагнитно индуцированных токов (ГИТ), оказывающие воздействие на ЭС, являются реакцией на колебания геомагнитного поля в широком диапазоне частот (от  $10^{-5}$  до  $10^0$  Гц).

Отличие геомагнитных бурь от других возмущений природного характера:

геомагнитные бури оказывают воздействие на ЭС на больших расстояниях, меняя параметры геомагнитного поля Земли на больших площадях;

ГИТ носят глобальный характер и приводят к единовременному отключению нескольких сетевых элементов, что делает неэффективным и используемые методы противоаварийного управления;

геомагнитные бури не могут быть визуализированными. Непосредственным сигналом о начале геомагнитной бури являются показания датчиков геомагнитных обсерваторий; он клас-



сифицируется по силе с помощью системы геомагнитных индексов [14]. Превентивным сигналом являются данные о параметрах солнечного ветра, зарегистрированные спутниками, расположенными в первой точке Лагранжа (L1);

временной промежуток между моментом изменения геомагнитного поля и началом развития системной аварии недостаточен для применения осмысленных УВ диспетчерами ЭС. Например, временной промежуток при системной аварии в ЭС Квебека в 1989 году был равен 92 секундам [15];

частота ГИТ мала по сравнению с номинальной частотой ЭС, равной 50 Гц, что позволяет рассматривать ГИТ как квазипостоянные токи. Главное отличие ГИТ от постоянной составляющей тока короткого замыкания заключается в том, что ГИТ может протекать в энергосистеме в интервале от нескольких минут до нескольких дней с постоянно изменяющейся амплитудой. Пример изменения параметров ГИТ во время системной аварии в Квебеке 13-14 марта 1989 приведен [15].

В энергоэнергетических системах пока мал опыт оперирования при геомагнитных бурях. Характерна низкая общественная осведомленность о принципах воздействия геомагнитных бурь на энергосистемы, что приводит к неточной классификации причин энергоаварий.

Геомагнитные бури по силе воздействия классифицируются с помощью системы индексов. Наиболее распространено использование индекса  $K_p$ , который представляет среднее трехчасовое значение изменения магнитного поля Земли в наноТеслах, измеренное на 13 выбранных геомагнитных обсерваториях. Шкала индекса логарифмически ранжирована от 1 до 9 по принципу шкалы Рихтера. Hydro Quebec blackout (13-14 марта 1989) и Halloween event (29-30 октября 2003) соответствуют сильным геомагнитным бурям уровня  $K_p=9$ , в то время как выход из строя силовых трансформаторов в ЮАР был спровоцирован рядом умеренных бурь ( $K_p=5-7$ ), приведших к ускоренному старению изоляции [16]. Таким образом, можно различить три возможных вида ГМБ, воздействующих на ЭС:

ГМБ, приводящие к системным авариям и повреждению высоковольтного оборудования ЭС;

ГМБ, приводящие к системным авариям, но не приводящие к повреждению высоковольтного оборудования ЭС;

ГМБ, не приводящие к системным авариям, но приводящее к повреждению высоковольтного оборудования ЭС.

В ЭС Hydro Quebec преобладают линии электропередачи класса напряжения 735 кВ и, как следствие, однофазные трансформаторы. В [17] показано, что класс напряжения и конструкция силового оборудования являются критическими факторами уязвимости энергосистемы. Блэкаут был вызван возмущением геомагнитного поля, равным 400 нТ/мин., вызвавшим одно полупериодное насыщение силовых трансформаторов, что впоследствии проявилось в возросшем дефиците реактивной мощности и ненормированном распределении высших гармоник. Ненормально высокий уровень высших гармоник спровоцировал ложное срабатывание средств релейной защиты, отключившее емкостные средства компенсации реактивной мощности. Совокупность этих факторов привела к лавине напряжения и потере 22 ГВт нагрузки [15]. Дополнительно вышли из строя два силовых трансформатора 735 кВ на подстанции LG4, а также шунтирующий реактор и выключатель на подстанции Nemicaui из-за недопустимо высокой нагрузки.

ГМБ в ЭС Швеции приводили к энергоавариям всех трёх типов. Полный перечень аварий приведен в [17]. Наибольший эффект на экономику Швеции имел так называемый Halloween blackout (30 октября 2003 года), вызванный возмущением геомагнитного поля, равным 470 нТ/мин. В 20:04 30 октября 2003 года значение электрического поля Земли выросло до 2 В/км. Системный оператор ЭС Швеции был проинформирован учеными Института физики космоса (Лунд, Швеция) в 20:05, но это не позволило предотвратить блэкаут в энергосистеме на юге Швеции в 20:07. Энергоавария была вызвана ложным срабатыванием устройств релейной защиты, установленных на линиях 135 кВ, имеющих более высокую чувствительность к токам третьей гармоники, чем основной. Как и при аварии в ЭС Квебека, ГМБ привело к дефициту

реактивной мощности и ненормированному распределению высших гармоник.

### **Сравнительный анализ управляющих воздействий**

При выборе УВ необходимо сравнивать стоимость их реализации и суммарную стоимость ущерба в случае системной аварии. Таким образом, для обеспечения качественного электроснабжения сначала необходима реализация УВ наименьшей стоимости. При использовании УВ типа отключение нагрузки (ОН) следует помнить, что это средство – наименее желательное, так как снижает основной показатель надежности электроснабжения потребителей и увеличивает экономический ущерб. Вместе с тем в современных условиях во многих случаях отказаться от ОН практически невозможно. В [5] предусмотрен ОН в объеме 50 % от суммарной нагрузки ЭС, что равно нагрузке, при которой ЭС может функционировать без использования УВ и с обеспечением принципа « $N-1$ ». В США после блэкаута в 2003 году объем нагрузки был снижен до 30 %. Несмотря на то что вероятность использования полного объема нагрузки, введенного под ОН, низка, возможность его реализации всегда должна быть обеспечена. Для выполнения принципа « $N-1$ » в ЭС Европы используется «циркулярная» разгрузка. В ЕЭС России под систему автоматического отключения нагрузки заводятся крупные нагрузочные фидеры. Два раза в год выполняются контрольные замеры нагрузки.

Анализ зарегистрированных аварий показал, что существующие меры противоаварийного контроля не оптимальны при ГМБ. В ЕЭС России в качестве УВ используется также деление сети на несинхронно работающие части [7]. Представляется целесообразным введение в практику оперирования ENTSO-E таких УВ, как деление сети и выделение электростанции на сбалансированную нагрузку, которые не учтены в существующем стандарте по диспетчеризации ENTSO-E [5]. Применение этих УВ позволит за счет снижения нагрузки на межсистемные связи сократить экономический ущерб как от недоотпуска электроэнергии, так и от потери оборудования. Команду на деление сети следует подавать при поступлении

информации от геомагнитных обсерваторий о критическом изменении параметров геомагнитного поля Земли. В дополнение рекомендуется увеличить число генераторов станции, находящихся в горячем резерве.

В настоящее время устойчивая работа ЭС обеспечивается при потере одного сетевого элемента. При этом в [1] указывается, что допускается неэффективная работа средств противоаварийной автоматики в случае потери двух сетевых элементов. Ввиду того, что ГМБ приводят к одновременному отключению нескольких сетевых элементов на больших географических расстояниях, рекомендуется предусмотреть разработку стандартов оперирования во время сильных ГМБ на базе принципа  $N-2$  как минимум в ЭС мегаполисов.

### **Выводы**

ГМБ – это явления, характеризующиеся низкой вероятностью, но потенциально угрожающие значительными экономическими потерями. Совокупность параметров ГМБ и ЭС может приводить к трём сценариям системных аварий, различающимся по степени прямого и косвенного ущерба. Общим для всех трёх сценариев является малый временной промежуток между изменением параметра геомагнитного поля и моментом начала системной аварии. По результатам выполненных исследований можно заключить, что для организации противоаварийного управления необходимо обеспечить взаимодействие диспетчеров с центрами прогнозирования космической погоды.

ГМБ носят глобальный характер и приводят к единовременному отключению нескольких сетевых элементов, что делает неэффективными используемые методы противоаварийного управления. Наибольший потенциал как мера противоаварийного управления имеет УВ типа деления сети, направленное на выделение электростанции на сбалансированную нагрузку. Автор рекомендует введение такой практики в ENTSO-E по примеру ЕЭС России.

В заключение отметим, что обеспечение надежного и качественного электроснабжения является результатом внедрения также превентивных и конструирующих мер.

Приложение

Перечень нормативных возмущений

Возмущения	Группы нормативных возмущений в сетях разного номинального напряжением, кВ			
	110–220 кВ	330–500 кВ	750 кВ	1150 кВ
<i>КЗ на сетевом элементе, кроме системы (секции) шин:</i>				
Отключение сетевого элемента основными <sup>1</sup> защитами при однофазном КЗ с успешным АПВ (для сетей 330 кВ и выше – ОАПВ, 110–220 кВ – ТАПВ)	I	I	I	I
То же, но с неуспешным АПВ <sup>2</sup>	I	I	I, II	II
Отключение сетевого элемента основными защитами при трехфазном КЗ с успешным и неуспешным АПВ <sup>2</sup>	II	—	—	—
Отключение сетевого элемента резервными защитами при однофазном КЗ с успешным и неуспешным АПВ	II	—	—	—
Отключение сетевого элемента основными защитами при двухфазном КЗ на землю с неуспешным АПВ	—	II	III	III
Отключение сетевого элемента действием УРОВ при однофазном КЗ с отказом одного выключателя	II	III	III	III
То же, но при двухфазном КЗ на землю	—	III	III	—
То же, но при трехфазном КЗ	III	—	—	—
Одновременное отключение двух ВЛ, расположенных в общем коридоре более чем на половине длины более короткой линии, в результате возмущения группы I	III	III	III	III
Возмущения групп I и II с отключением элемента сети или генератора, которые вследствие ремонта одного из выключателей приводят к отключению другого элемента или генератора, подключенного к тому же распределительству	III	III	III	III
<i>КЗ на системе (секции) шин</i>				
Отключение СШ с однофазным КЗ, не связанное с разрывом связей между узлами сети	I	I	II	II
То же, но с разрывом связей	III	III	—	—
Значение аварийного небаланса мощности				
<i>Значение аварийного небаланса мощности</i>				
Мощность генератора или блока генераторов, подключенных к сети общими выключателями	II	II	—	—
Мощность двух генераторов АЭС, подключенных к одному реакторному блоку	II	II	—	—

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методические указания по устойчивости энергосистем. Приказ Минэнерго, от 30 июня 2003, №277. [Электр. ресурс] URL: <http://so-ups.ru/fileadmin/files/laws/orders/pr277-300603me.pdf> (Дата обращения: 20.05.2016)
2. Митюгин А.А., Яковлев В.И. Исследование высоковольтных электромагнитных помех в электрической сети при отключении тока короткого замыкания // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2012. №1 (142). С. 70–79.
3. Техничко-экономическое обоснование: Синхронное объединение ЕЭС/ОЭС и УСТЕ. [Электр. ресурс] URL: [http://so-ups.ru/fileadmin/files/company/international/ucte-ees/Obzor\\_osnovnykh\\_rabot\\_i\\_rezultatov\\_Proekta.pdf](http://so-ups.ru/fileadmin/files/company/international/ucte-ees/Obzor_osnovnykh_rabot_i_rezultatov_Proekta.pdf) (Дата обращения: 20.05.2016)
4. ГОСТ 721-77. Системы электроснабжения, сети, источники и приемники электрической энергии. Номинальные напряжения свыше 1000 В / Утв. постановлением № 1376 Госстандарта СССР от 27 мая 1977 г.
5. UCTE Operation Handbook final v. 2.5 E, 24.06.2004. [Электр. ресурс]. URL: <http://www.ucte.org> (Дата обращения: 20.05.2016)
6. СТО 59012820.29.240.001-2010. Технические правила организации в ЕЭС России автоматического ограничения снижения частоты при аварийном дефиците активной мощности (автоматическая частотная разгрузка) / Стандарт организации ОАО «СО ЕЭС» от 31 декабря 2009 г. [Электр. ресурс] URL: [http://so-ups.ru/fileadmin/files/laws/standards/STO\\_59012820.pdf](http://so-ups.ru/fileadmin/files/laws/standards/STO_59012820.pdf) (Дата обращения: 20.05.2016)
7. СТО 59012820.29.240.001-2011. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Противоаварийная автоматика энергосистем. Условия организации процесса. Условия организации объекта. Нормы и требования / Стандарт организации ОАО «СО ЕЭС» от 19 апреля 2011 г. [Электр. ресурс] URL: [http://so-ups.ru/fileadmin/files/laws/standards/Emergency\\_control2011.pdf](http://so-ups.ru/fileadmin/files/laws/standards/Emergency_control2011.pdf) (Дата обращения: 20.05.2016).
8. Best protection practices for HV and EHV transmission systems of ENTSO-E CE area electrical grids. [Электр. ресурс] URL: [https://www.entsoe.eu/fileadmin/user\\_upload/\\_library/publications/entsoe/RG\\_SOC\\_CE/120425\\_RG\\_CE\\_TOP\\_06.3\\_D.2\\_best\\_protection\\_practices\\_report\\_1\\_.pdf](https://www.entsoe.eu/fileadmin/user_upload/_library/publications/entsoe/RG_SOC_CE/120425_RG_CE_TOP_06.3_D.2_best_protection_practices_report_1_.pdf) (Дата обращения: 20.05.2016)
9. Documentation technique de référence. Réseau de transport d'électricité, France, version applicable du 1er février 2009 [Электр. ресурс] URL: [http://clients.rte-france.com/htm/fr/mediatheque/telecharge/reftech/12-10-15\\_complet.pdf](http://clients.rte-france.com/htm/fr/mediatheque/telecharge/reftech/12-10-15_complet.pdf) (Дата обращения: 20.05.2016)
10. Cepin M. Assessment of power system reliability: methods and applications. London: Springer, 2011.
11. ENTSO-E Subgroup "System protection and dynamics" [Электр. ресурс] URL: [https://docs.entsoe.eu/pt\\_BR/dataset/subgroup-system-protection-and-dynamics/resource/74071a94-b406-4f72-bd14-e75e8f143dbb](https://docs.entsoe.eu/pt_BR/dataset/subgroup-system-protection-and-dynamics/resource/74071a94-b406-4f72-bd14-e75e8f143dbb) (Дата обращения: 20.05.2016)
12. СТО56947007-29.180.01.116-2012. Инструкция по эксплуатации трансформаторов / Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС» от 2 марта 2012 г. [Электр. ресурс] URL: <http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO-56947007-29.180.01.116-2012.pdf> (Дата обращения: 20.05.2016)
13. Bothmer V., Daglis I. Space Weather Physics and Effects. Springer, 2007.
14. Yermolaev Yu. I., Lodkina I.G., Nikolaeva N.S., Yermolaev M.Yu. Influence of the interplanetary driver type on the durations of the main and recovery phases of magnetic storms // Journal of Geophysical Research: Space Physics. DOI: 10.1002/2014JA019826.
15. Kappenman J.G. Geomagnetic storms and their impacts on the US power grid. / Metatech Corp. Tech. Rep, Meta-R-319. Goleta, CA, 2010.
16. Gaunt C.T., Coetzee G. (2007) Transformer failures in regions incorrectly considered to have low GIC-risk // IEEE PowerTech. Lausanne, 2007. P. 807–812.
17. Wik M. [et all.] Space weather events in July 1982 and October 2003 and the effects of geomagnetically induced currents on Swedish technical system // Ann. Geophys. 2009. Vol. 27. № 4. P. 1775–1787.

## REFERENCES

1. Metodicheskiye ukazaniya po ustoychivosti energosistem. Prikaz Minenergo, ot 30 iyunya 2003, №277 [Methodical principles of power system stability ensuring. Order no.277 from 30 June 2003, Minenergo]. Available: <http://so-ups.ru/fileadmin/files/laws/orders/pr277-300603me.pdf> (Accessed: 20.05.2016). (rus)
2. Mityugin A.A., Yakovlev V.I. Issledovaniye vysokovoltnykh elektromagnitnykh pomekh v elektricheskoy seti pri otklyuchenii toka korotkogo zamykaniya [Analysis of high voltage electromagnetic noise in electric networks while short circuit current shut-down]. St.Petersburg State Politechnical University Journal. St.Petersburg: SPbGPU Publ. 2012. № 1 (142). P. 70–79. (rus)
3. Tekhniko-ekonomicheskoye obosnovaniye: Sinkhronnoye obyedineniye YeES/OES i UCTE.

[Technical-economic justification: Synchronous integration of UPS of Russia and UCTE] Available: [http://so-ups.ru/fileadmin/files/company/international/ucte-ees/Obzor\\_osnovnykh\\_rabot\\_i\\_rezultatov\\_Proekta.pdf](http://so-ups.ru/fileadmin/files/company/international/ucte-ees/Obzor_osnovnykh_rabot_i_rezultatov_Proekta.pdf) (Accessed: 20.05.2016). (rus)

4. Mezhgosudarstvennyy standart GOST 721-77 «Sistemy elektrosnabzheniya, seti, istochniki i priyemniki elektricheskoy energii. Nominalnyye napryazheniya svyshe 1000 V» [GOST 721-77 «Power supply systems, networks, power sources and loads. Nominal voltage higher than 1000 V»]. Moscow: Gosstandart, 1977. (rus)

5. UCTE Operation Handbook final v. 2.5 E, 24.06.2004. Available: <http://www.ucte.org> (Accessed: 20.05.2016)

6. **STO 59012820.29.240.001-2010.** Tekhnicheskiye pravila organizatsii v YeES Rossii avtomaticheskogo ograniicheniya snizheniya chastoty pri avariynom defitsite aktivnoy moshchnosti (avtomaticheskaya chastotnaya razgruzka): standart organizatsii OAO «SO YeES » ot 31 dekabrya 2009 g. [Technical regulations for automatic frequency control organisation while active power deficit in UPS of Russia. Standard of SO UPS, 31 December 2009, STO 59012820.29.240.001-2010] Available: [http://so-ups.ru/fileadmin/files/laws/standards/STO\\_59012820.pdf](http://so-ups.ru/fileadmin/files/laws/standards/STO_59012820.pdf) (Accessed: 20.05.2016). (rus)

7. **STO 59012820.29.240.001-2011.** Avtomaticheskoye protivovariynoye upravleniye rezhimami energosistem. Protivovariynaya avtomatika energosistem. Usloviya organizatsii protsessa. Usloviya organizatsii obyektov. Normy i trebovaniya: standart organizatsii OAO «SO YeES » ot 19 aprelya 2011 g. [Automatic emergency control of power system states. Power system emergency control. Processes organization. Requirements and conditions. SO UPS standard, 19 April 2011, STO 59012820.29.240.001-2011] URL: [http://so-ups.ru/fileadmin/files/laws/standards/Emergency\\_control2011.pdf](http://so-ups.ru/fileadmin/files/laws/standards/Emergency_control2011.pdf) (Accessed: 20.05.2016). (rus)

8. Best protection practices for HV and EHV transmission systems of ENTSO-E CE area electrical grids. [Elektr. resurs] Available: [https://www.entsoe.eu/fileadmin/user\\_upload/\\_library/publications/entsoe/](https://www.entsoe.eu/fileadmin/user_upload/_library/publications/entsoe/)

RG\_SOC\_CE/120425\_RG\_CE\_TOP\_06.3\_D.2\_best\_protection\_practices\_report\_1\_.pdf (Accessed: 20.05.2016)

9. Documentation technique de référence. Réseau de transport d'électricité, France, version applicable du 1er février 2009 Available: [http://clients.rte-france.com/html/fr/mediatheque/telecharge/reftech/12-10-15\\_complet.pdf](http://clients.rte-france.com/html/fr/mediatheque/telecharge/reftech/12-10-15_complet.pdf) (Accessed: 20.05.2016)

10. **Cepin M.** Assessment of power system reliability: methods and applications. London: Springer, 2011.

11. ENTSO-E Subgroup "System protection and dynamics" Available: [https://docs.entsoe.eu/pt\\_BR/dataset/subgroup-system-protection-and-dynamics/resource/74071a94-b406-4f72-bd14-e75e8f143dbb](https://docs.entsoe.eu/pt_BR/dataset/subgroup-system-protection-and-dynamics/resource/74071a94-b406-4f72-bd14-e75e8f143dbb) (Accessed: 20.05.2016)

12. **STO56947007-29.180.01.116-2012].** Instruksiya po ekspluatatsii transformatorov [Tekst]: standart organizatsii OAO «FSK YeES » ot 2 marta 2012 g. STO56947007-29.180.01.116-2012 [Power transformer maintenance requirements, FGC UES Standard, 2 March 2012. Available: <http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO-56947007-29.180.01.116-2012.pdf> (Accessed: 20.05.2016) (rus)

13. **Bothmer V., Daglis I.** Space Weather Physics and Effects. Springer, 2007.

14. **Yermolaev Yu. I., Lodkina I. G., Nikolaeva N.S. Yermolaev M.Yu.** Influence of the interplanetary driver type on the durations of the main and recovery phases of magnetic storms. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. DOI: 10.1002/2014JA019826. (rus)

15. **Kappenman J.G.** Geomagnetic storms and their impacts on the US power grid. / Metatech Corp. (Tech. Rep, Meta-R-319). Goleta, CA, 2010.

16. **Gaunt C.T., Coetzee G.** (2007) Transformer failures in regions incorrectly considered to have low GIC-risk. *IEEE PowerTech*. Lausanne 2007. P. 807–812.

17. Wik et al (2009) Space weather events in July 1982 and October 2003 and the effects of geomagnetically induced currents on Swedish technical system. *Ann. Geophys.* 2009. Vol. 27. № 4. P. 1775–1787.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

**СОКОЛОВА Ольга Николаевна** — аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

E-mail: sokolova.olga87@gmail.com

**SOKOLOVA Olga N.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

E-mail: sokolova.olga87@gmail.com



DOI 10.5862/JEST.243.11

УДК 669.017:669.017.3:620.18:621.78

*Г.П. Анастасиади, С.Ю. Кондратьев, М.В. Сильников*

## **РОЛЬ ТЕРМОКИНЕТИЧЕСКИХ ДИАГРАММ РАСПАДА ПЕРЕОХЛАЖДЕННОГО АУСТЕНИТА ПРИ РАЗРАБОТКЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ**

*G.P. Anastasiadi, S.Yu. Kondratyev, M.V. Sil'nikov*

### **THE ROLE OF THERMO-KINETIC DIAGRAMS OF THE DECOMPOSITION OF OVERCOOLED AUSTENITE FOR THE DESIGN OF STRUCTURAL STEELS**

Показано значение диаграмм термокинетического превращения переохлажденного аустенита для разработки конструкционных сталей и технологических режимов термической обработки стальных деталей. Отмечен существенный вклад работников отраслевых научно-исследовательских организаций и машиностроительных предприятий Северо-Западного региона в исследование термокинетических диаграмм при разработке и освоении промышленной технологии производства высокопрочных и функциональных сталей, которые продемонстрировали необходимость тщательных исследований превращений переохлажденного аустенита. Показано, что вклад Северо-Западного региона России в исследование, разработку, производство и эксплуатацию новых металлических материалов – специальных сталей – весьма существенный, поскольку этот регион исторически был и остается ведущим исследовательским центром, сосредоточившим производство, научные исследования и подготовку научных кадров в области металлургии. Исследования и обобщения в области изучения термокинетических диаграмм сплавов железа с момента их публикации являются актуальными данными для научных работников, занимающихся созданием новых сталей и технологий их промышленного производства; они помогают специалистам, работающим на производстве, в их деятельности по обеспечению качества готовой продукции, а также чрезвычайно полезны для аспирантов и студентов металлургических специальностей, желающих приобрести квалификацию для работы в базовой отрасли экономики любой страны.

СТАЛИ И СПЛАВЫ; ДИАГРАММЫ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО И ТЕРМОКИНЕТИЧЕСКОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ ПЕРЕОХЛАЖДЕННОГО АУСТЕНИТА; ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА; МИКРОСТРУКТУРА; ФАЗОВЫЙ СОСТАВ; МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА.

The role and the relevance of creating diagrams of isothermal and thermo-kinetic transformation of supercooled austenite during the design of technological regimes of steel heat treatment have been investigated. It is shown that the studies of institutes and industrial enterprises of the Northwestern region of the country are of great importance for metallurgy. We have proved the need for a thorough examination of the transformation of supercooled austenite, and also systematized and generalized experimental data on the diagrams almost for all groups of steels and titanium alloys. Specific examples of the necessity of thermo-kinetic steel transformation diagrams for critical production tasks are given.

STEELS AND ALLOYS; DIAGRAMS OF ISOTHERMAL AND THERMO-KINETIC TRANSFORMATION OF OVERCOOLED AUSTENITE; HEAT TREATMENT; MICROSTRUCTURE; PHASE COMPOSITION; MECHANICAL PROPERTIES.



Более 50 лет назад В.Д. Садовский и А.А. Попов сформулировали тезис о роли и месте диаграмм изотермического (и термокинетического) превращения переохлажденного аустенита при разработке технологических режимов термической обработки стали: «Диаграммы кинетики изотермического распада переохлажденного аустенита являются в настоящее время такой же важной и необходимой характеристикой стали как химический состав, данные о положении критических точек, чувствительность к перегреву, прокаливаемость и т.д. Технологическое значение кинетических диаграмм чрезвычайно разнообразно. Они не только дают общее представление о поведении той или иной стали при охлаждении из аустенитного состояния, о возможных в данной стали типах превращения аустенита, но и непосредственно используются при разработке широкой номенклатуры режимов термической обработки» [1].

Принято считать, что исследованиям распада переохлажденного аустенита дала старт публикация: Davenport E.S., Bain E.C. Transformation of Austenite at Constant Subcritical Temperature // Trans. AIME. 1930. Vol. 90. P. 117–154 [2] (рис. 1).

Н.В. Paxton [3] в комментариях к перепечатке публикации Davenport E.S., Bain E.C. отмечает, что изучение фазовых превращений в стали началось с доклада Д.К. Чернова в июле 1868 года в Императорском русском техническом обществе [4], который был опубликован в Великобритании в 1880 году [5]. Дополнительно Н.В. Paxton отмечает особенности восприятия технических достижений в научной среде: «It is always difficult in a review such as to decide when “history begins!”. Since an arbitrary choice is unavoidable, we shall select the paper of Tchernoff, read before the Imperial Russian Technical Society in 1868, and published in English in 1880, in which he showed that steel cannot be hardened unless it is heated above a temperature  $a$  <точка  $b$  Чернова>.» («Всегда трудно в таких обзорах, как этот, решить, когда «история начиналась». Произвольный выбор неизбежен, мы выберем доклад Чернова, прочитанный перед Императорским русским техническим обществом в 1868 году и опубликованный в Англии в 1880 году, в котором он показал, что сталь не может быть упрочнена без нагрева выше точки  $b$  Чернова»).

Кроме того, изучение работ Д.К. Чернова показывает, что фактически ему было понятно, что превращения в стали при закалке можно контролировать по температуре охлаждающей среды. В статье «О приготовлении стальных броневых снарядов» (Сообщение в Императорском русском техническом обществе, 10 мая 1885 г.) [6] Д.К. Чернов проводит анализ влияния изотермической закалки стали, содержащей 0,80 % С, 0,20 % Si, 0,40 % Mn, в нагретом до 150–300 °С масле. Это вызывает искреннее удивление, поскольку температура начала мартенситного превращения этой стали ( $M_s$ ), равная  $M_s = 210–250$  °С, очевидно, была еще неизвестна в 1885 году. Одновременно автором проводились измерения длины образцов (с точностью, судя по приведенным значениям, 0,0005 дюйма, или 0,013 мм) для оценки изменения объема. Это было, по-

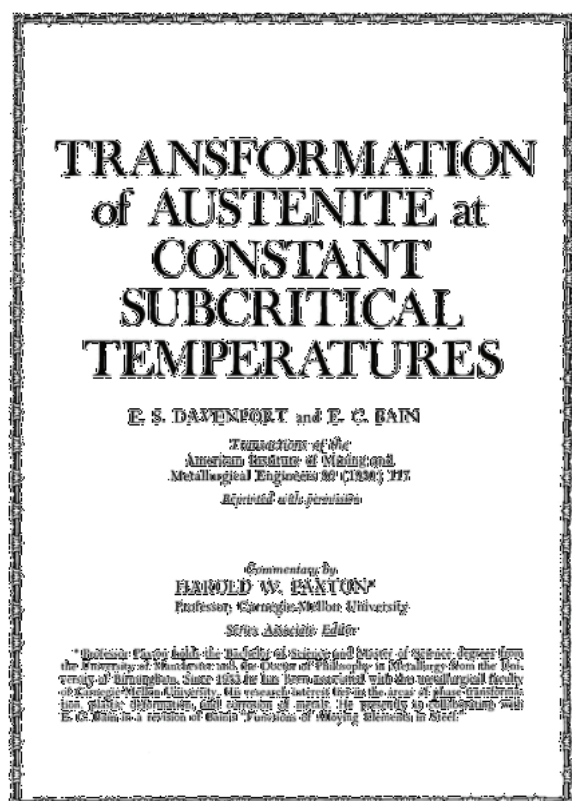


Рис. 1. Первая страница публикации Davenport E.S., Bain E.C. [2] (приведена в журнале Metallurgical Transactions. 1970. Vol. 1, Iss. 12. P. 3479)

видимому, первое применение изотермической закалки стали; по-существу, Davenport E.S. и Bain E.C. провели в 1920-х годах такие же исследования с применением нового оборудования, в том числе дилатометров и рентгеновского анализа.

Основную часть своих исследований Д.К. Чернов провел на Обуховском заводе, построенном на самом современном по тому времени уровне, включая мартеновскую выплавку стали, и введенном в действие в 1863 году, где специально для его исследований была создана испытательная и исследовательская база. Одновременно в Северо-Западном регионе России в это время функционировали еще два предприятия, производившие высококачественную металлопродукцию — Ижорский и Путиловский заводы.

В начале XX века в России были организованы два научно-исследовательских центра в области металлургии: в 1912 году в Санкт-Петербурге основан исследовательский центр с современным названием «Центральный научно-исследовательский институт материалов», а в 1938 году основан еще один исследовательский центр с современным названием «ЦНИИ конструкционных материалов «Прометей» имени И.В. Горынина» [7].

Подготовку научных кадров и специалистов по металлургии вели известные в стране высшие учебные заведения Санкт-Петербурга: Политехнический институт, Горный институт, Технологический институт.

Особенностью предыдущего этапа развития исследований металлургии в области высококачественных сталей было наличие в Северо-Западном регионе головных отраслевых научно-исследовательских институтов и производственных предприятий по видам техники. Они оснащались при любых сложных ситуациях в экономике современным исследовательским оборудованием, соответствовавшим требованиям мирового уровня. Это и обеспечивало сохранение в стране мирового уровня научных исследований в металлургии.

В настоящее время в Северо-Западном регионе функционируют несколько современных центров разработки и промышленного производства высококачественных сталей ответствен-

ного назначения; они выполняют исследования, разработку и сопровождение контроля качества, а также эксплуатации новых и применяемых в различных отраслях сталей. Важное место в этой деятельности занимает анализ кинетики фазовых превращений и обусловленных ими механических свойств, а также работоспособности деталей в различных эксплуатационных условиях.

В связи с разработкой и освоением приборов нового поколения для исследования фазовых превращений и структуры (дилатометры, рентгеноспектральные микроанализаторы, электронные микроскопы и др.), а также применением современной компьютерной техники для проектирования и автоматического управления процессами проведения научно-исследовательских работ значение изучения термокинетических диаграмм существенно повышается. Сложность назначения правильных режимов термической обработки в производстве стальных заготовок тяжело нагруженных деталей изделий, работающих в условиях разнообразных режимов внешнего воздействия (растяжение—сжатие, ударный изгиб, изменение рабочей температуры и др.), обусловлена многообразием и неявными механизмами действия различных по физико-химической природе факторов, определяющих конечную структуру деталей. К ним относятся:

- 1) химический состав стали, включая легирующие элементы и контролируемые в процессе производства вредные примеси (в основном, фосфор и сера);
- 2) неконтролируемые при производстве примеси (без специальных указаний в технических условиях) — кислород, водород, азот, металлические элементы, не входящие в технические требования к химическому составу стали;
- 3) химический состав аустенита, температура и способ нагрева заготовки;
- 4) термомеханическая «история» производства заготовки, которая определяет физико-химические характеристики аустенита перед окончательной термической обработкой, включающей различные сочетания режимов нагрева и охлаждения.

Большое число действующих факторов, как контролируемых в процессе производства, так и не подвергающихся контролю, приводит к веро-

ятностному характеру показателей структуры стали, образующейся в процессе превращения переохлажденного аустенита. Действующими факторами, влияющими на структуру, механические свойства и работоспособность стальных деталей, являются параметры, относящиеся к различным показателям технологии производства и контроля качества металлургической продукции: 1) величина зерна и температура нагрева; 2) горячая пластическая обработка; 3) напряжения и деформации; 4) способ нагрева; 5) места вырезки образцов по сечению слитка; 6) предварительная гомогенизация стали после отливки заготовок и обработки давлением для получения более равновесной структуры.

Оценка влияния этих факторов на качество заготовок является необходимой, а в ряде случаев — обязательной составляющей технологии производства ответственных крупногабаритных стальных деталей. Актуальность таких исследований значительно возрастает вследствие повышения технических требований к деталям машин и оборудования по уровню рабочих температур, величине механической нагрузки, длительности рабочих циклов и др. В связи с большими возможностями нового поколения исследовательского оборудования, позволяющего изучать с высоким разрешением и точностью процессы фазовых превращений, повышается также их техническая результативность на разных стадиях технологии производства. Недостаточное внимание к применению современных методов исследования для контроля качества и мониторинга эксплуатации стальных изделий, служащих основой большинства машин и механизмов ответственного назначения, недопустима, ибо анализ современных исследований по применению металлических материалов для эксплуатации в расширяющемся интервале условий работы показал: усложняющийся вид механической нагрузки; разнообразие агрессивных рабочих сред; повышение ущерба от чрезвычайных ситуаций в связи с возможным непрогнозируемым разрушением оборудования; необходимость контроля и мониторинга процесса эксплуатации и др.

Перед назначением конструкционного материала для изготовления конкретного изделия из стали предварительно должно быть проведе-

но изучение влияния на формирование структуры (а следовательно, на различные свойства материала) основных действующих факторов: величины зерна и температура нагрева; горячей пластической обработки; напряжений и деформаций; способа нагрева; мест вырезки образцов по сечению слитка; предварительной гомогенизации стали после отливки заготовок и обработки давлением для получения более равновесной структуры перед термической обработкой.

Этот анализ необходимо проводить комплексно с учетом всех перечисленных факторов. В научной литературе, как правило, рассматривается только их часть в соответствии с целью исследования. Так, например, в монографии С.С. Дьяченко [8] исследовано влияние на характеристики образующегося при нагреве аустенита применительно к термической обработке стали 20 (0,20 масс.% C;  $A_{c1} = 735^\circ\text{C}$ ,  $A_{c3} = 850^\circ\text{C}$ ) таких основных параметров структуры стали, как концентрация и состояние дефектов ферритно-перлитной смеси, степени предшествующей термообработке деформации; формы перлита; термической истории (закалка, закалка и отпуск, холодная деформация различной степени). Показано, что при скорости нагрева 40 К/с, температуре нагрева  $750^\circ\text{C}$  и времени выдержки 24 мин количество образующегося аустенита достигает наибольшего значения, и в случае исходной структуры зернистый перлит составляет ~ 24 об.%, а для стали со степенью холодной деформации прокаткой 50 % — около 50 об.% аустенита, т.е. увеличивается примерно в 2 раза. Время выдержки до начала образования аустенита составляет соответственно 12 минут для зернистого перлита и 1 мин для стали, деформированной прокаткой на 50 %. Таким образом, в [8] установлено существенное влияние исходной структуры стали на кинетику образования аустенита при нагреве под закалку.

В работе [9] исследовали фазовые превращения при закалке тонколистовой стали 0,4C-1,0Cr-1,0Ni-1,5Si-0,5Mo (масс.%) с построением термокинетических диаграмм превращения переохлажденного аустенита dilatометрическим методом. Установлено, что при одинаковой температуре нагрева  $880^\circ\text{C}$  параметры диаграмм для стали разных плавок значительно различа-

ются (кроме температуры начала мартенситного превращения  $M_n = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ):

1) время начала превращения по I-ступени составляет 400–900 с при одинаковой температуре начала превращения  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

2) время начала превращения по II-ступени составляет 150–400 с при температурах начала превращения 400–520  $^{\circ}\text{C}$ .

Данные работ [8–11] свидетельствуют о большом разбросе базовых показателей времени и температуры, определяющих процесс распада переохлажденного аустенита и, как следствие, характер формирующейся структуры стали и сплавов при закалке.

В настоящее время анализ термомеханической «истории» процесса металлургического производства стальной заготовки перед проведением окончательной термической обработки с контролируемыми режимами образования аустенита при нагреве и его распада при отпуске является обязательным этапом разработки технологии. При этом технология окончательной термообработки должна обеспечивать выполнение повышающихся технических требований к комплексу взаимно связанных механических свойств, которые характеризуются показателями прочности и пластичности, а также к работоспособности стальных деталей в составе машин, механизмов и конструкций ответственного назначения.

Следует отметить, что за рубежом при назначении режимов термической обработки деталей исследование структуры стали после термокинетического распада аустенита и последующего отпуска также является обязательным. При этом анализируются все основные технологические операции и их параметры, которые могут влиять на процесс формирования окончательной структуры материала [12–22], а именно:

термомеханическая «история» — Thermomechanical History (указываются основные параметры технологии производства заготовки — фактический химический состав стали в заготовке, ее размеры, режимы нагрева и охлаждения, степени деформации);

условия аустенитизации структуры, закалки и отпуска — Austenitising Conditions (режимы на-

грева и охлаждения, размер зерна аустенита при первой и повторной закалке, режимы проведения первого и последующего отпуска).

В [13] авторы отмечают, что ключом к успешному прогнозированию результатов термообработки служат информация о зависимости характеристик материала от предварительной структуры и температурного режима нагрева и непрерывного охлаждения, а также наличие широкой базы накопленных данных по превращениям переохлажденного аустенита. В этой работе подробно изучено влияние деформации при  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$  со степенями обжатия 0,30 и 60 % на термокинетические диаграммы низколегированных сталей, содержащих C, масс. %: 0,30–0,50; 1,0–1,4; 0,13; а также стали 0,32C-1,5Cr-1,5Ni-0,13Mo. Установлено, что в интервале скоростей охлаждения 0,04–1,00 К/с деформация подавляет ферритно-перлитное превращение и переводит сталь в режим закалки с образованием бейнитно-мартенситной структуры.

В работе [14] исследовали влияние деформации 35 % со скоростью  $1\text{ с}^{-1}$  на параметры превращения переохлажденного аустенита в стали 51ХГФ. Превращение исследовали на dilatометре при скорости охлаждения 0,04–38 К/с. Показано, что для деформации величиной 35 % время начала распада переохлажденного аустенита по I-й ступени уменьшается со 100 с до 30 с, а для бейнитного распада практически не изменяется по сравнению с недеформированным состоянием. После охлаждения со скоростями меньше 1 и больше 5 К/с твердость стали с исходной и предварительно деформированной структурами одинакова и составляет соответственно  $300\text{ HV}_{30}$  и  $650\text{ HV}_{30}$ , однако в узком интервале скоростей охлаждения 1–5 К/с твердость предварительно деформированного образца значительно ниже: различие в твердости составляет 100–200  $\text{HV}_{30}$ , что определяется соотношением структурных составляющих. Таким образом, в массивных стальных заготовках всегда есть промежуточная зона металла, в которой после закалки твердость изменяется от наибольшей (характерной для поверхности) до наименьшей (соответствующей основному объему металла). Структурно эта зона находится между верхним бейнитом и мартенситом. В таких случаях по-



строение термокинетической диаграммы является необходимым, поскольку именно совместные оценка количества структурных составляющих, тепловой расчет охлаждения при закалке и экспериментальные исследования состояния заготовки позволяют проектировать режим закалки стали определенного состава для конкретной детали.

В исследовании [15] для описания термокинетических диаграмм распада переохлажденного аустенита применена нейронная статистическая нелинейная модель, заимствованная из биологии. Для создания модели термокинетического распада переохлажденного аустенита использованы около 400 диаграмм низколегированных сталей с общим содержанием легирующих элементов не более 5 масс.% в интервалах концентраций: 0,08–0,77 C; 0,13–2,04 Mn; 0,12–1,90 Si; 0–2,08 Cr; 0–3,65 Ni; 0–1,24 Mo; 0–0,36 V; 0–0,30 Cu; 0–0,07 Al; температура аустенитизации составляла 850–1350 °C. Уравнения регрессии составлены для доли структурных составляющих и твердости сталей. Этот метод, по-видимому, эффективен для применения в образовательных программах, поскольку за его пределами остаются важные параметры технологии, относящиеся к термомеханической «истории» производства стальных заготовок, такие, как масса, метод производства исходного слитка, процессы непрерывной трансформации структуры при последовательных нагревах и формообразующей деформации, металлографическое описание и контроль структуры в производстве и др.

Современная методика разработки технологии термообработки крупных заготовок из легированных сталей включает обязательное построение термокинетической диаграммы для конкретной заготовки с использованием вырезанных из нее образцов-свидетелей для дилатометрического исследования. Такие образцы отражают термомеханическую «историю» конкретной заготовки и индивидуальные особенности формирования в ней структуры на последовательных этапах — от начала разливки до окончательной термической обработки — для получения свойств, заявленных в технических требованиях.

Влияние действующих факторов, обусловленных технологией производства стальных за-

готовок, на структуру продуктов распада переохлажденного аустенита разнообразно. В частности, показано, что для заготовок с одной термомеханической «историей» данные о влиянии температуры нагрева и размера зерна аустенита, полученные разными исследователями, аналогичны [23–28]. Это обусловлено увеличением размера зерна с ростом температуры аустенитизации и повышением стабильности переохлажденного аустенита при изотермическом превращении по 1-й ступени и снижением его стабильности по 2-й ступени, по крайней мере в среднеуглеродистых низколегированных сталях. Положение кривых начала и окончания изотермического превращения существенно зависит от места изготовления образцов в крупных слитках массой 1200 и 4500 кг [25]. Время начала превращения для среднеуглеродистой низколегированной стали в различных зонах слитка может изменяться по 1-й ступени в 3–20 раз, а по 2-й ступени — в 3–5 раза, что вызывает существенные различия в соотношении структурных составляющих — феррита, перлита, бейнита и мартенсита. Следствием перечисленных факторов является значительный разброс результирующего показателя термической обработки — комплекса механических свойств стали. Особенно это относится к крупным заготовкам деталей, в которых исключить или уменьшить этот разброс можно только при индивидуальном подходе к определению режима их термической обработки с построением термокинетической диаграммы для каждой заготовки.

Данные, приведенные в справочниках и в нормативно-технических документах производственного и отраслевого характера, отражающие накопленный опыт исследователей и практиков, оказывают большую помощь металлургам и технологам при разработке режимов термической обработки деталей с целью получить заданный уровень механических свойств. Они позволяют прогнозировать химический состав опытных плавок с заданным уровнем механических свойств, в том числе многокомпонентных сложнолегированных специальных сталей — высокопрочных, жаропрочных, инструментальных и др. При этом можно учитывать и возможность имеющегося на предприятии термического оборудо-





дования, габариты заготовок, предыдущую технологическую «историю» и др. Анализ диаграмм превращения переохлажденного аустенита позволяет понять и причины возможного брака изделий, возникающего при термической обработке; открывает возможность корректировки технологии для повышения качества изделий, снижения трудоемкости производства.

Методика проведения подготовительной исследовательской работы при разработке режимов термической обработки изделия должна учитывать влияние на распад переохлажденного аустенита всех основных этапов производства, влияющих на конечную структуру заготовки после термической обработки:

кристаллизацию слитка после разливки, определяемую его массой и способом производства (применение изложниц, непрерывной разливки и т.д.), которые параметрически задают размер дендритной структуры и первичного аустенитного зерна;

последующие нагревы и охлаждения в процессе обработки давлением, которые обычно проводятся до температуры выше температуры превращения  $\alpha \rightarrow \gamma$  и сопровождаются дроблением первичной дендритной структуры и формированием нового зерна аустенита, зависящего от режима термомеханической обработки;

условия образования и распределения зерна аустенита и продуктов его распада по сечению слитка при нагреве и охлаждении, определяющие степень неоднородности структуры.

Основная проблема при термомеханической обработке стальных слитков — техническая невозможность надежно оценить влияние исходной неоднородности материала на параметры термокинетической диаграммы распада переохлажденного аустенита при окончательной термообработке в связи с нестационарным ре-

жимом нагрева—охлаждения и неоднородным полем деформаций в объеме слитка при термомеханической обработке. Термокинетические диаграммы близких по химическому составу сталей могут существенно различаться (в пределах порядка величины) по основным показателям — времени начала превращения переохлажденного аустенита по первой и второй ступеням, определяющим переход процесса распада от перлитного к бейнитному и далее к мартенситному превращению с кардинальными изменениями механических свойств и работоспособности стали. Вероятными причинами разброса времени начала превращения в слитке стали являются трудно контролируемая термомеханическая «история» формирования структуры слитка в конкретном объеме на разных стадиях металлургического производства и связь с местом вырезки образцов, особенно в массивных заготовках. В настоящее время не представляется возможным производить назначение режима закалки и отпуска заготовок ряда ответственных деталей при их окончательной термической обработке, используя термокинетическую диаграмму, построенную по образцам, изготовленным из пробных брусков или той же партии заготовок. Необходимо получать диаграмму из материала каждой заготовки с определенным дублированием данных.

При разработке режимов термической обработки конкретных деталей необходимо учитывать вероятностный характер процессов трансформации исходной литой структуры слитка в сложных термодинамических условиях термомеханической «истории». Эти трансформации вызываются тепловыми и деформационными процессами, которые, с одной стороны, стабилизируют химическую микрон неоднородность легированной стали в крупных исходных заго-

Таблица 1

Фактический химический состав стали 40XCHM исследованных плавок

Номер плавки	Содержание химических элементов, масс. %									$T, ^\circ\text{C}$	
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	$A_{c1}$	$A_{c3}$
1	0,43	1,40	0,51	0,010	0,003	1,32	1,30	0,36	0,16	765	815
2	0,41	1,36	0,43	0,010	0,004	1,11	1,05	0,42	0,20		

Таблица 2

**Параметры кинетики превращения переохлажденного аустенита в стали 40ХСНМ, определенные по дилатометрическим кривым**

Скорость охлаждения, К/с	Температура распада по 1-й ступени, °С		Температура распада по 2-й ступени, °С		Время начала распада, с	
	Начало	Окончание	Начало	Окончание	1-я ступень	2-я ступень
0,05	720–730	650	450	330	3000	8500
0,1	706–715	620–630	—	—	1800	4000
0,2	688–715	626–629	427–456	320–329	900	2000
0,3	—	—	368–451	279–310	600–800	1500
0,5	—	—	357–450	300–310	400–500	800
1,0	—	—	357–445	293–310	—	400
2,0	—	—	397	279	—	250 (min)
3,0	—	—	—	—	—	150 (min)

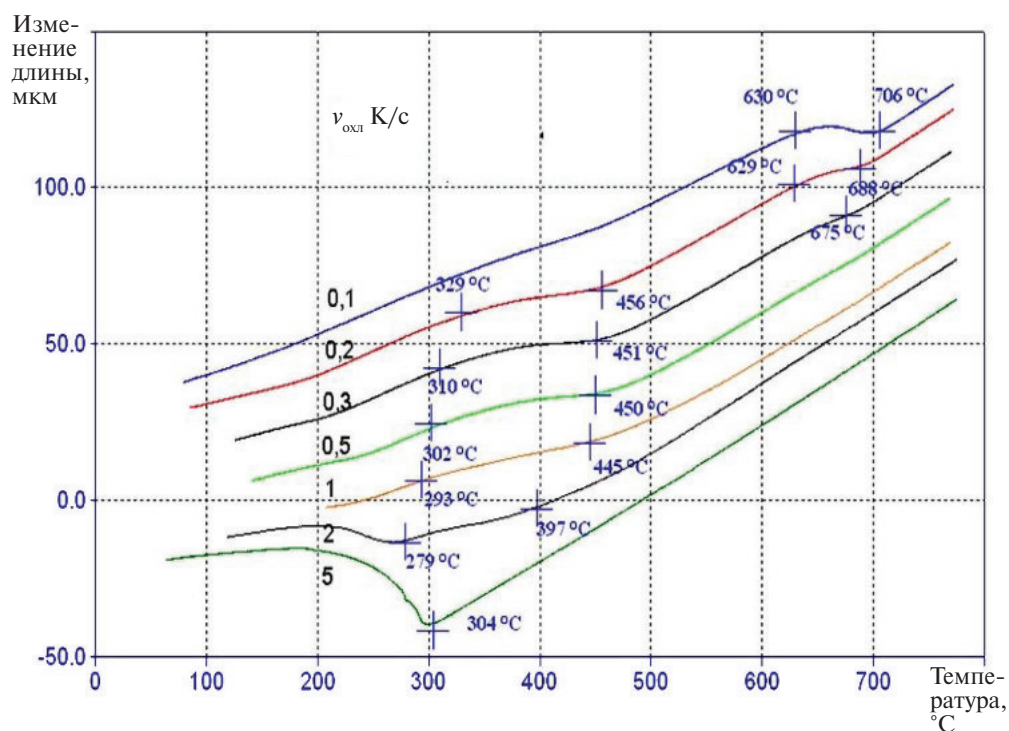


Рис. 2. Изменение длины стали 40ХСНМ (образец 1 плавки 2) при дилатометрическом исследовании. Охлаждение образца со скоростью 0,1–5 К/с

товках, с другой, — на уровне аустенитного зерна формируют продукты распада переохлажденного аустенита в соответствии с его исходным неоднородным составом.

Современный подход к разработке технологии термической обработки стали предполагает применение нового исследовательского оборудования, оснащенного вычислительными ком-

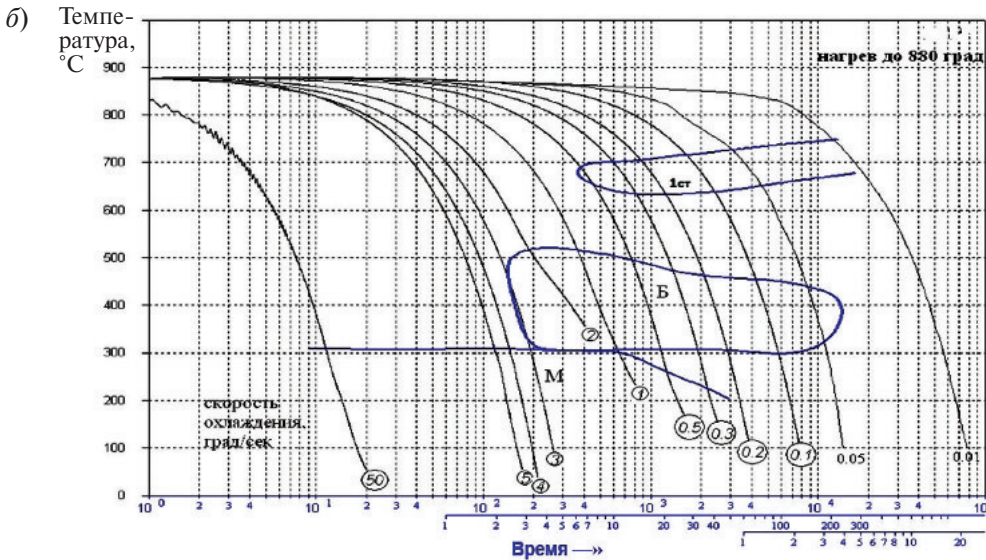


Рис. 3. Термокинетическая диаграмма распада переохлажденного аустенита стали 40XCHM: *a* – плавки 1; *б* – плавка 2

плексами для высокопроизводительного планирования и обработки результатов количественной оценки структуры стали, образовавшейся в процессе термомеханической «истории». Особенно это относится к разработке индивидуальной технологии термической обработки конкретной заготовки детали в тех случаях, когда экономические ограничения позволяют часть производ-

ственных расходов перенести на научные исследования, в частности при индивидуальном производстве ответственных деталей машин, предназначенных для длительной работы в тяжелых условиях.

Ниже как пример приведены результаты исследования, выполненного при разработке технологии производства стали 40ХСНМ и режимов



ее термической обработки, обеспечивающих получение высокого предела прочности ( $\geq 1800$  МПа). Химический состав стали приведен в табл. 1.

Термомеханическая «история» производства заготовок включала: выплавку в электродуговой сталеплавильной печи объемом 100 т; непрерывную разливку на слэбы размером  $200 \times 1200$  мм; прокатку на лист толщиной 6 мм. Термокинетическую диаграмму строили с использованием высокоскоростного закалочного-деформационного дилатометра DIL 805: точность измерения температуры  $\pm 0,05$  К; чувствительность при измерении размеров —  $0,05$  мкм; точность измерения времени и скорости охлаждения —  $\pm 5\%$ ; размер образцов — диаметр 4 мм, длина 10 мм.

Основной метод построения термокинетических диаграмм распада переохлажденного аустенита сводится к установлению зависимости размера образца от режима нагрева или охлаждения и ее анализу. Пример общего массива таких данных приведен на рис. 2, 3 и в табл. 2.

Даже в небольших по размерам образцах стали диаметром 4–6 мм, в которых скорость охлаждения в разных микрообъемах должна различаться незначительно, структура продуктов распада неоднородная. Причиной этого различия могут быть химическая неоднородность в объеме «бывших» первичных дендритов, которая, как показано выше, сохраняется при технологической обработке ниже  $1300^\circ\text{C}$ , а также вероятностная кинетика распада переохлажденного аустенита

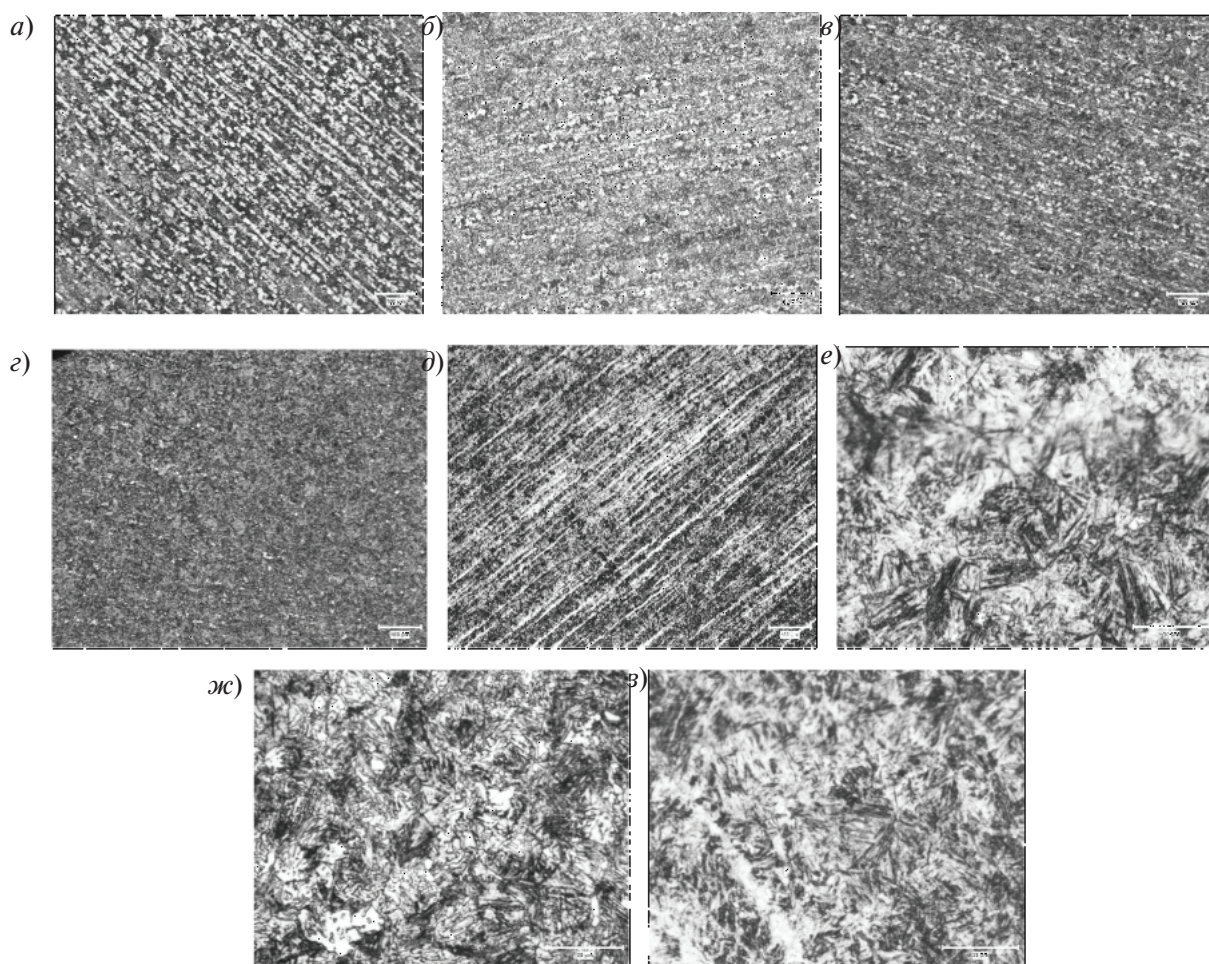


Рис. 4. Структура продуктов распада переохлажденного аустенита при непрерывном охлаждении стали 40XCHM с разной скоростью, К/с: а — 0,1; б — 0,2; в, г — 0,3; д, е — 1,0; ж, з — 1,5 (а–в, д, ж, з — плавка 2; г, е — плавка 1; а–д, ж —  $\times 100$ ; е, з —  $\times 1000$ )



в отдельных объемах. В процессе образования продуктов распада в локальном микрообъеме выделяется теплота фазового перехода  $\gamma \rightarrow \alpha$ , оценочно равная  $L = 900$  Дж/моль при теплоемкости железа  $c_p = 25$  Дж/моль·К, что определяет локальное выделение теплоты, соответствующее  $L/c = 36$  °С, и некоторый (трудно оцениваемый) сдвиг (задержка) по времени превращения в соседних микрообъемах. Оба этих фактора – химическая неоднородность аустенита в микрообъемах «бывших» дендритов и выделение теплоты при перестройке кристаллической решетки – по-видимому, определяют избирательность (по месту и времени) процесса превращения переохлажденного при закалке аустенита с

образованием различающейся в микрообъемах структуры (рис. 4). Однако очевидно, что расположение образующихся фаз (феррит + перлит или бейнит) наследует направление деформации аустенита при горячей прокатке с большой вытяжкой для прокатки сляба толщиной 200 мм на лист 6 мм (рис. 4, *a–z*) при скорости охлаждения 0,1–0,3 К/с. Даже превращения по бейнитному и мартенситному механизмам связаны с направлением деформации аустенита при горячей прокатке (рис. 4, *д–з*).

Процесс превращения особенно наглядно представляется при непрерывном охлаждении аустенита. Сравнительно низкая – 0,1–0,3 К/с скорость охлаждения (рис. *a–z*) приводит к об-

Таблица 3

Соотношение количества структурных составляющих, об.%, в стали 40ХСНМ плавки 1 после распада переохлажденного аустенита при разных скоростях охлаждения

Скорость охлаждения, °С/с	Количество структурных составляющих, об.%			
	Феррит + перлит + карбиды	Верхний бейнит	Нижний бейнит	Мартенсит
0,05	100	0	0	0
0,1	85	15	0	0
0,2	25	35	40	0
0,3	0	10	75	15
0,5	0	0	30	70
1	0	0	0	100
2	0	0	0	100

Таблица 4

Соотношение количества структурных составляющих (об.%) в стали 40ХСНМ плавки 2 после распада переохлажденного аустенита при разных скоростях охлаждения

Скорость охлаждения, °С/с	Количество структурных составляющих, об.%			
	Феррит + перлит + карбиды	Верхний бейнит	Нижний бейнит	Мартенсит
0,01	100	0	0	0
0,05	100	0	0	0
0,1	90	10	0	0
0,2	40	60	0	0
0,3	25	60	10	5
0,5	0	55	30	15
1	0	40	40	20
2	0	10	40	50
5	0	0	0	100



разованию строчечного феррита, который на-  
следует ориентацию аустенита предыдущей де-  
формации в направлении прокатки. В данном  
случае вытяжка заготовки в направлении про-  
катки и уменьшение ее размера по толщине —  
примерно 30-кратные. Увеличение скорости  
охлаждения в интервале 0,1–0,3 К/с подавляет  
выделение феррита, перлита и верхнего бейнита  
(табл. 3, 4), при этом увеличивается количество  
нижнего бейнита и образуется мартенсит  
(~ 15 об.%).

Структура продуктов распада переохлажден-  
ного аустенита, даже в сравнительно тонких ли-  
стовых заготовках толщиной 6 мм, — смешанная,  
содержащая 3–6 структурных составляющих.  
При скорости охлаждения 1–5 К/с в плавке 1  
стали 40ХСНМ образуется 100 об.% мартенсит;  
в плавке 2 при скорости охлаждения 1–2 К/с  
формируется бейнитно-мартенситная структура  
и при 5 К/с — 100 об.% мартенсита. Эксперимен-  
тальные результаты показывают, что стальные  
заготовки близкого состава, но разных плавок  
имеют после закалки в листах толщиной 6 мм  
существенно различающиеся структуры.

Таким образом, проведенные сравнительные  
дилатометрические и металлографические ис-  
следования двух сталей близкого состава, соот-  
ветствующего марке 40ХСНМ, с термомехани-  
ческой «историей», включающей выплавку в  
электропечи, внепечную обработку, непрерыв-  
ную разливку в слябы и горячую деформацию на  
тонкий (6 мм) лист, показали, что структура ста-  
ли после термокинетического распада переох-  
лажденного аустенита является в основном  
многофазной и неоднородной как в листовом  
прокате разных плавок, так и в образцах одного  
слитка. Это свидетельствует о вероятностном  
характере процессов трансформации исходной  
литой структуры слитка в сложных термодина-  
мических условиях термомеханической «исто-  
рии», сопровождаемые тепловыми и деформа-  
ционными процессами, которые, с одной  
стороны, стабилизируют химическую микро-  
неоднородность легированной стали в крупных  
исходных заготовках, с другой, — на уровне ау-  
стенитного зерна формируют продукты распада  
переохлажденного аустенита в соответствии с его  
исходным неоднородным составом.

Исследования и обобщения в области термо-  
кинетических диаграмм сплавов железа с момен-  
та их публикации служат актуальными данными  
для научных работников, занимающихся созда-  
нием новых сталей и технологий их промышлен-  
ного производства. Они помогают и специали-  
стам, работающим на производстве, в их  
деятельности по обеспечению качества готовой  
продукции. Они также чрезвычайно полезны для  
аспирантов и студентов металлургических спе-  
циальностей, желающих приобрести квалифи-  
кацию для работы в базовой отрасли экономики  
любой страны. Эти исследования остаются ак-  
туальными, несмотря на удвоение мирового про-  
изводства стали за последние 20 лет и прогресс  
в области создания нового исследовательского  
оборудования для металлургии, а может быть,  
именно благодаря этому, поскольку рост произ-  
водства всегда сопровождается расширением  
научных задач обеспечения качества продукции.

Увеличение в современной технике и науке  
количества исследований термокинетических  
диаграмм сталей и повышения их эффективно-  
сти закономерно и определяется тремя основ-  
ными факторами:

существенным прогрессом в области созда-  
ния новых приборов для дилатометрических  
исследований фазовых превращений в сталях,  
повышением их точности и оснащением ком-  
пьютерными средствами для планирования и  
автоматизации проведения экспериментов, что  
обеспечивает значительное повышение произ-  
водительности и эффективности научных ис-  
следований;

возможностью дополнительного исследова-  
ния фазовых превращений методами рентгено-  
структурного микроанализа и количественной  
электронной микроскопии, что позволяет под-  
тверждать объективными экспериментальными  
данными обеспеченность предусмотренных тре-  
бований к изделию (например, количественное  
соотношение фаз в структуре стали и их соста-  
ва);

наличием программных средств и экспери-  
ментального оборудования для термического  
анализа закалки заготовок различной формы.

Применение одновременно трех видов ис-  
следований для разработки режимов термиче-

ской обработки позволяет проектировать технологию изготовления уникальных деталей индивидуального производства на основе многофункционального предварительного анализа и плановых натурных экспериментов. Это развивалось непрерывно на протяжении последних 60 лет и получило дополнительный импульс в XXI веке за счет прогресса в исследовании структуры вещества на микро- и наноразмерном уровнях.

Вклад Северо-Западного региона России в исследование, разработку, производство и эксплуатацию новых металлических материалов — специальных сталей — является весьма существенным, поскольку исторически он был и остается ведущим исследовательским центром, сосредоточившим производство, научные исследования и подготовку научных кадров в области металлургии.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Садовский В.Д., Попов А.А. Диаграммы кинетики превращений переохлажденного аустенита // *Металловедение и термическая обработка стали. Справочник. Т. I* / Ред. М.Л. Бернштейн, А.Г. Рахштадт. М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1961. С. 616–669.
2. Davenport E.S., Bain E.C. Transformation of Austenite at Constant Subcritical Temperature // *Trans. AIME*. 1930. Vol. 90. P. 117–154.
3. Harold W. Paxton. Commentary by: Transformation of austenite at constant subcritical temperatures // *Metallurgical Transactions*. 1970. Vol. 1. Iss. 12. P. 3479–3501.
4. Чернов Д.К. Избранные труды по металлургии и металловедению. [The chosen works on metallurgy and metallurgical science]. М.: Наука, 1983. С. 9–48.
5. Tschernoff D.K. A Critical Review of Articles by Lavrov and Kalakoutzky on Steel and Steel Ordnance, with Original Investigations on the same topic // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. June 1880. Vol. 31. № 1. P. 286–307.
6. Чернов Д.К. Избранные труды по металлургии и металловедению. М.: Наука, 1983. С. 70–99.
7. Горынин И.В. Размышления с оптимизмом. СПб.: Издательство Политехнического университета, 2014. 526 с.
8. Дьяченко С.С. Образование аустенита в железо-углеродистых сплавах. М.: Металлургия, 1982. 128 с.
9. Anastasiadi G.P., Silnikov M.V. Thermo-kinetic austenite transformation in thin-sheet steels // *Materials Physics and Mechanics*. 2014. Vol. 20. P. 62–66.
10. Kondrat'ev S.Yu., Koval' Yu.N., Zotov O.G., Yaroslavskii G.Ya. The specific features of the processes of phase formation in the copper-aluminum-zinc system: II. Nonequilibrium conditions // *Металлофизика и новейшие технологии*. 1992. Т. 14. № 5. С. 22–30.
11. Матвеев В.В., Ярославский Г.Я., Чайковский Б.С., Кондратьев С.Ю. Сплавы высокого демпфирования на медной основе. Киев: Наукова думка, 1986. 208 с.
12. Atlas of continuous cooling transformation diagrams for vanadium steels // *The Vanadium International Technical Committee (VANITEC)*. England, Kent. June, 1985. 224 p.
13. Nurnberger F., Grydin O., Schaper M. [et al]. Microstructure Transformations in Tempering Steels during Continuous Cooling from Hot Forging Temperatures // *Steel research int.* 2010. Vol. 81. № 3. P. 224–233.
14. Kawulok R., Schindler I., Kawulok P. [et al.] Effect of deformation on the continuous cooling transformation (CCE) diagram of steel 32CRB4 // *Metallurgija*. 2015. Vol. 54. № 3. P. 473–476.
15. Trzaska J., Jagie A., Dobrzański L.A. The calculation of CCT diagrams for engineering steels // *Archives of Materials Science and Engineering*. 2009. Vol. 39. № 1. P. 13–20.
16. Matsuoka T., Takahashi M., Jamamory K., Matsui T. Development of cold rolled highstrength steel sheet // *Sumitomo Search*. 1974. № 12. P. 26–37.
17. Meyer L., Heisterkamp F., Hulka K., Muschenborn W. Thermomechanical processing of high-strength and mild flat-rolled steels // *Thermec 97*. — Wollongong, Australia, 1997. P. 87–97.
18. Nakata N., Militzer M. Modelling of Microstructure Evolution during Hot Rolling of a780 MPa High Strength Steel // *ISI International*. 2005. Vol. 45. № 1. P. 82–90.
19. Honeycombe R.W., Hehl R.F. Transformation from austenite in alloy steels // *Met. Trans.* 1976. Vol. 7 A. P. 915–919.
20. Decomposition of Austenite by Diffusional Processes: AIME. New York: Interscience Publishers, 1962. 352 p.
21. Kohlhaas R., Braun M. Die thermodynamischen Funktionen des reinen Eisens, Warmehalt und spezifische Earme austenitischer Eisenlegierungen und Stähle // *Arch. Eisenhüttenwesen*. 1963. B. 34. № 5. S. 391–399.
22. Hawbolt E.B., Chau B., Brimacombe J.K. Kinetics of austenite-ferrite and austenite-pearlite transformation in 1025 carbon steel // *Met. Trans.* 1985. Vol. 16 A. P. 565–578.

23. Садовский В.Д., Попов А.А. Диаграммы кинетики превращений переохлажденного аустенита // *Металловедение и термическая обработка стали и чугуна: Справочник* / Ред. Н.Т. Гудцов, М.Л. Бернштейн, А.Г. Рахштадт. М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1956. С. 427–461.

24. Попов А.А., Попова Л.Е. Справочник термиста: Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита. Москва–Свердловск: Машгиз, 1961. 430 с.

25. Попов А.А., Попова Л.Е. Справочник термиста. Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита. 2-е изд., испр. и доп. М.: Металлургия, 1965. 493 с.

26. Садовский В.Д. Превращения при нагреве стали. Структурная наследственность // *Металловедение и термическая обработка: Справочник в 3-х т.* / Ред. М.Л. Бернштейн, А.Г. Рахштадт. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1983. Т. 2. С. 83–111.

27. Садовский В.Д. Превращения при нагреве стали. Структурная наследственность // *Металловедение и термическая обработка: Справочник в 3-х т.* / Ред. М.Л. Бернштейн, А.Г. Рахштадт. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1995. Т. 3. С. 108–172.

28. Материалы для судостроения и морской техники: Справочник в 2-х т. / Ред. акад. И.В. Горынин. СПб.: НПО «Профессионал», 2009. Т. 1. 776 с. Т. 2. 664 с.

## REFERENCES

1. Sadovskiy V.D., Popov A.A. Diagrammy kinetiki prevrashcheniy pereokhlazhdenogo austenite. [Diagrams of kinetics of transformations of the overcooled austenite]. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka stali. Spravochnik*. T. I // Red. M.L. Bernshteyn, A.G. Rakhshadt. — M.: Gosudarstvennoye nauchno-tekhnicheskoye izdatelstvo literatury po chernoy i tsvetnoy metallurgii, 1961., S. 616–669. (rus)

2. Davenport E.S., Bain E.C. Transformation of Austenite at Constant Subcritical Temperature. *Trans. AIME*. 1930. Vol. 90. P. 117–154.

3. Paxton H. W. Commentary by: Transformation of austenite at constant subcritical temperatures. *Metallurgical Transactions*. 1970. Vol. 1. Iss. 12. P. 3479–3501.

4. Chernov D.K. Izbrannyye trudy po metallurgii i metallovedeniyu. [The chosen works on metallurgy and metallurgical science]. M.: Nauka, 1983. S. 9–48. (rus)

5. Tschernoff D.K. A Critical Review of Articles by Lavrov and Kalakoutzky on Steel and Steel Ordnance, with Original Investigations on the same topic. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 1880. V. 31. № 1. P. 286–307.

6. Chernov D.K. Izbrannyye trudy po metallurgii i metallovedeniyu. [The chosen works on metallurgy and metallurgical science]. M.: Nauka, 1983. S. 70–99. (rus)

7. Gorynin I.V. Razmyshleniya s optimizmom. [Optimistic thinking]. SPb.: Izdatelstvo Politekhnicheskogo universiteta, 2014. 526 s. (rus.)

8. Dyachenko S.S. Obrazovaniye austenita v zhelezouglerodistykh splavakh. [Austenite formation in iron-carbon alloys]. M.: Metallurgiya, 1982. 128 s. (rus.)

9. Anastasiadi G.P., Silnikov M.V. Thermo-kinetic austenite transformation in thin-sheet steels. *Materials Physics and Mechanics*. 2014. Vol. 20. P. 62–66.

10. Kondrat'ev S.Yu., Koval' Yu.N., Zotov O.G., Yaroslavskii G.Ya. The specific features of the processes of

phase formation in the copper-aluminum-zinc system: II. Nonequilibrium conditions. *Metallofizika i noveyshiye tekhnologii*. 1992. T. 14. № 5. S. 22–30.

11. Matveyev V.V., Yaroslavskiy G.Ya., Chaykovskiy B.S., Kondratyev S.Yu. Splavy vysokogo dempfirovaniya na mednoy osnove. [Copper Based High Damping Alloys]. Kiyev: Naukova dumka, 1986. 208 s. (rus.)

12. Atlas of continuous cooling transformation diagrams for vanadium steels. *The Vanadium International Technical Committee (VANITEC)*. England, Kent. June, 1985. 224 p.

13. Nurnberger F., Grydin O., Schaper M. [et al.] Microstructure Transformations in Tempering Steels during Continuous Cooling from Hot Forging Temperatures. *Steel research int.* 2010. Vol. 81. № 3. P. 224–233.

14. Kawulok R., Schindler I., Kawulok P. [et al.] Effect of deformation on the continuous soolling transformation (SSE) diagram of steel 32CRB4. *Metallurgija*. 2015. Vol. 54. № 3. P. 473–476.

15. Trzaska J., Jagie A., Dobrzański L.A. The calculation of CCT diagrams for engineering steels. *Archives of Materials Science and Engineering*. 2009. Vol. 39. № 1. P. 13–20.

16. Matsuoka T., Takahashi M., Jamamory K., Matsui T. Development of cold rolled highstrength steel sheet. *Sumitomo Search*. 1974. № 12. P. 26–37.

17. Meyer L., Heisterkamp F., Hulka K., Muschenborn W. Thermomechanical processing of high-strength and mild flat-rolled steels. *Thermec 97*. Wollongong, Australia, 1997. P. 87–97.

18. Nakata N., Militzer M. Modelling of Microstructure Evolution during Hot Rolling of a780 MPa High Strength Steel. *ISIJ International*. 2005. Vol. 45. № 1. P. 82–90.

19. Honeycombe R.W., Hehl R.F. Transformation from austenite in alloy steels. *Met. Trans*. 1976. Vol. 7 A. P. 915–919.

20. Decomposition of Austenite by Diffusional Processes: AIME. — New York: Interscience Publishers, 1962. 352 p.

21. **Kohlhaas R., Braun M.** Die thermodynamischen Funktionen des reinen Eisens, Warmehalt und spezifische Earme austenitischer Eisenlegierungen und Stahle. *Arch. Eisenhüttenwesen*. 1963. B. 34. № 5. S. 391–399.

22. **Hawbolt E.B., Chau V., Brimacombe J.K.** Kinetics of austenite-ferrite and austenite-pearlite transformation in 1025 carbon steel. *Met. Trans.* 1985. Vol. 16 A. P. 565–578.

23. **Sadovskiy V.D., Popov A.A.** Diagrammy kinetiki prevrashcheniy pereokhlazhdennogo austenita // Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka stali i chuguna: Spravochnik [Diagrams of the kinetics of transformation of supercooled austenite // Metal science and heat treatment of steel and cast iron. Handbook] / Red. N.T. Gudtsov, M.L. Bernshteyn, A.G. Rakhshadt. M.: Gosudarstvennoye nauchno-tekhnicheskoye izdatelstvo literatury po chernoy i tsvetnoy metallurgii, 1956. S. 427–461. (rus.)

24. **Popov A.A., Popova L.Ye.** Spravochnik termista: Izotermicheskiye i termokineticheskiye diagrammy raspada pereokhlazhdennogo austenita. [Handbook of heat treatment worker: Isothermal and Thermo-kinetic

decomposition diagrams of supercooled austenite]. Moskva-Sverdlovsk: Mashgiz, 1961. 430 s. (rus.)

25. **Popov A.A., Popova L.Ye.** Spravochnik termista. Izotermicheskiye i termokineticheskiye diagrammy raspada pereokhlazhdennogo austenita. [Handbook of heat treatment worker. Isothermal and Thermo-kinetic decomposition diagrams of supercooled austenite]. 2-ye izd., ispr. i dop. M.: Metallurgiya, 1965. 493 s. (rus.)

26. **Sadovskiy V.D.** Prevrashcheniya pri nagreve stali. Strukturnaya nasledstvennost. Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka. Spravochnik: v 3-kh t. [Transformations by heating the steel. Structural heredity // Metal science and heat treatment. Handbook: 3 Vols.] / Red. M.L. Bernshteyn, A.G. Rakhshadt. 3-ye izd., pererab. i dop. M.: Metallurgiya, 1983. T. 2. S. 83–111. (rus.)

27. **Sadovskiy V.D.** Prevrashcheniya pri nagreve stali. Strukturnaya nasledstvennost. Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka. Spravochnik v 3-kh t. [Transformations by heating the steel. Structural heredity. Metal science and heat treatment. Handbook: 3 Vols. / Red. M.L. Bernshteyn, A.G. Rakhshadt. 4-ye izd., pererab. i dop. M.: Metallurgiya, 1995. T. 3. S. 108–172.

28. Materialy dlya sudostroyeniya i morskoy tekhniki: spravochnik: v 2-kh t. [Materials for shipbuilding and marine equipment: handbook: 2 Vols.] / Red. akad. I.V. Gorynin. SPb.: NPO «Professional», 2009. T. 1. 776 s; T. 2. 664 s.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

**АНАСТАСИАДИ Григорий Панеодович** — доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.  
195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.  
E-mail: anastas45@yandex.ru

**ANASTASIADI Grigorii P.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.  
E-mail: anastas45@yandex.ru

**КОНДРАТЬЕВ Сергей Юрьевич** — доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.  
195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.  
E-mail: petroprom2013@yandex.ru

**KONDRATYEV Sergei Yu.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.  
E-mail: petroprom2013@yandex.ru

**СИЛЬНИКОВ Михаил Владимирович** — доктор технических наук генеральный директор ЗАО «НПО специальных материалов».  
195253, Санкт-Петербург, шоссе Революции, 58 а.  
E-mail: silnikivmv@mail.ru

**SIL'NIKOV Mikhail V.** — CJSC “Special Materials Corporation”.  
58a, av. Revolution, St. Petersburg, Russia, 195253.  
E-mail: silnikivmv@mail.ru

DOI 10.5862/JEST.243.12

УДК 662.732

*Г.В. Галевский, А.Е. Аникин, В.В. Руднева, С.Г. Галевский*

## **ПРИМЕНЕНИЕ БУРОУГОЛЬНЫХ ПОЛУКОКСОВ В МЕТАЛЛУРГИИ: ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА**

*G.V. Galevsky, A.E. Anikin, V.V. Rudneva, S.G. Galevsky*

### **USING BROWN-COAL SEMI-COKE IN METALLURGY: TECHNOLOGICAL AND ECONOMIC ASSESSMENT**

Проанализированы состояния производства, свойства и области применения полукоксов из отечественных малометаморфизованных углей различных месторождений. Сопоставлены свойства (зольность, содержание фиксированного углерода, выход летучих на сухую беззольную массу, реакционная способность, удельное электросопротивление, химический состав золы и др.) буроугольных полукоксов из углей Березовского месторождения Канско-Ачинского бассейна, Таловского месторождения Томской области, пламенного угля Кузбасса марки Г, угля марки ДГ Черемховского месторождения Иркутского бассейна. Установлено, что наиболее перспективно производство и потребление буроугольного полукокса Березовского месторождения КАБ ввиду его более высоких свойств по сравнению с полукоксами из малометаморфизованных углей других месторождений, технологической возможности его крупнотоннажного производства, относительно низкой стоимости, а также значительной потребности в нем многих областей промышленности.

**ПОЛУКОКС; БУРЫЕ УГЛИ; КАНСКО-АЧИНСКИЙ БАСЕЙН; БЕРЕЗОВСКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ; ПРОИЗВОДСТВО; ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА; ПРИМЕНЕНИЕ В МЕТАЛЛУРГИИ.**

We have analyzed the state of production, the properties and the areas of application of semi-coke from domestic low-metamorphism coals of various fields. We have compared the properties (ash-content, content of the fixed carbon, volatile content per on dry ash-free basis, reactivity, specific resistance, chemical composition of ashes, etc.) of brown-coal semi-coke from the Berezovsky deposit of the Kansk-Achinsk basin (KAB), the Talovsky deposit of the Tomsk region, of bituminous brand G coal of Kuzbass, and of DG brand coal of the Cheremkhovsky field of the Irkutsk basin. It is established that production and consumption of brown-coal semi-coke of the Berezovsky deposit of KAB is the most effective in view of its higher properties in comparison with semi-coke from low-metamorphism coals of other fields, a technological capability for large-capacity production, rather low cost, and also considerable need for the coal in many areas of the industry.

**SEMI-COKE; BROWN COALS; THE KANSK AND ACHINSK POOL; THE BEREZOVSKY FIELD; PRODUCTION; TECHNOLOGICAL PROPERTIES; APPLICATION IN METALLURGY.**

#### **Введение**

В настоящее время наблюдается нехватка основного восстановителя, используемого в металлургических процессах, — кокса из дефицитных спекающихся каменных углей. В связи с этим ведутся поиски новых перспективных угле-

родистых материалов, способных заменить полностью или частично каменноугольный кокс в целом ряде металлургических процессов. В то же время из-за переизбытка энергетических углей на топливном рынке угледобывающие предприятия активно ищут новые направления их сбыта [1, 2]. Поэтому поиск вариантов замены камен-



ноугольного кокса в ряде металлургических процессов исходными и переработанными энергетическими углями — весьма перспективное направление. Особенно интересны в этом плане бурые угли ввиду их значительных запасов и относительно низкой стоимости. Однако при использовании исходных бурых углей в качестве восстановителей в металлургических процессах возникает целый ряд проблем. Во-первых, зачастую металлургические предприятия располагаются на значительном удалении от буроугольных месторождений, а транспортировка бурого угля на расстояние свыше 300 км экономически и технологически нецелесообразна (высокая влажность, пыление, опасность самовозгорания и т.д.) [3–5]. Во-вторых, исходный бурый уголь имеет высокую влажность (27–38 %) и большой выход летучих веществ (45–48 %) [6]. Такие значения влажности и выхода летучих веществ недопустимы для металлургических процессов. В частности, при нагреве из исходного бурого угля начинают выделяться летучие вещества, содержащие большое количество смолистых веществ, которые затрудняют ход процесса и могут привести к выходу из строя газоочистки. В связи с этим очевидна необходимость предварительной обработки бурого угля перед использованием в металлургических процессах.

Одним из направлений подготовки бурого угля к использованию в металлургических процессах является их сушка и последующее брикетирование, благодаря чему существенно снижается влажность и достигается необходимый гранулометрический состав. Однако такой подготовки недостаточно, так как выход летучих веществ при этом не уменьшается [3]. Добиться существенного уменьшения выхода летучих веществ из бурого угля можно с помощью его глубокой термической переработки (при температуре 750–800 °С) [3]. При этом образуется буроугольный полукокс (БПК) — продукт, обладающий необходимыми свойствами для его применения в металлургических процессах.

**Цель нашей работы** — выполнить анализ технологий производства полукоксов из отечественных малометаморфизованных углей различных месторождений, сравнить свойства этих полукоксов, а также области их применения.

### Производство буроугольных полукоксов

В качестве сырья для производства БПК может быть использован любой бурый уголь. Однако одними из наиболее перспективных являются бурые угли Канско-Ачинского бассейна (КАБ) ввиду их значительных запасов (прогнозные ресурсы — 309,9 млрд т, или 23,4 % от запасов России), низких значений зольности (3,4–22,3 %) и содержания серы (0,1–2,2 %) [7], а также благоприятного состава золы ( $\text{CaO} + \text{MgO}$  до 55 %) [8].

В составе КАБ по целому ряду причин наиболее перспективными для производства БПК можно считать бурые угли Березовского месторождения. Во-первых, Березовское месторождение обладает значительными балансовыми запасами — 2453,2 млн т [9]. Разработка осуществляется открытым способом на разрезе «Березовский-1», проектная мощность которого — 55 млн т/год [10], а производственная мощность — 13,5 млн т/год [11, 12]. Толщина разрабатываемого угольного пласта — до 70 м [9]. Это в сочетании с благоприятными условиями залегания [11] обуславливает высокую среднемесячную производительность — до 575 т/чел. [13] и добычу угля 7,5–8,0 млн т/год [14, 15]. Разрез динамично развивается — за 10 лет добыча угля выросла на 32 % [13]. Во-вторых, Березовское месторождение находится на юго-западе Красноярского края в непосредственной близости к Кемеровской области, а следовательно, и к центру металлургии Сибири. Кроме того, рядом проходит Транссибирская железнодорожная магистраль, позволяющая организовать доставку сырья для металлургии не только Кузбасса, но и Красноярского края, Урала и др. В-третьих, бурые угли Березовского месторождения обладают благоприятным составом и свойствами: низкие зольность (5,6 %) и содержание серы (0,2–0,7 %), высокая теплота сгорания (16,0 МДж/кг) [9], а также благоприятный состав золы ( $\text{CaO} + \text{MgO}$  до 55 %) [8].

Известны различные технологические варианты производства полукоксов из малометаморфизованных углей [7, 8, 16–21].

На заводе «Сибэлектросталь» (г. Красноярск) в конце 60-х годов был освоен в опытно-про-

мышленном масштабе энерготехнологический способ полукоксования бурого угля, заключающийся в нагреве тонкоизмельченного угля комбинированным теплоносителем: в стадии подготовки — газовым, в стадии полукоксования — твердым [7, 16]. Технологическая схема данного способа содержит четыре контура: сушильно-размольный; бертинирования; полукоксования; охлаждения готового продукта. Этот способ позволяет получать мелкозернистый и пылевидный БПК (~ 80 % кл. 0,3–0,5 мм).

В Югославии в 60-е годы применялся способ, в котором бурый уголь обогащают, дробят до класса 0–5 мм, сушат в кипящем слое до влажности 6–12 % и далее подают на установку полукоксования Лурги—Рургаз в реактор с кипящим слоем, где в качестве теплоносителя используется полукокс с температурой 530 °С. Имеется возможность регулирования конечной температуры в пределах 450–1000 °С.

На Ангарском нефтехимическом комбинате, Ленинск-Кузнецком заводе полукоксования, а также в Германии в 60–70-е годы получил распространение процесс полукоксования в вертикальных шахтных печах системы Лурги с внутренним обогревом. Сущность процесса заключается в сушке угля (или брикетов), его полукоксовании, а затем охлаждении. В качестве газа-теплоносителя используется газ полукоксования, сжигаемый в топках камеры сушки и камеры полукоксования [16].

На заводе «Сланцы» в г. Кохтла-Ярве (Эстония) совместно с ВУХИНОм в 1997 году было проведено коксование длиннопламенного угля Новой Зеландии в камерных печах с внешним обогревом. Получен высококачественный углеродистый восстановитель. Также опробован и отработан процесс полукоксования углей марок Д, ДГ и СС в газогенераторах с получением полукокса, удовлетворяющего требованиям электротермических производств [17, 18]. В 2000-е годы в газогенераторах данного завода были проведены опытно-промышленные полукоксования углей марки Д Шубаркольского разреза Казахстана. Получен полукокс класса менее 25 мм, удовлетворяющий требованиям электротермических и агломерационных производств [17, 19].

Известна технология термоокислительного полукоксования и коксования на цепных колосниковых решетках (ЦКР). Пиролиз угля осуществляется в окислительном режиме за счет сгорания над слоем топлива выделяющихся летучих веществ. В связи с этим процесс получил название «автотермический», или «аутогенный». В России данную технологию разрабатывали в МХТИ им. Д. И. Менделеева, затем в ВУХИНе; в последнее время с участием Кузнецкого центра ВУХИНа процесс разработан и внедрен в условиях Казахстана для получения из углей марки Д Шубаркольского разреза углеродистых материалов для недоменных потребителей [17–19]. В России в промышленном масштабе этот процесс не применяется. Исключение составляют малотоннажные производства полукокса из углей марок Д и СС в котельных Кузбасса и Алтайского края. За рубежом данный способ широко используют в Канаде, США, Германии, ЮАР и Индии [17].

Для получения полукокса и кокса из углей могут применяться кольцевые печи. Сущность метода заключается в нагревании до заданной температуры относительно тонкого слоя (50–200 мм) свободно лежащей угольной загрузки на движущемся поде. В зависимости от типа перерабатываемого сырья и требований, предъявляемых к конечному продукту, загружаемый на кольцевую подину материал может быть кусковым или порошкообразным. Наибольший производственный опыт эксплуатации мощных кольцевых печей (диаметром до 25 м) с использованием бурых углей накоплен в Германии. Производительность агрегата — 115 тыс. т/год БПК (зольность  $A^d$  — 9 %, выход летучих  $V^{daf}$  — 3 %, пористость — 48,6 %, удельная поверхность — 300 м<sup>2</sup>/г) [17, 20]. В США также эксплуатируются кольцевые печи диаметром 5 и 8 м (производительность последней — 28 т/сут. кокса). Кокс используют в электротермических производствах ферросплавов и фосфора. В бывшем СССР технология коксования в кольцевых печах диаметром 5 м отрабатывалась на опытно-промышленных установках Нижнетагильского металлургического комбината и Московского коксогозового завода. В настоящее время эти установки не работают [17, 18].

В Китае на одном из заводов в провинции Шаньси (Внутренняя Монголия) эксплуатируются две вертикальные печи типа SJ производительностью около 100 тыс./т год полукокса из углей Шеньму марки Д. Печь SJ – вертикальная, квадратная, состоит из четырех камер. Загрузка угля сверху, осуществляется периодически и синхронно связана с выгрузкой полукокса. Газ для нагрева загрузки вдвигается через фурмы, установленные в стенах печи. Сгорая и частично сжигая выделяющиеся при нагреве летучие компоненты угля, образующиеся внутри печи, газ равномерно нагревает загрузку угля. Камеру можно разделить на три зоны: верхнюю – подсушка угля; среднюю – непосредственно полукоксирование, нижняя – охлаждение и выдача полукокса. В зоне полукоксирования достигается температура  $750 \pm 20^\circ\text{C}$ , в зоне охлаждения – не ниже  $80\text{--}100^\circ\text{C}$ . Данный полукокс используется для производства ферросплавов – ферросилиция и ферромарганца, фосфора (класс 5–15 мм), карбида кальция (класс 8–20 мм) [21]. Данная технология также используется в Казахстане – на борту Шубаркольского разреза в 2006 году построено шесть печей с общим производством полукокса 300 тыс. т/год [19, 21].

В настоящее время одним из самых перспективных способов получения БПК считается технология «Термококкс» [22]. Принципиальная схема данной технологии приведена на рис. 1.

Суть технологической концепции состоит в разделении углей с высоким выходом летучих веществ на два продукта – газовое топливо и коксовый остаток (полукокс). В рамках указанной технологии реализуются следующие способы: «Термококкс-С», «Термококкс-КС», «Термококкс-О<sub>2</sub>» [22].

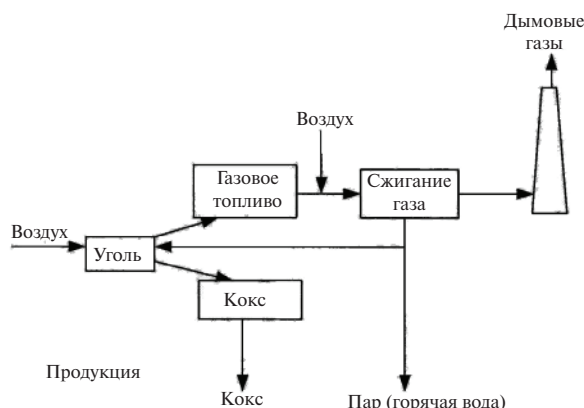


Рис. 1. Принципиальная схема технологии «Термококкс»

Технология «Термококкс-С» предусматривает частичную газификацию углей (окислительная карбонизация) в слоевых аппаратах с использованием обращенного дутья (схема с обратной тепловой волной). Продукты – БПК и горючий газ ( $\text{CO} + \text{H}_2$ ). В 1996 году процесс реализован в г. Красноярске на Опытно-промышленном заводе по переработке угля (с 2000 году – ЗАО «Карбоника-Ф») [1–4, 10–15, 22–26].

Технология «Термококкс-КС» заключается в частичной газификации углей (окислительная карбонизация) с использованием технологии кипящего слоя. Продукты – БПК и тепловая энергия. Принципиальная схема данной технологии приведена на рис. 2. В 2007 году процесс реализован в промышленных условиях на Березовском разрезе (ОАО «СУЭК», Красноярский край) [1–4, 10–15, 22–26].

Несомненное достоинство технологии «Термококкс-КС» – возможность ее реализации

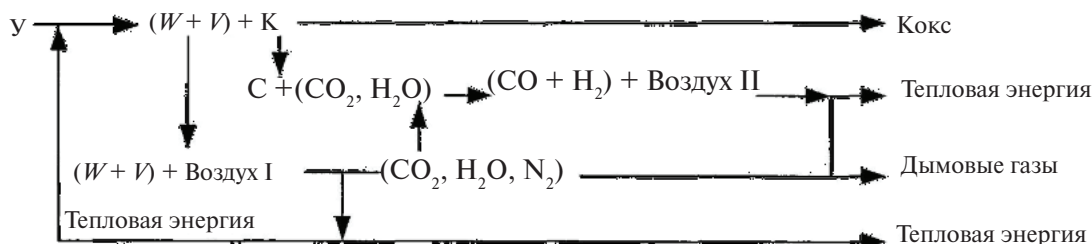


Рис. 2. Принципиальная схема технологии «Термококкс-КС»:

У – уголь; W – влага; V – летучие вещества; К – коксовый остаток (полукокс); С – углерод; Воздух I – первичное воздушное дутье; Воздух II – вторичное воздушное дутье

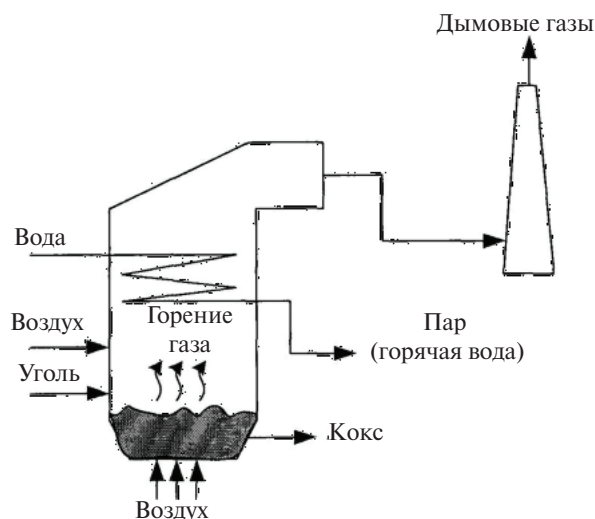


Рис. 3. Принципиальная схема технологии «Термококс-КС» с использованием энергетического котла

в модернизированных типовых энергетических котлах (рис. 3) [22].

Технология «Термококс- $O_2$ » предусматривает частичную газификацию малозольного угля в слоевых реакторах с использованием обращенного кислородного дутья. Продукты – БПК и синтез-газ. В дальнейшем синтез-газ может перерабатываться в синтетические жидкие топлива (СЖТ) [1–4, 10–15, 22–26]. Отличительная особенность данной технологии – существенное (в 2 раза) удешевление (за счет когенерации полукокса и синтез-газа в одном агрегате) получаемого синтез-газа и, следовательно, получаемых СЖТ (в 2 раза) по сравнению с другими технологиями, в т.ч. классической технологией SASOL [22].

Таким образом, исходя из географии опытно-промышленного и промышленного применения по технологии «Термококс» перерабатываются, в первую очередь, бурые угли Березовского месторождения КАБ. Данная технология позволяет перерабатывать бурые, а также каменные угли марок Д и Г других месторождений.

#### Сравнительный анализ технологических свойств бурого угольного полукокса

Сравнительный анализ свойств БПК из углей Березовского месторождения КАБ (БПК бере-

зовский) [8, 17, 20], БПК из углей Таловского месторождения Томской области (БПК таловский) [27], полукокса из каменного угля Кузбасса (ООО «Завод полукоксования», г. Ленинск-Кузнецкий) марки Г (КПК ленинск-кузнецкий) [7, 16, 21] и полукокса из каменного угля марки ДГ Черемховского месторождения Иркутского бассейна (КПК ангарский Ангарского завода нефтеоргсинтеза) [7, 16] представлен в таблице.

Из приведенных данных видно, что БПК березовский обладает следующими преимуществами по сравнению с полукоксами из малометаморфизованных углей других месторождений:

- зольность на сухую массу ( $A^d$ ) ниже на 53, 16 и 214 % по сравнению соответственно с БПК таловским, КПК ленинск-кузнецким и КПК ангарским;

- содержание фиксированного углерода ( $C_{\text{fix}}$ ) выше на 4, 10 и 15 % по сравнению соответственно с БПК таловским, КПК ленинск-кузнецким и КПК ангарским;

- содержание в золе  $CaO + MgO$  выше на 288 и 1633 % по сравнению соответственно с КПК ленинск-кузнецким и КПК ангарским;

- пористость (П) выше на 9 % по сравнению с КПК ленинск-кузнецким;

- удельная поверхность (S) выше на 21 и 45 % по сравнению соответственно с КПК ленинск-кузнецким и КПК ангарским;

- содержание углерода на сухую беззольную массу ( $C^{\text{daf}}$ ) выше на 2 и 1 % по сравнению соответственно с КПК ленинск-кузнецким и КПК ангарским;

- реакционная способность по  $CO_2$  при 1000 °C (PC) выше на 20 и 49 % по сравнению соответственно с БПК таловским и КПК ленинск-кузнецким.

Кроме технологических свойств, очевидны преимущества БПК из углей Березовского месторождения КАБ в плане производства, если учесть, что БПК таловский получен лишь в лабораторных условиях, КПК ленинск-кузнецкий производится в объеме 60 тыс. т/год [28] (чего явно недостаточно для удовлетворения потребности в нем), а производство КПК ангарского вообще остановлено в начале 1990-х годов. Между тем на Березовском разрезе производится около 25 тыс. т/год БПК на одну установку; при



Свойства полукоксов из малометаморфизованных углей различных месторождений

Свойства полукоксов	Полукоксы			
	БПК бере- зовский	БПК талов- ский	КПК ленинск- кузнецкий	КПК ангарский
Влажность на рабочую массу, %	1,2	Нет св.	13,8	17,0
Зольность на сухую массу, %	8,6	13,2	10,0	27,0
Выход летучих веществ на сухую беззольную массу, %	9,5	7,7	17,2	5,6
Содержание фиксированного углерода, %	81,9	79,1	74,5	67,4
Химический состав золы, %:				
SiO <sub>2</sub>	19,0	Нет св.	35,1	75,7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,5	То же	26,8	11,2
CaO + MgO	52,0	—//—	13,4	3,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,8	—//—	20,6	7,6
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Нет св.	—//—	1,25	0,03
SO <sub>3</sub>	4,4	—//—	Нет св.	Нет св.
Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	2,8	—//—	То же	То же
Удельное электросопротивление собственное, Ом·см	Нет св.	—//—	11,649	6,014
Удельное электросопротивление в засыпи кусков 3—6 мм, Ом·см	То же	—//—	1,6·10 <sup>6</sup>	75,0
Плотность кажущаяся, г/см <sup>3</sup>	0,924	—//—	0,869	0,820
Плотность истинная, г/см <sup>3</sup>	1,846	—//—	1,606	1,820
Пористость, %	49,9	—//—	45,9	55,0
Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г	264,0	—//—	217,5	182,0
Элементный состав, %:				
содержание углерода на сухую беззольную массу	90,85	—//—	88,83	89,70
содержание водорода на сухую беззольную массу	1,97	—//—	2,97	1,63
содержание азота на сухую беззольную массу	0,89	—//—	2,76	1,53
содержание кислорода на сухую беззольную массу	6,16	—//—	5,24	6,23
содержание серы на сухую беззольную массу	0,13	—//—	0,20	0,91
Реакционная способность по СО при 1000 °С, см <sup>3</sup> /(г·с)	6,48	5,4	4,35	9,8

этом имеется технологическая возможность увеличения объема производства до 100—125 тыс. т/год и более при проведении модернизации эксплуатирующихся энергетических котлов.

#### Анализ рынка сбыта березовского буроугольного полукокса

Анализ рынков сбыта КПК ленинск-кузнецкого и БПК березовского позволяет выделить следующие основные сферы их применения.

Ленинск-Кузнецкий завод полукоксования производит два вида полукоксов (П-2 и П-3), опробованных и применяемых в следующих областях [24]: в качестве восстановителя в металлургических процессах (производство ферросплавов); как компонент шихты для коксования,

производства карбида кальция и активированного угля; в качестве раскислителя стекла; для термической обработки стали; как топливо для кузниц; на агломерационных фабриках для спекания железной руды; в качестве выгорающих добавок для производства пористо-пустотного глиняного (строительного) кирпича; для энергетических целей (сжигание в котельных в смеси с рядовым углем).

Буроугольный полукоксы из углей Березовского месторождения КАБ опробован и применяется в следующих качествах: бездымное высококалорийное топливо [1—3, 5, 7, 13, 14, 22]; сырье для производства водорода путем газификации [7]; восстановитель в металлургических процессах; заменитель коксового орешка в про-



изводстве ферросплавов восстановитель для прямого (недоменного) получения железа из руд, для приготовления пылеугольного топлива (ПУТ) для вдувания в горн доменной печи [1–3, 7, 10, 13, 14, 22, 23, 25, 26]; добавка в шихту для коксования [1, 7, 16]; углеродный сорбент [22–24]; высококалорийный компонент смесевых топлив самого различного назначения, например для обжига цементного клинкера или для спекания глинозема [2].

Спрос на БПК из углей Березовского месторождения КАБ может составлять от 5 до 10 млн т/год [30]. БПК из углей Березовского месторождения КАБ особенно интересен для производителей ферросплавов. В 2012 году достигнута договоренность о проведении промышленных испытаний по использованию брикетов из БПК на Надежном металлургическом заводе. В конце 2012 года выполнена поставка 1000 т брикетов из БПК на ОАО «Серовский завод ферросплавов», ООО «СГМК-ферросплавы» и ООО «Металекс». В 2013 году на ферросплавные заводы поставка брикетов из БПК происходила на постоянной основе. В настоящее время ведутся работы по созданию брикета из БПК для кремниевых заводов ОАО «РУСАЛ» [31]. Планируется заменить дорогостоящие колумбийские угли на БПК при производстве кремния. Опыты пройдут на ЗАО «Кремний» в г. Шелехов. Годовая потребность ОАО «РУСАЛ» в углях — около 50 тыс. т. Замена их на БПК позволит сэкономить около 50 млн руб./год [32, 33]. Заключен договор на поставку БПК в количестве 3 тыс. т/год с НИИ экологических проблем металлургии для исполь-

зования в сталеплавильном производстве Новолипецкого металлургического комбината. Также БПК возможно использовать в металлургических производствах, где уголь применяют в пылевидной фракции. Именно такую технологию практикует Ачинский глиноземный комбинат (АГК). Потенциальными потребителями БПК могут стать и предприятия «Кузбассэнерго» в Кемеровской области [30].

Для сравнения — стоимости составляют: бурого угля марки 2Б Канско-Ачинского бассейна — 450–550 руб./т; каменного угля марки Г Кузнецкого бассейна — 1200–1400 руб./т; БПК Березовского месторождения КАБ — 2500 руб./т; полукокса ООО «Завод полукоксования» (г. Ленинск-Кузнецкий) марки П-2 (класс 10–100 мм) — 5500 руб./т; марки П-3 (класс 0–10 мм) — 2500 руб./т; коксового орешка — 5000–6000 руб./т; кокса класса 25–40 мм — 6000–7000 руб./т [34].

### Выводы

Проведенный анализ состояния производства, свойств и областей применения полукоксов из отечественных малометаморфизованных углей различных месторождений позволяет заключить, что наиболее перспективно производство и потребление буроугольного полукокса Березовского месторождения КАБ ввиду его улучшенных свойств по сравнению с полукоксами из малометаморфизованных углей других месторождений, технологической возможности его крупнотоннажного производства, относительно низкой стоимости, а также значительной потребности в нем многих областей промышленности.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исламов С.Р., Степанов С.Г. Глубокая переработка угля: введение в проблему выбора технологии // Уголь. 2007. № 10. С. 55–58.
2. Исламов С.Р. Экономический кризис как побуждение к глубокой переработке угля // Уголь. 2013. № 2. С. 46–48.
3. Исламов С.Р. Переработка низкосортных углей в высококалорийное топливо // Уголь. 2012. № 3. С. 64–66.
4. Романов С.М. Перспективы развития добычи, переработки и использования бурых углей в России // Уголь. 2009. № 1. С. 15–17.
5. Головин К.С., Крпачин С.С. Переработка углей — стратегическое направление повышения качества и расширения сфер их использования // Уголь. 2006. № 6. С. 64–67.
6. Ульянов И.А., Солдатенков А.П., Дмитриев В.К. [и др.]. Угли СССР: Справочник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1975. 308 с.
7. Балмасов Н.Н., Бранчугин В.К., Быкадоров В.С. [и др.]. Минерально-сырьевая база угольной промышленности России: в 2 т. Т. 1. Состояние, динамика, развитие. М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 1999. 648 с.

8. **Страхов В.М., Суровцева И.И., Долинский В.А. [и др.]**. БПК. Возможности его использования как топлива в агломерации железных руд // Кокс и химия. 2007. № 8. С. 20–26.
9. **Балмасов Н.Н., Бранчугов В.К., Быкадоров В.С. [и др.]**. Минерально-сырьевая база угольной промышленности России: в 2 т. Т. 2. Регионы и бассейны. М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 1999. 448 с.
10. **Королева А.** Пароль – КАТЭК. В День шахтера свое 35-летие отмечает Березовский разрез в Красноярском крае // Уголь. 2010. № 8. С. 36.
11. ОАО «СУЭК-Красноярск»: задачи на перспективу // Уголь. 2011. № 8. С. 18–19.
12. **Федоров А.В., Иншаков В.Ю.** ОАО «СУЭК-Красноярск»: результаты 2010 года и задачи на 2011 год // Уголь. 2011. № 3. С. 18–20.
13. **Федоров А.В.** СУЭК-Красноярск: итоги, проблемы, перспективы // Уголь. 2009. № 5. С. 48–51.
14. **Лалетин Н.И.** ОАО «СУЭК-Красноярск» – 2011 год: стабильность и развитие // Уголь. 2012. № 3. С. 15–18.
15. Филиал ОАО «СУЭК-Красноярск» «Разрез Березовский-1». Мы – за прозрачные, честные отношения // Уголь. 2012. № 4. С. 10–11.
16. **Мизин В.Г., Серов Г.В.** Углеродистые восстановители для ферросплавов. М.: Metallurgy, 1976. 272 с.
17. **Страхов В.М.** Научные и производственные аспекты получения специальных видов кокса для электротермических производств // Кокс и химия. 2008. № 9. С. 44–49.
18. **Страхов В.М., Святков Б.А., Головачев Н.П. [и др.]**. Технология производства кокса из углей Шубаркольского разреза. Оценка его качества как углеродистого восстановителя для выплавки ферросплавов // Кокс и химия. 2004. № 10. С. 16–20.
19. **Глезин И.Л., Шампаров А.Г., Страхов В.М.** Полукоксование длинно-пламенных углей Шубаркольского месторождения в газогенераторах // Кокс и химия. 2009. № 8. С. 25–29.
20. **Школлер М.Б.** БПК – модификатор свойств кокса и угольных смесей // Кокс и химия. 2007. № 12. С. 18–24.
21. **Страхов В.М., Суровцева И.В., Дьяченко А.В., Меньшенин В.М.** Технология производства и качество полукокса из вертикальных печей типа SJ Китая // Кокс и химия. 2007. № 5. С. 17–24.
22. **Исламов С.Р.** Энергоэффективное использование бурых углей на основе концепции «ТЕРМО-КОКС»: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / Красноярск, 2010. 37 с.
23. **Исламов С.Р.** О новой концепции использования угля // Уголь. 2007. № 5. С. 67–69.
24. **Гринько Н.К.** Использование чистых угольных технологий в России // Уголь. 2006. № 1. С. 6–8.
25. **Исламов С.Р.** Переработка бурого угля по схеме энерготехнологического кластера // Уголь. 2009. № 3. С. 65–67.
26. **Федоров А.В.** ОАО «СУЭК-Красноярск»: миллионы тонн «черного золота» // Уголь. 2013. № 8. С. 12–14.
27. **Строкина И.В.** Разработка научных основ и определение технологических режимов углеродотермического восстановления и окисления железа в водородосодержащей атмосфере: Дисс. ... канд. техн. наук / Новокузнецк, 2013. 154 с.
28. **Страхов В.М.** Научные и производственные аспекты получения специальных видов кокса для электротермических производств // Материалы Н.К. Перспективы развития химической переработки горючих ископаемых [электр. ресурс]. <http://www.ngpedia.ru/cgi-bin/getpage.exe?cn=333&uid=0.24549786420539&int=2>. Дата обращения: 17.07.2014.
29. ООО Завод полукоксования. Полукокс каменноугольный [электр. ресурс]. [http://www.zavod-polukoksovaniya.pulscen.ru/goods/121282-polukox\\_kamennougolny](http://www.zavod-polukoksovaniya.pulscen.ru/goods/121282-polukox_kamennougolny). Дата обращения: 17.07.2014.
30. СУЭК нашел покупателей [Электр. ресурс]. <http://www.krasnoyarsk.biz/articles/analytics/2008/03/14/suek>. Дата обращения: 17.07.2014.
31. Metallurgy заинтересовались Березовским полукоксом [электр. ресурс]. [http://www.metalindex.ru/news/2013/03/25/news\\_45066.html](http://www.metalindex.ru/news/2013/03/25/news_45066.html). (дата обращения: 17.07.2014).
32. Русал и СУЭК будут использовать полукокс бурого угля для производства кремния [Электр. ресурс]. <http://mining24.ru/2013/09/rusal-i-suek-budut-ispolzovat-poukoks-burogo-uglya-dlya-proizvodstva-kremniya/>. Дата обращения: 17.07.2014.
33. Интересы «Русала» все шире – от Содерберга до катанки и угольного пека [Электр. ресурс]. [http://www.rusal.ru/press-center/news\\_details.aspx?id=9240&ibt=52&at=1](http://www.rusal.ru/press-center/news_details.aspx?id=9240&ibt=52&at=1). Дата обращения: 17.07.2014.
34. Кокс металлургический и доменный. Динамика цен [Электр. ресурс]. [http://www.metalorg.ru/metal\\_catalog/metallurgicheskoye\\_syrye\\_i\\_polufabrikaty/koks/coke/](http://www.metalorg.ru/metal_catalog/metallurgicheskoye_syrye_i_polufabrikaty/koks/coke/). – Дата обращения: 27.07.2014.

## REFERENCES

1. **Islamov S.R., Stepanov S.G.** Glubokaya pererabotka uglya: vvedeniye v problemu vybora tekhnologii [Deep processing of coal: introduction to a problem of the choice of technology]. *Ugol*. 2007. № 10. С. 55–58. (rus.)
2. **Islamov S.R.** Ekonomicheskiy krizis kak

pobuzhdeniye k glubokoy pererabotke uglya [Economic crisis as motivation to deep processing of coal]. *Ugol*. 2013. № 2. S. 46–48. (rus.)

3. **Islamov S.R.** Pererabotka nizkosortnykh ugley v vysokokaloriynoye toplivo [Processing of low-grade coals in high-calorific fuel]. *Ugol*. 2012. № 3. S. 64–66. (rus.)

4. **Romanov S.M.** Perspektivy razvitiya dobychi, pererabotki i ispolzovaniya burykh ugley v Rossii [Prospects of development of production, processing and use of brown coals in Russia]. *Ugol*. 2009. № 1. S. 15–17. (rus.)

5. **Golovin K.S., Krapchin S.S.** Pererabotka ugley – strategicheskoye napravleniye povysheniya kachestva i rasshireniya sfer ikh ispolzovaniya [Processing of coals – the strategic direction of improvement of quality and expansion of spheres of their use]. *Ugol*. 2006. № 6. S. 64–67. (rus.)

6. **Ulyanov I.A., Soldatenkov A.P., Dmitriyev V.K. [i dr.]** Ugli SSSR : spravochnik. [Coals of the USSR: reference book] 2-ye izd., pererab. i dop. M.: Nedra, 1975. 308 s. (rus.)

7. **Balmasov N.N., Branchugov V.K., Bykadorov V.S. [i dr.]** Mineralno-syryevaya baza ugolnoy promyshlennosti Rossii : v 2 t. T. 1. Sostoyaniye, dinamika, razvitiye. [Mineral resources of the coal industry of Russia. State, dynamics, development]. M. : Izd-vo Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta, 1999. 648 s. (rus.)

8. **Strakhov V.M., Surovtseva I.I., Dolinskiy V.A. [i dr.]** BPK. Vozmozhnosti yego ispolzovaniya kak topliva v aglomeratsii zheleznykh rud [BPK. Possibilities of his use as fuels in agglomeration of iron ores]. *Koks i khimiya*. 2007. № 8. S. 20–26. (rus.)

9. **Balmasov N.N., Branchugov V.K., Bykadorov V.S. [i dr.]** Mineralno-syryevaya baza ugolnoy promyshlennosti Rossii : v 2 t. T. 2. Regiony i basseyny. [Mineral resources of the coal industry of Russia. Regions and pools.] M. : Izd-vo Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta, 1999. 448 s. (rus.)

10. **Koroleva A.** Parol – KATEK. V Den shakhtera svoye 35-letniye otmechayet Berezovskiy razrez v Krasnoyarskom kraye [Password – KATEK. In Day of the miner the 35 anniversary Berezovsky notes a section in Krasnoyarsk Krai]. *Ugol*. 2010. № 8. S. 36. (rus.)

11. OAO «SUEK-Krasnoyarsk»: zadachi na perspektivu [JSC SUEK Krasnoyarsk: tasks on prospect]. *Ugol*. 2011. № 8. S. 18–19. (rus.)

12. **Fedorov A.V., Inshakov V.Yu.** OAO «SUEK-Krasnoyarsk»: rezultaty 2010 goda i zadachi na 2011 god [JSC SUEK Krasnoyarsk: results of 2010 and task for 2011]. *Ugol*. 2011. № 3. S. 18–20. (rus.)

13. **Fedorov A.V.** SUEK-Krasnoyarsk: itogi, problemy, perspektivy [SUEK Krasnoyarsk: results, problems, prospects]. *Ugol*. 2009. № 5. S. 48–51. (rus.)

14. **Laletin N.I.** OAO «SUEK-Krasnoyarsk» – 2011 god: stabilnost i razvitiye [JSC SUEK Krasnoyarsk – 2011: stability and development]. *Ugol*. 2012. № 3. S. 15–18.

15. Filial OAO «SUEK-Krasnoyarsk» «Razrez Berezovskiy-1». My – za prozrachnyye, chestnyye otnosheniya [Branch of JSC SUEK Krasnoyarsk «Berezovsky-1 Coal mine». We – for the transparent, honest relations]. *Ugol*. 2012. № 4. S. 10–11. (rus.)

16. **Mizin V.G., Serov G.V.** Uglerodistyye vosstanoviteli dlya ferrosplavov. [Carbonaceous reducers for ferroalloys]. M. : Metallurgiya, 1976. 272 s. (rus.)

17. **Strakhov V.M.** Nauchnyye i proizvodstvennyye aspekty polucheniya spetsi-alnykh vidov koksa dlya elektrotermicheskikh proizvodstv [Scientific and production aspects of receiving special types of coke for electrothermal productions]. *Koks i khimiya*. 2008. № 9. S. 44–49. (rus.)

18. **Strakhov V.M., Svyatov B.A., Golovachev N.P. [i dr.]** Tekhnologiya proiz-vodstva koksa iz ugley Shubarkolskogo razreza. Otsenka yego kachestva kak uglerodistogo vosstanovitelya dlya vyplavki ferrosplavov [The production technology of coke from coals of the Shubarkolsky section. An assessment of his quality as carbonaceous reducer for smelting of ferroalloys]. *Koks i khimiya*. 2004. № 10. S. 16–20. (rus.)

19. **Glezin I.L., Shamparov A.G., Strakhov V.M.** Polukoksovaniye dlinnoplamennykh ugley Shubarkolskogo mestorozhdeniya v gazogeneratorakh [Devolatilization of coal of long-flame coals of the Shubarkolsky field in gas generators]. *Koks i khimiya*. 2009. № 8. S. 25–29. (rus.)

20. **Shkoller M.B.** BPK – modifikator svoystv koksa i ugolnykh smesey [BPK – the modifier of properties of coke and coal mixes]. *Koks i khimiya*. 2007. № 12. S. 18–24. (rus.)

21. **Strakhov V.M., Surovtseva I.V., Dyachenko A.V., Menshenin V.M.** Tekhnologiya proizvodstva i kachestvo polukoksa iz vertikalnykh pechey tipa SJ Kitaya [The production technology and quality of semi-coke from vertical SJ furnaces of China]. *Koks i khimiya*. 2007. № 5. S. 17–24. (rus.)

22. **Islamov S.R.** Energoeffektivnoye ispolzovaniye burykh ugley na osnove kontseptsii «TERMOKOKS»: Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk. [Power effective use of brown coals on the basis of the concept of «TEPMOKOKC»] / Krasnoyarsk, 2010. 37 s. (rus.)

23. **Islamov S.R.** O novoy kontseptsii ispolzovaniya uglya [About the new concept of use of coal]. *Ugol*. 2007. № 5. S. 67–69. (rus.)

24. Grinko N.K. Ispolzovaniye chistyykh ugolnykh tekhnologiy v Rossii [Use of pure coal technologies in Russia]. *Ugol*. 2006. № 1. S. 6–8. (rus.)

25. **Islamov S.R.** Pererabotka burogo uglya po skheme energotekhnologicheskogo klastera [Processing of brown coal according to the scheme of a power technological cluster]. *Ugol*. 2009. № 3. S. 65–67. (rus.)

26. **Fedorov A.V.** OAO «SUEK-Krasnoyarsk»: milliony tonn «chernogo zolota» [JSC SUEK Krasnoyarsk: millions tons of «black gold»]. *Ugol*. 2013. № 8. S. 12–14. (rus.)

27. **Strokina I.V.** Razrabotka nauchnykh osnov i opredeleniye tekhnologicheskikh rezhimov uglerodotermicheskogo vosstanovleniya i okisleniya zheleza v vodorodosoderzhashchey atmosfere : Diss. kand. tekhn. nauk. [Development of scientific bases and definition of the technological modes of carbon-thermal restoration and oxidation of iron in the the hydrogen-containing atmosphere]. Novokuznetsk, 2013. 154 s. (rus.)
28. **Strakhov V.M.** Nauchnyye i proizvodstvennyye aspekty polucheniya spetsialnykh vidov koks dlya elektrotermicheskikh proizvodstv [Scientific and production aspects of receiving special types of coke for electrothermal productions] // Materialy N.K. Perspektivy razvitiya khimicheskoy pererabotki goryuchikh iskopayemykh [Elektr. resurs]. <http://www.ngpedia.ru/cgi-bin/getpage.exe?cn=333&uid=0.24549786420539&inte=2>. (data obrashcheniya: 17.07.2014). (rus.)
29. ООО Zavod polukoksovaniya. Polukoks kamennougolnyy [LLC Plant of devolatilization of coal. Semi-coke coal] [Elektr. resurs]. <http://www.zavod-polukoksovaniya.pulscen.ru/goods/121282-polukox-kamennougolny>. (data obrashcheniya: 17.07.2014). (rus.)
30. SUEK nashel pokupateley [SUEK has found buyers] [elektr. resurs]. <http://www.krasnoyarsk.biz/articles/analitics/2008/03/14/suek>. Data obrashcheniya: 17.07.2014. (rus.)
31. Metallurgi zainteresovalis Berezovskim polukoksom [Metallurgists have become interested in Berezovsky semi-coke] [Elektr. resurs]. [http://www.metalindex.ru/news/2013/03/25/news\\_45066.html](http://www.metalindex.ru/news/2013/03/25/news_45066.html). Data obrashcheniya: 17.07.2014. (rus.)
32. Rusal i SUEK budut ispolzovat polukoks burogo uglya dlya proizvodstva kremniya [RUSAL and SUEK will use semi-coke of brown coal for silicon production]. [Elektr. resurs]. <http://mining24.ru/2013/09/rusal-i-suek-budut-ispolzovat-poukoks-burogo-uglya-dlya-proizvodstva-kremniya/>. Data obrashcheniya: 17.07.2014. (rus.)
33. Interesy «Rusala» vse shire – ot Soderberga do katanki i ugolnogo peka [Interests of «RUSAL» are wider and wider – from Soderbergh to a rod iron and coal pitch]. [Elektr. resurs]. [http://www.rusal.ru/press-center/news\\_details.aspx?id=9240&ibt=52&at=1](http://www.rusal.ru/press-center/news_details.aspx?id=9240&ibt=52&at=1). Data obrashcheniya: 17.07.2014. (rus.)
34. Koks metallurgicheskii i domennyy. Dinamika tsen [Coke metallurgical and domain. Dynamics of the prices] [Elektr. resurs]. [http://www.metaltorg.ru/metal\\_catalog/metallurgicheskoye\\_syrye\\_i\\_polufabrikaty/koks/coke/](http://www.metaltorg.ru/metal_catalog/metallurgicheskoye_syrye_i_polufabrikaty/koks/coke/). Data obrashcheniya: 27.07.2014. (rus.)

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

**ГАЛЕВСКИЙ Геннадий Владиславович** — доктор технических наук заведующий кафедрой Сибирского государственного индустриального университета  
654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42..  
E-mail: kafcmet@sibsiu.ru

**GALEVSKY Gennadii V.** — Siberian State Industrial University.  
42, Kirov St, Novokuznetsk, Russia, 654007.  
E-mail: kafcmet@sibsiu.ru

**АНИКИН Александр Ефимович** — старший преподаватель Сибирского государственного индустриального университета.  
654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42..  
E-mail: kafcmet@sibsiu.ru

**ANIKIN Aleksandr E.** — Siberian State Industrial University.  
42, Kirov St, Novokuznetsk, Russia, 654007.  
E-mail: kafcmet@sibsiu.ru

**РУДНЕВА Виктория Владимировна** — доктор технических наук профессор Сибирского государственного индустриального университета  
654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42..  
E-mail: kafcmet@mail.ru

**RUDNEVA Viktoriia V.** — Siberian State Industrial University.  
42, Kirov St, Novokuznetsk, Russia, 654007.  
E-mail: kafcmet@mail.ru

**ГАЛЕВСКИЙ Сергей Геннадьевич** — кандидат экономических наук доцент Национального минерально-сырьевого университета «Горный».  
199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2..  
E-mail: nirs@spmi.ru

**GALEVSKY Sergei G.** — National Mineral Resources University.  
2, line 21 V.O., St. Petersburg, Russia, 199106.  
E-mail: nirs@spmi.ru



DOI 10.5862/JEST.243.13

УДК 621.762

*В.Н. Цеменко, Д.В. Фук, С.В. Ганин*

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭКСТРУЗИИ  
ПОРОШКОВЫХ И ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ.  
ЧАСТЬ 1. ПОРОШКОВОЕ ТЕЛО**

*V.N. Tsemenko, D.V. Fuk, S.V. Ganin*

**DETERMINING THE RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS AND MODELING  
THE EXTRUSION OF POWDER AND POROUS MATERIALS.  
PART 1. POWDER BODY**

В работе исследование процессов пластической деформации металлических материалов выполнено с использованием численных методов, в частности методом конечных элементов. Разработана расчетно-экспериментальная методика определения реологических характеристик порошкового материала по известным механическим характеристикам материала частиц на основе анализа процесса деформации идеализированной модели порошкового тела. Рассмотрена идеализированная модель порошкового тела, с помощью которой осуществлено математическое моделирование процесса деформации элементарной ячейки в виде кубика со сферической частицей, окруженной многогранной порой. Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными по прессованию порошкового материала АКБ-2.5 в замкнутой матрице. Это свидетельствует о практической возможности применять для математического моделирования процессов уплотнения порошковых материалов разработанную расчетно-экспериментальную методику определения реологических характеристик порошкового тела по известным значениям предела текучести материала частиц.

**ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ; КОМПАКТИРОВАНИЕ; МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ; ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ; ПЛОТНОСТЬ.**

The paper has studied the process of plastic deformation of powder metal materials via various numerical methods, in particular, the finite-element method. The calculation and experimental technique developed for determining the rheological characteristics of powder materials is performed according to the well-known mechanical characteristics of the material's particles on the basis of analyzing the deformation of an idealized model of a powder body. We have considered an idealized model of the powder body, based on which we simulated the deformation process of an elementary cell shaped as a cube with a spherical particle surrounded with a faceted pore. The simulation results are in good agreement with the experimental data on the pressing of the АКБ-2.5 powder material in a closed matrix. This means it is possible to use the developed calculation and experimental technique for determining the rheological characteristics of a powder body from the known yield point values of the particle material for simulating the consolidation processes of powder materials.

**POWDER METALLURGY; COMPACTION; MATHEMATICAL MODELLING; PLASTIC DEFORMATION; DENSITY.**

**Введение**

Технологические процессы порошковой металлургии успешно конкурируют с традицион-

ными способами производства, а в ряде случаев являются единственными при получении изделий со специальными свойствами [1–9]. Наи-



более сложными технологическими процессами порошковой металлургии, которые определяют комплекс физико-механических и специальных свойств изделий, являются процессы уплотнения и пластического деформирования заготовок. В настоящее время активно развивается математическое моделирование процессов уплотнения порошковых материалов. С использованием результатов компьютерного и математического моделирования можно исследовать процессы пластической обработки, анализировать влияние различных технологических факторов на свойства заготовок без проведения дорогостоящих экспериментов. Для проведения компьютерного и математического моделирования процессов деформирования порошковых материалов необходимо иметь данные об их реологических характеристиках. Методика определения реологических характеристик изложена в работах [1, 10, 11]; она в основном опирается на экспериментальное изучение поведения порошковых материалов при различных схемах нагружения (одноосное растяжение, сдвиг, одноосное сжатие, сжатие в закрытой матрице и гидростатическое сжатие). Однако выполнение экспериментальных исследований не всегда целесообразно, а иногда и невозможно на существующем оборудовании, так как физико-механические свойства металлических сферических порошков из материалов с высоким уровнем прочности не могут быть точно определены экспериментально при различных схемах нагружения. В этом случае возникает необходимость заменить физическое моделирование математическим.

Цель нашей работы — создание расчетно-экспериментальной методики определения реологических характеристик порошкового материала по известным механическим характеристикам материала частиц исходя из анализа процесса деформации идеализированной модели порошкового тела.

#### Методика проведения исследований

Процесс уплотнения порошковых материалов условно может происходить по двум механизмам — межчастичному сдвигу (структурная деформация) и в виде пластической деформации материала самих частиц порошка. Реализация этих механизмов в большей или меньшей степени определяется мно-

гими факторами, среди которых основными являются относительная плотность, форма и размер частиц. Механические характеристики порошкового материала зависят от многих факторов, среди которых особенно следует выделить свойства материала частиц, их форму и размер.

Исследование процесса уплотнения порошковых материалов с частицами различного размера и формы показало, что размер и форма частиц порошковых материалов оказывают существенное влияние на протяженность этапа структурного деформирования [1]. При этом этап структурного деформирования протяженнее для более рыхлых в состоянии утряски материалов. Начиная с некоторой величины относительной плотности кривые уплотнения материалов одного химического состава с частицами различного размера и формы практически совпадают. Практическое совпадение кривых уплотнения для сравнительно высоких плотностей указывает на идентичность пластического сопротивления деформированию материалов с различными исходными размерами и формой частиц.

Для исследования был выбран порошок алюминия АКВ-2.5 фракции 0,63–1,0 мм. Химический состав порошка АКВ-2.5:

<i>Наименования показателя</i>	<i>Химический состав % масс</i>
Активный алюминий	не менее 98,75
Примеси, не более:	
Железо	0,45
Кремний	0,30
Медь	0,30
Графит	0,10
Влага	0,10

Механические характеристики материала частиц: модуль нормальной упругости —  $E = 70000$  МПа; коэффициент Пуассона — 0,33; предел текучести —  $\sigma_s = 73$  МПа. На рис. 1 представлены кривые уплотнения порошков алюминия марки АКВ-2.5 со средними размерами частиц 50 и 100 мкм.

Как следует из рис. 1, для порошка АКВ-2.5 различного гранулометрического состава кривые практически совпадают начиная от значения относительной плотности 0,74.

Для разработки расчетно-экспериментальной методики определения реологических характери-

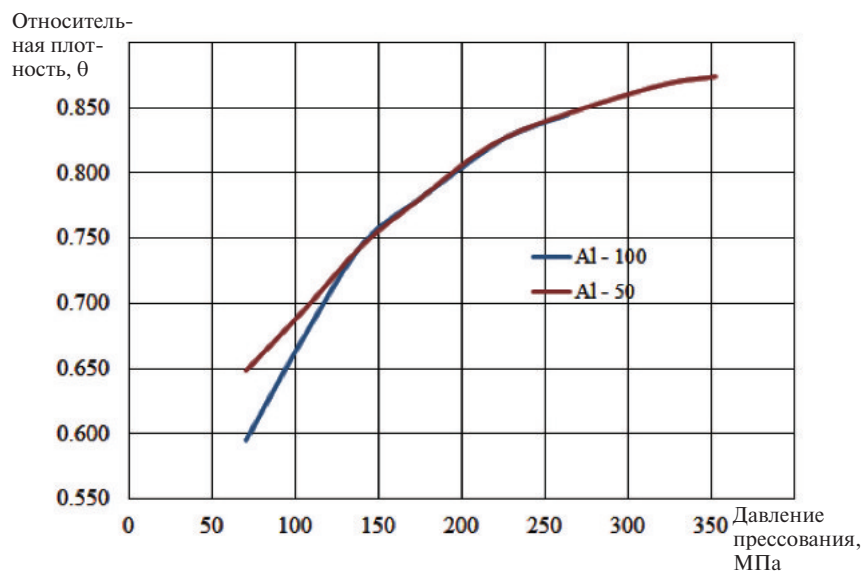


Рис. 1. Кривые уплотнения порошков с частицами различного размера и формы

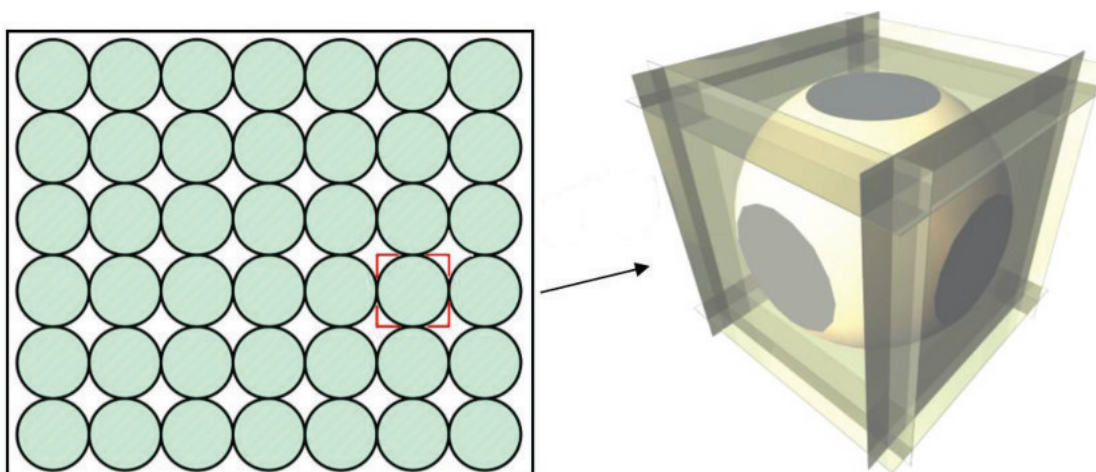


Рис. 2. Модель порошкового тела и его представительная элементарная ячейка

стик порошкового материала рассмотрим идеализированную модель порошкового тела, состоящего из сферических частиц одинакового размера. При приложении нагрузки уплотнение такого тела в замкнутом объеме осуществляется за счет пластической деформации материала частиц.

#### Математическое моделирование процесса уплотнения порошкового тела

Математическое моделирование при анализе процесса деформации элементарной ячейки

осуществлялось в коммерческом программном пакете ABAQUS версии 16.4 [12]. В качестве элементарной ячейки выбран кубик с частицей сферической формы, окруженной многогранной порой. При решении данной задачи был реализован неявный метод (implicit) в трехмерной постановке. На рис. 2 показана модель порошкового тела и его представительная элементарная ячейка.

Построенная конечно-элементная модель элементарной ячейки содержит 8310 элементов

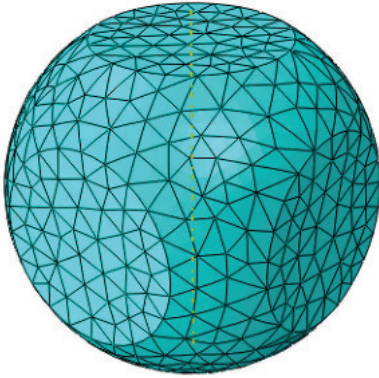


Рис. 3. Конечно-элементная модель элементарной ячейки

типа C3D10 и 12283 узлов. Условия гидростатического нагружения моделировались заданием граничных условий в перемещениях: элементарная ячейка равномерно сжимается абсолютно жесткими поверхностями до определенного перемещения с трех сторон с постоянной скоростью 3 мм/с. Контактное трение при деформации ячейки не учитывалось. На рис. 3 показана конечно-элементная модель элементарной ячейки.

Для построения кривых предельного состояния порошковых материалов использовано условие текучести, заданное лемнискатой. Возможность представления условия текучести в виде поверхности вращения лемнискаты показана в работе [10]. Уравнение

$$T^2 = - \left( (\sigma_0 - q_s)^2 + \frac{(p_s + q_s)^2}{2} \right) + \sqrt{2(p_s + q_s)^2(\sigma_0 - q_s)^2 + \frac{(p_s + q_s)^4}{4}}, \quad (1)$$

где  $T$  — интенсивность касательных напряжений;  $p_s, q_s$  — пределы текучести соответственно при

гидростатическом сжатии и растяжении;  $\sigma_0$  — среднее напряжение) представляет собой условие текучести, заданное лемнискатой, а на рис. 4 показана геометрическая интерпретация поверхности текучести на плоскости  $T$ – $\sigma_0$ .

При такой интерпретации предел уплотнения  $c$  и пластический сдвиг  $\tau_s$  могут быть вычислены путем исследования уравнения (1) на экстремум. Результаты исследования представлены уравнениями (2) и (3):

$$c = p_s \sqrt{\frac{3}{8}}; \quad (2)$$

$$\tau_s = \frac{p_s}{\sqrt{8}}. \quad (3)$$

Следует отметить, что при расчете  $\tau_s$  по формуле (3) должно выполняться неравенство ( $\tau_s \leq \tau_s^{\text{комп}}$ ), где  $\tau_s^{\text{комп}}$  — предел текучести компактного материала при чистом сдвиге. Для кривой текучести, заданной лемнискатой, это неравенство корректно выполняется при относительных плотностях не более 0,9, так как  $p_s$ , существенно возрастая, увеличивает предел уплотнения  $c$  и пластический сдвиг  $\tau_s$ . Поэтому при моделировании был рассмотрен интервал относительных плотностей от 0,74 до 0,9.

#### Результаты математического моделирования гидростатического сжатия представительной ячейки порошкового материала

Стадии развития пластических деформаций на примере представительной ячейки с плотностью 0,74 показаны на рис. 5. На рис. 6 представлены зависимости предела текучести при гидростатическом сжатии от относительной плотности порошкового тела.

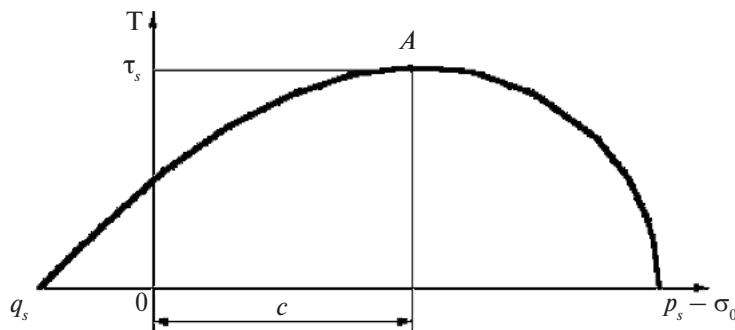


Рис. 4. Кривая текучести, заданная лемнискатой

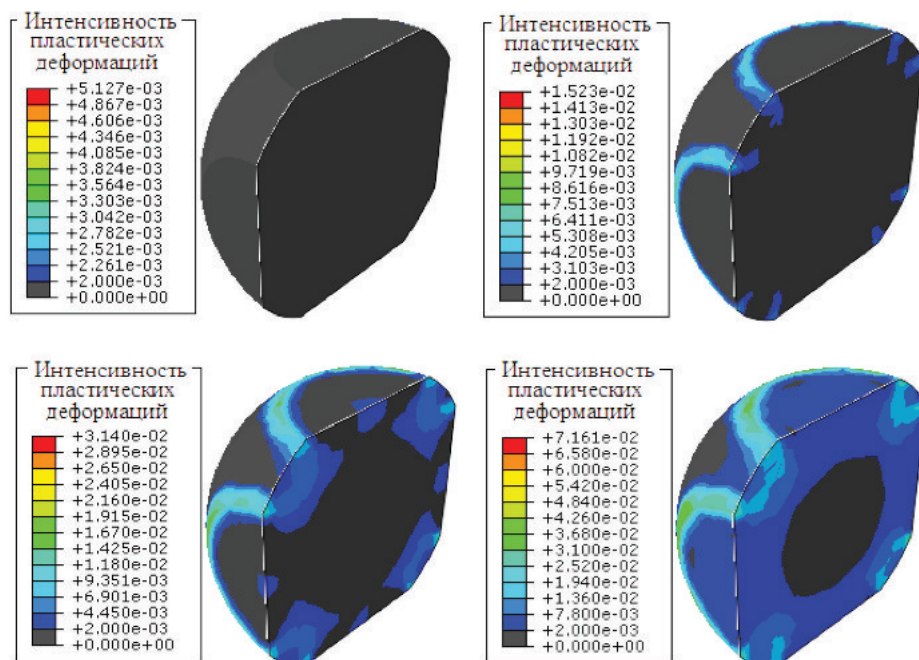


Рис. 5. Стадии развития пластических деформаций в представительной ячейке при гидростатическом сжатии (упругая область — темная)

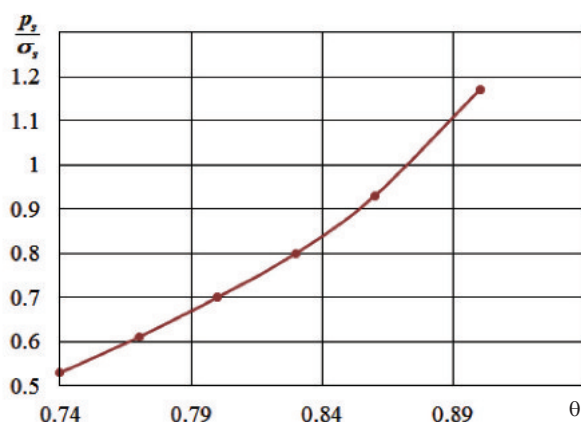


Рис. 6. Зависимость предела текучести при гидростатическом сжатии  $p_s$  от относительной плотности  $\theta$

Зная предел текучести порошковых материалов при гидростатическом сжатии  $p_s$  для различных плотностей, можно построить кривые предельного состояния порошкового материала в виде лемнискаты. Для упрощения модели при рассмотрении процессов сжатия построение лемнискаты выполнено из начала координат вследствие незначительного сопротивления рас-

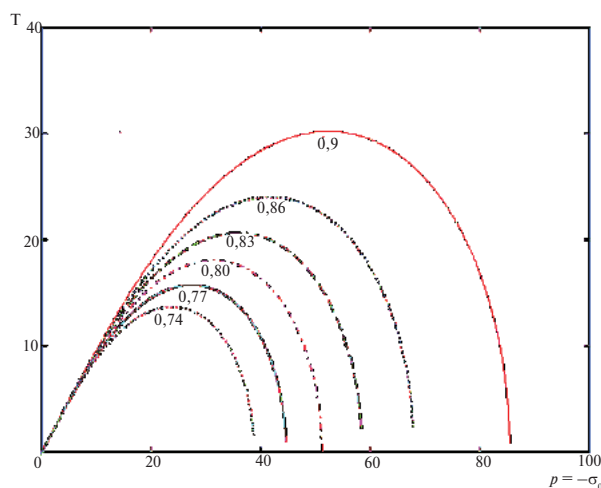


Рис. 7. Кривые предельного состояния порошкового материала при разных плотностях

тяжению порошкового тела. На рис. 7 представлены кривые предельного состояния исследованного порошкового материала при разных плотностях на плоскости  $p$ – $T$ .

В работе [13] было показано, что процесс деформирования порошковых и пористых материалов можно исследовать с использованием



программного пакета ABAQUS и встроенной в него реологической модели Друкера–Прагера, которая предназначена для описания упруго-пластического поведения материалов. Для определения ее параметров, кроме сведений о пределе текучести и условиях перехода материала в пластическое состояние, необходимо иметь информацию и об упругих характеристиках порошкового тела [12].

В теории упругости для описания напряженно-деформированного состояния используются модуль нормальной упругости  $E$ , коэффициент Пуассона  $\nu$ , модуль объемной деформации  $K$  и модуль сдвига  $G$ . Определим модуль объемной деформации  $K$  из условий гидростатического сжатия, а модуль нормальной упругости  $E$  и коэффициент Пуассона — из условий одноосного сжатия. Для определения упругих характеристик была использована та же модель представительного элемента из компактного материала: кубик с частицей сферической формы окруженной многогранной порой.

Результаты численных экспериментов при гидростатическом и одноосном сжатии представлены на рис. 8 а, б. Для процесса гидростатического сжатия: интенсивность касательных напряжений  $T = 0$ ; гидростатическое давление  $\sigma_0 = \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ ; а для процесса одноосного сжатия  $T = \frac{\sigma_z}{\sqrt{3}}$ ;  $\sigma_0 = \frac{\sigma_z}{3}$ .

В области упругой деформации (линейный участок на рис. 8 а, б) выполняется закон Гука:

$\sigma_0 = K \varepsilon_0$ ;  $\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E}$ , где  $\varepsilon_0 = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$  — объемная деформация;  $K$  — модуль объемной деформации, МПа;  $E$  — модуль упругости, МПа;  $\sigma_z$ ,  $\varepsilon_z$  — приложенное напряжение и относительная деформация вдоль оси  $z$  при одноосном сжатии.

Используя зависимости приложенного напряжения  $\sigma$  от относительной деформации  $\varepsilon$ , представленные на рис. 8, можно вычислить модуль объемной деформации  $K$  и модуль упругости  $E$  для порошковых материалов различной плотности.

Коэффициент Пуассона  $\nu$  и модуль сдвига  $G$  рассчитываем по формулам [2]

$$\nu = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{E}{3K} \right); \quad G = \frac{E}{2(1 + \nu)}.$$

Зависимости параметров упругих характеристик порошкового материала от пористости  $P$  представлены в виде графиков на рис. 9

Полученные зависимости механических характеристик порошкового материала от плотности использованы для определения параметров модели Друкера–Прагера и проведения математического моделирования процесса пресования порошкового материала в закрытой матрице.

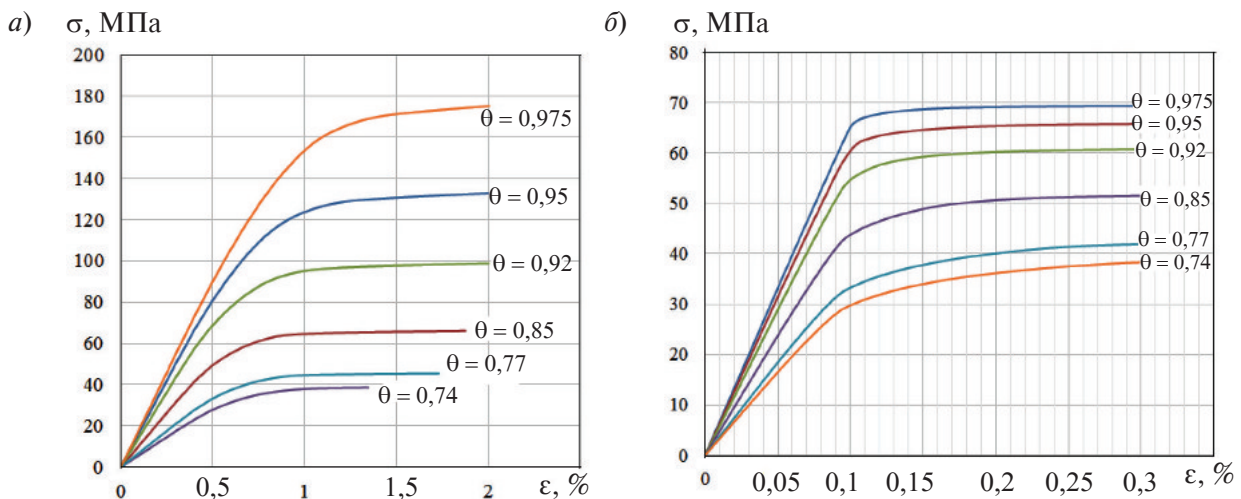


Рис. 8. Кривые нагружения представительной ячейки различной плотности  $\theta$ : а) при гидростатическом сжатии; б) при одноосном сжатии



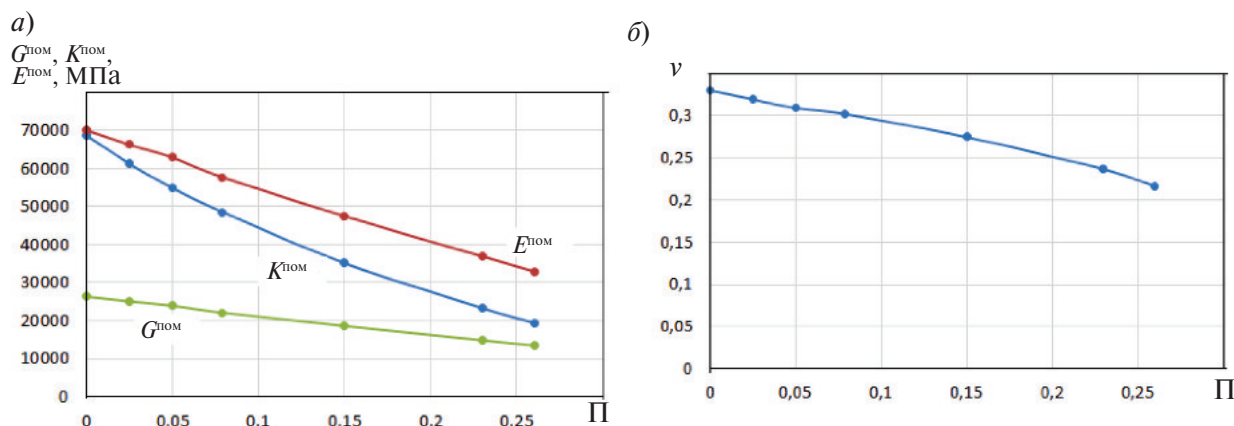


Рис. 9. Зависимости упругих характеристик порошкового материала от пористости

### Сравнительный анализ результатов моделирования и экспериментов процесса прессования в закрытой матрице

Математическое моделирование процесса прессования проводилось с использованием программного пакета ABAQUS и встроенной в него модели материала «DRUCKER-PRAGER» с подпрограммой, разработанной авторами [13]. В табл. 2 указаны идентификационные параметры модели текучести, использованные для задания свойств материалов при моделировании процесса прессования порошка АКВ-2.5 в закрытой матрице. Задача решалась в трехмерной постановке.

#### Параметры реологической модели Друкера–Прагера

Относительная плотность $\rho$	$P_a$ , МПа	$P_b$ , МПа	$d$ , МПа	$\beta$ , градус	$m$ , МПа
0,74	23,69	38,69	0	59,6	15,10
0,77	27,27	44,53	0	59,6	17,26
0,80	31,29	51,10	0	59,6	19,81
0,83	35,76	58,4	0	59,6	22,64
0,86	41,57	67,89	0	59,6	26,31
0,90	52,30	85,41	0	59,6	33,11

На рис. 10 показано осевое сечение цилиндрической прессовки из порошка АКВ-2.5.

Зависимость относительной плотности цилиндрической заготовки от давления прессования представлена на рис. 11.

Как видно из графика (см. рис. 11), результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными. Отклонение значений, полученных при моделировании, от

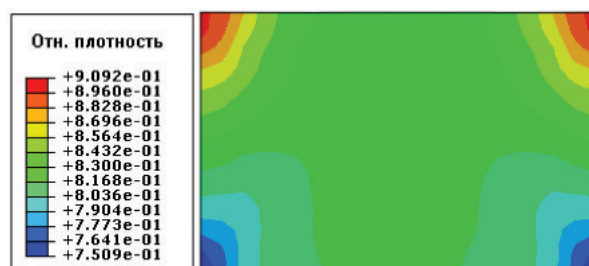


Рис. 10. Распределение относительной плотности в осевом сечении цилиндрической прессовки из порошка АКВ-2.5

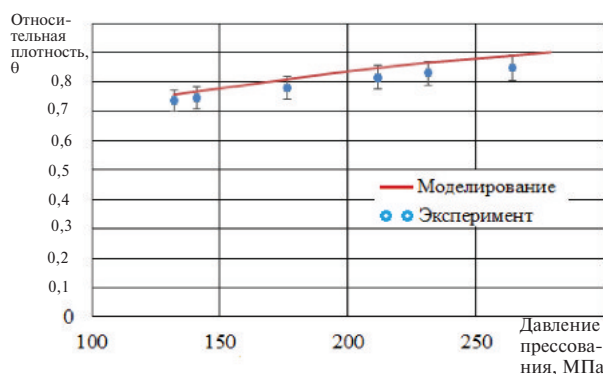


Рис. 11. Зависимость относительной плотности цилиндрической заготовки из порошка АКВ-2.5 от давления прессования

значений, найденных экспериментально, не превышает 6%.

### Заключение

В результате исследования разработана расчетно-экспериментальная методика опреде-

ния реологических характеристик порошкового материала.

Рассмотрена идеализированная модель порошкового тела, с помощью которой осуществлено математическое моделирование процесса деформации элементарной ячейки в виде кубика со сферической частицей, окруженной многогранной порой. На основе результатов моделирования деформации элементарной ячейки при гидростатическом нагружении построена кривая предельного состояния порошкового тела, заданная лемниской. При такой интерпретации предел уплотнения и предел текучести при пластическом сдвиге могут быть вычислены путем исследования уравнения лемнискаты на экстремум. Для порошкового материала АКВ-2.5 построены кривые предельного состояния в интервале относительных плотностей от 0,74 до 0,9.

По результатам численных экспериментов для порошкового материала АКВ-2.5 модуль

объемной деформации определен из условий гидростатического сжатия элементарной ячейки, а модуль нормальной упругости и коэффициент Пуассона — из условия ее одноосного сжатия.

Полученные механические характеристики порошкового материала АКВ-2.5 использованы для математического моделирования процесса прессования с помощью пакета программ ABAQUS. Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными по прессованию порошкового материала АКВ-2.5 в замкнутой матрице. Это свидетельствует о практической возможности применять разработанную расчетно-экспериментальную методику определения реологических характеристик порошкового тела по известным значениям предела текучести материала частиц для математического моделирования процессов уплотнения порошковых материалов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Цеменко В.Н.** Деформирование порошковых сред. [Deformation of powder environments]. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2001. 104 с.
2. **Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А.** Технология послойного электронно-лучевого синтеза порошковых изделий в вакууме. // Заготовительные производства в машиностроении. 2014. № 8. С. 40–45.
3. **Соколов Ю.А., Кондратьев С.Ю., Лукьянов А.А.** Получение изделий из композиционных материалов методом электронно-лучевого синтеза и исследование их свойств. // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 2. С. 35–41.
4. **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, № 11. С. 91–96.
5. **Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Кокорин В.Н.** Прессование гетерофазных увлажненных порошковых металлических смесей для повышения качества высокоплотных заготовок с использованием метода интенсивного уплотнения. // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2011. № 6. С. 12–16.
6. **Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Кокорин В.Н., Сизов Н.А.** Исследование процесса уплотнения при ультразвуковом воздействии на увлажненную порошковую среду. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 178. С. 148–155.
7. **Рудской А.И., Кокорин В.Н., Кондратьев С.Ю., Филимонов В.И., Кокорин А.В.** Прессование гетерофазных увлажненных железных порошков при использовании метода интенсивного уплотнения. // Научные технологии в машиностроении. 2013. № 5 (23). С. 13–20.
8. **Кондратьев С.Ю., Горынин В.И., Попов В.О.** Оптимизация параметров поверхностно-упрочненного слоя при лазерной закалке деталей. // Сварочное производство. 2011. № 3. С. 11–15.
9. **Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А.** Алгоритм и технологические процессы синтеза порошковых деталей электронным лучом в вакууме. // Технология машиностроения. 2015. № 1. С. 11–16.
10. **Рудской А.И., Рыбин Ю.И., Цеменко В.Н.** Теория и моделирование процессов деформирования порошковых и пористых материалов. СПб.: Наука, 2012. 415 с.
11. **Рыбин Ю.И., Цеменко В.Н.** Предельное состояние уплотняемых порошковых сред. Обработка сплошных и слоистых материалов: Межвузовский международный сборник научных трудов. Магнитогорск: МГТУ, 2003. С. 74–80.
12. **Abaqus Analysis User's Guide. Volume 3: Materials. Abaqus 6.14.**
13. **Фук Д.В., Ганин С.В., Цеменко В.Н.** Моделирование и исследование процесса уплотнения порошковых материалов с использованием программного пакета ABAQUS // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2016. №1(238). С. 100–110. DOI 10.5862/JEST.238.10.

## REFERENCES

1. **Tsemenko V.N.** Deformirovaniye poroshkovykh sred [Deformation of powder environments]. SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2001. 104 s. (rus.)
2. **Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Sokolov Yu.A.** Tekhnologiya posloynnogo elektronno-luchevogo sinteza poroshkovykh izdeliy v vakuumе [Technology of layer-by-layer electron beam synthesis of powder products in vacuum]. *Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyenii*. 2014. № 8. S. 40–45. (rus.)
3. **Sokolov Yu.A., Kondratyev S.Yu., Lukyanov A.A.** Polucheniye izdeliy iz kompozitsionnykh materialov metodom elektronno-luchevogo sinteza i issledovaniye ikh svoystv [Producing of details from composite materials by method of electron beam synthesis and research of their properties]. *Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyenii*. 2015. № 2. S. 35–41. (rus.)
4. **Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Sokolov Yu.A., Kopayev V.N.** Osobennosti modelirovaniya protsessa posloynnogo sinteza izdeliy elektronnykh luchom [Features of modeling of process of layer-by-layer synthesis of products electronic beam]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2015. T. 85, № 11. S. 91–96. (rus.)
5. **Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Kokorin V.N.** Pressovaniye geterofaznykh uvlazhnennykh poroshkovykh metallicheskiykh smesey dlya povysheniya kachestva vysokoplotnykh zagotovok s ispolzovaniyem metoda intensivnogo uplotneniya [Pressing of the heterophase moistened powder metal mixes for improvement of quality of high density preparations with use of a method of intensive consolidation]. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal s prilozheniyem*. 2011. № 6. S. 12–16. (rus.)
6. **Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Kokorin V.N., Sizov N.A.** Issledovaniye protsessa uplotneniya pri ultrazvukovom vozdeystviy na uvlazhnennuyu poroshkovuyu sredu [Research of process of consolidation at ultrasonic impact on the humidified powder medium]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2013. № 178. S. 148–155. (rus.)
7. **Rudskoy A.I., Kokorin V.N., Kondratyev S.Yu., Filimonov V.I., Kokorin A.V.** Pressovaniye geterofaznykh uvlazhnennykh zheleznykh poroshkov pri ispolzovanii metoda intensivnogo uplotneniya [Pressing of the heterophase moistened iron powders when using a method of intensive consolidation]. *Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyenii*. 2013. № 5 (23). S. 13–20. (rus.)
8. **Kondratyev S.Yu., Gorynin V.I., Popov V.O.** Optimizatsiya parametrov poverkhnostno-uprochnennogo sloya pri lazernoy zakalke detaley. [Optimization of the parameters of the surface-hardened layer in laser quenching of components]. *Svarochnoye proizvodstvo*. 2011. № 3. S. 11–15. (rus.)
9. **Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Sokolov Yu.A.** Algoritm i tekhnologicheskiye protsessy sinteza poroshkovykh detaley elektronnykh luchom v vakuumе [Algorithm and technological processes of synthesis of powder details an electronic beam in vacuum]. *Tekhnologiya mashinostroyeniya*. 2015. № 1. S. 11–16. (rus.)
10. **Rudskoy A.I., Rybin Yu.I., Tsemenko V.N.** Teoriya i modelirovaniye protsessov deformirovaniya poroshkovykh i poristykh materialov. [Theory and modeling of processes of deformation of powder and porous materials]. SPb.: Nauka, 2012. 415 s. (rus.)
11. **Rybin Yu.I., Tsemenko V.N.** Predelnoye sostoyaniye uplotnyayemykh poroshkovykh sred. Obrabotka sploshnykh i sloistykh materialov: Mezhdunarodnyy mezhduzavodskiy sbornik nauchnykh trudov [Limit condition of the condensed powder mediums. Magnitogorsk: MG TU, 2003. S. 74–80. (rus.)
12. Abaqus Analysis User's Guide. Volume 3: Materials. Abaqus 6.14.
13. **Fuk D.V., Ganin S.V., Tsemenko V.N.** Modelirovaniye i issledovaniye protsessa uplotneniya poroshkovykh materialov s ispolzovaniyem programmnogo paketa ABAQUS [Modeling and research of process of consolidation of powder materials with use of a software package of ABAQUS]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2016. № 1(238). S. 100–110. DOI 10.5862/JEST.238.10.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

**ЦЕМЕНКО Валерий Николаевич** — доктор технических наук профессор, заведующий кафедрой Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

E-mail: plast-ftim@mail.ru

**TSEMENKO Valerii N.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

E-mail: plast-ftim@mail.ru

**ФУК Доан Ван** — аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

E-mail: fukdoan@mail.ru

**FUK Doan Van** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.  
E-mail: fukdoan@mail.ru

**ГАНИН Сергей Владимирович** — кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.  
195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.  
E-mail: S.V.Ganin@gmail.com

**GANIN Sergei V.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.  
E-mail: S.V.Ganin@gmail.com

DOI 10.5862/JEST.243.14

УДК 621.762

*В.Н. Цеменко, Д.В. Фук, С.В. Ганин*

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭКСТРУЗИИ  
ПОРОШКОВЫХ И ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ.  
ЧАСТЬ 2. ПОРИСТОЕ ТЕЛО**

*V.N. Tsemenko, D.V. Fuk, S.V. Ganin*

**DETERMINING THE RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS AND MODELING  
THE EXTRUSION OF POWDER AND POROUS MATERIALS.  
PART 2. POROUS BODY**

В работе выполнено исследование процессов пластической деформации металлических материалов с использованием численных методов, в частности методом конечных элементов. На основе анализа процесса деформации идеализированной модели пористого тела разработана расчетно-экспериментальная методика определения реологических характеристик пористого материала по известным механическим характеристикам материала частиц. Рассмотрена идеализированная модель пористого тела, с помощью которой осуществлено математическое моделирование процесса деформации представительной элементарной ячейки в виде 1/8 куба со сферической порой. Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными по прессованию пористого материала АКБ-2.5. Это свидетельствует о практической возможности применять при математическом моделировании процессов уплотнения пористых материалов разработанную расчетно-экспериментальную методику определения реологических характеристик пористого тела по известным значениям предела текучести материала частиц.

ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ; КОМПАКТИРОВАНИЕ; МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ; ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ; ПЛОТНОСТЬ.

The paper investigates the plastic deformation processes in metal materials using the numerical methods, in particular, the finite-element method. The calculation and experimental technique developed for determining the rheological characteristics of a porous material is performed according to the well-known mechanical characteristics of the material's particles on the basis of analyzing the deformation of an idealized model of a porous body. We have considered an idealized model of the porous body, based on which we simulated the deformation process of a representative elementary cell shaped as 1/8th of a cube with a spherical pore. The simulation results are in good agreement with the experimental data on the pressing of the AKB-2.5 porous material. This means it is possible to use the developed calculation and experimental technique for determining the rheological characteristics of a porous body from the known yield point values of the particle material for simulating the consolidation processes of porous materials.

POWDER METALLURGY; COMPACTION; MATHEMATICAL MODELLING; PLASTIC DEFORMATION; DENSITY.

**Введение**

Разработка новых технологий порошковой металлургии позволяет эффективнее использо-

вать ее возможности по созданию материалов с повышенными эксплуатационными свойствами [1–9]. Для отработки новых технологических процессов, в том числе пластической деформа-



ции порошковых и пористых материалов, широко применяется математическое моделирование. Это позволяет изучать влияние различных технологических факторов на свойства заготовок без проведения дорогостоящих экспериментов.

В первой части данного исследования была представлена методика определения реологических характеристик порошковых материалов с использованием структурно-феноменологического подхода, основанного на идеализированной модели с элементарной ячейкой в виде кубика с частицей сферической формы, окруженной многогранной порой. Практическое применение такой модели реализовано для процесса уплотнения порошкового материала при холодной пластической обработке.

В практике порошковой металлургии широко применяется метод горячего уплотнения. При горячем уплотнении процессы компактирования и спекания совмещаются в одной операции, при этом давление уплотнения существенно снижается по сравнению с холодным прессованием. Горячее компактирование часто служит единственным методом изготовления плотных заготовок из порошковых материалов с низкими пластическими свойствами. Поскольку в процессе горячей деформации происходит частичное спекание уплотняемого порошка, то в этом случае его можно рассматривать как пористое тело, которое подчиняется эллиптическому условию пластичности [10]. В этом случае определение реологических характеристик может быть реализовано расчетно-экспериментальным методом при моделировании представительного элемента пористого тела в процессах нагружения. В работе [11] рассмотрена модель пористого тела с известным значением предела текучести матричного материала, на основе которой с использованием программного пакета Marc (разработка компании MSC Software) определены зависимости предела текучести при гидростатическом сжатии и предела текучести при чистом сдвиге от относительной плотности пористого железа. Полученные реологические характеристики пористого материала позволили моделировать процессы холодного и горячего деформирования в программном пакете Multidef (разработка Санкт-Петербургского политехни-

ческого университета), задавая предел текучести матричного материала при соответствующей процессу температуре. Однако реализованный подход, использующий два программных пакета, требует дополнительных операций, связанных с переносом данных из одного пакета в другой, и ограничивает возможности решения многих задач математического моделирования процессов пластической деформации пористых тел. При решении таких задач целесообразно использовать более универсальный программный продукт.

Целью представляемой работы является применение программного пакета ABAQUS для анализа идеализированной модели пористого тела при разработке расчетно-экспериментальной методики определения реологических характеристик пористого материала по известным механическим характеристикам матричного материала.

#### **Методика проведения исследования и свойства материала**

Воспользуемся численным методом, использованным Ю.И. Рыбиным для определения зависимости предела текучести и упругих характеристик пористых материалов от относительной плотности, в соответствии с которым исследовалась представительная элементарная ячейка в виде  $1/8$  куба со сферической порой [11]. Элементарная ячейка имела размеры  $100 \times 100 \times 100$  мм; радиус сферической поры варьировали в пределах R36–R80, чтобы соответствующие пористости изменялись от 0,025 до 0,268. На рис. 1 показана модель пористого тела и его представительная элементарная ячейка.

#### **Математическое моделирование процесса деформации пористого тела**

Математическое моделирование выполняли в коммерческом программном пакете ABAQUS версии 16.4. При решении задачи был реализован неявный метод (implicit) в трехмерной постановке. Контактное трение при деформации ячейки не учитывалось.

Определение реологических характеристик пористых материалов возможно при реализации условия чистого сдвига и трехосного сжатия в упругой и упругопластической зонах. Схемы нагружения показаны на рис. 2.

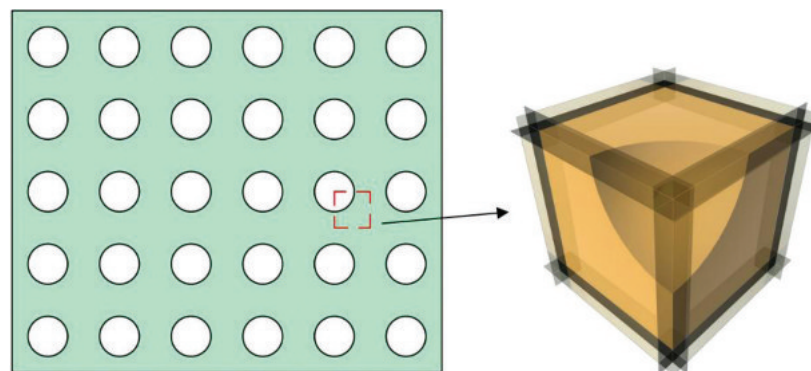


Рис. 1. Модель пористого тела и его представительная элементарная ячейка

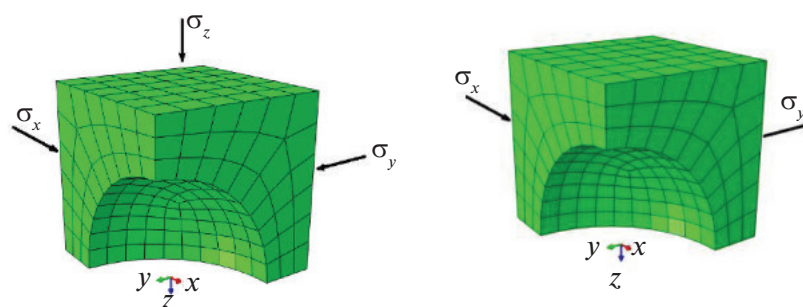


Рис. 2. Схема испытаний элементарной ячейки:  
а) гидростатическое сжатие; б) чистый сдвиг

В качестве матричного материала использован технический алюминий марки А1. Механические характеристики материала при нормальных условиях: модуль упругости –  $E = 70000$  МПа; коэффициент Пуассона – 0,33, предел текучести – 73 МПа.

#### Определение предела текучести при гидростатическом сжатии

Условия гидростатического нагружения моделировались заданием граничных условий в перемещениях, одинаковых по трем граням кубической ячейки. Скорость перемещения составляет 3 мм/с на каждой грани. Схема гидростатического сжатия представлена на рис. 2, а.

Напряжение  $p$  по граням кубика вычисляется как отношение суммы сил  $P_i$  в узловых точках сетки конечных элементов к площади грани:

$$p = \frac{\sum P_i}{F},$$

где площадь грани  $F = 100 \times 100$  мм<sup>2</sup>.

Стадии развития пластической деформации при гидростатическом сжатии на кубической ячейке со сферической порой R70 показаны на рис. 3.

На первой стадии происходила только упругая деформация (рис. 3, а). С увеличением нагрузки зона пластической деформации распространяется от контура поры к грани кубика (рис. 3, б). Далее зона пластической деформации интенсивно расширяется по мере увеличения приложенного внешнего нагружения (рис. 3, в, г). При достижении определенной степени деформации размеры зоны пластической деформации стабилизируются. При этом значении приложенной внешней нагрузки начинается пластическое течение материала. Дальнейший рост внешней нагрузки обусловлен уменьшением размера поры.

На рис. 4 представлена зависимость предела текучести кубика от относительной плотности при гидростатическом сжатии. Для сравнения были построены кривые зависимости по данным расчета Ю.И. Рыбина и Б.А. Друянова. Здесь  $p_s^{nm}$  и  $\sigma_s$  – со-

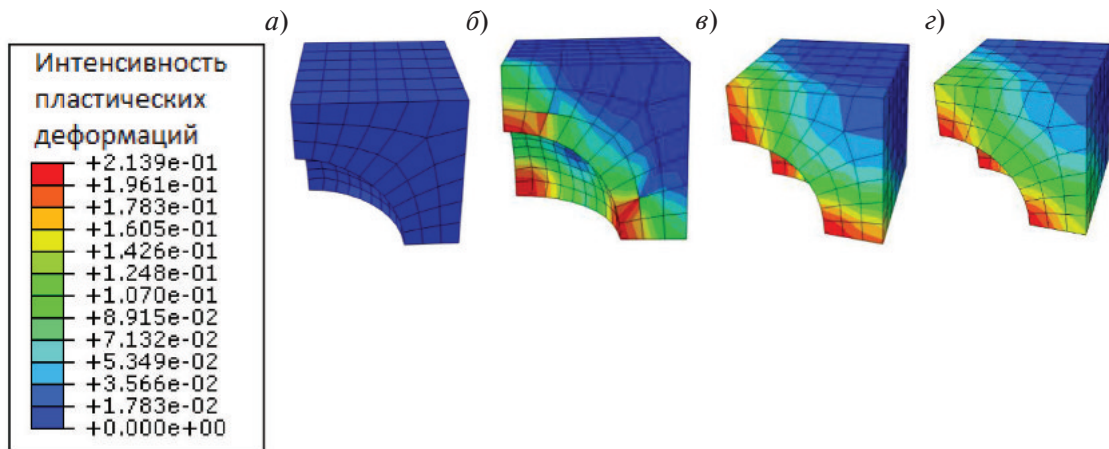


Рис. 3. Стадии развития пластической деформации в кубической ячейке со сферической порой при гидростатическом сжатии (упругая область в электронном виде – синяя)

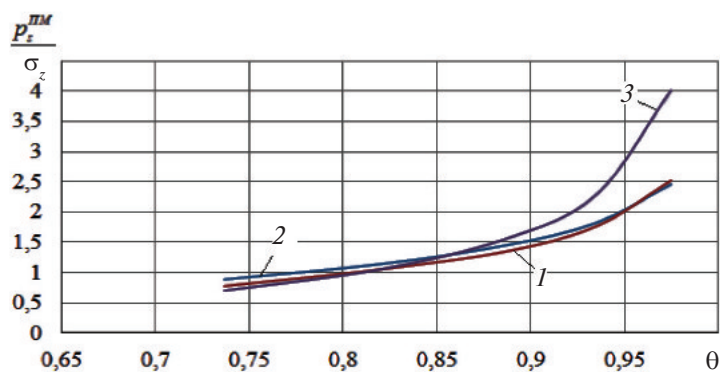


Рис. 4. Зависимости пределов текучести кубической ячейки при гидростатическом сжатии от относительной плотности  $\theta$ :  
1 – по данным моделирования; 2 – по данным расчета Ю.И. Рыбина [10]; 3 – по данным расчета А.Б. Друянова [11]

ответственно пределы текучести пористого и компактного материалов при гидростатическом сжатии.

Как видно из рис. 4, все кривые имеют одинаковый вид. При изменении относительной плотности в пределах от 0,74 до 0,975 предел текучести при гидростатическом сжатии изменяется от  $0,75 \sigma_s$  до  $2,6 \sigma_s$ . Результаты, найденные по данным расчета Ю.И. Рыбина, и результаты, полученные нами при моделировании, совпадают практически полностью.

#### Определение предела текучести при чистом сдвиге.

Условие чистого сдвига задавали граничными условиями в перемещениях (рис. 2, б). Стадии

развития пластической деформации на кубической ячейке со сферической порой R36 показаны на рис. 5.

На начальной стадии по́ра играет роль концентратора напряжений (см. рис. 5, а). Далее формируется вторая зона пластических деформаций – на стыке граней, к которым приложена внешняя нагрузка (см. рис. 5, б). Постепенно эти две зоны расширяются в направлении друг к другу (рис. 5, в). Через некоторое время эти зоны соединяются в одну, и процесс стабилизируется. Напряжение, соответствующее этому состоянию материала, может быть принято за предел текучести при чистом сдвиге.

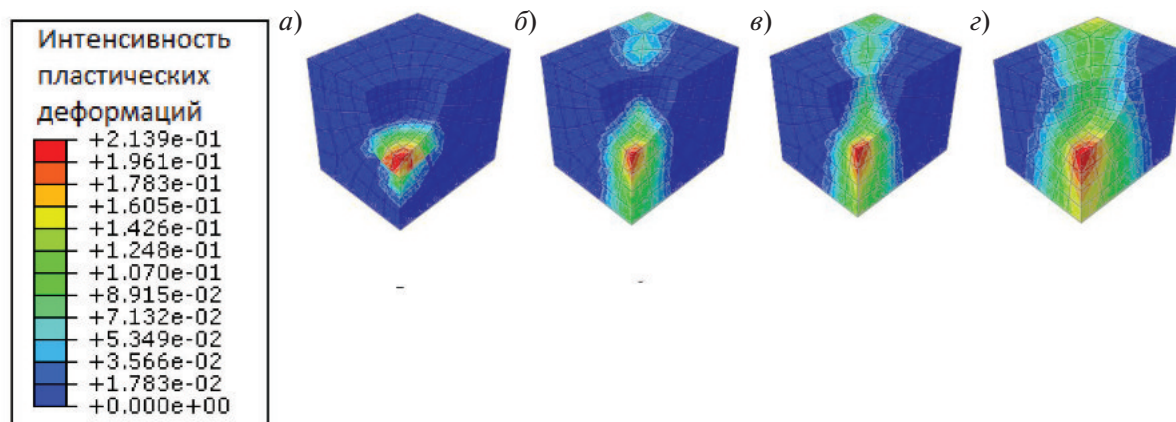


Рис. 5. Стадии развития пластической деформации в кубической ячейке со сферической порой при чистом сдвиге (в электронном виде упругая область — синяя)

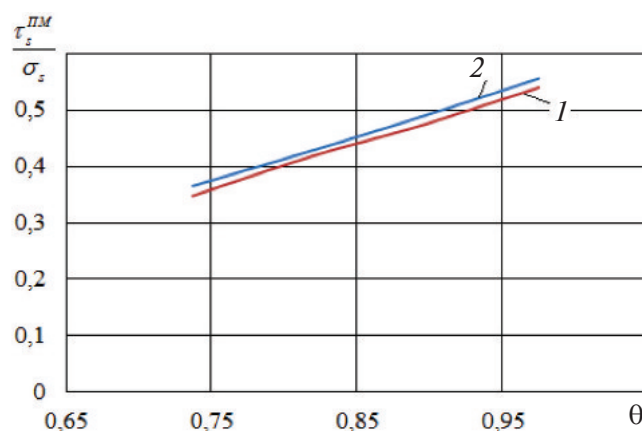


Рис. 6. Зависимость предела текучести (1 — по данным моделирования, 2 — по данным расчета Ю.И. Рыбина [11]) кубической ячейки при чистом сдвиге от относительной плотности  $\theta$

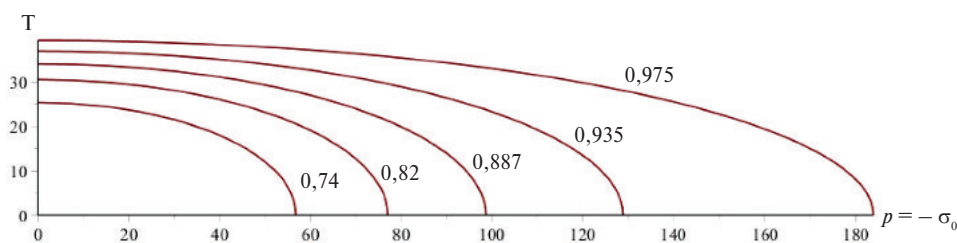


Рис. 7. Кривые текучести кубической ячейки для исследованного диапазона относительной плотности

На рис. 6 представлена зависимость предела текучести при чистом сдвиге от плотности. Для сравнения была построена кривая зависимости по данным расчета, приведенного в работе [11]. Здесь  $\tau_s$  и  $\sigma_s$  — пределы текучести соответственно

пористого и компактного материалов при чистом сдвиге.

На рис. 7 показаны кривые текучести в виде эллипсов, построенных по двум точкам, находящимся на осях  $T$  и  $\sigma_0$ , — пределам текучести при гидростатическом сжатии и чистом сдвиге.

Для использования программного пакета ABAQUS и встроенной в него реологической модели Друкера–Прагера, кроме пределов текучести материала, необходимо определить и его упругие характеристики [12]. Модуль объемной деформации  $K$  определим из условий гидростатического сжатия, а модуль нормальной упругости  $E$  и коэффициент Пуассона – из условий одноосного сжатия кубической ячейки.

**Определение модуля объемной деформации  $K$ .** Результаты расчета на гидростатическое сжатие представлены на рис. 8, а в виде зависимости приложенного напряжения  $\sigma_z$  от относительной деформации  $\varepsilon$ . Принято:  $T = 0$ ,  $\sigma_0 = \sigma_z = \sigma_y = \sigma_x$ .

В области упругой деформации (в ней зависимость на рис. 8, а имеет линейный характер) выполняется закон Гука

$$\sigma_0 = K\varepsilon_0,$$

где  $\varepsilon_0 = \varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z$  – объемная деформация.

Пользуясь графиком зависимости приложенного напряжения  $\sigma_z$  от относительной деформации  $\varepsilon$ , можно вычислить модуль объемной деформации  $K$  для различных значений плотности материала.

**Определение модуля упругости  $E$  и коэффициента Пуассона  $\nu$ .** Результаты численных экспериментов одноосного сжатия представлены на рис. 8, б в виде зависимости приложенного напряжения  $\sigma_z$  от относительной деформации  $\varepsilon$ . Для процесса одноосного сжатия верны соотношения

$$T = \frac{\sigma_z}{\sqrt{3}} \text{ и } \sigma_0 = \frac{\sigma_z}{3}.$$

В области упругой деформации (то есть там, где зависимость на рис. 8, б линейна) выполняется закон Гука

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E}.$$

Воспользуемся графиком зависимости приложенного напряжения  $\sigma_z$  от относительной де-

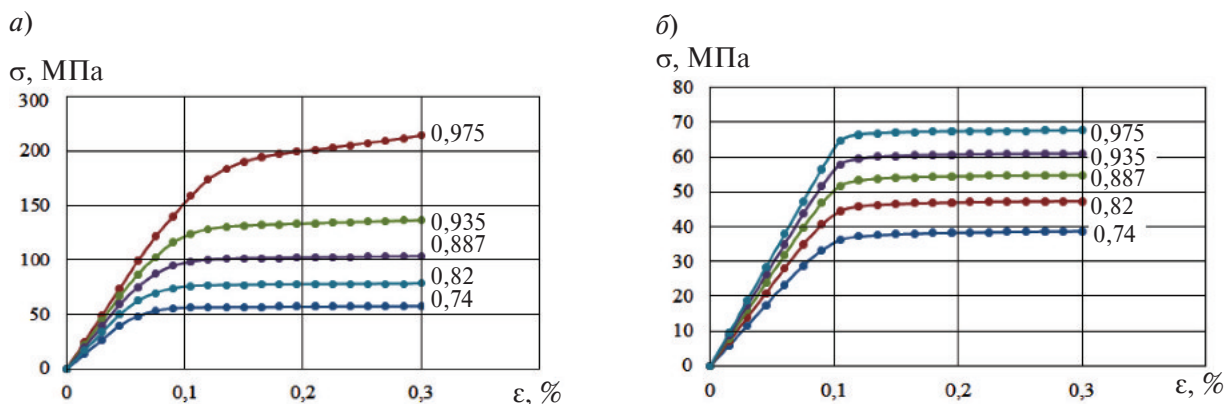


Рис. 8. Зависимости напряжения от относительной деформации кубической ячейки при разных плотностях (значения  $\theta$  – цифры у кривых): а – при гидростатическом сжатии; б – при одноосном сжатии

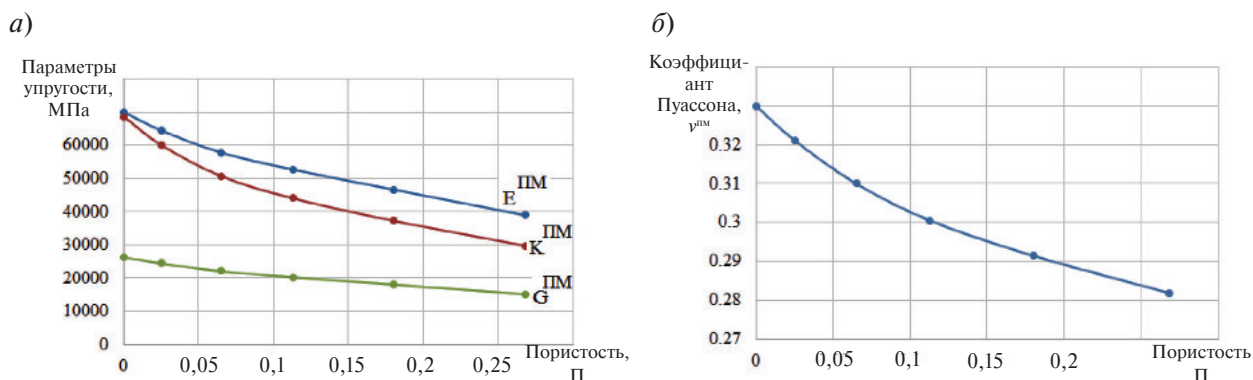


Рис. 9. Зависимости параметров упругости кубической ячейки со сферической пораами от пористости а)  $E$ ,  $K$ ,  $G$ ; б)  $\nu$



формации  $\varepsilon_z$  для вычисления модуля упругости  $E$  при различных плотностях.

Коэффициент Пуассона и модуль сдвига  $G$  рассчитываем по формулам [11]

$$\nu^{\text{пм}} = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{E^{\text{пм}}}{3K^{\text{пм}}} \right); \quad G^{\text{пм}} = \frac{E^{\text{пм}}}{2(1 + \nu^{\text{пм}})}.$$

Зависимость параметров упругости кубической ячейки со сферическими пораами можно представить в виде графика (рис. 9).

Результаты моделирования на 3D-моделях процессов деформации пористого материала при разных схемах нагружения позволяют заменить натурные испытания имитационным моделированием в ходе определения реологических характеристик пористых материалов для решения задач пластической деформации пористой среды.

### Сравнительный анализ результатов моделирования и экспериментов по осадке пористого материала в капсуле при повышенной температуре

Мы выполняли математическое моделирование осадки порошкового материала в капсуле. Параметры материала и процесса деформации были выбраны теми же, что и при проведении экспериментальных исследований в работе [13].

Поскольку процесс деформирования проводится при температуре 300 °С, порошковый алюминий АКВ-2.5 можно интерпретировать как пористое тело. При этой температуре использованный матричный материал имеет следующие ме-

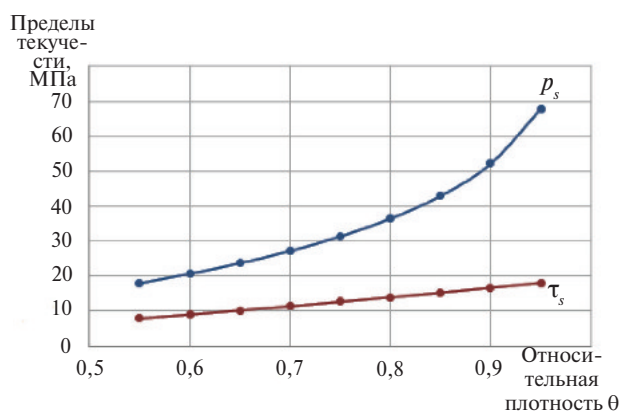


Рис. 11. Зависимости пределов текучести при гидростатическом сжатии ( $p_s$ ) и чистом сдвиге ( $\tau_s$ ) пористого тела от относительной плотности  $\theta$  при температуре 300 °С

ханические характеристики: модуль упругости —  $E = 50500$  МПа; коэффициент Пуассона — 0,33; предел текучести — 34 МПа.

На рис. 10 приведены зависимости пределов текучести при гидростатическом сжатии  $p_s$  и чистом сдвиге  $\tau_s$  пористого тела на основе технического алюминия при температуре 300 °С, которые были определены на основе численного эксперимента в соответствии с представленной выше методикой.

Математическое моделирование процесса осадки порошковой заготовки в капсуле проводилось с использованием программного пакета ABAQUS и встроенной в него модели материала «Drucker — Prager» с подпрограммой, разработанной в [14]. При решении задачи был реализован явный метод (explicit) в трехмерной постановке.

На рис. 11 показано осевое сечение порошковой заготовки при деформации 45 % в сравнении с экспериментальными результатами, полученными в работе [13].

Таким образом, под действием пластической деформации оболочки произошло уплотнение заготовки за счет дополнительного воздействия гидростатической составляющей тензора напряжений в порошковой заготовке. Как видно на

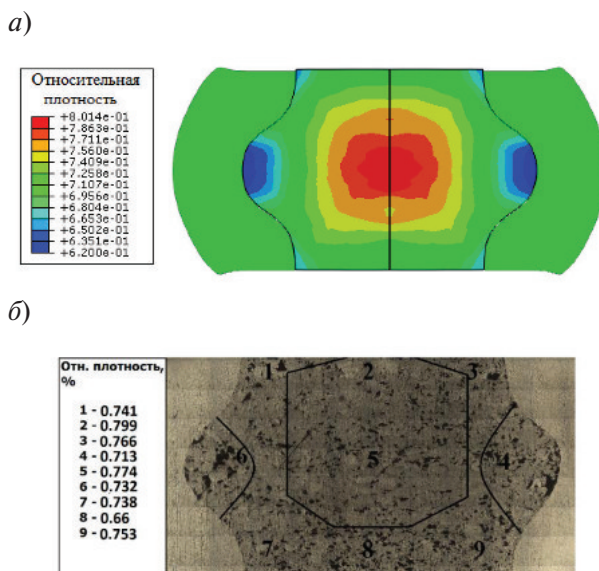


Рис. 11. Распределение плотности в порошковой заготовке при деформировании 45%: а) математическое моделирование; б) эксперимент [13]

рис. 12, результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными. Различие средней плотности между практикой и моделированием составляет 4%. При этом максимальное уплотнение произошло в центре заготовки, где гидростатическое давление больше, чем в других участках. Плотность в центральных областях превышает 0,8. У краев заготовки, где произошла потеря устойчивости капсулы, явно видны зоны разрыхления материала. Плотность в этих зонах находится в интервале 0,62–0,65.

### Заключение

В результате выполненного исследования на основе применения программного пакета ABAQUS проведен анализ идеализированной модели пористого тела и разработана расчетно-экспериментальная методика определения реологических характеристик пористого материала. На основании результатов моделирования деформации элементарной ячейки в виде куба со сферической порой при гидростатическом нагружении и чистом сдвиге определены зависимости пределов текучести от относительной

плотности, на основе которых построены кривые текучести пористого тела в виде эллипсов.

По результатам численных экспериментов для пористого алюминия марки АКВ-2.5 определен модуль объемной деформации из условий гидростатического сжатия элементарной ячейки, а модуль нормальной упругости и коэффициент Пуассона – из условия ее одноосного сжатия. Полученные механические характеристики пористого материала использованы для математического моделирования процесса осадки пористого материала в капсуле при температуре 300 °С. Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Полученные результаты показывают возможность применения представительной ячейки в виде кубической формы со сферической порой для определения реологических характеристик пористых материалов при известном значении предела текучести матричного материала и использования полученных зависимостей этих характеристик от плотности для математического моделирования процессов уплотнения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цеменко В.Н. Деформирование порошковых сред [Deformation of powder environments]. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2001. 104 с.
2. Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А. Технология послойного электронно-лучевого синтеза порошковых изделий в вакууме. // Заготовительные производства в машиностроении. 2014. № 8. С. 40–45.
3. Соколов Ю.А., Кондратьев С.Ю., Лукьянов А.А. Получение изделий из композиционных материалов методом электронно-лучевого синтеза и исследование их свойств. // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 2. С. 35–41.
4. 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. № 11. С. 91–96.
5. Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Кокорин В.Н. Прессование гетерофазных увлажненных порошковых металлических смесей для повышения качества высокоплотных заготовок с использованием метода интенсивного уплотнения. // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2011. № 6. С. 12–16.
6. Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Кокорин В.Н., Сизов Н.А. Исследование процесса уплотнения при ультразвуковом воздействии на увлажненную порошковую среду. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 178. С. 148–155.
7. Рудской А.И., Кокорин В.Н., Кондратьев С.Ю., Филимонов В.И., Кокорин А.В. Прессование гетерофазных увлажненных железных порошков при использовании метода интенсивного уплотнения. // Научные технологии в машиностроении. 2013. № 5 (23). С. 13–20.
8. Кондратьев С.Ю., Горынин В.И., Попов В.О. Оптимизация параметров поверхностно-упрочненного слоя при лазерной закалке деталей. // Сварочное производство. 2011. № 3. С. 11–15.
9. Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А. Алгоритм и технологические процессы синтеза порошковых деталей электронным лучом в вакууме. // Технология машиностроения. 2015. № 1. С. 11–16.
10. Рудской А.И., Рыбин Ю.И., Цеменко В.Н. Теория и моделирование процессов деформирования порошковых и пористых материалов. СПб.: Наука, 2012. 415 с.
11. Друянов Б.А. Прикладная теория пластичности пористых тел. М.: Машиностроение, 1989. 165 с.
12. Abaqus Analysis User's Guide. Volume 3: Materials. Abaqus 6.14.

13. Доан Ван Фук, Цеменко В.Н., Ганин С.В. Моделирование процесса осадки порошкового материала в оболочке // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2015. № 3 (226). С. 30–39. DOI 10.5862/JEST.226.4

14. Фук Д.В., Ганин С.В., Цеменко В.Н. Моделирование и исследование процесса уплотнения порошковых материалов с использованием программного пакета ABAQUS // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2016. № 1 (238). С. 100–110. DOI 10.5862/JEST.238.10

## REFERENCES

1. Tsemenko V.N. Deformirovaniye poroshkovykh sred. [Deformation of powder environments]. SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2001. 104 s. (rus.)

2. Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Sokolov Yu.A. Tekhnologiya posloynogo elektronno-lucheвого синтеза poroshkovykh izdeliy v vakuumе. [Technology of layer-by-layer electron beam synthesis of powder products in vacuum.]. *Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyenii*. 2014. № 8. S. 40–45. (rus.)

3. Sokolov Yu.A., Kondratyev S.Yu., Lukyanov A.A. Polucheniye izdeliy iz kompozitsionnykh materialov metodom elektronno-lucheвого синтеза i issledovaniye ikh svoystv [Producing of details from composite materials by method of electron beam synthesis and research of their properties]. *Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyenii*. 2015. № 2. S. 35–41. (rus.)

4. Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Sokolov Yu.A., Kopayev V.N. Osobennosti modelirovaniya protsessа posloynogo синтеза izdeliy elektronnym luchom. [Features of modeling of process of layer-by-layer synthesis of products electronic beam]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2015. T. 85, № 11. S. 91–96. (rus.)

5. Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Kokorin V.N. Pressovaniye geterofaznykh uvlazhnennykh poroshkovykh metallicheskiykh smesey dlya povysheniya kachestva vysokoplotnykh zagotovok s ispolzovaniyem metoda intensivnogo uplotneniya [Pressing of the heterophase moistened powder metal mixes for improvement of quality of high density preparations with use of a method of intensive consolidation]. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal s prilozheniyem*. 2011. № 6. S. 12–16. (rus.)

6. Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Kokorin V.N., Sizov N.A. Issledovaniye protsessа uplotneniya pri ultrazvukovom vozdеystvii na uvlazhnennuyu poroshkovuyu sredu. [Research of process of consolidation at ultrasonic impact on the humidified powder medium]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2013. № 178. S. 148–155. (rus.)

7. Rudskoy A.I., Kokorin V.N., Kondratyev S.Yu., Filimonov V.I., Kokorin A.V. Pressovaniye geterofaznykh

uvlazhnennykh zheleznykh poroshkov pri ispolzovanii metoda intensivnogo uplotneniya. [Pressing of the heterophase moistened iron powders when using a method of intensive consolidation]. *Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyenii*. 2013. № 5 (23). S. 13–20. (rus.)

8. Kondratyev S.Yu., Gorynin V.I., Popov V.O. Optimizatsiya parametrov poverkhnostno-uprochnennogo sloya pri lazernoy zakalke detaley. [Optimization of the parameters of the surface-hardened layer in laser quenching of components]. *Svarochnoye proizvodstvo*. 2011. № 3. S. 11–15. (rus.)

9. Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Sokolov Yu.A. Algoritм i tekhnologicheskiye protsessy синтеза poroshkovykh detaley elektronnym luchom v vakuumе. [Algorithm and technological processes of synthesis of powder details an electronic beam in vacuum]. *Tekhnologiya mashinostroyeniya*. 2015. № 1. S. 11–16. (rus.)

10. Rudskoy A.I., Rybin Yu.I., Tsemenko V.N. Teoriya i modelirovaniye protsessov deformirovaniya poroshkovykh i poristyykh materialov. [Theory and modeling of processes of deformation of powder and porous materials]. SPb.: Nauka, 2012. 415 s. (rus.)

11. Druyanov B.A. Prikladnaya teoriya plastichnosti poristyykh tel. [Applied theory of plasticity of porous bodies]. M.: Mashinostroyeniye, 1989. 165 s. (rus.)

12. Abaqus Analysis User's Guide. Volume 3: Materials. Abaqus 6.14.

13. Doan Van Fuk, Tsemenko V.N., Ganin S.V. Modelirovaniye protsessа осадки порошкового материала в оболочке. [Modeling of the process rainfall of powder material in a cover]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2015. № 3(226). S. 30–39. (rus.) DOI 10.5862/JEST.226.4

14. Fuk D.V., Ganin S.V., Tsemenko V.N. Modelirovaniye i issledovaniye protsessа uplotneniya poroshkovykh materialov s ispolzovaniyem programmного paketa ABAQUS [Modeling and research of process of consolidation of powder materials with use of a software package of ABAQUS]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2016. № 1(238). S. 100–110. DOI 10.5862/JEST.238.10

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS**

**ЦЕМЕНКО Валерий Николаевич** — доктор технических наук заведующий кафедрой Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.  
195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.  
E-mail: plast-ftim@mail.ru

**TSEMENKO Valerii N.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.  
E-mail: plast-ftim@mail.ru

**ФУК Доан Ван** — аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.  
195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.  
E-mail: fukdoan@mail.ru

**FUK Doan Van** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.  
E-mail: fukdoan@mail.ru

**ГАНИН Сергей Владимирович** — кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.  
195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.  
E-mail: S.V.Ganin@gmail.com

**GANIN Sergei V.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.  
E-mail: S.V.Ganin@gmail.com

DOI 10.5862/JEST.243.15

УДК 621.762

*С.Ю. Петрович, В.Д. Андреева, В.А. Липин,  
С.В. Каракчиев, И.К. Боричева*

## **КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ И КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ БЫСТРООХЛАЖДЕННЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al-Zn-Mg-Cu ПРИ ЕЕ МОДИФИЦИРОВАНИИ ЦИРКОНИЕМ**

*S.Yu. Petrovich, V.D. Andreeva, V.A. Lipin,  
S.V. Karakchiev, I.K. Boricheva*

## **QUALITATIVE AND QUANTITATIVE INDICATORS OF RAPIDLY SOLIDIFIED ALLOYS OF THE Al-Zn-Mg-Cu SYSTEM MODIFIED BY ZIRCONIUM**

Получены образцы быстроохлажденного сплава Al-Zn-Mg-Cu, модифицированного цирконием. На поверхности образцов, находившейся в прямом контакте с охлаждающей средой, обнаружен аморфный слой, доля которого не превышает 9 % от общего объема образца. Этот слой представляет собой композиционный материал, состоящий из аморфной матрицы и интерметаллидных включений  $Zr_3Al$ ,  $Zr_2Al$ ,  $ZrAl_2$  и  $ZrAl_3$ , причем упрочняющей фазой является  $ZrAl_3$ , размер частиц которой от 5 до 30 нм. Аморфизация всего объема сплава с добавкой циркония в качестве легирующего компонента позволяет получить практически равномерное распределение интерметаллидов в аморфной матрице. Сувеличением в сплаве содержания циркония свыше 1,5 мас. % суммарное количество интерметаллидов Al-Zr в нем уменьшается. При содержании в исходных образцах свыше 1,5 мас. % циркония наблюдается существенный рост зерна Al, что свидетельствует о нецелесообразности еще больше увеличивать количество циркония как легирующего компонента.

**АЛЮМИНИЕВЫЙ СПЛАВ; СВЕРХБЫСТРОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ; АМОРФНАЯ МАТРИЦА; МОДИФИКАЦИЯ ЦИРКОНИЕМ; ЦИНК; МАГНИЙ; МЕДЬ; ИНТЕРМЕТАЛЛИД.**

Samples of a rapidly solidified Al-Zn-Mg-Cu alloy modified by zirconium were obtained. An amorphous layer which did not exceed 9% of the total volume of the sample was discovered on the sample surface that was in direct contact with the cool ambient. This layer is a compound material consisting of an amorphous matrix and inclusions of intermetallic  $Zr_3Al$ ,  $Zr_2Al$ ,  $ZrAl_2$  and  $ZrAl_3$  compounds, wherein  $ZrAl_3$  is the strengthening phase with particle sizes ranging from 5 to 30 nm. Amorphization of the whole volume of the alloy with added zirconium as an alloying component allows to obtain an almost uniform distribution of intermetallics in the amorphous matrix. The total number of Al-Zr intermetallics decreases with an increase in zirconium content above 1.5 wt%. When this happens, a significant growth of Al grain can be observed, which is evidence of the further increase in the content of zirconium as the alloying component.

**ALUMINIUM ALLOY; ULTRA-RAPID SOLIDIFICATION; AMORPHOUS MATRIX; ZIRCONIUM MODIFYING; ZINC; MAGNESIUM; CUPRUM; INTERMETALLIC.**

### **Введение**

Наноструктуры, сформированные в результате сверхбыстрого охлаждения сплавов, суще-

ственно улучшают их механические свойства [1]. Полученные из таких материалов изделия ничем не уступают, а в ряде случаев превосходят по прочности литые аналоги и зачастую обладают



уникальными свойствами. Быстроохлажденные сплавы (БС) обладают улучшенными механическими свойствами: они имеют исключительно высокие значения прочности, твердости, причем в сочетании с высокой пластичностью при сжатии или изгибе. БС также имеют высокие значения предела прочности на растяжение, усталостной прочности, энергии ударного разрушения и упругости. Поэтому БС широко применяются как конструкционные или специальные материалы, например в машинном оборудовании, матрицах (фильер), технических инструментах, спортивных и декоративных материалах, микро- и радиоэлектронике, пишущих приборах, в соединительных, коррозионноустойчивых, ферромагнитных материалах и др. [2].

Алюминиевые сплавы системы Al-Zn-Mg-Cu – самые высокопрочные среди алюминиевых сплавов [3–8] и пока остаются основным конструкционным материалом для применения в современной аэрокосмической технике. Наиболее эффективные способы улучшения свойств таких сплавов – это легирование микродобавками переходных и других металлов, уменьшение концентраций нежелательных примесей, а также применение сложных многоступенчатых режимов старения.

Существенное влияние на структуру и служебные свойства оказывает содержание примеси циркония, добавление которой значительно улучшает прочностные характеристики материала. Известно, что добавка циркония повышает прочность сплава системы Al-Zn-Mg-Cu в пять раз [9]. Цирконий в небольших количествах добавляют в сплавы для повышения их коррозионной стойкости за счет формирования структуры с вытянутыми зернами и регулирования степени рекристаллизации. Добавка циркония также содействует измельчению зерна. Цирконий способствует созданию центров кристаллизации в алюминии без переохлаждения при небольшом структурном несоответствии с матрицей. Основное действие присадок циркония состоит в повышении приблизительно на 100 градусов температуры рекристаллизации сплава. Эффект наиболее значителен при наличии циркония в мелкодисперсной форме, что наблюдается при быстрой закалке в ходе кри-

сталлизации и последующем высокотемпературном распаде.

Алюминий при относительно невысоком (до 2 мас. %) легировании цирконием образует интерметаллидные фазы  $Zr_3Al$  и  $ZrAl_3$ , причем слой  $ZrAl_3$  толще, так как алюминий диффундирует в дефекты решетки  $ZrAl_3$  [10].

Цель нашей работы – изучение количественных и качественных характеристик сплава системы Al-Zn-Mg-Cu при его сверхбыстром охлаждении и легировании цирконием.

Быстроохлажденные алюминиевые сплавы имеют благоприятный комплекс физико-химических характеристик, улучшенную структуру микро- и наноразмеров, они могут быть квазикристаллического или даже аморфного состояния [11].

### Экспериментальная часть

Для получения образцов использовали установку быстрого охлаждения на медном диске.

Схема грануляционной установки свободно-го литья с охлаждением капель расплава на медном диске представлена на рис. 1. Электродвигатель 1 через шкивы и ремень приводит во вращение опорный диск 2 и находящийся на нем массивный медный диск 3. Поверхность медно-

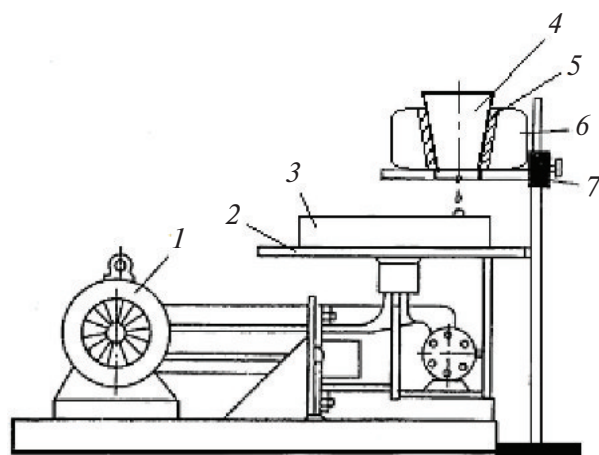


Рис. 1. Схема грануляционной установки свободно-го литья с охлаждением капель расплава на диске:

- 1 – двигатель; 2 – опорный приводной диск;
- 3 – медный диск; 4 – тигель с отверстием;
- 5 – медная обечайка для тигля; 6 – теплоизолятор;
- 7 – штатив-держатель

го диска предварительно была отполирована с помощью различного абразива и фетра, а также обезжирена этиловым спиртом. Расплав подавался через дозирующий тигель 4 с отверстием на дне диаметром 2 мм. Тигель помещался в специальную медную обечайку 5, перед началом эксперимента разогретую до 950 °С для уменьшения теплопотерь расплава. Медная обечайка с тиглем имела теплоизолятор 6, выполненный из асбеста.

Количественный состав шихты для изучения количественных и качественных характеристик быстроохлажденных сплавов системы Al-Zn-Mg Cu был выбран для авиационного сплава В96с согласно ГОСТ 4784-94 [12]. В результате была получена система Al-8,5Zn-2,5Mg-2,3Cu-xZr, где числа показывают содержание каждого из элементов, мас. %;  $x = \{0; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0\}$  (табл. 1).

Таблица 1

Расчетный состав алюминиевых сплавов

Номер образца	Al, мас. %	Zn, мас. %	Mg, мас. %	Cu, мас. %	Zr, мас. %
1	86,7				0
2	86,5				0,2
3	86,2	8,5	2,5	2,3	0,5
4	85,7				1,0
5	85,2				1,5
6	84,7				2,0

Плавку шихты проводили в два этапа. Первоначально плавился алюминий в силитовой печи, в которой расплав нагревался до температуры 900 °С. Второй этап: в тигель с расплавленным алюминием добавляли оставшиеся компоненты и тщательно перемешивали графитовой мешалкой; после этого тигель снова помещали в печь и нагревали до температуры 1060 °С.

Параллельно в другой печи разогревалась до температуры порядка 750 °С обечайка и дозирующий тигель с отверстием в дне. Когда все компоненты сплава были расплавлены, тигель извлекали из печи, расплав снова перемешивали и заливали в разогретый дозирующий тигель. После чего под действием силы тяжести расплав-

ленный металл по каплям падал на вращающийся медный диск.

## Результаты и их обсуждение

Полученные образцы сплавов имели форму «лепешек» диаметром 20–40 мм. В центре образец был толщиной порядка 100 мкм, а по его краям образовалось кольцо толщиной значительно больше, чем центральная область (рис. 2).

Образцы сплавов были исследованы на изломе с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) марки SUPRA 55VP-25-78.

В каждом образце на расстоянии 1, 3, 5, 10, 20, 25, 30, 35, 40 мкм от поверхности охлаждения («дна») был определен элементный состав.

На рис. 3 представлена графическая зависимость распределения циркония вдоль сечения.

Из полученных данных (см. рис. 3) следует, что диффузионные процессы при высоких скоростях кристаллизации имеют одинаковый характер при разном содержании циркония в образцах.

Фазовый анализ образцов материала был произведен на рентгеновском дифрактометре ДРОН2 в монохроматическом  $\text{Cu}_{K\alpha}$ -излучении. Исследованию подвергались все образцы, кроме образца 2, содержащего 0,2 мас. % Zr. Особенности дифрактометрического метода позволяют получить информацию о фазовом составе,



Рис. 2. Образец полученного сплава

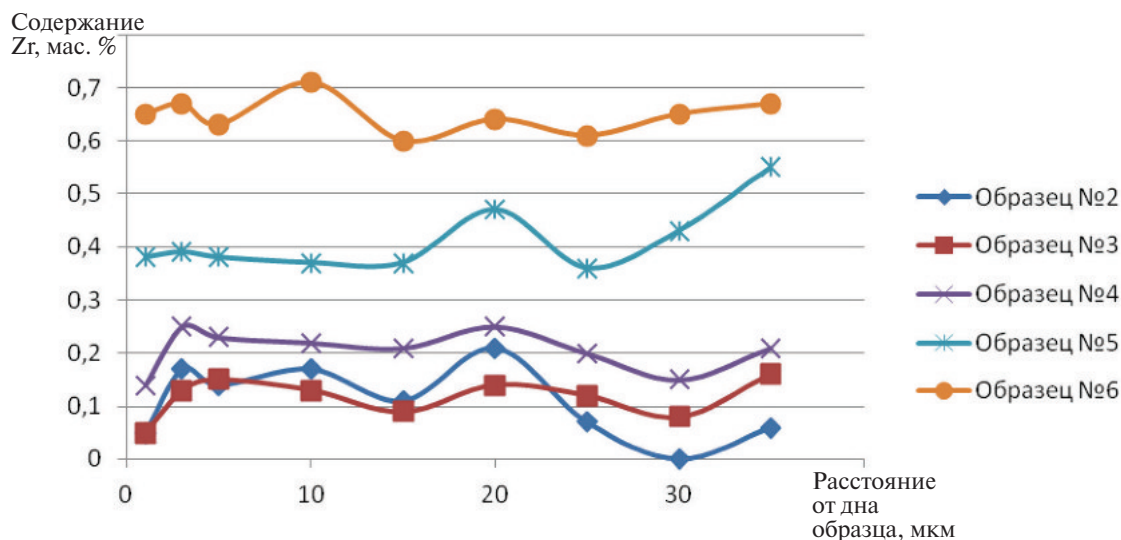


Рис. 3. Распределения циркония в образцах с различным содержанием циркония

усредненную по всей поверхности объекта, а не на конкретных участках гранул.

Были осуществлены качественный фазовый анализ в программе DiffracPlus EVA с использованием порошковой базы ICDD (PDF-2) [13] и обработка профиля рентгенограммы по методу Ритвельда (программа DiffracPlus Topas фирмы Bruker) для определения количественного соотношения фаз и определения их размера [14]. Расчет по Ритвельду предполагает построение теоретической рентгенограммы с учетом инструментальных параметров съемки и полного описания структур, обнаруженных при фазовом анализе фаз (использовалась база данных ICSD), и сравнение ее с экспериментально полу-

ченной дифрактограммой. В результате «подгонки» модели к рентгенограмме в процессе ряда итераций параметр недоверности GOF (*Goodness of Fit*) во всех случаях не превышал 2 %, что является хорошим результатом. При этом существовала возможность уточнения и качественного фазового состава образцов. Результаты рентгеноструктурных исследований представлены в табл. 2.

Было установлено, что основной фазовой составляющей во всех образцах является Al (рис. 4). В образцах 3 и 4 содержится до 4,5 мас.% AlCuMg, в образцах 5 и 6 – следы  $Al_2CuMg$ . Наблюдается изменение параметра решетки алюминия с 4,0496 (образец 3) до 4,0543 (образец 6),

Таблица 2

Содержание (мас.%) фаз и их размер (нм) в образцах быстроохлажденного сплава Al–Zn–Mg–Cu

Но- мер об- разца	Al		$Al_2CuMg$		AlCuMg		$Zr_3Al$		$ZrAl_3$		$Zr_2Al$		$ZrAl_2$		$Zn_2Zr$	
	%	Размер, нм	%	Размер, нм	%	Размер, нм	%	Размер, нм	%	Размер, нм	%	Размер, нм	%	Размер, нм	%	Размер, нм
3	86,5	350–500	–	–	1,5	200–300	2,0	1–5	0,5	10–15	6,5	10–20	–	–	3,0	>3000
4	87,5	230–330	–	–	4,5	5–10	1,0	1–5	0,5	5–10	6,5	10–20	–	–	–	–
5	95,5	600–800	1,0	65–90	–	–	–	–	0,5	20–30	2,0	20–30	1,0	5–8	–	–
6	97,0	>7000	0,5	>1000	–	–	–	–	0,5	5–10	1,5	5–10	0,5	150–200	–	–

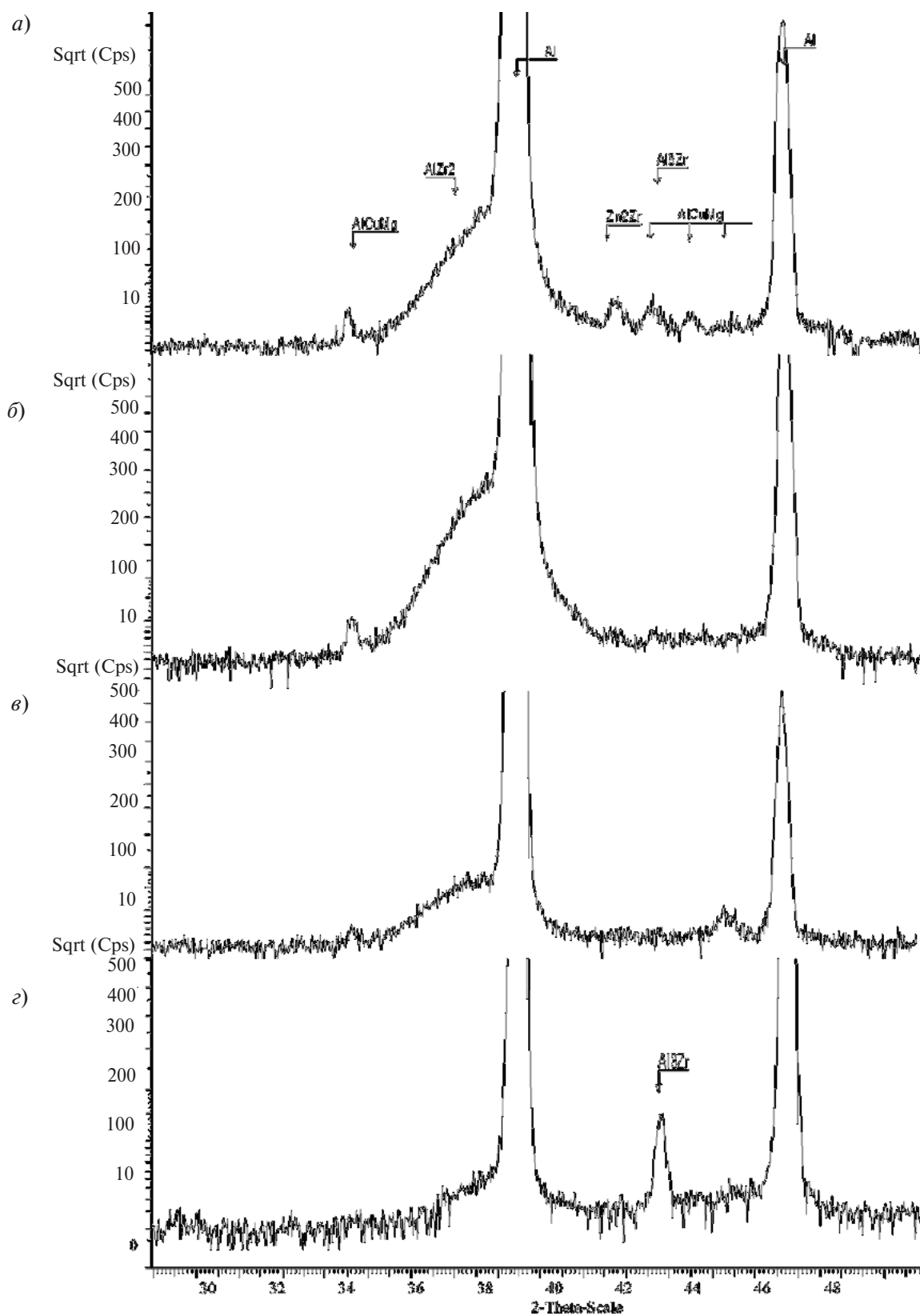


Рис. 4. Рентгенограммы образцов 3 (а); 4 (б); 5 (в); 6 (г)

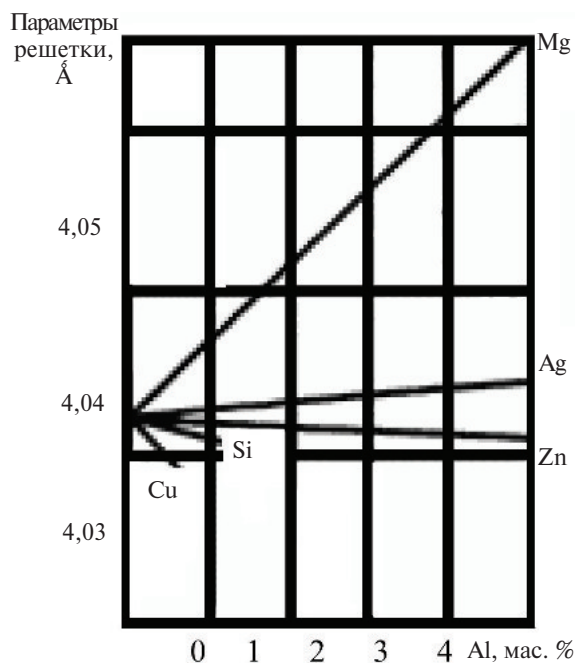


Рис. 5. Зависимость параметра решетки Al от содержания легирующих элементов [15]

что может быть вызвано увеличением растворимости легирующих элементов в Al (рис. 5).

Обработка рентгенограммы по Ритвельду позволила разложить гало на составляющие и тем самым уточнить состав аморфной фазы (рис. 6). Размер частиц  $Zr_3Al$ ,  $Zr_2Al$ ,  $ZrAl_2$  и  $ZrAl_3$  не превышает 10–30 нм. Суммарное их количество уменьшается с 9,0 мас.% в образце 3 до 2,5–3,0 мас.% в образцах 5 и 6 (см. табл. 2).

Крупные выделения  $Zn_2Zr$  в образце 3 образовались, видимо, на этапе смешивания компонентов сплава и не подверглись расплавлению при дальнейшем перегреве до 1060 °С (температура плавления  $Zn_2Zr$  составляет 1180 °С) [16]. В образцах с большим содержанием Zr его растворимость в Al резко возрастает, и фаза  $Zn_2Zr$  практически не успевает образоваться.

Частицы Al имеют размер от 300 до 800 нм, однако при увеличении доли Zr в сплаве более 1,5 мас.% наблюдается их интенсивный рост до 7 мкм и более (в образце 6).

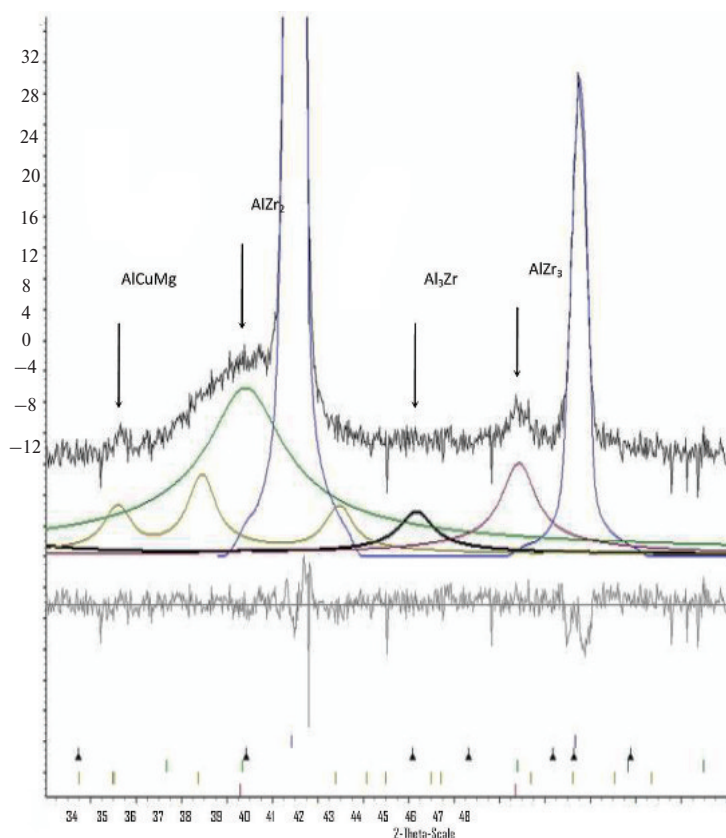


Рис. 6. Пример разложения рентгеноаморфного гало в программе DiffracPlus Topas на составляющие (образец 5)



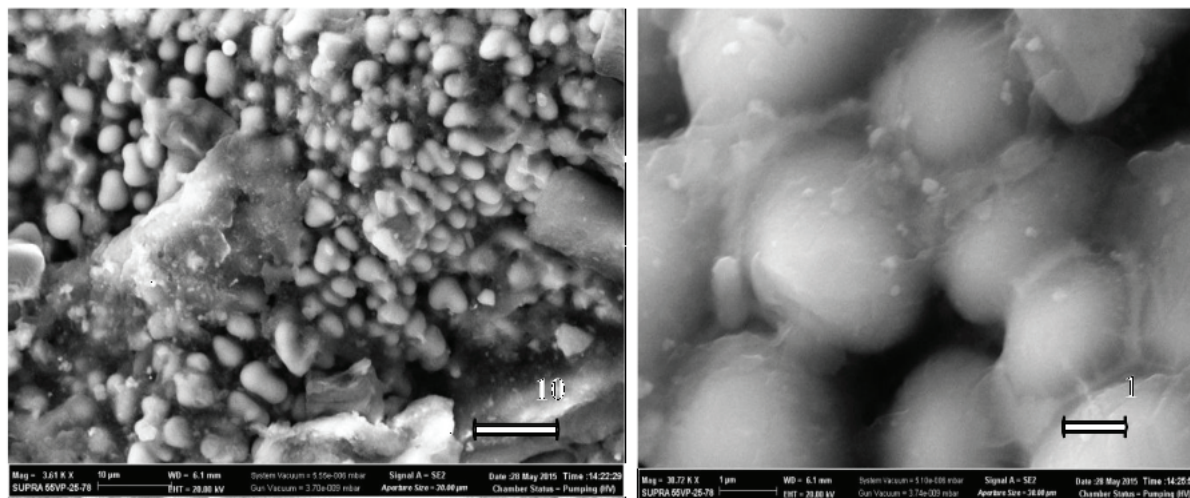


Рис. 7. РЭМ-снимки образца быстроохлажденного сплава Al-Zn-Mg-Cu (образец 3)

Результаты рентгеновского анализа подтверждаются электронно-микроскопическими исследованиями на растровом электронном микроскопе «SUPRA 55VP-25-78» (рис. 7). Исследовались поверхности изломов образцов.

На электронных изображениях (образец 3) отчетливо видны отдельные частицы размером 2–3 мкм. Они представляют собой «коконы» из наноразмерных образований исследуемого сплава, на поверхности которых различаются отдельные частицы (размером до 20 нм) интерметаллидов системы Al-Zr. Крупные включения на поверхности объекта – также, очевидно, скопления аморфных фаз.

### Выводы

В результате работы получены образцы сплава Al-Zn-Mg-Cu, модифицированного циркони-

ем. Это композиционный материал, состоящий из аморфной матрицы и интерметаллидных включений системы Al-Zr, причем упрочняющей фазой служит  $ZrAl_3$ , размер частиц которой составляет 5–30 нм.

При увеличении содержания легирующей добавки циркония характер распределения интерметаллидных включений не изменяется. То есть при аморфизации всего объема сплава с добавкой циркония в качестве легирующего компонента следует ожидать практически равномерное распределение интерметаллидов в аморфной матрице.

С повышением содержания Zr в исходных образцах свыше 1,5 мас. % наблюдается существенный рост зерна Al, что свидетельствует о нецелесообразности еще большего увеличения количества циркония как легирующего компонента.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука. Физматлит, 2007. 416 с.
2. Выюгов П.Н., Дмитренко А. Е. Металлические стёкла // Вопросы атомной науки и техники. 2004. С. 187–191.
3. Puchkov Y.A. [et al.] Study of alloy V91 of the system Al-Zn-Mg-Cu system supercooled solid solution decomposition // Metal Science and Heat Treatment. 2010. Vol. 52. №. 7-8. P. 362–367.
4. Liang P. [et al.]. Experimental investigation and thermodynamic calculation of the Al-Mg-Zn system // Thermochimica Acta. 1998. Vol. 314. №. 1. P. 87–110.
5. Шаломеев В.А. Влияние редкоземельных металлов на структуру и свойства магниевого лития // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2014. №. 3. С. 37–41.
6. Фридляндер И.Н. Современные алюминиевые, магниевые сплавы и композиционные материалы на их основе // Металловедение и термическая обработка металлов. 2002. №. 7. С. 24–29.
7. Strawbridge D.J., Hume-Rothery W., Little A.T. The constitution of Al-Cu-Mg-Zn alloys at 460 °C //

Journal of the Institute of Metals. 1947–1948. Vol. 74. P. 191–193.

8. **Захаров А.М., Фридляндер И.Н., Эдельман Н.М.** Изучение свойств четвертичной системы Al Zn Mg Cu. // Журнал неорганической химии. 1961. №5. С. 11–65.

9. **Луц А.Р., Суслина А.А.** Алюминий и его сплавы: Учебное пособие. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. 81 с.

10. **Мондольфо Л. Ф.** Структура и свойства алюминиевых сплавов / Пер. с англ. М.: Metallurgiya, 1979. 640 с.

11. **Рудской А.И. [и др.]**. Производство и свойства быстроохлажденных порошковых сплавов на основе алюминия // Сборник тезисов конференции МАТИ. М., 2007. С. 94–98.

12. **ГОСТ 4784 – 97.** Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки. (Взамен ГОСТ 4784 – 74). Введен 1-08-2000. М.: Изд-во стандартов, 2000. 8 с.

13. Powder Diffraction File / Joint Committee on Powder Diffraction Standards International Center for Diffraction Data (ICDD). 2008.

14. **Young R. A.** Introduction to the Rietveld Method. Oxford: Oxford University Press, 1993. P. 1–39.

15. **Миркин Л.И.** Рентгеноструктурный контроль машиностроительных материалов. Справочник. М.: Машиностроение, 1979. 134 с.

16. Диаграммы состояния двойных металлических систем: В трех томах / Под ред. Н.П. Лякишева. М.: Машиностроение, 1996–2001.

## REFERENCES

1. **Gusev A.I.** Nanomaterialy, nanostruktury, nanotekhnologii [Nanomaterials, nanostructures, nanotechnologies]. 2-ye izd., pererab. i dop. M.: Nauka-Fizmatlit, 2007. 416 s. (rus.)

2. **Vyugov P.N., Dmitrenko A.Ye.** Metallicheskiye stekla [Metallic glasses]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki*. 2004. S. 187–191. (rus.)

3. **Puchkov Y.A. [et al.]** Study of alloy V91 of the system Al–Zn–Mg–Cu system supercooled solid solution decomposition. *Metal Science and Heat Treatment*. 2010. Vol. 52. №. 7–8. S. 362–367. (rus.)

4. **Liang P. [et al.]** Experimental investigation and thermodynamic calculation of the Al–Mg–Zn system // *Thermochimica Acta*. 1998. Vol. 314. №. 1. S. 87–110. (rus.)

5. **Shalomeyev V.A.** Vliyaniye redkozemelnykh metallov na strukturu i svoystva magniyevogo litya [Rare metal influence over structure and properties of magnesium lithium]. *Vostochno-yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy*. 2014. №. 3. S. 37–41. (rus.)

6. **Fridlyander I.N.** Sovremennyye alyuminiyevyye, magniyevyye splavy i kompozitsionnyye materialy na ikh osnove [Modern aluminium, magnesium alloys and their composition materials]. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*. 2002. №. 7. S. 24–29. (rus.)

7. **Strawbridge D.J., Hume-Rothery W., Little A.T.** The constitution of Al–Cu–Mg–Zn alloys at 460 °C // Journal of the Institute of Metals. 1947–1948. Vol. 74. P. 191–193.

8. **Zakharov A.M., Fridlyander I.N., Edelman N.M.** Izucheniye svoystv chetvertichnoy sistemy Al Zn Mg Cu. [Studying properties of quaternary system Al Zn Mg Cu]. *Zhurnal neorganicheskoy khimii*. 1961. №5. S. 11–65. (rus.)

9. **Luts, A.R., Suslina A.A.** Alyuminiy i yego splavy: Uchebnoye posobiye [Aluminium and its alloys: Textbook]. Samara: Samar. gos. tekhn. un-t, 2013. 81 s. (rus.)

10. **Mondolfo L.F.** Struktura i svoystva alyuminiyevykh splavov [Structure and properties of aluminium alloys] / Per. s angl. M.: Metallurgiya, 1979. 640 s. (rus.)

11. **Rudskoy A.I. [i dr.]**. Produzvodstvo i svoystva bystrookhlazhdennykh poroshkovykh splavov na osnove alyuminiya [Production and properties of fast cooling powder alloys based on aluminium]. *Sbornik tezisev konferentsii MATI*. M., 2007. S. 94–98. (rus.)

12. **GOST 4784–97.** Alyuminiy i splavy alyuminiyevyye deformiruyemye [Aluminium and aluminium malformed alloys]. Marki. (Vzamen GOST 4784 – 74). Vveden 1-08-2000. M.: Izd-vo standartov, 2000. 8 s. (rus.)

13. Powder Diffraction File / Joint Committee on Powder Diffraction Standards International Center for Diffraction Data (ICDD). 2008.

14. **Young R.A.** Introduction to the Rietveld Method. Oxford: Oxford University Press, 1993. P. 1–39.

15. **Mirkin L.I.** Rentgenostrukturnyy kontrol mashinostroytelnykh materialov [X ray and structural control of mechanical-engineering materials]: Spravochnik. M.: Mashinostroyeniye, 1979. 134 s. (rus.)

16. Diagrammy sostoyaniya dvoynykh metallicheskiykh sistem (v trekh tomakh) [Diagrams of double metallic systems condition (in three volumes)] / Pod red. N.P. Lyakisheva. M.: Mashinostroyeniye, 1996–2001. (rus.)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

**ПЕТРОВИЧ Сергей Юрьевич** — заведующий лабораторией Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.  
195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.  
E-mail: lmpa2010-new@mail.ru

**PETROVICH Sergey Yu.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.  
E-mail: lmpa2010-new@mail.ru

**АНДРЕЕВА Валентина Дмитриевна** — кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.  
195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.  
E-mail: avd2007@bk.ru

**ANDREEVA Valentina D.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.  
E-mail: avd2007@bk.ru

**ЛИПИН Вадим Аполлонович** — доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.  
195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.  
E-mail: vadim.lipin@km.ru

**LIPIN Vadim A.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.  
E-mail: vadim.lipin@km.ru

**КАРАКЧИЕВ Сергей Валерьевич** — студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.  
195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.  
E-mail: serkarakchiev93@gmail.com

**KARAKCHIEV Sergei V.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.  
E-mail: serkarakchiev93@gmail.com

**БОРИЧЕВА Ирина Константиновна** — кандидат технических наук заведующая лабораторией Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.  
195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.  
E-mail: borichevaik2015@yandex.ru

**BORICHEVA Irina B.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.  
E-mail: borichevaik2015@yandex.ru

*В.С. Мамутов, А.В. Мамутов, А.А. Курятников*

## **КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ТОНКОЛИСТОВОЙ ФОРМОВКИ С УЧЕТОМ РАЗРЫВА ВОДЫ**

*V.S. Mamutov, A.V. Mamutov, A.A. Kuriatnikov*

### **COMPUTER SIMULATION OF AN ELECTROHYDRAULIC SHEET METAL PRESSING IN VIEW OF THE CAVITATION TRESHOLD**

Показано присутствие кавитационных эффектов при электрогидроимпульсной штамповке. Оценка влияния кавитации на давление в разрядной камере и на поверхности тонколистовой заготовки сделана с применением разработанной в комплексе LS-DYNA 971 осесимметричной модели разрядной камеры. Ввод энергии в плазму задавался на основе экспериментальных данных, вода моделировалась идеальной сжимаемой жидкостью, заготовка — одномерной оболочечной моделью. Расчеты, проведенные для отрицательных давлений разрыва воды 0,1 и 40 МПа, показали незначительную разницу в параметрах деформированного состояния заготовки при значительном различии импульсного давления на поверхности заготовки.

ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНАЯ ШТАМПОВКА; КАВИТАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ; ДАВЛЕНИЕ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗАГОТОВКИ; ВВОД ЭНЕРГИИ В ПЛАЗМУ; ИДЕАЛЬНАЯ СЖИМАЕМАЯ ЖИДКОСТЬ; ОДНОМЕРНАЯ ОБОЛОЧЕЧНАЯ МОДЕЛЬ ЗАГОТОВКИ; ДАВЛЕНИЕ РАЗРЫВА ВОДЫ; ОСЕСИММЕТРИЧНАЯ МОДЕЛЬ В КОМПЛЕКСЕ LS-DYNA 971.

The presence of cavitation effects during electrohydraulic pressing is shown. The effect of cavitation on the pressure in the discharge chamber and at the blank surface is estimated using a numerical model of the axisymmetric discharge chamber developed using the LS-DYNA 971 finite element complex. The energy deposition law in a plasma channel is defined by the experimentally obtained curve. The water is defined as an ideally compressed liquid. The blank is built using one-dimensional elements with axisymmetrical shell formulation. The calculations performed for negative cavitation thresholds of 0.1 MPa and 40 MPa have shown the negligible difference in the blank's deformation despite the fact that pulse pressure at the blank's surface changes significantly.

ELECTROHYDRAULIC FORMING; CAVITATION IN WATER; COMPUTER SIMULATION USING LS-DYNA 971; ENERGY DEPOSITION LAW; IDEALLY COMPRESSED LIQUID; AXI-SYMMETRICAL SHELL; CAVITATION THRESHOLD; NUMERICAL MODEL OF THE AXISYMMETRIC DISCHARGE CHAMBER; NEGLIGIBLE DIFFER.

Электрогидроимпульсная обработка материалов эффективна в различных технологиях, требующих высокой концентрации энергии и давления [1]. Впервые в 1944 году силовой эффект высоковольтного электрического разряда в жидкости описали Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко

[2]. Применения высоковольтного электрического разряда для обработки металлов давлением предложено Л.А. Юткиным в 1955 году [3]. Начиная с середины 60-х годов высоковольтный разряд в жидкости как источник высокого давления нашел широкое применение в машино-

строении при изготовлении сложных высокоточных деталей из листовых и трубных заготовок [4]. В настоящее время процессы электрогидроимпульсной штамповки (ЭГИШ) широко применяются и исследуются в странах с высокоразвитым машиностроением — США, Японии, Германии, Франции [5]. Следует отметить относительно высокий уровень промышленного применения и исследовательской активности в области этих процессов на Украине [6], а также в Беларуси [7]. В России в области машиностроения можно отметить развитие комплексной теории канала плазменного разряда, гидродинамики и деформирования заготовки в условиях ЭГИШ с использованием компьютерного моделирования. Адекватное компьютерное моделирование ЭГИШ стало возможным только с появлением таких универсальных научных конечно-элементных комплексов, как LS-DYNA® [8]. Сначала комплекс LS-DYNA применялся для моделирования ЭГИШ при упрощенной геометрии камеры [9], но позже учитывалась реальная геометрия электродной системы и другие особенности процесса [10–12].

Однако такое моделирование деформирования тонколистовой заготовки не затрагивало вопросы, связанные с кавитацией рабочей жидкости в разрядной камере. Цель нашей работы — оценить на базе компьютерного моделирования процесса при помощи конечно-элементного комплекса LS-DYNA влияние уровня разрыва воды на характер деформирования тонколистовой заготовки.

### Электрический разряд и кавитация воды

В предыдущих работах, в которых проводились конечно-элементные расчеты ЭГИШ [10–12], предполагалось, что разрыв воды происходит вблизи значения отрицательного давления 0,1 МПа. Теоретически вода может выдерживать отрицательные давления до 1000 МПа, но на практике в условиях статических испытаний даже в чистой фильтрованной воде кавитация наступает при отрицательных давлениях уже в 30 МПа [13]. Исследования при импульсном растяжении показали, что прочность воды может достигать 46 МПа [14]. Обычно в технике кавитацию рассматривают в связи с разрушением поверхности

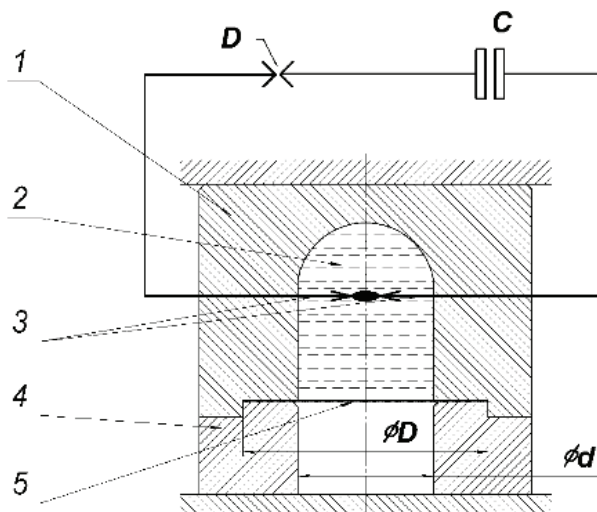


Рис. 1. Схема электрогидроимпульсной вытяжки-формовки: 1 — разрядная камера; 2 — электроды; 3 — рабочая жидкость (вода); 4 — матрица; 5 — тонколистовая заготовка

изделий, происходящим при схлопывании пузырьков [15]. Как будет показано ниже, похожая проблема имеет место и при ЭГИШ.

При ЭГИШ разрядная камера 1 заполнена рабочей жидкостью, в качестве которой чаще всего используется техническая или водопроводная вода 2 (рис. 1).

При разряде предварительно заряженной высоковольтной конденсаторной батареи  $C$  на электроды 3 при их расположении в жидкости с определенным расстоянием между концами электродов (межэлектродный промежуток) происходит электрический пробой. Сопротивление промежутка после пробоя сильно падает, а ток резко возрастает, и происходит выделение большей части электрической энергии конденсатора. Образуется плазменный канал; выделение электрической энергии внутри канала приводит к повышению температуры, а также давления в нем и быстрому расширению. Расширение канала образует волну сжатия, которая приводит к деформированию листовой заготовки 5, расположенной на поверхности матрицы 4.

Движение заготовки образует в жидкости вблизи ее поверхности зоны отрицательного давления, которые могут приводить к разрыву жидкости — ее кавитации. Такие зоны перемещаются внутри камеры, и момент разрыва жидкости



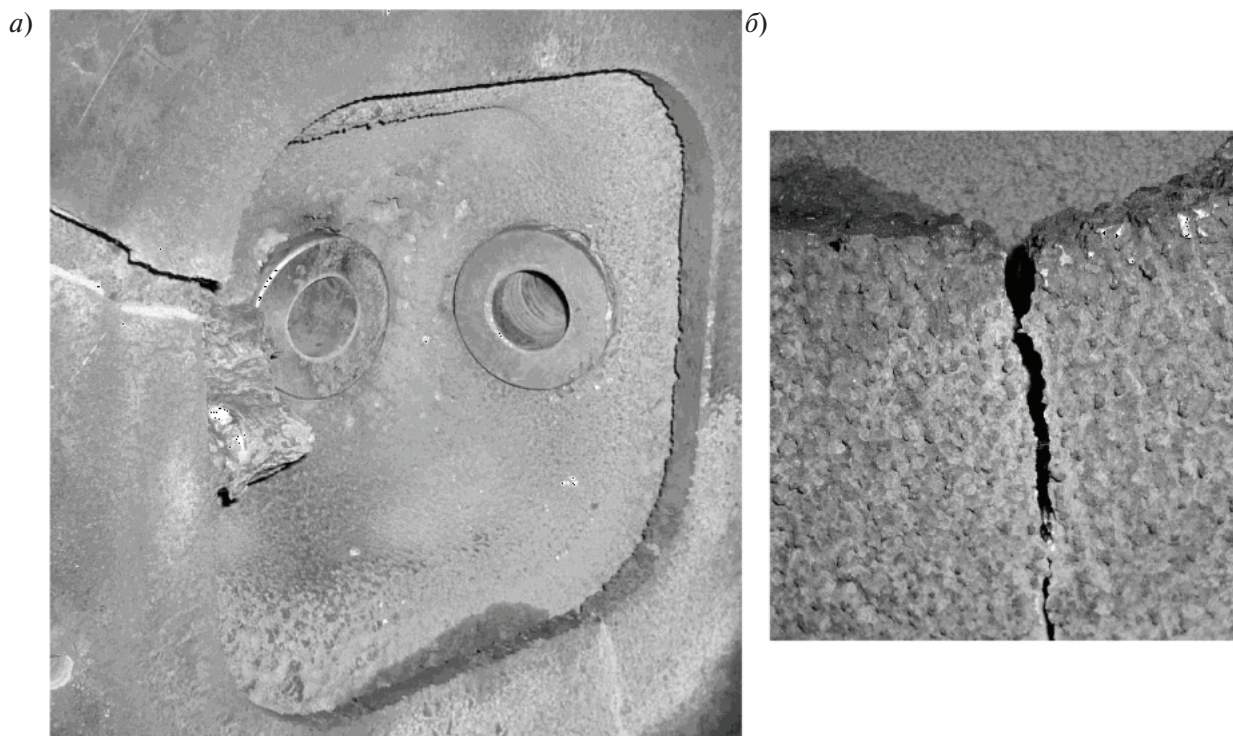


Рис. 2. Разрядная камера: *а* — разрушение стенки и дна камеры; *б* — локальное местное разрушение

может произойти, когда зона отрицательного давления находится вблизи стенки камеры. Если время воздействия отрицательного давления на жидкость достаточно для образования пузырьков, образуется слой пузырьковой жидкости. При приходе волны сжатия происходит сокращение (схлопывание) пузырьков, прилегающих к поверхности камеры или находящихся на некотором расстоянии от поверхности. В этом случае возможно локальное возникновение импульсного давления порядка нескольких сотен МПа [15], многократное воздействие которого приводит к разрушению поверхности камеры. Так как переменное давление в жидкости создает переменные, преимущественно растягивающие напряжения внутри корпуса камеры, то возможно образование сначала микротрещин, затем их увеличение и разрушение разрядной камеры.

В качестве примера на рис. 2, *а* показана разрядная камера из коррозионностойкой стали (размер выходного окна — 150×150 мм) с трещиной (слева, вверху рисунка).

На кромке дна камеры при увеличении можно увидеть разрушение поверхности и мелкие трещины в нескольких местах (рис. 2, *б*). Общее разрушение камеры произошло после примерно нескольких сотен тысяч разрядов, что сопоставимо с ресурсом работы электрогидроимпульсной установки. Кроме того, металл в районе трещины ранее был ослаблен сваркой при частичной модификации конструкции камеры, которая могла бы иметь значительно больший ресурс работы. Поэтому с точки зрения промышленного применения ЭГИШ разрушение поверхности разрядной камеры вследствие кавитации нельзя считать критичным.

#### Влияние кавитации на давление в жидкости вблизи заготовки

Судя по виду поверхности камеры на фотографии (рис. 1), а также данным многочисленных исследователей кавитация реально имеет место при ЭГИШ. Поэтому при проектировании технологий важен вопрос, каким образом кавитация влияет на давление в камере и как это в итоге влияет на деформирование заготовки.

Технологические процессы ЭГИШ можно условно разделить на две группы: процессы с «податливой» заготовкой (например, тонколистовая формовка) и процессы с незначительной податливостью заготовки («жесткая» заготовка). Ко второй группе можно отнести калибровку, снятие остаточных напряжений, получение мелкодисперсных материалов и др., когда движение поверхности объекта воздействия давления незначительно смещает рабочую жидкость в направлении действующего давления. В варианте такой «жесткой» технологической оснастки и заготовки, как показывают компьютерные расчеты [11], отрицательное давление может не возникать. В этом случае кавитации рабочей жидкости на этапе нагружения не происходит. В работе [16] при помощи компьютерных расчетов с учетом гидродинамики пузырьковой жидкости показано, что созданием слоя пузырьковой жидкости вблизи заготовки на этапе, предшествующем прохождению волны сжатия от канала разряда, можно увеличить амплитуду давления, что служит положительным фактором для «жестких» операций ЭГИШ.

Деформирование заготовки в формовочных процессах в условиях ЭГИШ с большой податливостью заготовки происходит преимущественно за счет давления гидротока жидкости, теорию которого применительно к ЭГИШ разработал В.Н. Чачин [4]. При этом имеют место кавитационные разрывы жидкости вблизи деформируемой заготовки, когда давление в жидкости становится отрицательным. Однако возможности аналитических методов гидромеханики, которыми пользовались в прошлом веке В.Н. Чачин и другие исследователи нагружения заготовки, не позволяли адекватно оценить давление в разрядной камере и вблизи деформируемой заготовки, а также влияние разрыва жидкости при кавитации на давление.

#### Компьютерная модель процесса и исходные данные для компьютерного моделирования

Моделирование осуществлялось в конечно-элементном комплексе LS-DYNA 971. Использовалась компьютерная модель осесимметричного разряда в жидкости аналогично тому, как это

сделано в работе [9]. Жидкость, расположенная в разрядной камере сверху электродов (рис. 1), в случае «податливой» деформируемой заготовки из тонколистового металла будет иметь незначительное перемещение по сравнению с жидкостью вблизи заготовки. Двумерная модель, получаемая в этом случае, более экономична с точки зрения общего количества конечных элементов и времени счета по сравнению с трехмерной моделью при учете электродной системы [10].

Для обеспечения варианта «податливой» заготовки рассматривалась электрогидроимпульсная свободная вытяжка осесимметричной заготовки из латуни Л68 диаметром  $D = 110$  мм, толщиной  $0,24$  мм в матрицу с диаметром очка  $d = 60$  мм (см. рис. 1). Фиксированный зазор между прижимом и матрицей был  $0,3$  мм. С учетом особо тонколистового металла предполагалось целесообразным моделировать заготовку плоской оболочкой, которая в силу симметрии задавалась в виде балочного элемента по типу *BEAM*. Материалы камеры, матрицы и прижима предполагались абсолютно жесткими и задавались моделями *MAT\_RIGID*.

Динамическая кривая деформационного упрочнения аппроксимировалась в степенном виде (по Холломану):

$$\sigma_s = B \varepsilon_i^m,$$

где  $\sigma_s$  — напряжение текучести;  $\varepsilon_i$  — интенсивность тензора логарифмических деформаций. Величины динамической кривой деформационного упрочнения для латуни Л68 взяты по данным работы [17]:  $B = 925$  МПа и  $m = 0,44$ . Выбрана модель материала *MAT\_POWER\_LAW\_PLASTICITY* с указанными выше параметрами кривой деформационного упрочнения степенного вида и упругими константами:  $E = 1,15 \cdot 10^{11}$  Па — модуль Юнга;  $\nu = 0,35$  — коэффициент Пуассона и плотностью  $\rho = 8300$  кг/м<sup>3</sup>. Коэффициент кулоновского трения задавался равным  $\mu = 0,2$  для трения покоя и  $\mu = 0,15$  при движении заготовки.

В качестве модели материала для плазменного канала использовалась модель *MAT\_NULL*, совместно с уравнением состояния *EOS\_LINEAR\_POLYNOMIAL\_WITH\_ENERGY\_LEAK*. При этом в качестве кривой, задающей ввод энергии, принималось отношение мощности

ввода энергии к начальному объему сферического канала разряда. Начальный радиус канала брался 0,5 мм. Вводимая мощность определялась зависимостью, аналогичной принятой в работе [9]. Зависимость мощности от времени представляла три последовательных треугольных импульса длительностью 57,4 мкс; 57,5 мкс; 54,1 мкс и с амплитудами соответственно 9,1; 4,9 и 1,69 МВт. Данные были получены экспериментально для последующей верификации результатов расчета по измеренным параметрам деформированного состояния заготовки, также представленным в работе [9].

В качестве модели жидкости использовалась модель идеальной сжимаемой жидкости *MAT\_ELASTIC\_FLUID* с начальной плотностью  $\rho_0 = 1000 \text{ кг/м}^3$  и модулем объемного сжатия  $K = 2,35 \text{ ГПа}$ . Во второй карте опции *\*MAT\_ELASTIC\_FLUID* величина отрицательного давления разрыва воды варьировалась в пределах от 0,1 до 40 МПа.

При конечно-элементной разбивке обеспечивалась регулярная прямоугольная сетка на подвижных границах «плазма–жидкость» и «заготовка–жидкость». С учетом значительного формоизменения канала разряда делалось экспоненциальное сгущение сетки вблизи границ канала разряда. Расчет осуществлялся в лагранжево-эйлеровой постановке (ALE).

### Результаты расчетов

Пример результатов расчетов при отрицательном давлении разрыва жидкости 0,1 и 40 МПа представлен на графиках рис. 3. Элемент №1 находился на границе с каналом разряда, а элемент №514 находился вблизи центра поверхности заготовки. Можно отметить существенное различие графиков давления, действующего на заготовку, при разных уровнях давления разрыва жидкости.

На рис. 4 представлены графики зависимости эффективной деформации заготовки от времени при отрицательных давлениях разрыва жидкости 0,1 и 40 МПа.

Элемент №12639 находился вблизи радиуса закругления кромки матрицы, а элемент №12685 — в центре заготовки. Следует отметить, что графики эффективных деформаций при отрицатель-

ных давлениях разрыва жидкости 0,1 и 40 МПа имеют различия только в начале, когда деформация не превышает 10–20 % от конечной деформации. Расчеты показали, что во всем диапазоне от 0,1 до 40 МПа давления разрыва воды различие конечных значений эффективной деформации имеет порядок 1–3 %, что обусловлено больше погрешностью вывода результатов расчета. При этом в работе [9] показано, что экспериментальные значения деформаций для разных точек заготовки различаются на 10–15 % от расчетных значений при заданной из опытов функции ввода мощности электрической энергии в канал разряда.

Для данного случая «податливой» заготовки данный эффект достаточно хорошо объясняют графики кинетической энергии системы (глобальной), представленные на рис. 5 в нормированном виде (текущее значение отнесено к максимальной величине кинетической энергии).

Видно, что для вариантов давления разрыва жидкости 0,1 (1) и 40 (2) МПа графики изменения кинетической энергии — ее накопления в виде энергии гидротока и последующего преобразования в энергию пластического деформирования — достаточно близки, а в конце движения заготовки практически совпадают. Этим можно объяснить близость величин эффективной деформации точек заготовки для разных давлений разрыва. По графикам также видно, что для принятого варианта исходных данных примерно 20 % кинетической энергии оказались не преобразованными в энергию пластического деформирования, что, по сути, определяет величину гидродинамического КПД процесса в этом варианте расчетных данных. Следует отметить, что аналогичная картина имеет место и для других значений давления разрыва жидкости в указанном выше диапазоне. Поэтому можно согласиться с автором работы [4] относительно преобладающего влияния гидротока жидкости на свободное формоизменение «податливой» заготовки. С точки зрения прогнозирования пластической деформации заготовки можно считать расчеты при помощи конечно-элементного комплекса LS-DYNA с моделью фиксированного давления разрыва воды вполне приемлемыми

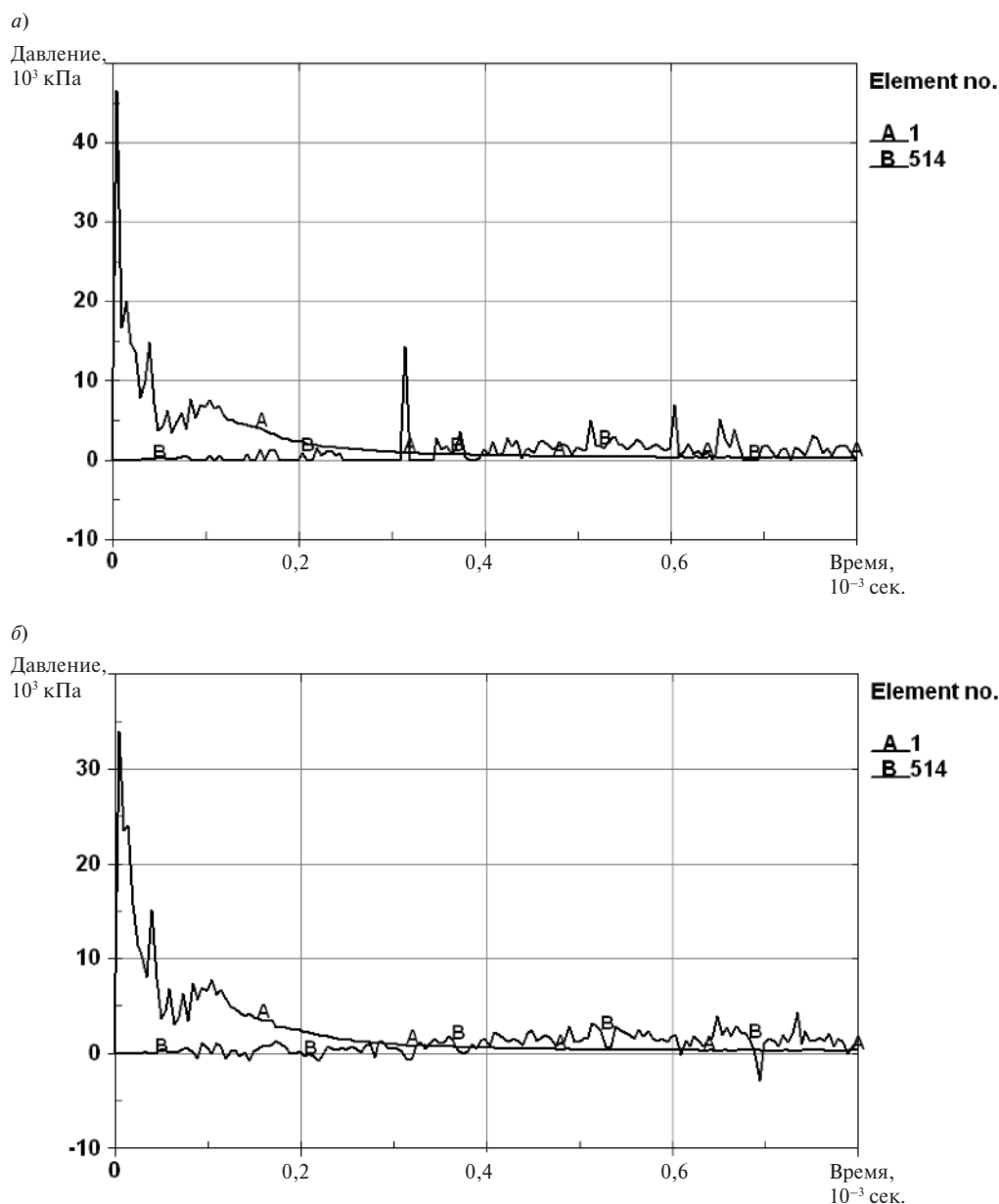


Рис. 3. Графики зависимости давления от времени в жидкости вблизи канала разряда (*A*) и над центром заготовки (*B*) при отрицательном давлении разрыва жидкости (*a* — 0,1 МПа; *б* — 40 МПа)

для расчета процессов ЭГИШ в случае «податливой» заготовки.

Экспериментальная верификация параметров импульсного давления в жидкости вблизи тонкой деформируемой заготовки представляет технически сложную задачу. Как показывают компьютерные расчеты [10], давление в конкретный момент времени даже для разрядной камеры небольшого объема сильно различается в

разных, достаточно близких точках камеры. Поэтому измерение на стенке камеры, например пьезоэлектрическим датчиком, не дает корректной картины давления на заготовку. С этой точки зрения интересен способ, основанный на измерении при помощи фотосъемки сверхскоростным фоторегистратором скорости вылета струи жидкости через небольшое отверстие в заготовке в процессе нагружения и деформирования заготов-

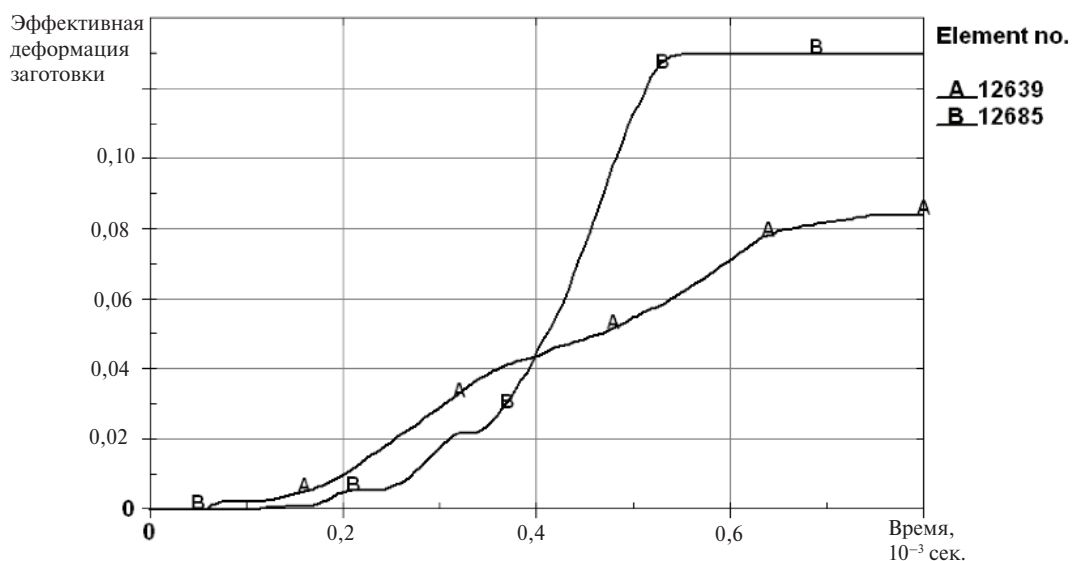
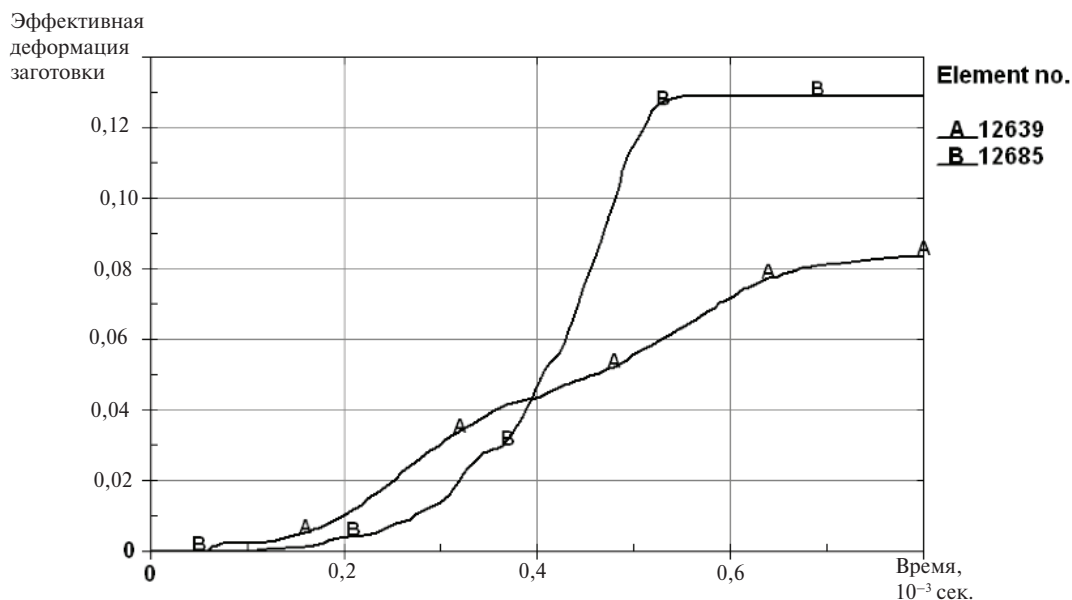


Рис. 4. Графики зависимости эффективной деформации заготовки от времени вблизи радиуса закругления кромки матрицы (A) и в центре заготовки (B) при отрицательных давлениях разрыва жидкости (a – 0,1 МПа; б – 40 МПа)

ки [17]. Представленные в этой работе результаты таких измерений показывают пульсирующий характер давления, действующего на подвижную тонколистовую заготовку, аналогично тому, как это показывают и расчеты (см. рис. 3).

Для корректного определения импульсного давления на «податливой» заготовке в процессах ЭГИШ нужны, по крайней мере, экспериментальные данные о времени разрыва воды в за-

висимости от величины отрицательного давления, времени воздействия давления на жидкость, температуры, степени загрязнения воды посторонними примесями. Имея такие зависимости, а также создав в рамках конечно-элементного комплекса соответствующую модель жидкости, можно более точно прогнозировать давление на подвижной заготовке. К сожалению, такие экспериментальные данные пока недоступны.



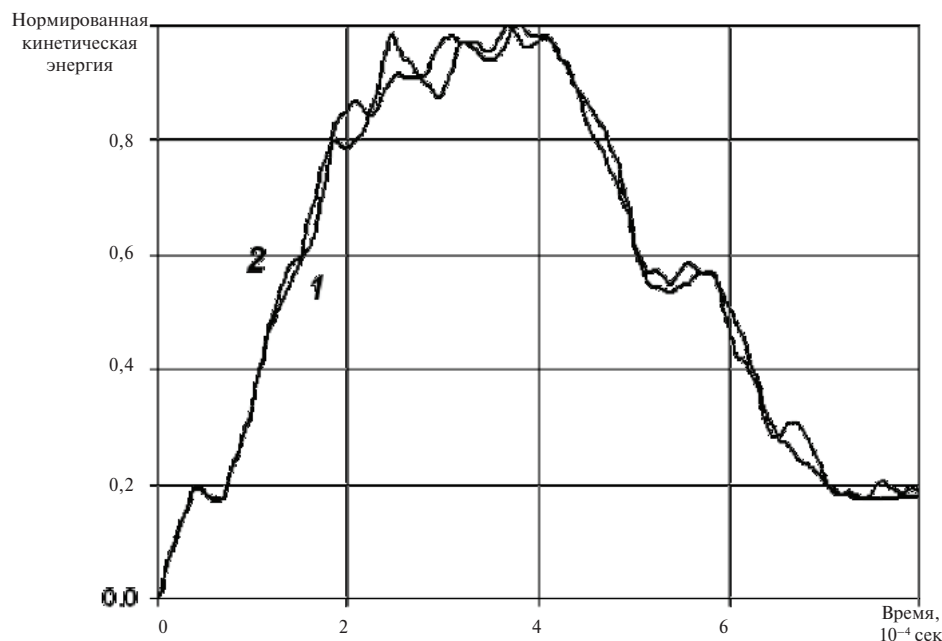


Рис. 5. Зависимость нормированной кинетической энергии от времени при отрицательных давлениях разрыва жидкости 0,1 (1) и 40 (2) МПа

### Заключение

На примере разрушения поверхности разрядной камеры показано влияние кавитационных эффектов при ЭГИШ. Для оценки влияния кавитации на давление в разрядной камере и на поверхности подвижной деформирующейся тонколистовой заготовки выбрана осесимметричная модель, разработанная на основе техники ALE с применением программного комплекса LS-DYNA 971. Расчеты производились на примере

конкретной «податливой» заготовки в пределах отрицательных давлений воды от 0,1 до 40 МПа, при которых возможна ее кавитация. Результаты расчетов показали незначительную разницу в параметрах деформированного состояния заготовки и одновременно значительное различие импульсного давления на поверхности заготовки. Это подтверждает теорию преимущественного влияния гидротока на деформацию «податливой» заготовки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оборудование и технологические процессы с использованием электрогидравлического эффекта / Под ред. Г.А. Гулого. М.: Машиностроение, 1977. 320 с.
2. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Электрическая эрозия металлов. Вып. 1/2. М.: Госэнергоиздат, 1944. 60 с.
3. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект. М.: Машгиз, 1955. 50 с.
4. Чачин В.Н. Электрогидроимпульсная обработка машиностроительных материалов. Минск: Наука и техника, 1978. 184 с.
5. Rohatgi A., Stephens E.V., Davies R.W., Smith M.T., Soulami A., Ahzi S. Electro-hydraulic forming of sheet metals: Free-forming vs. conical-die forming // Journal of Materials Processing Technology. 2012. Vol. 212. № 5. P. 1070–1079.
6. Тараненко М.Е. Электрогидравлическая штамповка: теория, оборудование, техпроцессы. Харьков: Изд-во ХАИ, 2011. 272 с.
7. Здор Г.Н., Исаевич Л.А., Качанов И.В. Технологии высокоскоростного деформирования металлов. Минск: БНТУ, 2010. 456 с.
8. Hallquist J.O. LS-DYNA theoretical manual / Livermore Software Technology Corporation: Livermore, CA, 2006. 498 p.
9. Головащенко С.Ф., Мамутов А.В., Мамутов В.С. Методика компьютерного моделирования электрогидроимпульсного формоизменения тонколистовых

металлов с применением программного комплекса LS-DYNA 971 // Металлообработка, 2012. № 4(69). С. 23–29.

10. **Мамутов А.В., Мамутов В.С.** Моделирование электрогидроимпульсной листовой формовки с применением комплекса LS-DYNA // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического института. 2014. № 1(190). С. 101–107.

11. **Mamutov V.S., Mamutov A.V., Golovaschenko S.F.** Simulation of High-Voltage Discharge Channel in Water at Electro-Hydraulic Forming Using LS-DYNA® // 13th International LS-DYNA® Users Conference, Metal forming. Dearborn, USA. 2014. P. 9.

12. **Mamutov A.V., Golovashchenko S.F., Mamutov V.S., Bonnen J.F.** Modeling of electrohydraulic forming of sheet metal parts // Journal of Materials Processing Technology. 2015. Vol. 219. P. 84–100.

13. **Пирсол И.** Кавитация. М.: Мир, 1975. 95 с.

14. **Богач А.А., Уткин А.В.** Прочность воды при импульсном растяжении // Прикладная механика и техническая физика. 2000. Т.41. №4. С. 198–205.

15. **Корнфельд М.** Упругость и прочность жидкостей. М., Л.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1951. 108 с.

16. **Мамутов В.С.** Взаимодействие волны сжатия со слоем кавитированной воды при электрогидроимпульсной обработке // Труды XXVI Международной конференции «Математическое и компьютерное моделирование в механике деформируемых сред и конструкций». СПб.: ИД «ФАРМиндекс», 2015. С. 205–206.

17. **Вагин В.А., Здор Г.Н., Мамутов В.С.** Методы исследования высокоскоростного деформирования металлов. Минск: Наука и техника, 1990. 208 с.

## REFERENCES

1. *Oborudovaniye i tekhnologicheskiye protsessy s ispolzovaniyem elektrogidravlichesкого эффекта.* [Equipment and technological processes with using of electrohydraulic effect.] / Pod red. G.A. Gulogo. M.: Mashinostroyeniye, 1977. 320 p. (rus)

2. **Lazarenko B.R., Lazarenko N.I.** Elektricheskaya eroziya metallov. [Electrical erosion of metals.] Vyp. 1/2. M.: Gosenergoizdat, 1944. 60 p. (rus)

3. **Yutkin L.A.** Elektrogidravlicheskiy effekt. [Electrohydraulic effect.] M.: Mashgiz, 1955. 50 p. (rus)

4. **Chachin V.N.** Elektrogidroimpulsnaya obrabotka mashinostroitelnykh materialov. [Electrohydraulic processing of machine-building materials.] Minsk: Nauka i tekhnika, 1978. 184 p. (rus)

5. **Rohatgi A., Stephens E.V., Davies R.W., Smith M.T., Soulami A., Ahzi S.** Electro-hydraulic forming of sheet metals: Free-forming vs. conical-die forming. *Journal of Materials Processing Technology*. 2012. Vol. 212. № 5. P. 1070–1079.

6. **Taranenko M.Ye.** Elektrogidravlicheskaya shtampovka: teoriya, oborudovaniye, tekhnoprotsessy. [Electrohydraulic stamping: the theory, the equipment, technological processes.] Kharkov: Izd-vo KhAI, 2011. 272 p. (rus)

7. **Zdor G.N., Isayevich L.A., Kachanov I.V.** Tekhnologii vysokoskorostnogo deformirovaniya metallov. [Technologies of high-speed deforming of metals]. Minsk: BNTU, 2010. 456 s. (rus)

8. **Hallquist J.O.** LS-DYNA theoretical manual/ Livermore Software Technology Corporation: Livermore, SA, 2006. 498 p.

9. **Golovashchenko S.F., Mamutov A.V., Mamutov V.S.** Metodika kompyuternogo modelirovaniya elektrogidroimpulsnogo formoizmeneniya tonkolistovykh metallov s primeneniym programmnogo kompleksa LS-

DYNA 971 [Using LS-DYNA 971 code for computer simulation of electro-hydro-impulse forming of thin-sheet metals]. *Metalloobrabotka*. 2012. № 4(69). S. 23–29. (rus)

10. **Mamutov A.V., Mamutov V.S.** Modelirovaniye elektrogidroimpulsnoy listovoy formovki s primeneniym kompleksa LS-DYNA [Simulating the electro-hydraulic sheet metal forming using LS-DYNA]. *St.Petersburg State Politechnical Universiti Journal*. St.Petersburg: SPbGPU Publ. 2014. №1(190). P. 101–107. (rus)

11. **Mamutov V.S., Mamutov A.V., Golovaschenko S.F.** Simulation of High-Voltage Discharge Channel in Water at Electro-Hydraulic Forming Using LS-DYNA®. *13th International LS-DYNA® Users Conference, Metal forming*. Dearborn, USA. 2014. P. 9.

12. **Mamutov A.V., Golovashchenko S.F., Mamutov V.S., Bonnen J.F.** Modeling of electrohydraulic forming of sheet metal parts. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015. Vol. 219. P. 84–100.

13. **Pirsol I.** Kavitatsiya. [Cavitation.] M.: Mir, 1975. 95 p. (rus)

14. **Bogach A.A., Utkin A.B.** Prochnost vody pri impulsnom rastyazhenii [Tensile strength of water at impulse tension]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*. 2000. T.41. №4. S. 198–205. (rus)

15. **Kornfeld M.** Uprugost i prochnost zhidkostey. [Elasticity and strength of fluids.] M., L.: Gosudarstvennoye izdatelstvo tekhniko-teoreticheskoy literatury, 1951. 108 s. (rus)

16. **Mamutov V.S.** Vzaimodeystviye volny szhatiya so sloyem kavitirovannoy vody pri elektrogidroimpulsnoy obrabotke [Interaction of wave of compression with layer of water after cavitation at electro-hydraulic process]. *Trudy XXVI Mezhdunarodnoy konferentsii «Matematicheskoye i kompyuternoye modelirovaniye v*

*mekhanike deformiruyemykh sred i konstruksiy*». SPb.: ID «FARMindeks», 2015. S. 205–206. (rus)

17. **Vagin V.A., Zdor G.N., Mamutov V.S.** Metody issledovaniya vysokoskorostnogo deformirovaniya

metallov. [Methods of research of high-speed deformation of metals.] Minsk: Nauka i tekhnika, 1990. 208 s. (rus)

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

**МАМУТОВ Вячеслав Сабайдинович** — доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

E-mail: mamutov\_vs@spbstu.ru

**MAMUTOV Vicheslav S.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

E-mail: mamutov\_vs@spbstu.ru

**МАМУТОВ Александр Вячеславович** — кандидат технических наук, приглашенный ученый Оклендского университета (Мичиган, США).

2200 N Squirrel Rd. Rochester, Michigan 48309.

E-mail: A.Mamutov@yahoo.com

**MAMUTOV Aleksandr V.** — Oakland University.

2200 N Squirrel Rd. Rochester, Michigan 48309.

E-mail: A.Mamutov@yahoo.com

**КУРЯТНИКОВ Александр Алексеевич** — аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

E-mail: kuriatnikov91@mail.ru

**KURIATNIKOV Aleksandr A.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

E-mail: kuriatnikov91@mail.ru



DOI 10.5862/JEST.243.17

УДК 621.438.001.2

*А.К. Нгуен, К.Л. Лапшин*

## **ХАРАКТЕРИСТИКИ И СТРУКТУРА ПОТОКА ТУРБИННОЙ СТУПЕНИ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ ГРАДИЕНТОМ СТЕПЕНИ РЕАКТИВНОСТИ**

*A.Q. Nguyen, K.L. Lapshin*

### **CHARACTERISTICS AND STRUCTURE OF THE FLOW IN A TURBINE STAGE WITH A NEGATIVE GRADIENT OF THE DEGREE OF REACTIVITY**

Исследованы характеристики и структура пространственного потока осевой турбинной ступени с отрицательным градиентом степени реактивности. Построена расчетная модель этой ступени и выполнены проверочные 3D газодинамические расчеты в программном комплексе ANSYS CFX. На номинальном режиме проанализировано течение в межвенцовых зазорах и в каналах лопаточных венцов на разных сечениях вдоль радиуса. Построены графики изменения КПД и степени реактивности на переменных по частоте вращения ротора режимах, распределения по высоте лопатки параметров потока (углы  $\alpha_1$ ,  $\beta_1$ ,  $\alpha_2$ ; степень реактивности; коэффициенты скорости в направляющем аппарате и рабочем колесе). Выполнено сравнение результатов расчета с экспериментальными данными. Дано заключение о целесообразности применения программного комплекса ANSYS CFX для определения характеристик и структуры пространственного потока турбинной ступени с отрицательным градиентом степени реактивности, а также о достоинствах ступени такого типа по сравнению с обычной.

ТУРБИНАЯ СТУПЕНЬ; ТАНГЕНЦИАЛЬНЫЙ НАКЛОН; НАПРАВЛЯЮЩИЕ ЛОПАТКИ; ОТРИЦАТЕЛЬНЫЙ ГРАДИЕНТ СТЕПЕНИ РЕАКТИВНОСТИ; ANSYS CFX.

The characteristics and the structure of the spatial flow in an axial turbine stage with a negative gradient of the degree of reactivity were explored. A calculation model of the stage was constructed and 3-D testing gas-dynamic calculations in ANSYS CFX were performed. The structure of the flow between blade rows and in the blade-to-blade sections on different sections along the radius were analyzed under nominal conditions. The graphs of the efficiency index and the degree of reactivity depending on the frequency of the rotor are presented. The distribution of flow parameters ( $\alpha_1$ ,  $\beta_1$  and  $\alpha_2$  angles; the degree of reactivity, coefficients of flow velocity for the guide vanes and the impellers) are given by the height of the blade. The calculation results are compared with the experimental data. We have concluded that it seems feasible to use ANSYS CFX to determine the characteristics and spatial patterns of flow in the turbine stage with the negative gradient of the degree of reactivity. The merits of this type of stage compared to the stage of conventional type are formulated.

TURBINE STAGE; TANGENTIAL INCLINATION; GUIDE BLADES; NEGATIVE GRADIENT OF DEGREE OF REACTIVITY; ANSYS CFX.

#### **Введение**

Как известно из теории турбомашин, в турбинной ступени с широко распространенными закрутками потока  $C_{1u} \cdot r = \text{const}$  и  $\alpha_1 = \text{const}$  из-за низкой у корня и высокой у периферии термодинамической степени реактивности  $\rho_r$  возни-

кают значительные протечки рабочего тела через диафрагменное уплотнение и радиальный зазор над рабочими лопатками, что приводит к снижению КПД и мощности. Для улучшения течения в этих областях полезно при выходе из направляющих аппаратов (НА) сообщить потоку радиальную скорость в направлении к оси тур-

бины. Такое действие приводит к снижению градиента степени реактивности [1–10] вдоль радиуса ступени.

### Цель работы

В пакете ANSYS CFX исследовались характеристики и структуру пространственного потока осевой турбинной ступени с тангенциальным наклоном направляющих лопаток (ТННЛ), что служит одним из основных способов снижения градиента степени реактивности, и полученные результаты сравнивались с экспериментальными, которые представлены в [1]. Тем самым проверялась возможность и целесообразность использования пакета ANSYS CFX в качестве виртуального стенда для исследования характеристик и структуры пространственного потока осевых турбинных ступеней со сниженным градиентом степени реактивности, что и составляет цель работы.

### Постановка задачи

Геометрические параметры ступени взяты из [1]. Ступень (рис. 1) средней веерности  $\left(\frac{d_{2c}}{l_2} = 6,34\right)$  с отрицательным градиентом степени реактивности спроектирована при  $\alpha_1 = \text{const}$  так, чтобы обеспечить в зазоре между НА и рабочим колесом (РК) закрутку потока по закону твердого тела  $\frac{C_{1u}}{r} = \text{const}$  [1], что нетра-

диционно и характеризует научную новизну объекта исследований. Угол  $\alpha_{1\text{эф}}$  постоянен вдоль радиуса и равен  $18^\circ 10'$ . Угол ТННЛ на среднем радиусе равен  $23^\circ$ ; лопатки РК не закручены вдоль радиуса. Ступень такого типа с рабочими лопатками (РЛ) постоянного вдоль радиуса профиля представляет интерес для применения в качестве первой, интенсивно охлаждаемой, в высокотемпературных газовых турбинах. Высокая степень реактивности у корня РЛ открывает дополнительные возможности по минимизации осевого усилия, действующего на общий ротор компрессора и турбины газотурбинной установки (ГТУ). Под влиянием высокой термодинамической степени реактивности у корня на диск такой турбинной ступени действует значительное осевое усилие. В газотурбинных двигателях компрессор и турбина часто располагаются на одном жестком валу. Осевое усилие в компрессоре направлено в сторону всасывания, а у турбины — в сторону нагнетания. Чем меньше эта разница осевых усилий, тем проще конструкция опорно-упорного подшипника. Поэтому расчетно-теоретические и экспериментальные исследования турбинной ступени такого типа весьма актуальны.

Проверочные 3D газодинамические расчеты выполнялись с учетом ценных методических рекомендаций, изложенных в статьях [11–13]. Для упрощения решения задачи исследовали турбинную ступень без радиального зазора над РК. По-

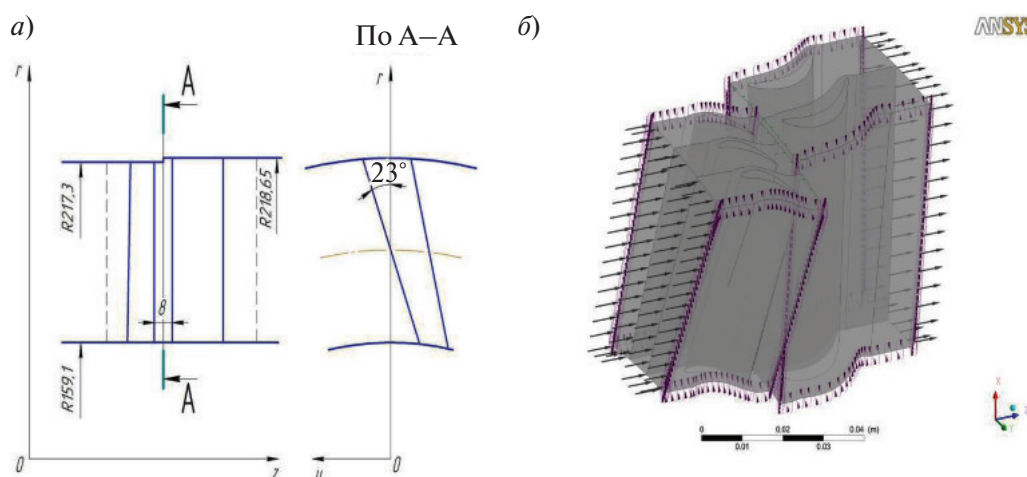


Рис. 1. Схема турбинной ступени (а) и ее расчетная модель (б)



строение расчетной модели выполнено с помощью программ, входящих в пакет ANSYS. Расчетная модель (см. рис. 1) – сектор проточной части, который состоит из трех направляющих лопаток (НЛ) и двух рабочих лопаток (РЛ). Расчетная сетка содержит 4754052 узла, в том числе НА – 2626065 узлов и РК – 2127987 узла. Вблизи поверхностей, обтекаемых потоком, обеспечено сгущение сетки, что необходимо для корректного расчёта параметров потока в пограничном слое. Заданы параметры газа на входе в расчетную область – давление и температура торможения ( $P_0^* = 0,137$  МПа и  $T_0^* = 368$  К), а на выходе – давление в потоке ( $P_2 = 0,103298$  МПа). Способ решения – стационарная задача (Stage), при этом на поверхности сопряжения выполняется осреднение параметров потока в окружном направлении. Применение Stage оправдано тем, что степень неравномерности потока перед рабочими лопатками, вычисленная по известной формуле Г.Ю. Степанова [14], составляет всего примерно 3 %.

## Результаты расчетов

На рис. 2 показаны меридианные линии тока в турбинной ступени. При постоянном угле  $\alpha_{\text{эф}}$  искривление линий тока, вызывающее снижение  $\frac{\partial p}{\partial r}$ , возникает внутри направляющих решеток. Впервые подобная картина линий тока была приведена в статье [4]. В зонах выходных кромок и за НА линии тока смещаются к корню ступени (см. рис. 2), в результате чего появляется центро-стремительное ускорение, снижающее радиальный градиент давления. В этой ступени угол тангенциального наклона НЛ – большой и положительный, при этом проекция лопаточной силы на оси  $r$  имеет существенную величину.

Центробежная сила  $\frac{\rho C_u^2}{r}$  в месте максимального изгиба профиля невелика, и уравновесить проекцию лопаточной силы на оси  $r$  может только отрицательный градиент давлений (то есть давления у корня должны быть выше, чем у пери-

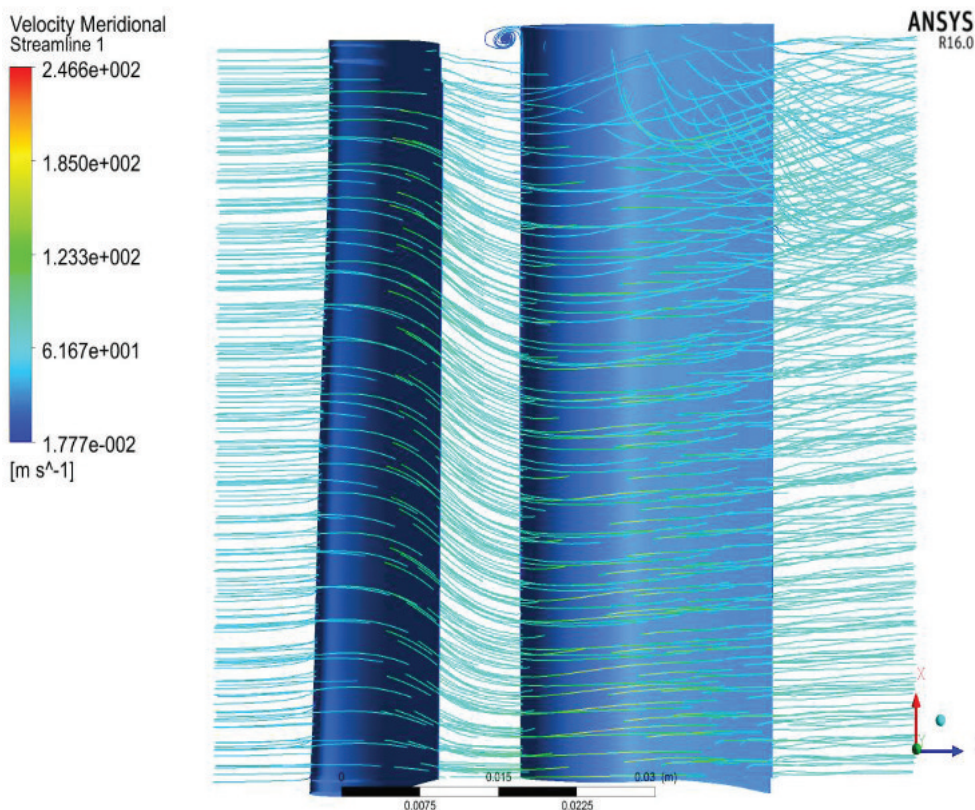


Рис. 2. Меридианные линии тока в турбинной ступени

ферии). А изменение давления потока за РК вдоль радиуса невелико. По этой причине на расчетных режимах градиент степени реактивности во всей зоне изменения параметра  $\frac{u}{C_0}$  получился отрицательным, т. е. степень реактивности у корня больше, чем у периферии (рис. 5).

После решения стационарной задачи результаты представлены в виде непрерывного распределения полей поверхностей тока; получены окружный КПД и степени реактивности при различных значениях параметра  $\frac{u}{C_0}$ . На рис. 3, 4 показаны распределения абсолютных и относительных скоростей в трех сечениях на номинальном режиме. На рис. 5 представлены зависимости расчетных и экспериментальных КПД и степеней реактивности от значений параметра

$\frac{u}{C_0}$ . И абсолютные, и относительные скорости потока во всех исследованиях были дозвуковыми.

Рис. 3 показывает, как ведет себя поток в абсолютной системе координат. В турбинной ступени с ТННЛ выход потока из ступени в среднем сечении близок к осевому (об этом свидетельствует параллельность векторов скорости на выходе из ступени и оси Z системы координат), а в корневом и периферийном сечениях выходы потока заметно отклоняются от осевого. Это приводит к увеличению потерь кинетической энергии с выходной скоростью.

На рис. 4 показано, как ведет себя поток в относительной системе координат. В турбинной ступени с ТННЛ в среднем сечении поток обтекает профиль рабочих лопаток почти без углов атаки,

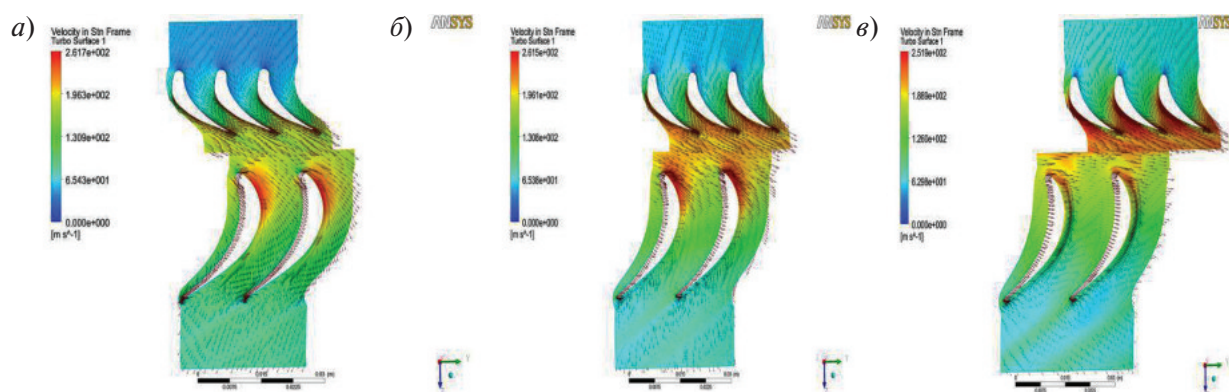


Рис. 3. Распределение абсолютных скоростей в трех сечениях:  
а) корневом; б) среднем; в) периферийном

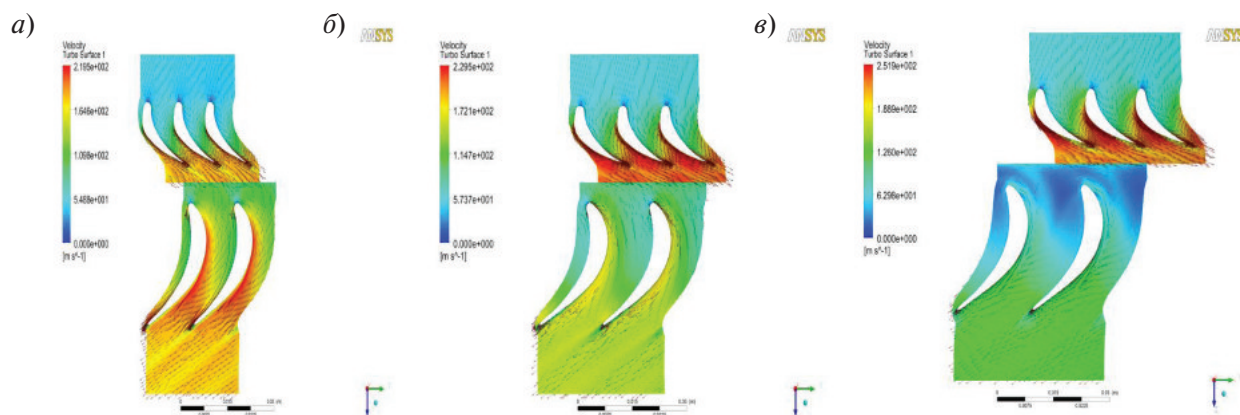


Рис. 4. Распределение относительных скоростей в трех сечениях:  
а) корневом; б) среднем; в) периферийном

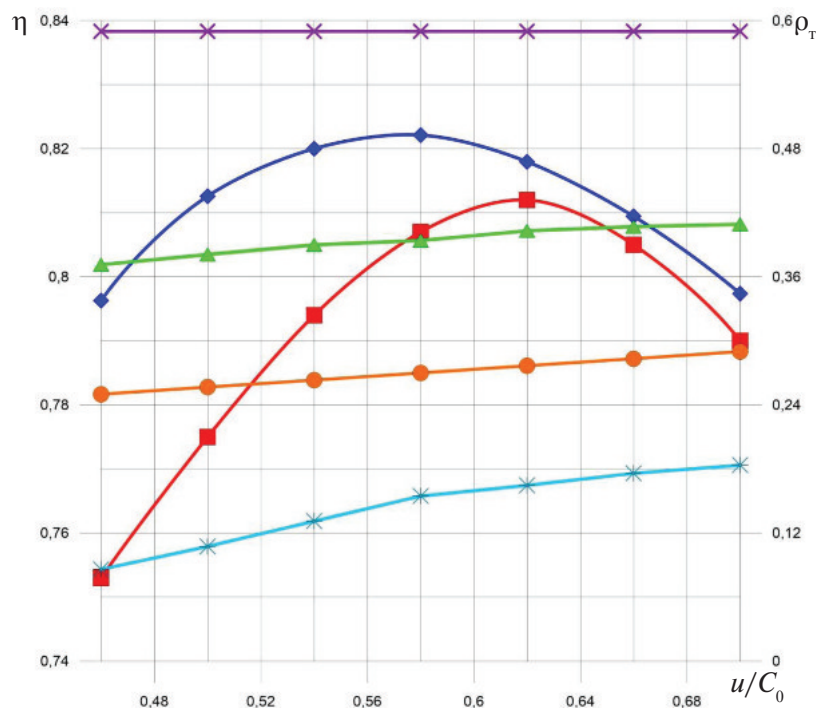


Рис. 5. Зависимости окружного и внутреннего КПД и степеней реактивности от параметра  $\frac{u}{C_0}$ :  $\diamond$   $\eta_{расч}$ ;  $\blacksquare$   $\eta_{экс}$ ;  $\blacktriangle$   $\rho'_{т расч}$ ;  $\times$   $\rho''_{т расч}$ ;  $\circ$   $\rho'_{т экс}$ ;  $\times$   $\rho''_{т экс}$

а в корневом и периферийном сечениях — с отрицательными углами атаки. Это приводит к уменьшению окружного КПД этой ступени.

На рис. 5 экспериментальный внутренний КПД достигает максимума при  $\frac{u}{C_0} = 0,62$ ; а расчетный окружной КПД — при  $\frac{u}{C_0} = 0,58$ . Разница между ними составляет 1 %. Это различие объясняется тем, что в расчетной модели исследуемой ступени в программе ANSYS CFX не учитывался радиальный зазор.

Экспериментально доказано [1], что турбинные ступени со сниженным градиентом степени реактивности по сравнению со ступенями обычного типа менее чувствительны к величине радиального зазора. В монографии [8] для учета влияния радиального зазора над рабочими лопатками без банджа на внутренний КПД турбинной ступени рекомендована эмпирическая формула, учитывающая снижение градиента степени реактивности. В соответствии с этой формулой разница между максимумами КПД в

расчете и в эксперименте для турбинной ступени с отрицательным градиентом степени реактивности составляет 0,7 %. Уместно отметить, что для ступени обычного типа с широко распространенной закруткой потока  $\alpha_1 = \text{const}$  эта разница составила бы примерно 3,6 %.

Экспериментальная степень реактивности  $\rho_{тс}$  на среднем диаметре примерно на 16 % больше расчетной. Увеличение степени реактивности  $\rho_{тс}$  в экспериментах объясняется ростом потерь кинетической энергии в РК под негативным влиянием радиального зазора, что приводит к снижению КПД и повышению оптимального значения параметра  $\left(\frac{u}{C_0}\right)_{\text{опт}}$ .

### Сравнение расчетных данных с экспериментальными

Чтобы исследовать пространственную структуру потока в турбинной ступени с ТННЛ на режиме траверсирования, было вычислено распределение параметров потока по высоте лопатки на оптимальном режиме  $\frac{u}{C_0} = 0,58$  в осевом

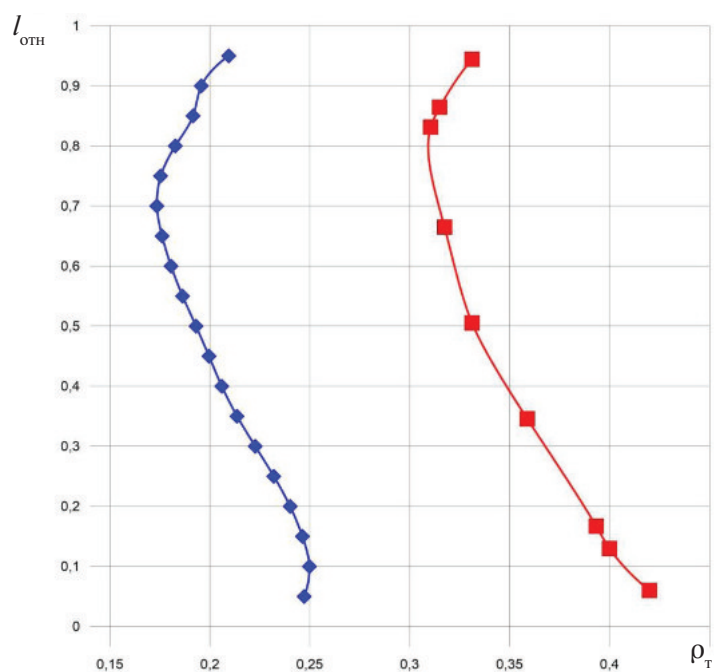


Рис. 6. Распределение степени реактивности по высоте лопатки:

—◆—  $\rho_{T\text{ расч}}$ ; —■—  $\rho_{T\text{ эксп}}$

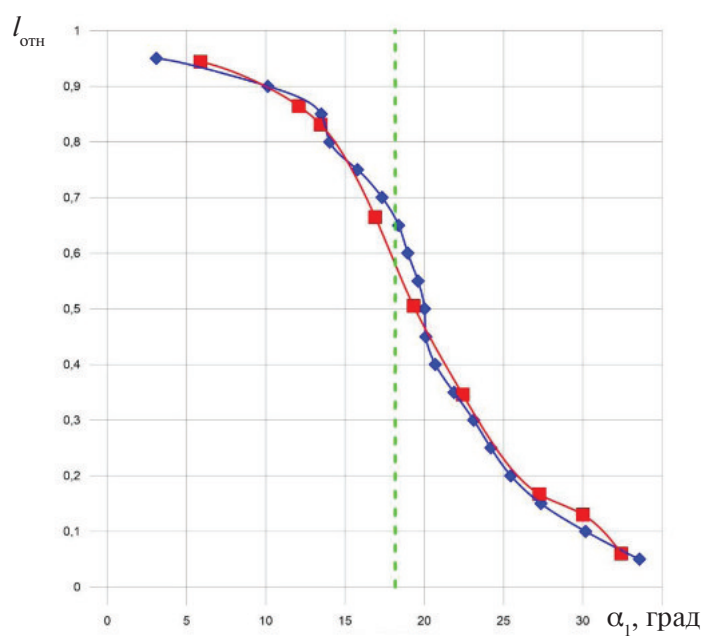


Рис. 7. Распределение угла  $\alpha_1$  по высоте лопатки:

—◆—  $\alpha_{1\text{ расч}}$ ; —■—  $\alpha_{1\text{ эксп}}$ ; ----  $\alpha_{1\text{ эф}}$

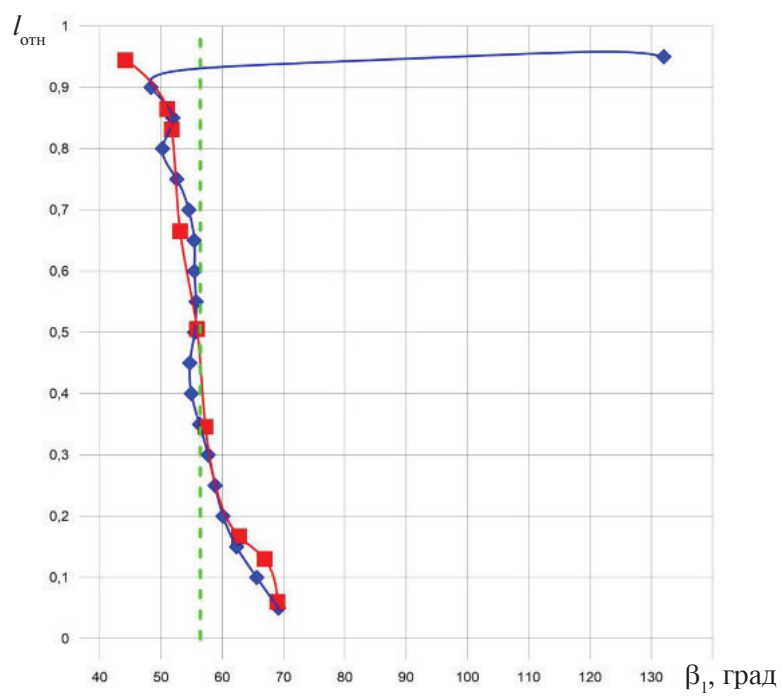


Рис. 8. Распределение угла  $\beta_1$  по высоте лопатки:  
 $\blacklozenge$  —  $\beta_{1, \text{расч}}$ ;  $\blacksquare$  —  $\beta_{1, \text{эксп}}$ ;  $---$   $\beta_{1, \text{л}}$

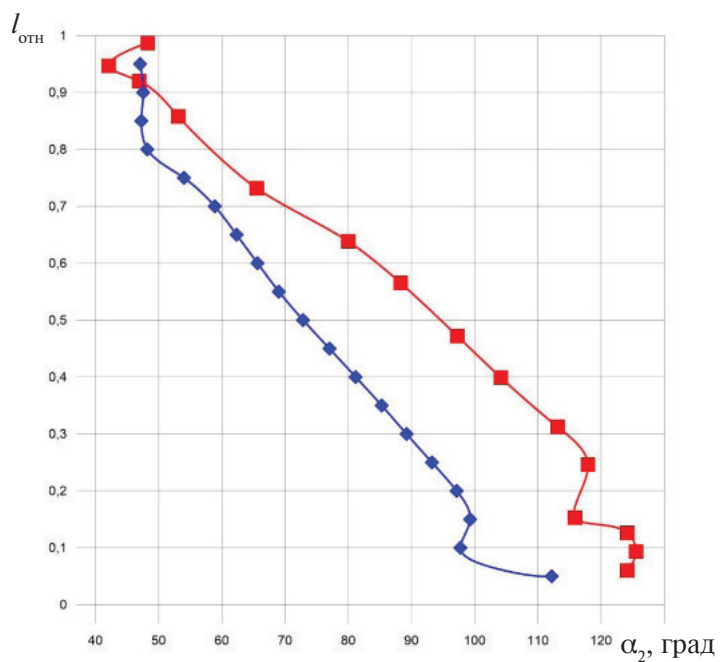


Рис. 9. Распределение угла  $\alpha_2$  по высоте лопатки:  
 $\blacklozenge$  —  $\alpha_{2, \text{расч}}$ ;  $\blacksquare$  —  $\alpha_{2, \text{эксп}}$



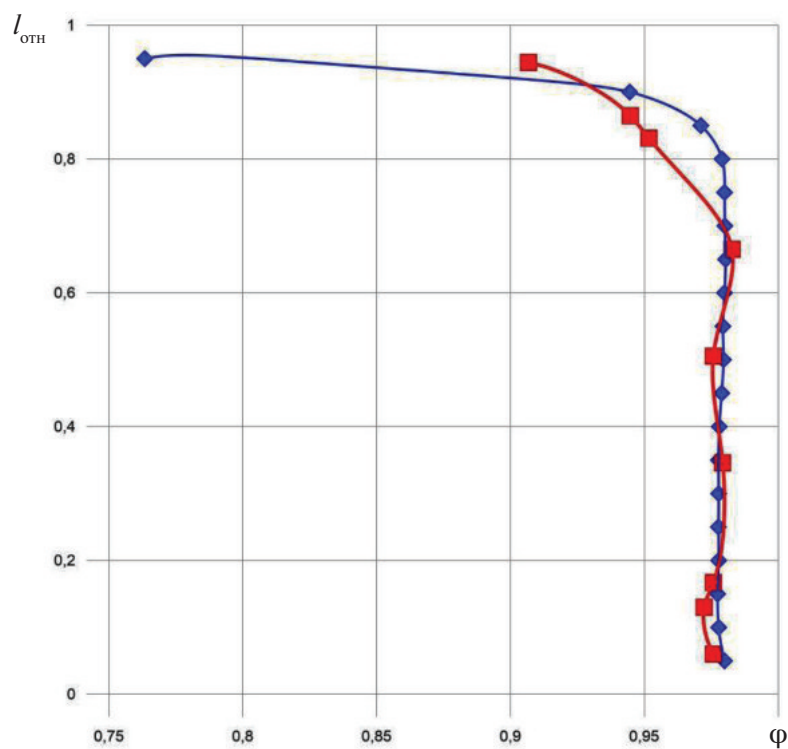


Рис. 10. Распределение коэффициента скорости для НА по высоте лопатки: —◆— —  $\varphi_{\text{расч}}$ ; —■— —  $\varphi_{\text{эксп}}$

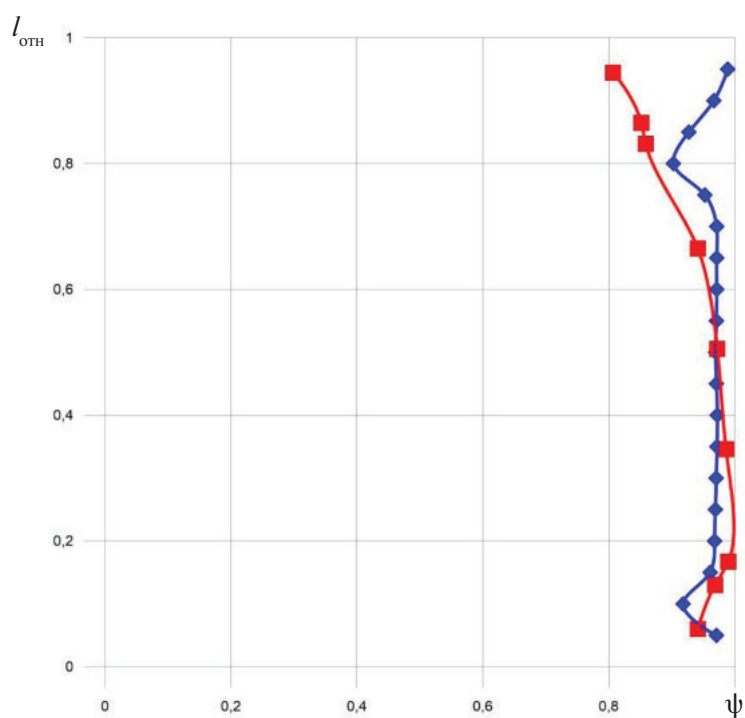


Рис. 11. Распределение коэффициента скорости для РК по высоте лопатки: —◆— —  $\psi_{\text{расч}}$ ; —■— —  $\psi_{\text{эксп}}$

зазоре и за РК. Для этого осевой зазор между НЛ и РЛ был увеличен до 20 мм, как и в эксперименте. Расчетная плоскость в осевом зазоре расположена на расстоянии 13 мм от выходных кромок НЛ, а за РК — на расстоянии 10 мм от выходных кромок РЛ. В этих же плоскостях выполнялось траверсирование пространственного потока в эксперименте. После вычисления всех параметров потока выполнено сравнение расчетных параметров с экспериментальными.

Распределение степени реактивности по высоте лопатки в проточной части ступени на режиме траверсирования получилось нелинейным. В нижней части градиент степени реактивности — отрицательный, а в верхней части — положительный. Рис. 6 показывает, что экспериментальная степень реактивности примерно на 16 % больше расчетной по причине наличия радиального зазора над РЛ.

Углы  $\alpha_1$  сильно отличаются от эффективных углов  $\alpha_{1\text{эф}}$ . Это отклонение тем существеннее, чем больше отрицательный градиент степени реактивности. В нижней части отклонение между углом потока  $\alpha_1$  и эффективным углом  $\alpha_{1\text{эф}}$  получились положительное, а в верхней части — отрицательное. На рис. 7 видно, что расчетные и экспериментальные углы  $\alpha_1$  почти совпадают друг с другом.

Углы потока  $\beta_1$  в этой ступени заметно отличаются от геометрических по высоте лопатки. В нижней части поток обтекает профили РЛ с отрицательными, а в верхней части — с положительными углами атаки. На рис. 8 расчетные и экспериментальные углы  $\beta_1$  почти совпадают, но отличие между ними состоит в том, что расчетный угол  $\beta_1$  в периферийной области РЛ резко увеличивается, и, соответственно, в этой области угол  $\alpha_1$  уменьшается. Это объясняется тем, что поток в этом случае находится в зоне циркуляционного вихря (см. рис. 2).

На рис. 9 видно, что углы выхода потока  $\alpha_2$  за РЛ заметно изменяются по высоте лопатки. У корня закрутка потока — отрицательная, а у периферии — положительная. Значительное отклонение выхода потока за РЛ от осевого направления приводит к увеличению потерь

кинетической энергии с выходной скоростью за ступенью.

Из рис. 10, 11 видно, что под влиянием тангенциального наклона НЛ улучшается обтекание в корневых сечениях НЛ, а потери в периферийных сечениях возрастают, т. е. коэффициент скорости за НА убывает вдоль радиуса. Высокая степень реактивности у корня положительно влияет на обтекание решеток РЛ, в нижней части которых коэффициент скорости  $\psi$  больше, чем в верхней части. Снижение коэффициента скорости  $\psi$  в периферийных области объясняется появлением положительного угла атаки в этой области. Расчетные и экспериментальные коэффициенты скорости за НА почти совпадают по высоте лопатки. Расчетные и экспериментальные коэффициенты скорости за РК в нижней половине почти совпадают, а в верхней половине экспериментальные значения меньше расчетных, что объясняется наличием радиального зазора над РЛ.

### Выводы

Из рассмотренных выше результатов расчетных и экспериментальных исследований приходим к следующим выводам.

Поскольку отклонения между расчетами и опытами невелики даже для ступени с отрицательным градиентом степени реактивности, то можно программу ANSYS CFX рассматривать как виртуальный стенд и применять ее для исследования характеристик и структуры потока дозвуковых турбинных ступеней как обычного типа, так и с ТННЛ.

Исследованная ступень с отрицательным градиентом степени реактивности и рабочими лопатками постоянного профиля имеет достаточно высокую экономичность, особенно при больших радиальных зазорах у периферии РЛ без бандажа. Поэтому она может быть рекомендована для применения в проточных частях турбин высокотемпературных ГТУ.

Ступень с отрицательным градиентом степени реактивности из-за высокой корневой степени реактивности может уменьшить суммарное осевое усилие, действующее на ротор «компрессор — турбина» ГТУ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьева Н.Н., Бусурин В. Н., Гоголев И. Г., Дьяконов Р.И. Аэродинамические характеристики ступеней тепловых турбин / Под общ. ред. В.А. Черникова. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1980. 263 с., ил.
2. Кириллов И.И., Кириллов А.И. Теория турбомашин. Примеры и задачи: Учебное пособие для вузов. Л.: Машиностроение (Ленинград. отд-ние), 1974. 320 с.
3. Кириллов И.И. Теория турбомашин. Л.: Машиностроение, 1972. 533 с.
4. Алексеев О.Н., Кириллов А.И., Лапшин К.Л., Черников В.А. Исследования турбинных ступеней с навалом сопловых лопаток // Труды ЛПИ. 1969. № 310. С. 35–40.
5. Кириллов И.И., Агафонов Б.Н., Афанасьева Н.Н., Кириллов А.И., Проскуряков Г.В., Черников В.А., Шварцман О.А. Исследование и отработка ступеней для высокотемпературных газовых турбин // Теплоэнергетика. 1983. №3. С. 50–55.
6. Щегляев А.В. Паровые турбины. М., 1976. 368 с.
7. Топунов А.М., Тихомиров В.А. Управление потоком в тепловых турбинах. Л., 1979. 151 с.
8. Лапшин К.Л. Оптимизация проточных частей паровых и газовых турбин. СПб., 2011. 177 с.
9. Лапшин К.Л. Оптимизация проточных частей паровых турбин с применением «интегральных» сопловых лопаток // НТВ СПбГПУ. Сер.: Наука и образование. 2013. №1. С. 61–66.
10. Лапшин К.Л., Фомин В.С., Аврутов Е.А., Кириллов В.И. Влияние тангенциального наклона направляющих лопаток на структуру потока и характеристики осевой турбинной ступени // Изв. вузов. Энергетика. 1985. № 7. С. 76–80.
11. Смирнов Е.М., Кириллов А.И., Рис В.В. Опыт численного анализа пространственных турбулентных течений в турбомашинах // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Изд-во Политехнического университета. 2004. № 1. С. 56–70.
12. Кириллов А.И., Рис В.В., Смирнов Е.М. Опыт решения методических и практических задач численного моделирования течений и теплообмена в турбомашинах // Справочник. Инженерный журнал. Приложение: «Методы совершенствования энергетических установок». М.: Машиностроение, 2004. № 10. С. 13–19.
13. Епифанов А.А., Кириллов А.И., Рассохин В.А. Расчет трехмерного течения в ступенях малорасходных турбин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия: Наука и образование. СПб. Изд-во Политехнического университета. 2012. №1. С. 65–70.
14. Степанов Г.Ю. Гидродинамика решеток турбомашин. М., 1962. 512 с.

## REFERENCES

1. Afasnasyeva N.N., Busurin V.N., Gogolev I.G., Dyakonov R.I. Aerodinamicheskiye kharakteristiki stupeney teplovykh turbin [Aerodynamic characteristics of thermal turbines stages] / Pod obshch. red. V.A. Chernikova. Leningrad: Mashinostroyeniye, Leningr. otd-niye, 1980. 263 s., il. (rus)
2. Kirillov I.I., Kirillov A.I. Teoriya turbomashin. Primery i zadachi. Uchebnoye posobiye dlya vuzov. [Theory of turbomachinery. Examples and exercises. Textbook for universities]. Leningrad: Mashinostroyeniye (Leningrad. otd-niye), 1974. 320 s. (rus)
3. Kirillov I.I. Teoriya turbomashin. [Theory of turbomachinery]. Leningrad: Mashinostroyeniye, 1972. 533 s. (rus)
4. Alekseyev O.N., Kirillov A.I., Lapshin K.L., Chernikov V.A. Issledovaniya turbinnykh stupeney s navalom soplovykh lopatok [The research of turbine stages with the bulk of the nozzle vanes]. Trudy LPI. 1969. №310. S. 35–40. (rus)
5. Kirillov I.I., Agafonov B.N., Afanasyeva N.N., Kirillov A.I., Proskuryakov G.V., Chernikov V.A., Shvartsman O.A. Issledovaniye i otrabotka stupeney dlya vysokotemperaturnykh gazovykh turbin. [The research and treatment stages for high temperature gas turbines]. Teploenergetika. 1983. №3. S. 50–55. (rus)
6. Shcheglyayev A.V. Parovyye turbiny. [Steam turbines]. Moscow, 1976. 368 s. (rus)
7. Topunov A.M., Tikhomirov V.A. Upravleniye potokom v teplovykh turbinakh. [Flow control in thermal turbines]. Leningrad, 1979. 151 s. (rus)
8. Lapshin K.L. Optimizatsiya protochnykh chastey parovykh i gazovykh turbin. [Optimization of flow parts of steam and gas turbines]. SPb., 2011. 177 s. (rus)
9. Lapshin K.L. Optimizatsiya protochnykh chastey parovykh turbin s primeneniym «integralnykh» soplovykh lopatok [Optimization of flow parts of steam turbines using «integrated» nozzle vanes]. NTV SPbGPU. 2013. №1(166). S. 61–66. (rus)
10. Lapshin K.L., Fomin V.S., Avrutov Ye.A., Kirillov V.I. Vliyaniye tangentsialnogo naklona napravlyayushchikh lopatok na strukturu potoka i kharakteristiki osevoy turbinnoy stupeni [The influence of the tangential inclination of the guide vanes on the structure of flow and the characteristics of axial turbine stages]. Izvestiya vuzov. Energetika. 1985. № 7. S. 76–80. (rus)
11. Smirnov Ye.M., Kirillov A.I., Ris V.V. Opyt chislenogo analiza prostranstvennykh turbulentnykh techeniy v turbomashinakh [Experience of numerical analysis of spatial turbulent flows in turbomachines]. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. 2004. № 1. S. 56–70. (rus)

12. Kirillov A.I., Ris V.V., Smirnov Ye.M. Opyt resheniya metodicheskikh i prakticheskikh zadach chislennogo modelirovaniya techeniy i teploobmena v turbomashinakh [Experience of solving methodological and practical problems of numerical simulation of flows and heat exchange in turbomachines]. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal. Prilozheniye «Metody sovershenstvovaniya energeticheskikh ustanovok»*. Machine building Publ. Moscow. 2004. № 10. S. 13–19. (rus)

13. Yepifanov A.A., Kirillov A.I., Rassokhin V.A. Raschet trekhmernogo techeniya v stupenyakh maloraskhodnykh turbin [Calculation of three-dimensional flow in turbine stages of economical]. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Seria: Science and education*. SPb. SPbSPU Publ. 2012. №1. S. 65–70. (rus)

14. Stepanov G.Yu. Gidrodinamika reshetok turbomashin [Hydrodynamics grids of turbomachines]. Moscow, 1962. 512 s. (rus)

# СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

**НГУЕН Ан Куанг** — аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.  
E-mail: anquang12a1@mail.ru

**NGUYEN An Quang** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.  
E-mail: anquang12a1@mail.ru

**ЛАПШИН Кирилл Леонидович** — доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.  
E-mail: kirill.lapschin@gmail.com

**LAPSHIN Kirill L.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.  
E-mail: kirill.lapschin@gmail.com

DOI 10.5862/JEST.243.18

УДК 532.5: 621.6

*А.И. Латухина, Е.А. Локтионова, Ю.Р. Полупанова*

## **ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ СЕТОК В НАПОРНЫХ ВОДОВОДАХ**

*A.I. Latuhina, E.A. Loktionova, J.R. Polupanova*

### **HYDRODYNAMICAL GRID RESISTENCE IN PRESSURE CONDUITS**

Область применения сеток и решеток чрезвычайно широка. Однако их использование приводит к дополнительным сопротивлениям и потерям энергии при обтекании. Выбор типа и конструкции сетки определяется ее назначением и условиями эксплуатации. В статье представлены результаты исследования пластиковых перфорированных сеток разной степени проницаемости на выходе из трубопровода. Экспериментально определено влияние сеток на коэффициенты расхода напорного трубопровода. Значения коэффициентов расхода установлены двумя способами: при постоянном и при переменном напоре. Показана тождественность обоих способов определения коэффициентов расхода. Вычислены коэффициенты сопротивления сеток. Изучено влияние пористости сеток на численные значения этих коэффициентов. Расчетные величины аппроксимированы степенными зависимостями, связывающими коэффициенты сопротивления сеток с поверхностной и линейной пористостями. Приведено сравнение предложенных зависимостей с данными публикаций. Даны рекомендации по назначению величин коэффициентов сопротивления устройств.

**ПЕРФОРИРОВАННЫЕ СЕТКИ; КОЭФФИЦИЕНТ РАСХОДА; КОЭФФИЦИЕНТЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ; ПОВЕРХНОСТНАЯ ПОРИСТОСТЬ; ЛИНЕЙНАЯ ПОРИСТОСТЬ.**

The practical application of grids and lattices is extremely wide. However, their use results in additional resistance and energy losses in the flow. Selecting the type and mesh design is determined by its purpose and conditions of use. The article investigates a perforated plastic grid with varying degrees of permeability at the outlet of the conduit. We have experimentally determined the effect of mesh on the flow rates of the pressure pipe. Flow coefficient values were set in two ways: with constant and variable pressure. It is shown that the two methods for determining the rate coefficients are identical. We have calculated the drag coefficients of the grid. The influence of grid porosity on the numerical values of these coefficients has been studied. The calculated values are approximated by the degree of the dependence linking the drag coefficients to surface grids and linear porosity. The proposed dependencies have been compared with the data presented in the literature. The recommendations for setting the values of drag coefficients of the devices are given.

**PERFORATED GRIDS; FLOW COEFFICIENT; DRAG COEFFICIENT; SURFACE POROSITY; LINEAR POROSITY.**

#### **Введение**

Сетки и решетки в потоках жидкости или газа встречаются в самых разных сферах практической деятельности. Они используются в строительстве зданий и дорог, трубопроводном транспорте, водоснабжении, экологии, металлургии, машиностроении и других областях.

В зависимости от назначения и условий эксплуатации сетки могут различаться по материалу, конфигурации, геометрии ячеек и технологии их изготовления.

Основной задачей при расчете систем и конструкций, оборудованных сетками, является определение коэффициентов сопротивления



этих устройств. Природа сопротивления и течения жидкости или газа через сетки определяется многими факторами, поэтому точный гидромеханический расчет коэффициентов сопротивления не представляется возможным. Их значения устанавливаются, как правило, опытным путем. Зависимость коэффициентов сопротивления сеток и решеток от геометрических особенностей и условий течения исследовалась, например, в [1, 3, 6–12, 14–19, 21]. Как показывает обзор приведенной литературы, применительно к некоторым практическим задачам разными авторами независимо друг от друга получены результаты, дающие хорошее совпадение данных экспериментов и расчетов по рекомендуемым эмпирическим зависимостям [1, 3, 8, 10, 12, 13, 16]. Однако из анализа литературы также следует, что вопрос о сопротивлении решеток и сеток в настоящее время не менее актуален, чем несколько десятилетий назад [9, 10]. Это связано не только с появлением новых практических задач, но и с использованием новых материалов и внедрением современных технологий в производстве. При этом вклад каждого нового фактора в суммарное сопротивление сетки может быть установлен специальными экспериментальными исследованиями.

Целями данной работы были: определение влияния плоских пластиковых сеток на коэффициент расхода трубопровода; установление численных значений коэффициентов сопротивления сеток и их зависимости от числа Рейнольдса; определение влияния поверхностной и линейной пористости сеток на величины коэффициентов сопротивления.

### Методика эксперимента

Исследовался горизонтальный трубопровод постоянного сечения с отношением длины к диаметру  $l/D = 20$ , на выходе из которого при свободном истечении воды устанавливались плоские сетки разной степени перфорации (рис. 1).

Коэффициент расхода трубопровода  $\mu$  определялся экспериментально двумя способами: по расходу  $Q$  при различных фиксированных напорах ( $\mu_{H=\text{const}}$ ) и по времени опорожнения напорного бака при различных начальных и конечных напорах ( $\mu_{\text{опор}}$ ).

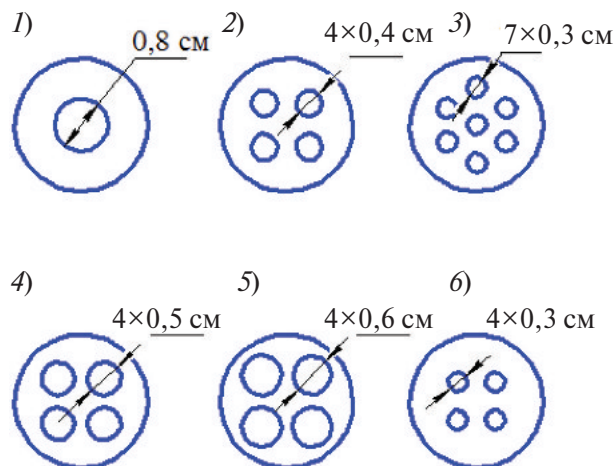


Рис. 1. Виды исследуемых сопротивлений (1 – диафрагма  $d = 0,8$  см; 2 – сетка с 4-мя отверстиями  $d = 0,4$  см; 3 – сетка с 7-ю отверстиями  $d = 0,3$  см; 4 – сетка с 4-мя отверстиями  $d = 0,5$  см; 5 – сетка с 4-мя отверстиями  $d = 0,6$  см; 6 – сетка с 4-мя отверстиями  $d = 0,3$  см)

Обе серии опытов проводились для устройств, представленных на рис. 1: для трех сеток одинаковой поверхностной пористости  $n_o = 0,1$  с разным числом отверстий (сетки 1–3) и 4-х сеток разной поверхностной пористости с одинаковым числом отверстий (сетки 2–6). Пористость определяется как

$$n_o = \frac{\omega_n}{\omega_0},$$

где  $\omega_n$  – суммарная площадь отверстий сетки (площадь просвета);  $\omega_0$  – площадь сечения трубы.

### Результаты и обсуждение

Результаты измерений и вычислений  $\mu$  представлены на рис. 2. Коэффициенты расхода трубопровода  $\mu_{H=\text{const}}$ , найденные при фиксированных напорах, представлены как функции относительного напора  $H/H_0$  ( $H_0$  – максимально возможный на используемой экспериментальной установке напор), а коэффициенты расхода  $\mu_{\text{опор}}$ , установленные в опытах по опорожнению бака, – как функции относительного напора  $\Delta H/H_1$ , где  $\Delta H$  – падение напора при опорожнении;  $H_1$  – начальный напор при опорожнении.

Расхождение значений  $\mu_{H=\text{const}}$  и  $\mu_{\text{опор}}$  согласно данным расчетов составило не более 10 %, что является хорошим совпадением, если иметь

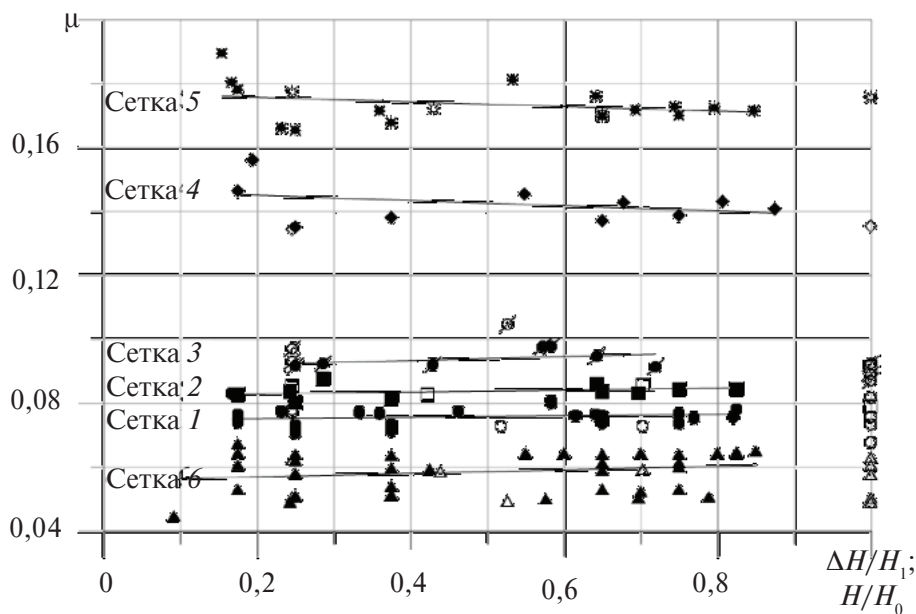


Рис. 2. Сопоставление коэффициентов расхода трубопровода  $\mu_{H=\text{const}}$  (маркеры без заливки) и  $\mu_{\text{опор}}$  (маркеры с заливкой)

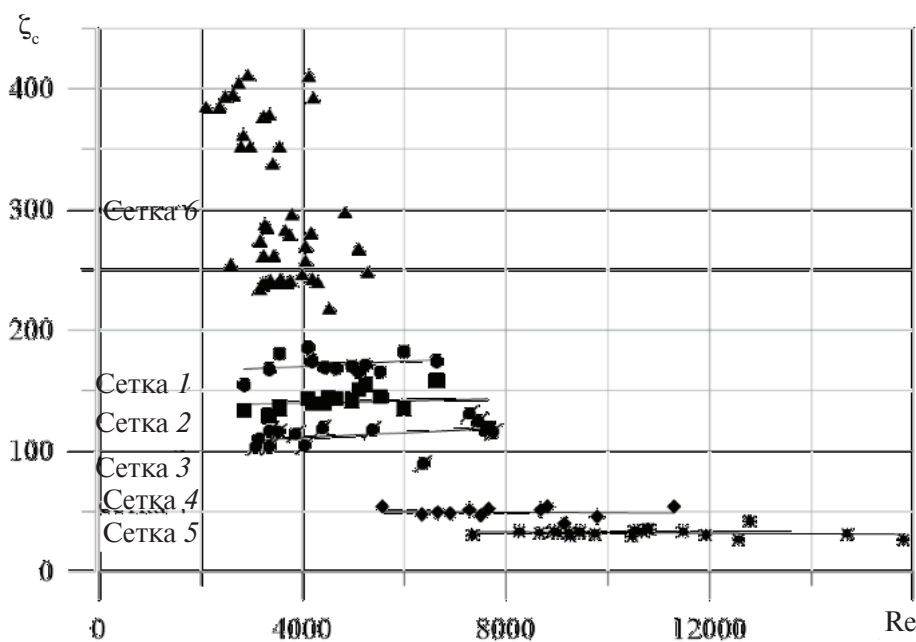


Рис. 3. График зависимости  $\zeta_c = f(\text{Re})$

в виду точность проведенных измерений. Это также свидетельствует, что  $\mu$  не зависит от напора над центром выходного сечения трубопровода.

По значениям коэффициентов расхода  $\mu$  для всех опытов определялись полные коэффициенты сопротивления  $\zeta_f$  трубопровода. При истечении в атмосферу  $\zeta_f = (1/\mu^2) - 1$ . Коэффици-

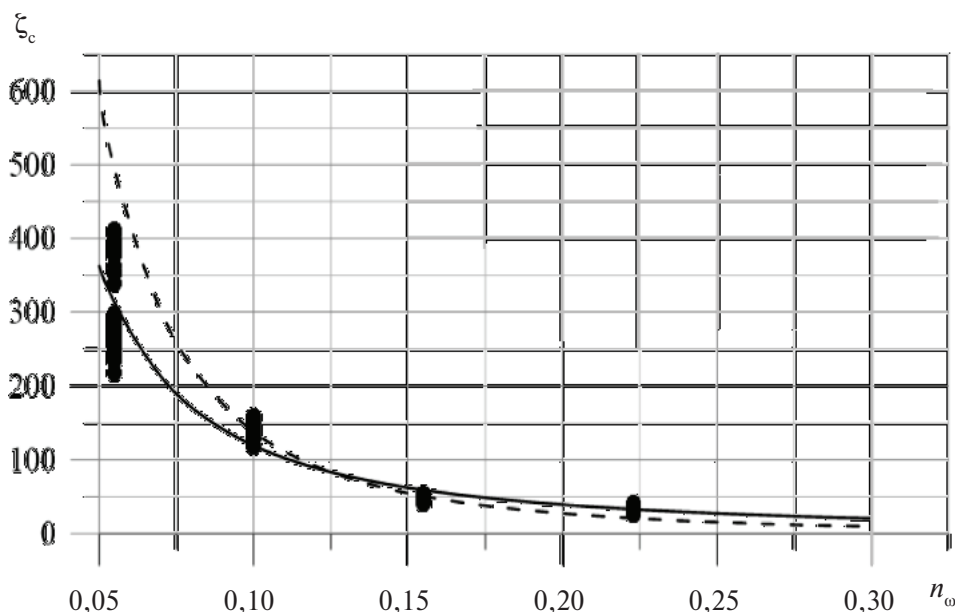


Рис. 4. График зависимости  $\zeta_c = f(1/n_\omega)$  (сетки 2, 4–6):  
 —  $\zeta_c = 3(1/n_\omega)^{1,6}$ ; — — —  $\zeta_c = 0,85(0,31 + 2(1/n_\omega - 1)^2)$ ; • • • — опыт

ент сопротивления непосредственно сетки устанавливался как

$$\zeta_c = \zeta_f - \zeta'_f,$$

где  $\zeta'_f$  — полный коэффициент сопротивления трубы без сетки, предварительно установленный экспериментально аналогичным образом.

Данные по коэффициентам сопротивления  $\zeta_c$  для всех исследованных сеток приведены на рис. 3 как функции чисел Рейнольдса  $Re$ , которые вычислены по средней скорости воды в трубе  $v$ .

Как видно из рис. 3, в исследуемом диапазоне чисел Рейнольдса ( $2 \cdot 10^3 < Re < 2 \cdot 10^4$ ) коэффициенты сопротивления практически не зависят от  $Re$ , что соответствует данным литературы, например [2, 4, 5, 8–12, 14–18].

Однако сравнение численных значений  $\zeta_c$  с приводимыми в литературе довольно приближенно, поскольку перфорированные сетки, исследованные детально рядом авторов, отличаются по конструкции, условиям обтекания и другим факторам.

В то же время исследованиями установлено, что основной параметр, определяющий сопротивление сетки, — это ее пористость [1, 3, 9, 13, 20]. В этой связи проводились опыты с сетками 2, 4–6 по выявлению зависимости коэффици-

ентов сопротивления  $\zeta_c$  от поверхностной пористости  $n_\omega$ . Результаты этих исследований представлены на рис. 4.

Имея в виду характер изменения  $\zeta_c$  как функции  $n_\omega$ , связь между  $\zeta_c$  и  $n_\omega$  можно представить в виде

$$\zeta_c = C \left( \frac{1}{n_\omega} \right)^m,$$

где  $C$  — константа, а  $m > 0$  — показатель степени.

Логарифмируя последнее выражение

$$\log \zeta_c = m \log \frac{1}{n_\omega} + \log C,$$

легко видеть (рис. 5), что  $m$  — тангенс угла наклона прямой, связывающей  $\log \zeta_c$  и  $\log \left( \frac{1}{n_\omega} \right)$ .

Согласно аппроксимации рис. 5 с достаточной степенью точности можно принять  $m = 1,6$ , что соответствует значению константы  $C = 3$ . Тогда зависимость для  $\zeta_c$  примет вид

$$\zeta_c = 3 \left( \frac{1}{n_\omega} \right)^{1,6}.$$

Как видно из рис. 4, расчеты по аппроксимирующей зависимости дают хорошее совпадение с результатами экспериментов.

Для иллюстрации влияния разных факторов на значения коэффициентов сопротивления на

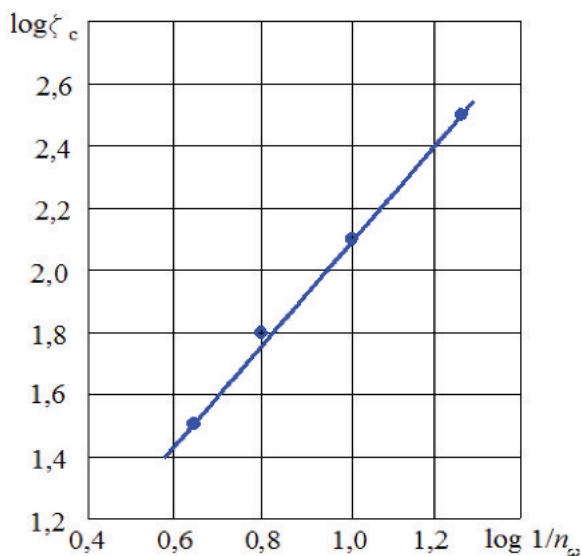


Рис. 5. График зависимости  $\log \zeta_c = f\left(\log \frac{1}{n_\omega}\right)$  (сетки 2, 4–6)

рис. 4 нанесена кривая связи  $\zeta_c = f(1/n_\omega)$ , рассчитанная по формуле

$$\zeta_c = 0,85 \left( 0,31 + 2 \left( \frac{1 - n_\omega}{n_\omega} \right)^2 \right),$$

которая рекомендована в [9] для перфорированных сеток, исследованных в других условиях. Как видно, расчеты по предлагаемым зависимостям дают приемлемое совпадение в довольно узком диапазоне поверхностной пористости ( $0,1 < n_\omega < 0,2$ ).

Кроме того, в опытах было установлено, что для сеток малой поверхностной пористости ( $n_\omega < 0,1$ ) значения  $\zeta_c$  существенно зависят от взаимного расположения отверстий (см. рис. 3, сетку 6 – две группы точек для двух вариантов расположения отверстий).

В случае сеток одинаковой поверхностной пористости ( $n_\omega = 0,1 = \text{const}$ ) с разным числом отверстий (сетки 1, 2, 3) опыты показали различие в численных значениях  $\zeta_c$  до 20 % (см. рис. 3).

Чтобы установить влияние числа отверстий на значения коэффициентов сопротивления, целесообразно ввести гидравлический диаметр сетки  $d_r$  по определению [1]

$$d_r = N \frac{\omega_i}{\chi_i} = N \frac{d_i}{4},$$

где  $\omega_i$ ,  $\chi_i$  – соответственно площадь и смоченный периметр одного отверстия диаметром  $d_i$ ;  $N$  –

число отверстий. С другой стороны, если определить коэффициент линейной пористости как

$$n_d = \frac{\sum d_i}{D_0} = N \frac{d_i}{D_0},$$

где  $D_0$  – диаметр трубы, то очевидно соотношение

$$\frac{d_r}{D_0} = \frac{n_d}{4}.$$

На рис. 6 в координатах  $\zeta_c = f(n_d)$  представлены результаты опытов для сеток 1–3 ( $N = 1; 4; 7$ ) со значениями  $n_d = 0,32; 0,64; 0,84$  соответственно.

При аппроксимации осредненных данных опытов зависимостью

$$\zeta_c = 220 (1 - 0,57 n_d)$$

на рис. 6 нанесены также расчетные точки (треугольные маркеры) для пористостей  $n_d = 0,44; 0,7; 1,0$ , соответствующих сеткам с промежуточной перфорацией по сравнению с исследованными ( $N = 2; 5; 10; n_\omega = 0,1 = \text{const}$ ).

Следует отметить, кроме того, что для сетки 1, представляющей собой диафрагму и являющейся наиболее исследованным устройством, значения  $\zeta_c$ , найденные в опытах авторов данной статьи, оказались заниженными по сравнению с рекомендациями [1, 3, 4] на 28 % для случая, когда диафрагма установлена внутри трубы, и на 37 % для случая, когда диафрагма – в конце тру-

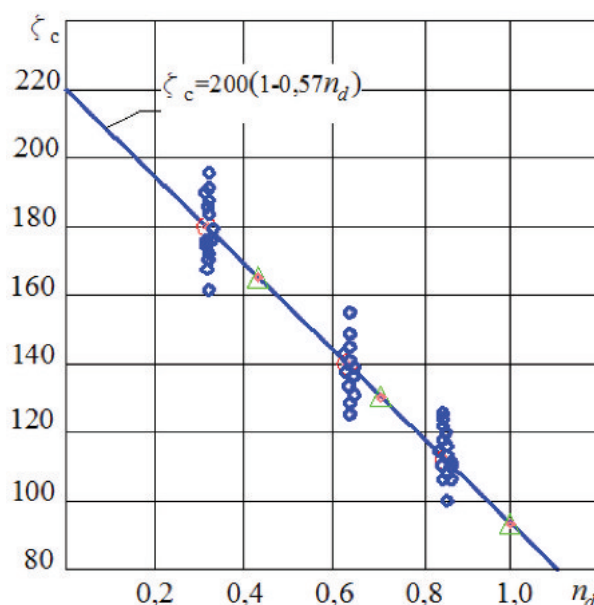


Рис. 6. График зависимости  $\zeta_c = f(n_d)$  (сетки 1–3)

бы при истечении под уровень. Различия в значениях коэффициентов сопротивления связаны, очевидно, не только с точностью измерений, но и с особенностями растекания потока внутри трубы и в конце ее при истечении под уровень или при истечении в атмосферу.

### Выводы

Основываясь на данных литературных источников и результатах проведенных опытов,

можно констатировать, что для назначения коэффициентов сопротивления перфорированных сеток необходимы:

экспериментальная проверка численных значений коэффициентов;

уточнение влияния места установки устройства (вход, выход, внутри канала), величины пористости (поверхностная или линейная), взаимного расположения отверстий, степени загрязнения и других параметров.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.
2. Справочник по гидравлическим расчетам / Под ред. П.Г. Киселева. М.: Энергия, 1972. 312 с.
3. Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления. М.: Недра, 1982. 224 с.
4. Альтшуль А.Д., Калисун В.И. Гидравлическое сопротивление трубопроводов. М.: Стройиздат, 1975. 285 с.
5. Альтшуль А.Д., Калисун В.И., Майрановский Ф.Г., Пальгунов П.П. Примеры расчетов по гидравлике / Под ред. А.Д. Альтшуля. М.: Стройиздат, 1976. 256 с.
6. Идельчик И.Е. Учет влияния вязкости на гидравлическое сопротивление диафрагм и решеток // Теплоэнергетика. 1960. № 9 С. 75–80.
7. Курганов А.М., Федоров Н.Ф. Справочник по гидравлическим расчетам систем водоснабжения и канализации. Л.: Стройиздат, 1973. 408 с.
8. Дербунович Г.И., Земская А.С., Репик Е.Ю., Соседко Ю.П. К вопросу о гидравлическом сопротивлении сеток // Ученые записки ЦАГИ. 1980. Том XI, № 2. С. 133–136.
9. Дербунович Г.И., Земская А.С., Репик Е.Ю., Соседко Ю.П. Гидравлическое сопротивление перфорированных решеток // Ученые записки ЦАГИ. 1984. Том XV, № 2. С. 114–118.
10. Великанов Н.Л., Корягин С.И., Наумов В.А. Гидродинамическое сопротивление решеток и сеток в прямом трубопроводе // Вестник машиностроения. 2014. № 6. С. 44–47.
11. Великанов Н.Л., Наумов В.А., Примак Л.В. Гидродинамическое сопротивление сеток // Механизация строительства. 2014. № 11 (845). С. 28–31.
12. Schlichting H. Ergebnisse und Probleme von Gitteruntersuchungen // ZFW. 1953. № 1, S. 109–122.
13. Повх И.Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении. М.-Л.: Машиностроение, 1974. 479 с.
14. Ханжонков В.И. Сопротивление сеток // Промышленная аэродинамика. 1944. № 3. С. 210–214.
15. Таганов Г.И. Выравнивающее действие сеток в потоках жидкостей и газов // Труды ЦАГИ. 1947. № 604. 14 с.
16. Loehrke R.L., Nagib H.M. Experiments on management of free-stream turbulence. 1972. AGARD Rep. 598.
17. Tan-Atichat J., Nagib H.M., Loehrke R.I. Interaction of free-stream turbulence scales // J. Fluid Mech. Vol. 114.
18. Baines W.D., Peterson E.G. An investigation of flow through screens // Transactions of the ASME, VII. 1951. 1982. Vol. 73, № 5.
19. Идельчик И.Е. Аэродинамика промышленных аппаратов // М.: Машиностроение. 1983. 351 с.
20. Альтшуль А.Д., Киселев П.Г. Гидравлика и аэродинамика. М.: Госстройиздат, 1975. 323 с.
21. Бредов В.И. Об определении величины местных гидравлических сопротивлений в трубопроводах. Гидравлика однородных и неоднородных жидкостей // Тр. МИСИ. 1972. Вып. № 89. С. 44–51.

### REFERENCES

1. Idelchik I.Ye. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam. [Hydraulic resistance textbook] M.: Mashinostroyeniye, 1992. 672 s. (rus)
2. Spravochnik po gidravlicheskim raschetam [Hydraulic solutions textbook] / Pod red .P.G. Kiseleva. M.: Energiya, 1972. 312 s. (rus)
3. Altshul A.D. Gidravlicheskiye soprotivleniya. [Hydraulic resistance] M.: Nedra, 1982. 224 s. (rus)
4. Altshul A.D., Kalitsun V.I. Gidravlicheskiye soprotivleniya truboprovodov. [Hydraulic resistance of the pipeline] M.: Stroyizdat, 1975. 285 s. (rus)
5. Altshul A.D., Kalitsun V.I., Mayranovskiy F.G., Palgunov P.P. Primery raschetov po gidravlike / Pod red. A.D. Altshulya. M.: Stroyizdat, 1976. 256 s. (rus)
6. Idelchik I.Ye. Uchet vliyaniya vyazkosti na gidravlicheskiye soprotivleniya diafragm i reshetok. [Accounting viscosity effect



on the flow resistance of the diaphragms and grids]. *Teploenergetika*. 1960. № 9. S. 75–80. (rus)

7. **Kurganov A.M., Fedorov N.F.** Spravochnik po gidravlicheskim raschetam sistem vodosnabzheniya i kanalizatsii. [Hydraulic textbook: Water supply and sewerage] L.:Stroyizdat, 1973. 408 s. (rus)

8. **Derbunovich G.I., Zemskaya A.S., Repik Ye.Yu., Sosedko Yu.P.** K voprosu o gidravlicheskom soprotivlenii setok. *Uchenyye zapiski TsAGI*. 1980. T. XI, № 2. S. 133–136. (rus)

9. **Derbunovich G.I., Zemskaya A.S., Repik Ye.Yu., Sosedko Yu.P.** Gidravlicheskiye soprotivleniya perforirovannykh reshetok. [Hydraulic resistance of the perforationally grids] // *Uchenyye zapiski TsAGI*. 1984. T. XV, № 2. S. 114–118. (rus)

10. **Velikanov N.L., Koryagin S.I., Naumov V.A.** Gidrodinamicheskoye soprotivleniye reshetok i setok v pryamom truboprovode. [Hydraulic resistance of grids and networks in the lineare pipelines] // *Vestnik mashinostroyeniya*. 2014. № 6. S. 44–47. (rus)

11. **Velikanov N.L., Naumov V.A., Primak L.V.** Gidrodinamicheskoye soprotivleniye setok. [Hydraulic resistance of the grids] // *Mekhanizatsiya stroitelstva*. 2014. №11 (845). C. 28–31. (rus)

12. **Schlichting H.** Ergebnisse und Probleme von Gitteruntersuchungen. [Results and problems of grid research]. // *ZFW* 1, 1953. S. 109–122. (ger)

13. **Povkh I.L.** Aerodinamicheskiy eksperiment v

mashinostroyenii. [Aerodynamic experiment in engineering] // M.-L.: Mashinostroyeniye, 1974. 479 s. (rus)

14. **Khanzhonkov V.I.** Soprotivleniye setok. [The grids resistens] // *Promyshlennaya aerodinamika*. 1944. № 3. S. 210–214. (rus)

15. **Taganov G.I.** Vyravnivayushcheye deystviye setok v potokakh zhidkostey i gazov. [The aligning action of the grids in the flow of liquids and gases] // *Trudy TsAGI*. 1947. № 604. 14 c. (rus)

16. **Loehrke R.L., Nagib H.M.** Experimentson management of free-stream turbulence. 1972. *AGARD Rep.* 598.

17. **Tan-Atichat J., Nagib H.M., Loehrke R.I.** Interaction of free-stream turbulence scales. 1982. *J. Fluid Mech.* Vol. 114.

18. **Baines W. D., Peterson E.G.** An investigation of flow through screens. Transactions of the ASME, VII, 1951, Vol. 73, № 5.

19. **Idelchik I.Ye.** Aerodinamika promyshlennykh apparatov. [Aerodynamics industrial vehicles] // M.: Mashinostroyeniye. 1983. 351 s. (rus)

20. **Altshul A.D., Kiselev P.G.** Gidravlika i aerodinamika. [Hydraulic and Aerodynamic] // M.: Gosstroyizdat, 1975. 323 s. (rus)

21. **Bredov V.I.** Ob opredelenii velichiny mestnykh gidravlicheskiy soprotivleniy v truboprovodakh. Gidravlika odnorodnykh i neodnorodnykh zhidkostey. *MISI. Tr.*, 1972. Vyp. № 89. C. 44–51. (rus)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

**ЛАТУХИНА Анастасия Игоревна** — студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

E-mail: lai-03@mail.ru

**LATUHINA Anastasiia I.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

E-mail: lai-03@mail.ru

**ЛОКТИОНОВА Елена Анатольевна** — кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

E-mail: elena.lokt@yandex.ru

**LOKTIONOVA Elena A.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

E-mail: elena.lokt@yandex.ru

**ПОЛУПАНОВА Юлия Руслановна** — студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

E-mail: julyopolup@mail.com

**POLUPANOVA Juliia R.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

E-mail: julyopolup@mail.com

DOI 10.5862/JEST.243.19

УДК 655

*А.В. Иванов*

## НАУЧНОЕ КНИГОИЗДАНИЕ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

*A.V. Ivanov*

### ACADEMIC PUBLISHING IN THE POLYTECHNIC UNIVERSITY

Информационная эпоха, в которой мы живем, возникла не сразу, имела свои предпосылки, и, кроме собственно, научной мысли и самоотверженного труда десятков тысяч ученых в мире, фундаментом для нее послужила возможность генерировать знания в печатной книге. Столь значимый процесс, который, наряду с возникновением письменности, начался с изобретения в 1445 году печатного станка Гуттенбергом, имеет свои исторические ретроспективы, причем в каждой области издательской деятельности прошли свой путь. Для научного книгоиздания в Санкт-Петербурге — научно-образовательном центре страны — был характерен свой путь, который оказал значимое влияние на университетское книгоиздание современной России. Невольно Политехнический университет стал в начале XXI века флагманом вузовского книгоиздания. Технологические и экономические концепции, разработанные в его стенах, были взяты за основу и до сих пор используются университетами страны.

ИЗДАТЕЛЬСТВО; ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ; УНИВЕРСИТЕТСКОЕ КНИГОИЗДАНИЕ; ЦИФРОВАЯ ТИПОГРАФИЯ; ПОЛИГРАФИЧЕСКИЕ МАШИНЫ; МЕНЕДЖМЕНТ В ИЗДАТЕЛЬСКОМ ДЕЛЕ; НАУКА; УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС; УЧЕБНАЯ ЛИТЕРАТУРА; ТИПОГРАФСКОЕ ДЕЛО.

The Information Age in which we live has not come at once, had its own premises. In addition, in fact, to scientific thought and selfless work of tens of thousands of scientists in the world, it served as the foundation for the ability to generate knowledge in a printed book. This important process, along with the emergence of writing, began with the invention of Gutenberg's printing press in 1445. Also this process had its historical retrospectives that passed its way into every area of publishing. Saint Petersburg is a scientific and educational center of the country. Here scientific publishing has its own way, which had a significant impact on the publishing of contemporary Russia. Unwittingly Politechnical University began the leader in the university book publishing in the beginning of the 21st century. Technological and economic concepts developed within its walls, were taken as a basis and are still used by the country's universities.

PUBLISHING HOUSE; POLITECHNICAL UNIVERSITY; UNIVERSITY BOOK PUBLISHING; DIGITAL PRINTING HOUSE; PRINTING MACHINES; MANAGEMENT IN THE PUBLISHING BUSINESS; SCIENCE; EDUCATIONAL PROCESS; EDUCATIONAL LITERATURE; PRINTING BUSINESS.

Функционирование любого учебного заведения основано на трех составляющих образовательного процесса — преподавателях, аудито-

риях и книгах. Причем книга и преподаватель тесно взаимосвязаны: не может человек написать хороший учебник, не читая лекций!



Рис. 1. Александр Васильевич Иванов,  
директор Издательства  
политехнического университета

Студенту и преподавателю XXI века сложно представить современный университет без возможности печатать свои чертежи, дипломные работы, лекции, книги — без университетского издательства. Кажется, что Издательство Политехнического университета, расположенное в шаговой доступности от основных учебных корпусов, существовало всегда. Однако это не так. Наше Издательство прошло долгий, трудный и славный путь от Кассы взаимопомощи студентов (КВП) в 1903 году до своего сегодняшнего вида.

В бытовом общении мы часто путаем понятия «издательство» и «типография».

Типография — прежде всего полиграфическое оборудование, которое обслуживают опытные специалисты-операторы. Станки напечатают то, что подготовили заказчики книги.

Издательство объединяет технические возможности типографии и усилия всех специалистов по подготовке книги к ее дальнейшей жизни за пределами печатного цеха, как в допечатном (редакторы, дизайнеры, верстальщики и др.), так

и в послепечатном (экономисты, маркетологи, распространители и др.) процессе. Издательство присваивает книге важные официальные реквизиты, которые делают ее и авторов узнаваемыми в бесконечном информационном потоке.

В дореволюционный период (до 1917 года) в России возникли различные формы кооперативных способов печати, которые еще нельзя называть издательским бизнесом, но именно они положили начало развитию современных университетских издательств. В такой кооперации затраты распределялись между институтом и студентами.

В предлагаемой статье рассматриваются конкретные — но наиболее типичные — этапы развития издательско-полиграфического дела в Политехническом университете (до 1993 года — институте) [9].

#### Касса взаимопомощи студентов

В 1903 году начала свою работу Касса взаимопомощи студентов (КВП). Помимо бытовых задач, КВП решала и общеинститутскую задачу — печатание курсов и конспектов лекций, входивших в планы преподавания высшей технической школы. Студенческие издания [2], выпускаемые за счет средств КВП на базе собственного литографического производства, способствовали более эффективному обучению и сокращали временную дистанцию в преподавании той или иной дисциплины.

«Кстати, еще в 1931–1934 годах сборники ЛИИ (Ленинградского индустриального института) печатались КУБУЧ при Ленинградском городском Доме Ученых. Вероятно, лаборатория полиграфических машин как техническое средство возникла на механико-машиностроительном факультете (ММФ) ЛИИ...» [1].

Справка: Учебно-техническое издательство Комиссии по улучшению быта учащихся (КУБУЧ) при Президиуме Ленинградского Совета рабочих, крестьянских и красноармейских депутатов основано в марте 1924 года на правах отдела КУБУЧ при Президиуме Ленсовета, а с 1927 года вошло в Управление подсобными предприятиями КУБУЧ. В 1931 году переименовано в учебно-техническое издательство «КУБУЧ». Издавало учебную литературу по различным об-

ластям знания, путеводители, справочники, календари. Имело ряд книжных магазинов и киосков. Постановлением Президиума Ленсовета и решением КУБУЧа от 21 января 1936 прекратило свое существование [1].

Для политехников «КУБУЧ» представлял несомненный интерес, прежде всего как издательство, в котором выходили в свет книги наших знаменитых ученых авторов: Н.А. Меншуткина, М.Ю. Лурье, М.А. Шателена, В.Ф. Миткевича, Л.В. Канторовича и др.

Буквально на следующий год после открытия Политехнического института Комиссия в составе Ф.Ю. Левинсон-Лессинга, Н.А. Меншуткина, А.А. Ржешотаревского и А.Г. Гусакова представила Совету института доклад, который был заслушан 8 октября 1903 года, когда были приняты Правила издания Известий института. Согласно этим правилам «Известия Санкт-Петербургского Политехнического института, выходят с сентября по май в количестве не менее четырех книжек в год формата большой восьмушки (1/8 доля печатного листа)» [10].

Следует отметить, что до революции 1917 года существовало два параллельных способа издания учебно-научной литературы: централизованно, за счет средств казны института, и на средства КВП (последний способ применялся в основном для помощи студентам в освоении учебного материала). При этом процесс подготовки рукописи к печати с редакторскими правками проводился профессионально либо в стенах института, либо в издательстве (например, КУБУЧ), далее следовал ручной набор текста в типографии с двумя корректурами и контрольным оттиском для подписи в печать.

#### Кафедра «Полиграфические машины»

Типографское оборудование в те времена было в своем роде уникальным и в основном немецкого производства. Это были надежные машины, сохранившие свою работоспособность до наших дней. К сожалению, нет достоверных данных о производстве отечественных полиграфических машин в дореволюционный период России. В период становления молодой Советской республики и перехода на индустриальные рельсы в тридцатые годы прошлого века воз-



Рис. 2. Владимир Тихонович Бушунов, заведующий кафедрой «Полиграфические машины» 1973—1975 гг.)

никла острая необходимость в создании строкоотливных и печатных машин. Требовались высококвалифицированные инженеры для создания своего — отечественного — полиграфического машиностроения. Это была задача государственной важности. И решалась она в стенах Политехнического.

В 1930 году была набрана первая группа численностью 21 человек по специальности «Полиграфическое машиностроение» на кафедре «Полиграфические машины». 15 марта 1931 года создана лаборатория полиграфического машиностроения. Тогда же заведующим лабораторией и специальностью стал доцент И.В. Арбузов.

С мая 1936 года четыре кафедры, в том числе и «Полиграфические машины», объединяются в одну — «Кафедру машин, автоматов и полуавтоматов» под руководством профессора С.В. Вяхирева. За этот период была проделана большая работа в направлении подготовки инженеров, специалистов по полиграфическому машиностроению, успешно применявших свои знания в промышленности. В предвоенный год



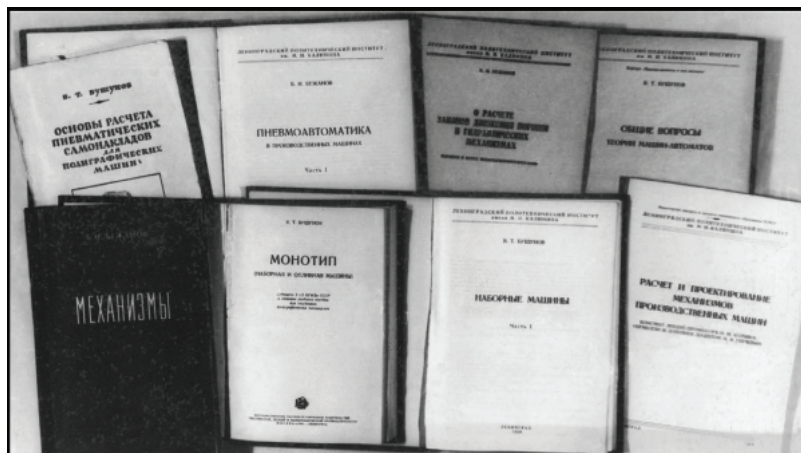


Рис. 3. Книги, изданные в лаборатории полиграфических машин



Рис. 4. Коллектив лаборатории полиграфических машин

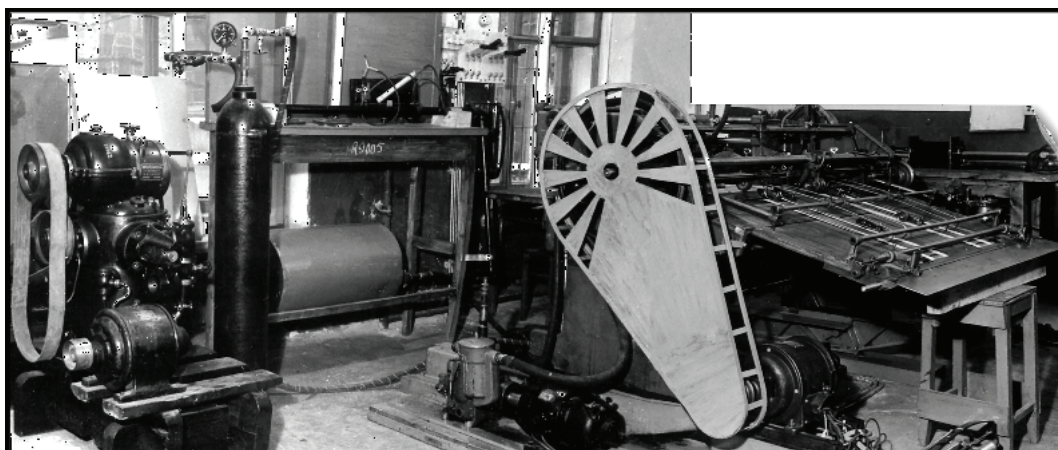


Рис. 5. Полиграфическое оборудование лаборатории полиграфических машин





объединенная кафедра насчитывала уже 13 человек преподавательского состава.

В период Великой Отечественной войны (1941–1945) работа кафедры была приостановлена. После Победы заведующим кафедрой стал профессор Х.Ф. Кетов, а с 1948 по 1954 год — профессор Н.И. Колчин. Вновь начала функционировать лаборатория полиграфических машин.

С 1954 года кафедру возглавлял профессор Н.К. Фадеев, а в 1973–1975 годы — В.Т. Бушунов. Все это время лаборатория полиграфических машин обеспечивала не только учебный процесс, но и вела активную производственную деятельность. Печатались учебные пособия, авторефераты диссертаций, методические указания, «Труды ЛПИ».

Лаборатория размещалась в перемышке между I и II учебными корпусами. На первом этаже находился наборный цех с кассами ручного набора и наборными машинами, печатный цех с плоскопечатными машинами. На третьем этаже размещался переплетно-брошюровочный цех, оснащенный необходимым оборудованием. Несколько комнат было отведено под редакторские и корректорские работы. В подвале стояли машины для резки бумаги.

Студенты в лаборатории выполняли не только учебные лабораторные работы, но и в свободное время имели возможность подрабатывать. Производственную практику учащиеся проходили на таких крупных городских предприятиях, как «Печатный двор» и «Ленполиграфмаш». Выпускники кафедры работали не только на ленинградских предприятиях, но и в конструкторских бюро заводов полиграфического машиностроения Рыбинска, Ейска и ряда других городов.

Начиная с 1975 года кафедра «Автоматы» прекратила подготовку инженеров-конструкторов по специальности «Полиграфическое машиностроение». Её заменила специальность «Комплексная автоматизация и механизация в промышленности» со специализацией «Роботы и манипуляторы».

После этого еще несколько лет лаборатория продолжала участвовать в наглядном обеспечении учебного процесса: в ней проводились экс-

курсии для ознакомления студентов с работой машин-автоматов.

### Типография (1993 год)

В начале девяностых годов XX века издательский и полиграфический рынок в современном его понимании еще не сформировался. Перестройка, взяв курс на гласность, создала самые благоприятные условия для развития практически любого бизнеса. Рынок попросту пустовал — не было даже простых бланков; книги популярных авторов еще только начинали издаваться, возникали, как грибы после дождя, новые газеты и журналы, Интернет еще был чем-то эфемерным и, главное, была катастрофическая нехватка полиграфических мощностей! Печатали на любом работающем оборудовании, печатали, не считая даже себестоимость, так как потребитель соглашался в то время на любые цены. В таких условиях издание учебно-научной литературы для высшей школы было весьма проблематичным: в вузах ощущался дефицит средств, старые плановые модели уже не могли работать, авторы писали учебники и монографии, но их ставили в очередь на высокие издательские полки.

В Санкт-Петербургском государственном техническом университете (СПбГТУ) в перестроечную эпоху [18] полиграфический процесс пытались адаптировать к существующим экономическим реалиям. Создавалось, но было закрыто малое предприятие; была отлажена работа редакционно-издательского отдела, которым успешно руководила Инна Павловна Моргачева; типографию выделили в отдельную структуру, но, как говаривали классики марксизма-ленинизма: «Кадры решат все»!

Автор этой статьи не был пассивным критикующим наблюдателем, а с 1993 года принимал действенное и самое непосредственное личное участие в создании нынешнего Издательства Политеха.

Мое появление в СПбГТУ в 1993 году было связано с опытом всей предыдущей жизни. После создания ряда коммерческих типографий мной был приобретен навык организации производств «с нуля» без инвестиций, а полученная в юности первая профессия наладчика

полиграфического оборудования позволяла не только разбираться в существовавших технологиях офсетной печати, но и осуществлять ремонт и наладку оборудования, что было немаловажно для физически изношенного оборудования типографии Политеха.

С идеей более эффективного использования имеющейся типографии я, поработав на малой офсетной машине печатником, обратился к Сергею Ивановичу Маркову, в тот момент работавшему помощником проректора по научной работе Анатолия Константиновича Григорьева. Условия для такого шага созрели — коллектив «лихорадило» от мизерной зарплаты и постоянных технологических сбоев. Требовался принципиально иной подход к конструированию самой системы производства, требовались квалифицированные печатники и копировщики печатных форм. Заказы на печать регулярно задерживались из-за отсутствия элементарно отлаженных допечатных технологических звеньев.

Сергей Иванович был осторожен и попросил сначала составить технико-экономическое обоснование, а потом уже согласился обсудить его более предметно. Начальник типографии находилась в декретном отпуске, и принятие управленческого решения произошло почти автоматически. Так, по итогам голосования коллектива (10 голосами из 11) автор этой статьи был выбран начальником типографии и 1 ноября 1993 года приступил к исполнению обязанностей.

Если в дневное рабочее время я занимался административными вопросами, то после 17 часов мне приходилось буквально вставать к печатному станку — такова была реальность: годовой план по учебно-методическим изданиям необходимо было выполнять. В тот период приходилось решать множество совершенно не связанных между собой задач — от организации поставки запасных частей для оборудования до расчета сдельных норм выработки для всех категорий рабочих, не говоря уже о чисто снабженческих функциях по поставкам бумаги, картона и переплетного сырья. Мой рабочий день редко был короче 12 часов при одном выходном дне в неделю. Учитывая общую экономическую ситуацию в стране и, соответственно, в вузе, приходилось находить сторонние заказы для полу-

чения дополнительных средств, которые направлялись на оплату труда сотрудников и различные накладные расходы. Если учесть, что в полиграфическом производстве того времени применялось более 30 наименований различного сырья (от уайт-спирита, ветоши, ваты, резинотканевых полотен до офсетных пластин и ортофосфорной кислоты!), не считая бумаги, то легко представить, в какой ситуации находилась в тот период типография, при том что системы централизованных закупок уже не существовало. Производство поглощало все средства, и отдел снабжения при всем старании не мог предусмотреть всех потребностей типографии в условиях постоянного наращивания объемов производства.

### Издательско-полиграфический центр

Несколько позже состоялось мое знакомство с А.К. Григорьевым: проректор по научной работе произвел впечатление вдумчивого человека, «болеющего» за институт и искренне желающего наладить в нем издательское дело. Он занимался газетой «Политехник» и понимал как никто другой, что без публикации печатных трудов наука обречена. Многие мои начинания проректор поддерживал, и я чувствовал опору руководства как в его лице, так и в лице своего непосредственного куратора С.И. Маркова. Через два месяца, доложив Сергею Ивановичу, что очередь из рукописей учебных пособий ликвидирована, я спросил, что делать дальше. На это получил ясный и короткий ответ: «Развивай типографию!». Так открылась новая страница в истории типографского дела в Политехническом...

Вскоре (в марте 1994 года) потребовалось расширение штата сотрудников за счет внебюджетных средств, и мной была подана служебная записка на имя проректора по научной работе. Анатолий Константинович поставил свою утверждающую резолюцию на документе, и бумага переключалась в планово-финансовый отдел, которым руководила Светлана Илларионовна Апакина. Спустя два дня А.К. Григорьев скоропостижно скончался на лекции, а через несколько часов последовал звонок от Светланы Илларионовны, которая сообщила, что это была последняя подпись Анатолия Константиновича, и она исполнит его волю...

Была сформирована комиссия по организации похорон, в состав которой неожиданно был включен и я. Этот день отчетливо запомнился: после обсуждения деталей похорон и текста некролога, когда все уже покидали кабинет, Юрий Сергеевич Васильев — ректор университета, которого я тогда увидел впервые в своей жизни, — назвал меня по имени-отчеству и попросил держаться. Его слова были просты: «Анатолий Константинович говорил много хорошего о Вас. Не стесняйтесь, приходите; когда будут трудности, поможем». В дальнейшем я всегда ощущал его незримую поддержку и, когда возникал тот или иной глобальный для меня вопрос, знал куда идти.

Для понимания остроты ситуации необходимо пояснить, что с первого же дня моей работы в качестве и.о. начальника типографии мне пришлось начать процедуру перевода всех основных категорий рабочих на сдельно-премиальную оплату труда, без чего было невозможно повышение производительности. Пришлось рассчитывать нормы времени, разрабатывать методику, доказывать в планово-финансовом отделе актуальность коэффициента приведения зарплаты к средней по отрасли, следить за состоянием лицевого счета типографии, уговаривать коллег из других типографий переходить на работу в Политех. Ректорат поддерживал мои начинания, но, хотя мысль о бизнесе в полиграфии и издательском деле часто звучала из уст ректора и его заместителей, однако все понимали, что основная задача — обеспечение учебного и научного процесса литературой. Это сыграло свою роль — появилась возможность для создания устойчивой модели полиграфического производства.

После окончательной выверки всех производственных процессов стало объективно необходимо поставить вопрос о создании Издательско-полиграфического центра (ИПЦ). Проект был поддержан ректоратом, и 24 марта 1994 года был издан соответствующий приказ. Теперь редакционно-издательский отдел, участок множительной техники и типография были объединены в одно целое, управление было централизовано, и следовало уже внедрять совершенно иную модель — от рукописи через производство к потребителю! Был сделан самый

важный управленческий шаг на пути дальнейшего развития издательско-полиграфической деятельности — разорванные даже по подчиненности звенья длинной технологической цепочки (РИО подчинялся проректору по учебной работе, типография — проректору на научной работе, а участок множительной техники — другому проректору) наконец-то были соединены вместе, и на каждом из участков производства книги можно было осуществлять общее планирование, не говоря уже о единой кадровой политике, новых стандартах сдельно-премиальной оплаты труда и общем снабжении. Именно этот шаг предвосхитил дальнейшее развитие событий: почти все университеты страны взяли на вооружение наш пример и пошли на объединение своих издательских и полиграфических структур (рис. 6).

В 1995 году на должность первого вице-президента университета был выбран Михаил Петрович Федоров. Примерно в то же время на

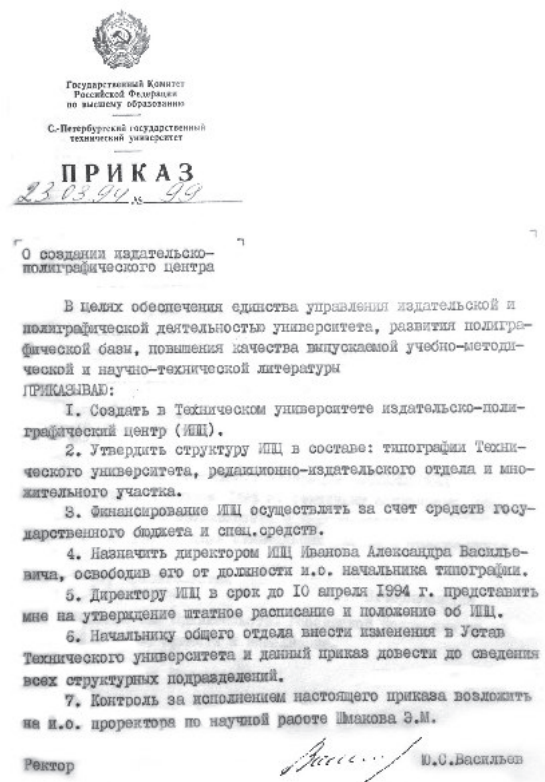


Рис. 6. Приказ о создании Издательско-полиграфического центра



должность вице-президента по учебной работе был назначен Владимир Викторович Глухов, а несколько ранее проректором по научной работе утвержден Альберт Яковлевич Башкарев, которому был подчинен издательско-полиграфический центр. Все вновь назначенные руководители были политехниками, имели ученую степень доктора наук, отлично знали вуз и обладали определенным авторитетом.

Новое руководство достаточно вдумчиво подошло к вопросу дальнейшего развития типографии. А.Я. Башкарев лично интересовался многими производственными вопросами и даже лично ездил в Госкомвуз знакомиться с куратором этого направления. Изменения в управлении коснулись и типографского комплекса — по настоянию профессора В.В. Глухова был обозначен объем производства учебной и научной литературы в 300 печатных листов в год, который Издательско-полиграфический центр должен был выполнять беззатратно для вуза за счет своей прибыли. Решение было экономически оправданным, и такой порядок просуществовал до начала 2000-х годов.

### Издательство Политехнического университета

Вопрос о создании полноценного издательства с собственной полиграфической базой возник уже давно — вуз нуждался в собственном издательском бренде. Современные тенденции требовали статусных позиций для университета в профессиональной издательской среде. На Ученом совете университета в мае 1996 года автор этой статьи успешно выступил с докладом на тему «Издательская деятельность», после чего Совет единодушно принял решение о переименовании Издательско-полиграфического центра в Издательство Политехнического университета (рис. 7).

Встречаясь на различных выставках и мероприятиях с коллегами из других вузов, приходилось убеждаться в том, что проблемы, стоящие перед издающими подразделениями вузов, имеют общий характер и однотипное решение. Более того, возникали идеи оптимизации выпуска учебной литературы по одним и тем же дисциплинам уже для вузов всей страны. В Государственном комитете по высшему образованию,

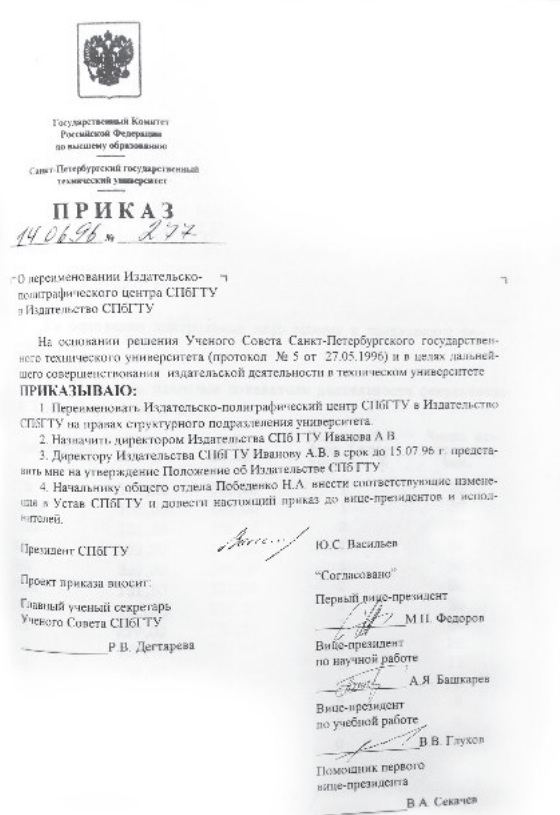


Рис. 7. Приказ о переименовании Издательско-полиграфического центра в Издательство

которому в то время подчинялся университет и который осуществляло министерские функции управления российскими вузами, существовало Управление учебного книгоиздания, библиотек и медиатек. Возглавлял его Петр Григорьевич Буга — человек не понаслышке знающий нужды и чаяния этого направления. Мне довелось быть лично принятым Петром Григорьевичем в Москве.

На Люсиновской улице в доме 51, где располагался Госкомвуз, я познакомился не только с начальником Управления, но и с другими его сотрудниками. Г.Е. Ефремова, Л.Г. Тюрина были профессионалами своего дела и могли в оперативном порядке проконсультировать вузовского издателя. Чаще всего вопросы касались «грифования» учебной литературы, то есть присвоения своеобразного знака качества книги. Было очевидным, что деятельность такой структуры на федеральном уровне была крайне необходима: вузы получали инструктивные письма, осуществлялась координационная деятельность с Учеб-

но-методическими объединениями, издательская деятельность университетов отмечалась при аттестации и аккредитации и не проходила незамеченной, как сейчас.

На рубеже веков происходила трансформация идеологических принципов работы верхних эшелонов власти. Однако в то время еще не все измерялось деньгами и существовал государственный подход к системообразующим направлениям в деятельности министерств и ведомств. Как упоминалось в начале этой статьи, даже в период капитализма в России в 1903 году научное книгоиздание иначе, как дотационным, не мыслилось, но век спустя, в период стабилизации российской экономики в 2001–2003 гг., тезис о том, что надо зарабатывать деньги даже на малотиражной продукции, звучал все чаще. В дальнейшем технологическое развитие рынка Интернета окончательно подорвало суть редакционно-издательских процессов в университетском книгоиздании — любой файл, запущенный в PDF-формате в сеть, стал считаться электронным изданием, и никто теперь не учитывает его качество как учебно-научного материала.

Позже, после очередной трансформации министерства образования, по распоряжению А.А. Фурсенко Управление учебного книгоиздания, библиотек и медиатек было ликвидировано. Шаг, в общем-то не имеющий позитивного смысла, так как библиотеки и издающие подразделения составляют особый пласт в деятельности любого высшего образовательного учреждения, и данные направления требуют единой государственной политики и координации со стороны органов федеральной власти. Идеальная модель, та, при которой издающее подразделение в вузе обеспечивает на 100 % потребность библиотеки в учебной литературе, до сих пор не реализована нигде, а мысли такие всегда высказывал П.Г. Буга <скоропостижно ушел из жизни в 1997 году при очередной реструктуризации министерства — комментарий автора>.

### Сектор компьютерного макетирования

Век всеобщей компьютеризации наступил внезапно, даже по житейским меркам. Компьютер заменил человеку многое, но еще больше

компьютер дал издателям. Такой трудоемкий процесс, как набор текста на фотонаборных устройствах или строкоотливных машинах, стал быстро исчезать: в издательство стали все чаще приносить рукописи в электронном виде, что значительно ускоряло процесс издания. Это началось в середине девяностых годов, и через 5–7 лет автор полностью заменил собой наборщика изъав таким образом целое технологическое звено в отрасли.

В конце 1994 года в ректорат университета была поставлена первая так называемая настольная издательская система (НИС) с печатным устройством RISO. Запомнилось, каким образом данная система оказалась в Издательско-полиграфическом центре: был оперативный звонок из отдела материально-технического снабжения, и так же оперативно мы получили весь комплект техники, состоявший из трех компьютеров, матричного принтера и ризографа. Виды на эту технику были у проректора по УМО Владимира Николаевича Козлова, но ректор Ю.С. Васильев разрешил ситуацию со свойственной ему чёткостью и мудростью: «Оборудование издательское, значит должно быть в соответствующей структуре вуза».

Следует сказать, что В.Н. Козлов долгие годы возглавлял Редакционно-издательский совет университета, и с ним достаточно много было реализовано имиджевых проектов по выпуску учебной литературы: выпускались серии книг по той или иной группе специальностей, поддерживалось много изданий, не вошедших в тематический план. Владимир Николаевич структурировал систему внутреннего грифования учебной литературы, ввел в документооборот листы согласования для утверждения в печать и всегда отслеживал соответствие названия того или иного учебного пособия названию соответствующей дисциплины. Как проректор он поддерживал издательство во многих начинаниях, осуществлял взаимосвязь учебно-методического объединения и издательства, что было весьма органично, так как именно УМО контролировало качество издаваемого учебного материала.

Для коллектива ИПЦ началась эпоха освоения персонального компьютера. Чтобы понять,



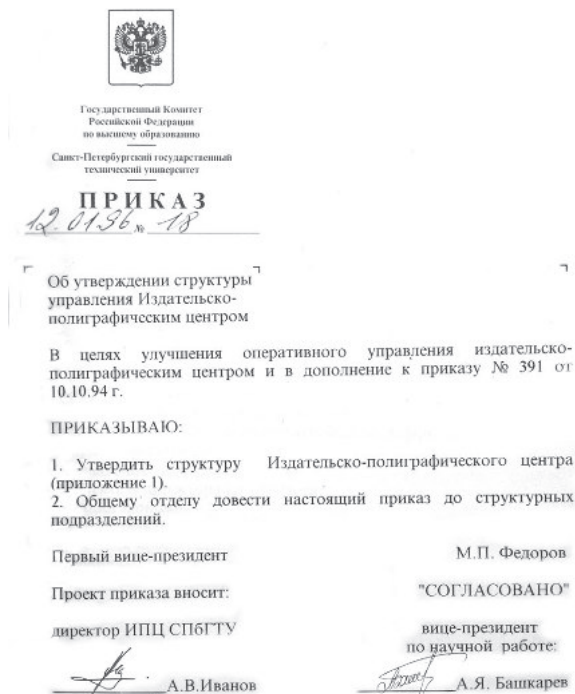


Рис. 8. Приказ о структуре ИПЦ

«как, куда и зачем», пришлось изучать знаменитое учебное пособие В.Э. Фигурнова [17] и искать молодежь, знакомую с принципами работы на компьютере. К слову сказать, коллектив созданного сектора компьютерного макетирования был укомплектован студентами и выпускниками всего одной кафедры факультета технологии исследования материалов — кафедры пластической обработки металлов, порошковых и композиционных материалов, которой руководил Николай Никандрович Павлов.

Как в новых условиях оплачивать труд верстальщиков и наборщиков? Прежние способы оплаты труда наборщиков не подходили по нормам времени и по самой технологии производства.

Настольной книгой по организации труда верстальщиков-наборщиков был «Справочник нормативных материалов для издательских работников» под редакцией В.А. Маркуса (М., 1977). С 1986 года ситуация изменилась. Коллегией Госкомиздата СССР было принято решение о расширении прав и самостоятельности изда-

тельств и совершенствовании тематического планирования (приказ от 20.11.1986 № 23). Объемные показатели работы редакторов в качестве основных были отменены. Издательствам предоставлялось право самостоятельно утверждать нормы выработки редакционно-издательских работников исходя из конкретных особенностей выпускаемой литературы в пределах определенных издательству численности работников и форм зарплаты [12].

Автором этой статьи на начальном этапе была разработана пятиуровневая система нормирования и оплаты труда по степени сложности текстов, так как набор и верстка формул являются процессом весьма трудоемким, а в техническом вузе основной ассортимент литературы был именно таким. Были пронормированы основные операции и утверждены сдельные расценки.

Тогда же появились и первые коммерческие заказы на компьютерный набор и верстку текстов значительных объемов. Сектор компьютерного макетирования работал в две, а иногда и в три смены. Это позволило не только набрать коллектив эффективно работающих молодых специалистов, но и дополнительно оснастить сектор новой техникой. Скорость выпуска учебных пособий увеличилась в три-четыре раза при заметном улучшении качества.

#### Издательско-полиграфическая ассоциация вузов Санкт-Петербурга [15]

В 1995 году на базе Петрозаводского госуниверситета была организована всероссийская конференция вузовских издателей. Принять участие в ней был приглашен и наш вуз. Чтобы продемонстрировать наши достижения, было принято решение развернуть прямо на конференции выставку наших изданий — вместе с заместителем мы выехали в Петрозаводск на машине с багажником, полным нашей продукцией. Выступив с докладом и открыв выставку, мы привлекли к себе внимание. Так начал формироваться имидж нашего университета как флагмана университетского книгоиздания.

На одном из мероприятий в Санкт-Петербургском государственном университете (СПбГУ) мне довелось познакомиться с дирек-

тором издательства «Образование» от РГПУ им. А.И. Герцена Сергеем Николаевичем Васильевым и директором издательства СПбГУ Сергеем Игоревичем Богдановым. Наши первые встречи с основателями Ассоциации в тот период носили бессистемный характер. Мы видели схожесть наших проблем и обменивались опытом на семинарах, конференциях или просто за чашкой чая. Иногда, засиживаясь до позднего вечера у меня в кабинете, мы подолгу обсуждали пути развития вузовского книгоиздания.

Так была сформулирована сама идея создания межвузовской отраслевой ассоциации. Был написан Устав Издательско-полиграфической ассоциации вузов Санкт-Петербурга, который был зарегистрирован 27 апреля 1997 года. Учредителями выступили три ведущих вуза города — СПбГУ, РГПУ и СПбГТУ. В середине девяностых, когда старая система хозяйствования уже была почти заменена на новые экономические отношения, но механизм замены нигде прописан не был, именно тогда, на переломе формаций, необходимы были принципиально новые подходы к построению модели вузовских издающих подразделений. Достаточно сказать, что появление только персональных компьютеров в издательском процессе вызывало много вопросов: не было ни норм выработки, ни категорий работ — не было ничего для определения зарплат новых специалистов в государственном секторе.

После моего краткого выступления по городскому радио о целях и задачах Ассоциации стали поступать телефонные звонки от заинтересованных в Ассоциации директоров РИО и вузовских типографий. Одними из первых новых членов Ассоциации стали ЛЭТИ (В.Г. Павловских) и Гидрометеорологический университет (И.Г. Максимова). Впервые мы провели общее собрание членов Ассоциации в ЛЭТИ, и тогда же я предложил провести первую научно-практическую конференцию «Проблемы интеграции издательско-полиграфической деятельности вузов» на базе нашего университета.

Конференция состоялась в Доме ученых в Лесном 26–28 мая 1998 года. География участников конференции была внушительной — от Владивостока до Мурманска. Число участников — более 100 человек. Многие выступали с докладами, де-

лились опытом. Отрасль также не осталась в стороне — ряд поставщиков оборудования приняли самое активное участие в нашей работе. Помимо конкретных практических задач, которые обсуждались на конференциях, Ассоциация получила двадцать новых членов из разных регионов страны. Министерство заинтересовалось нашей деятельностью, и уже осенью того же года заместитель министра Виктор Александрович Болотов пригласил меня выступить с докладом на Совете ректоров Москвы и Московской области. Нашу модель он хотел внедрить и в столичном регионе.

В следующем, 1999 году после беседы с В.А. Болотовым возникла идея о создании Совета по издательской деятельности. Несколько дней в кабинете заместителя министра встречались представители вузов и Московского государственного университета печати имени И. Федорова: обсуждалась структура общественного органа, которая должна была обеспечивать обратную связь с министерством для более эффективной работы. Были назначены два сопредседателя Совета — В.И. Соловьев и А.В. Иванов.

В ставшем мне родным Политехе, благодаря президенту университета Ю.С. Васильеву, Ассоциация имела всегда мощную поддержку. Юрий Сергеевич в должности первого лица вуза обладал редким даром руководителя поощрять новые начинания и мыслил всегда по-государственному широко, прекрасно понимая, что если штаб-квартира Ассоциации находится в Политехе, то и во всех мероприятиях федерального и регионального уровней всегда будет звучать лейтмотивом наш вуз, что было важно для рейтинга университета.

Как истинный новатор, Юрий Сергеевич впервые в отечественных университетах ввел в 2001 году должность проректора по книгоизданию и интеллектуальной собственности, которую я замещал до 2003 года. Тогда удалось централизовать издательский процесс и продумать механизмы защиты результатов труда научного потенциала нашего университета.

### Управление информационных ресурсов

В период подготовки конференции «Учебник третьего тысячелетия» произошло мое знакомство с корпорацией Xerox, которую представлял в Санкт-Петербурге Леонид Вячеславович Коно-



Рис. 9. Цифровая полноцветная печатная машина DocuColor 5252



Рис. 10. Автоматическая печатная линия DocuTech Book Factory

валов. После первых двадцати минут нашего разговора возникло ощущение, что цифровые печатные системы нам не приобрести никогда. Помимо ультрасовременной технологии печати, которая революционно должна была бы изменить сам принцип типографского дела, существовала еще ультравысокая цена оборудования. Тогда казалось, что Политех на это не пойдет. Корпорация Хероx оказала спонсорскую помощь в проведении

конференции, Л.В. Коновалов выступил с объемным докладом о цифровой печати, и далее мы поддерживали отношения на уровне обмена мнениями и совместных планов внедрения.

Бюджет страны насыщался денежной массой, цена на нефть росла, и экономика страны была на подъеме. Шел 2003 год — год, когда ректором Политехнического университета был избран Михаил Петрович Федоров.

Надо отметить, что новый ректор был политехником со студенческой скамьи, прошел весь административный и научный путь, от аспиранта до члена-корреспондента РАН, и уже успел достаточное время, около восьми лет, поработать в качестве первого проректора нашего вуза. Михаил Петрович революционных преобразований в университет не привнес, но привлек новые кадры...

В том же году проректором по развитию был назначен А.И. Рудской, которому был передан в управление издательско-полиграфический комплекс вуза. Будучи до этого лично знаком с Андреем Ивановичем и искренне пытаясь развить издательско-полиграфическое направление, я получил поддержку в своих давних начинаниях в плане переоснащения полиграфической базы вуза. Проректор А.И. Рудской смотрел намного шире на систему обращения информации в вузе и предложил сразу объединить несколько структур под единым руководством — издательство, типографский комплекс, газету «Политехник» и только что организованную пресс-службу вуза. Так было создано **Управление информационных ресурсов**, которое функционировало восемь лет.

Энергичность Андрея Ивановича сказалась сразу же: уже в 2004 году был подписан контракт с корпорацией Xerox на поставку цифровой полноцветной печатной машины DocuColor 5252. Он сумел убедить ректора Университета М.П. Федорова в целесообразности такого приобретения, что вскоре дало свои результаты. Именно при Михаиле Петровиче произошла полная модернизация полиграфического парка оборудования. После инсталляции первой цифровой печатной машины полиграфическая продукция приобрела качественно другой вид — был освоен выпуск рекламных материалов в полноцветном исполнении, красочными стали обложки для учебных пособий и монографий, в издательстве появились дизайнеры. При этом сроки печати такой продукции с недели-двух уменьшились до нескольких часов (рис. 9).

Следующим шагом стала поставка автоматической печатной линии DocuTech Book Factory (фабрика книг). В 2006 году была организована в общегородском масштабе презентация этой

линии, которая производила книги и брошюры прямо с файла, как в единичном экземпляре, так и тиражно. При этом стоимость экземпляра практически не зависела от величины тиража, что было неоспоримым преимуществом данной технологии цифровой печати. В дальнейшем, следуя нашему опыту, подобное оборудование приобрели практически все ведущие вузы страны (рис. 10).

При поддержке ректората были отремонтированы все основные производственные цеха типографии и издательства, появились новые специальности, заметно вырос объем производимой продукции, и университет стал оказывать полиграфические услуги другим вузам города.

### Кафедра «Полиграфические машины»

Несомненно, что была проделана очень большая управленческая работа по отладке новой технологии. Необходимо было грамотно скалькулировать ценообразование, найти новых спе-

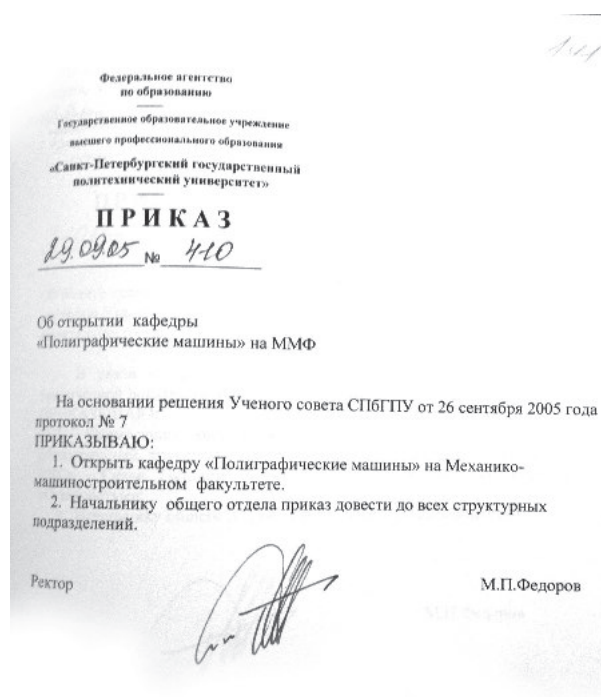


Рис. 11. Приказ об открытии кафедры «Полиграфические машины»





Рис. 12. Профессор  
Александр Олегович Поляков

циалистов и построить совершенно иную, чем при офсетной печати, логистику. Встал вопрос и о подготовке кадров на теперь уже модернизированной новой полиграфической базе. Давно вынашиваемая мною идея о восстановлении закрытой в 1975 году кафедры приобрела осязаемые контуры.

В 2005 году Министерство образования по просьбе отраслевых предприятий увеличило университету план приема за счет средств государственного бюджета по новой специальности — «Полиграфические машины и автоматизированные комплексы» — в количестве 11 единиц. Моя инициатива была одобрена проректором А.И. Рудским, который поставил свою подпись под официальным письмом по открытию специальности в Министерство, и на механико-машиностроительном факультете (ММФ) была открыта новая кафедра — «Полиграфические машины». Это направление получило поступательное развитие — через четыре года конкурс на данную специальность превышал 8 человек на место, и план приема в 2015 году был увеличен до 24 единиц (рис. 11).

Само открытие кафедры логически вытекало из всех мероприятий по модернизации полиграфической базы университета. По сути, кафедра могла опираться на формировавшийся современный учебно-лабораторный комплекс вуза. При этом ряд специалистов из отрасли начали читать лекции студентам, и взаимосвязь производства и вуза принимала все более четкие очертания. Нехватка инженерных кадров для типографий Санкт-Петербурга не раз обсуждалась на совместных совещаниях руководителей отрасли с сотрудниками нашей кафедры. Существующий и поныне Северо-Западный институт печати не имел и не имеет до сих пор актуальной лабораторной базы, в отличие от нашего университета.

Научный руководитель моей кандидатской диссертации профессор Александр Олегович Поляков (рис. 12) еще в 2000 году, после защиты, стал настаивать на открытии учебного и научного направлений в области издательского дела и полиграфии. Более того, уже тогда он в своих научных статьях ставил вопрос о хранении и использовании электронных баз данных книг, тем самым обозначая развитие электронного книгоиздания. Многие наши совместные исследования легли в основу моей будущей докторской диссертации.

Велась научная работа с использованием потенциала кафедры: был реализован научный проект совместно с РФФ НИОКР, проводились расчеты и исследования для нужд других вузов страны. Сотрудники кафедры — профессора А.О. Поляков, В.В. Ваганов, А.В. Иванов и другие — выпустили восемь учебных пособий [6–13] и три монографии [5]. Следует сказать, что серьезная научная работа с объемами хозяйственных договоров от 5 млн рублей в год не смогла быть реализована, так как в России в постперестроечный период не получили должного развития такие предприятия, как «Ленполиграфмаш», Ейский завод полиграфических машин, Рыбинский завод, а Киевский завод полиграфических машин оказался уже в другом государстве. По сути, все типографское оборудование, включая персональные компьютеры и программное обеспечение, было импортного производства. Подготовка кадров для отрасли была ориентирована больше на инженеров-эксплуатационников, а не на конструкторов. Требовались техно-





логи с глубоким знанием информационных технологий. Следовало менять направление подготовки, однако Ученый Совет факультета в этом вопросе меня не поддержал, несмотря на обращение Федерального агентства по печати.

Инновационный статус нашего университета, присвоенный по конкурсу в 2007 году, привнес очередное обновление парка учебно-лабораторного оборудования: было закуплено промышленное тяжелое оборудование инновационного типа – полноцветная цифровая печатная машина iGen3, которая позволяла снизить себестоимость получаемого оттиска с одновременным увеличением скорости печати самого высокого качества.

Торжественный запуск данного оборудования состоялся 26 февраля 2008 года в присутствии ряда vip-персон федерального масштаба – госсекретаря Союзного государства Павла Павловича Бородина, вице-губернатора Санкт-Петербурга Сергея Борисовича Тарасова и других. Событие широко освещалось в прессе: телеканалы «НТВ» и «5» опубликовали сюжеты о запуске, а пресса посвятила этому отдельные рубрики в газетах.

Так был завершён переход издательско-полиграфического комплекса университета на принципиально иную технологическую платформу цифровой печати, которая позволила увеличить производственные объёмы за пять лет в шесть раз!

Политехнический университет выступил пионером в освоении систем цифровой печати для университетского книгоиздания. Информация о «технологическом прорыве» в этой области распространялась стремительно. Практически каждую неделю профессор А.И. Рудской направлял к нам делегации гостей нашего вуза. Посетители, никогда ранее не слышавшие о подобном «чуде печати», задавали много вопросов, ответы на которые приходилось формулировать на ходу. В образовательном пространстве России мы стали выделяться наличием сверхскоростных систем печати.

Однако работа продолжалась... В связи со значительно возросшим потоком заказов были приглашены на работу специалист по развитию и экономист. Вместе мы приступили к разработке производственного плана и стали вести учёт

по категориям заказчиков, типам заказов и тиражам. Закладывались основы сквозного планирования издательско-полиграфического производства, был утвержден штат менеджеров по приему и обработке заказов, определен персональный план каждому менеджеру.

В 2008 году была закуплена и установлена среднеформатная офсетная печатная машина немецкого производителя КВА. Вместе с ней было приобретено устройство Computer to Plate для изготовления печатных форм прямым способом переноса изображения, фальцевальная машина, резательная машина с ножом 110 см, а также термопереплетное оборудование. Практически теперь типографский комплекс был почти полностью модернизирован и уникален тем, что позволял производить качественную скоростную печать и делать любой переплет любых тиражей до 3000 экземпляров сразу несколькими способами печати. Была определена точка рентабельности для цифровой и офсетной печати, и далее все наши усилия были направлены на расширение объемов производства и увеличение финансовых показателей. По данным бухгалтерии университета каждый год наша структура заканчивала с положительным сальдо.

#### **Департамент по печати и научно-учебному книгоизданию**

Корпорация Хегох популяризировала нас и на международном уровне. Дважды мне доводилось выступать с докладами на заседаниях Консультативного совета клиентов высшего образования США, где я познакомился с руководителями практически всех университетских типографий Соединенных Штатов, в которых было установлено цифровое печатное оборудование. При этом и сегодня можно утверждать, что выбор наш в пользу этой корпорации был правильным. Хегох отличает прежде всего внимательное отношение к своим заказчикам и профессионально отлаженный технический сервис. «На российском рынке Хегох известен широкому кругу потребителей преимущественно благодаря офисным решениям для печати документов. При этом спектр компетенций Хегох значительно шире: портфолио компании включает в себя комплексные решения для цифровой полигра-

фии, создания полнотекстовых электронных библиотек, управления контентом, организации системы персонализированных коммуникаций, услуги аутсорсинга печати. Решения Херох востребованы многими учреждениями образования и культуры России» [16].

Между тем в 2012 году Управление информационных ресурсов было переименовано в Департамент по печати и научно-учебному книгоизданию, еще раньше из юрисдикции Управления были исключены пресс-служба и центр средств визуальной информации. Это было связано с развитием вуза и избранием в 2011 году А.И. Рудского ректором СПбГПУ. Менялась структура вуза, соответственно, изменения коснулись и всего издательско-полиграфического комплекса. Открытый в 2011 году отдел рекламно-сувенирной продукции был переподчинен в 2013 году департаменту корпоративных общественных связей, а кафедра «Полиграфические машины» присоединена к кафедре «Автоматы» с сохранением профиля подготовки «Полиграфические машины и автоматизированные комплексы».

Мысль о том, как сделать рентабельным отдел рекламно-сувенирной продукции, переведя все основное оборудование в сектор цифровой промышленной печати, не была поддержана ректоратом, хотя в этом случае экономия затрат при выпуске такой продукции составляла бы 45 % от себестоимости. Когда моя инициатива по закупке линейки оборудования для печати рекламных материалов была поддержана проректором по научной работе А.И. Рудским, то изначально предполагалось, что самым массовым заказчиком станут студенты университета. Однако этого не произошло в силу низкой покупательной способности данной категории потребителей.

### Новые горизонты

PDF-версии книг в XXI веке активно распространяются в Интернет-пространстве. К сожалению, не всегда соблюдается авторское право, нелегальным контентом наполнены многие электронные библиотеки и агрегаторы контента.

Естественно, Издательство как непосредственный представитель автора по всем вопросам книгоиздания и книгораспространения не

могло остаться в стороне. В 2014 году началась активная работа по заключению договоров с авторами на представление их произведений в сети Интернет с соблюдением закона об авторском праве и выплатой авторских гонораров. Параллельно были заключены договоры с такими электронными библиотечными системами и агрегаторами контента, как ЭБС «Лань», «Некс-Медиа», Центральный коллектор библиотек «Бибком», «Ай Пи Эр Медиа» и др. Книги авторов-политехников стали доступны по подписке в Интернет-пространстве, что, несомненно, благоприятно сказывается на имидже и представлении Политехнического университета в научно-образовательной среде. Таким образом, Издательство выходит сегодня на новый технологический уровень — в среду электронного книгоиздания.

Наблюдая за развитием электронных библиотечных систем (ЭБС), их интеграцией в профессиональные сообщества и расширением репертуара участников, вполне логично сделать вывод, что за электронной книгой будущее. Однако активное развитие ЭБС в начале этого века за последние три-четыре года несколько притормозилось. На различных конференциях, слушая доклады директоров библиотек, агрегаторов электронного контента и разработчиков интернет-порталов, невольно приходишь к выводу, что электронный контент и электронная книга — всего лишь вспомогательный атрибут, но никак не отдельная технологическая платформа книгоиздания. Многие исследования по психологии чтения и восприятию информации содержат данные о том, что восприятие информации с электронного носителя снижается по сравнению с печатной книгой, а создание мультимедийных учебников — процесс на сегодняшний день достаточно дорогостоящий, в разы превосходящий по сложности подготовку печатного носителя информации. Кроме того, разработка стройной структурированной системы доступа к электронным файлам книг в среде Интернет «буксует» из-за отсутствия соответствующего законодательства, хаотичного подхода со стороны участников рынка и не реализованной технологии глобального сетевого покрытия для онлайн-доступа.

В том же 2014 году были проведены переговоры с такими мощными издательскими консорциумами, как Springer, Oxford University Press, Cambridge University Press и Thomson Reuters об обмене файлами научных монографий и статей. Начали поступать первые заявки на публикации за рубежом. Основным мотиватором в этом процессе выступило Министерство образования и науки РФ, которое два года назад ввело нормативы оценки деятельности вуза по характеристике «публикационная активность». Наукометрические показатели взяты за основу для контроля за деятельностью российских ученых в университетской среде, и уже сегодня достаточно посмотреть сайт eLibrary.ru, чтобы увидеть «публикационное лицо» того или иного профессора.

### Авторы

Говоря об Издательстве Политехнического университета, невозможно не сказать о его известных авторах — ученых, государственных деятелях, руководителях крупных компаний, писателях, художниках. Общение с этими людьми оставило неизгладимые впечатления у всех сотрудников Издательства и, особенно, у директора.

Самым первым изданием в сотрудничестве с зарубежными авторами и издателями была книга «Брауншвейгские князья первой половины XVIII века». Куратором со стороны Германии выступил почетный доктор нашего университета профессор Ф. Венцель. Это был 1998 год, наш вуз готовился к 100-летию юбилею. В качестве подарка Ганноверский университет имени Лейбница организовал издание этой книги сразу в двуязычном варианте. Фридрих Венцель по телефону и почте согласовывал состав выходных сведений издания и с собой в багаже привез первую партию книг. Так я познакомился с достойным ученым и нестандартно мыслящим человеком своего времени. Позже у нас завязалась большая дружба, которая сохраняется и по сей день. Профессор Венцель был не только заведующим кафедрой русского научно-технического языка университета в Ганновере — он еще очень хорошо разбирался в шрифтах, создал уникальный шрифт на кириллице, который потом при уходе на пенсию передал в дар нашему вузу. Он

помог наладить контакты практически со всеми университетами Германии, где изучали издательское дело и полиграфию. Зачастую мы вместе отправлялись в поездки, где он выступал в качестве переводчика. Однажды мы прочли совместную лекцию в Институте книжных наук Университета Гуттенберга, после чего я был принят в Общество Гуттенберга. Фридрих очень переживал, когда встречал неправильное употребление шрифтов даже на улице. Его взгляд остро подмечал безвкусицу как наших, так и немецких рекламистов, и он всегда пояснял свой взгляд на тот или иной «шедевр».

К 100-летию юбилею нашего вуза в 1999 году издательством была выпущена целая серия из 19 книг и брошюр. Такие авторы, как В.А. Смелов, В.И. Хозиков, Д.И. Кузнецов, дали свое описание создания и развития Политехнического института. Книги эти по сей день актуальны!

Инициатором крупных издательских проектов в 2009–2011 годах выступил А.И. Рудской, обеспечивший выпуск таких значимых книг, как «Моя жизнь с Фольксвагеном» Карла Хана и «Трудная судьба демократа» Дмитрия Кузнецова.

Когда в кабинет директора Издательства вошел подтянутый экс-президент концерна Фольксваген доктор Хан, то совершенно не верилось, что ему 82 года. Во всем чувствовалась немецкая пунктуальность, четкость, внутренний порядок. На стол легла книга на немецком языке, выдержавшая не одно переиздание. Это была книга об известной немецкой автомобильной компании, написанная рукой очевидца, прошедшего путь от рядового менеджера по продажам до президента концерна с 50 000 работниками только в одном городе Вольфсбург. Нашли переводчицу и быстро перевели книгу на русский язык. Организацию этого процесса взял на себя профессор Аскар Сарыгулов, работавший в то время в Инженерно-экономическом университете. Далее была верстка книги ускоренными темпами, и в следующий визит доктора Хана на моем столе лежали две книги — на русском и немецком языках. Все были поражены полиграфической идентичностью изданий, даже бумага была такой же, как в оригинале! На пресс-конференции в

Доме журналиста на Невском автор особо подчеркнул профессионализм сотрудников нашего издательства.

Следующим интересным изданием была книга об экс-президенте Кыргызстана Аскаре Акаеве. Ее автор — Дмитрий Иванович Кузнецов — в доступной широкой аудитории форме изложил всю суть попытки реализации демократического правления в отдельно взятой среднеазиатской стране. Интересный рассказ о тогда еще начинавшихся «цветных» революциях.

Неординарные авторы издательства оказывали большое влияние и на научное мировоззрение тех сотрудников, с кем приходилось тесно работать.

Профессор Владимир Васильевич Елисеев, издавший у нас учебник «Механика упругих тел», своим взглядом на истинность научных школ и требовательностью поразил меня с первых же минут нашего знакомства. Человек, который может увлекательно рассказывать не только о своей научной деятельности, но и обладающий широким кругозором, всегда поражает своими неординарными выводами. Бывший заместитель министра по науке министерства образования, экс-депутат Госдумы профессор Борис Алексеевич Виноградов с большой эрудицией рассказывал о политических коллизиях нашего государства и необходимости реанимации оборонно-промышленного комплекса. Профессор Сергей Захарович Сапожников, самостоятельно переведивший на русский язык английских классиков поэзии и издававший малыми тиражами свои двуязычные переводы, широко и многогранно обсуждал будущее науки в целом и развитие политехнического образования в частности.

Особо хотелось бы отметить выдающегося отечественного социолога профессора Самуила Ароновича Кугеля, который и в 90-летнем возрасте сохранил чувство юмора, ясность ума и работоспособность. Наши доверительные бесе-

ды с Самуилом Ароновичем об общественном устройстве страны, о роли социологии и его рассказы о встречах с интересными личностями эпохи запомнились особо — в них не было бахвальства и критиканства, а был свойственный только Самуилу Ароновичу юмор и четкое знание механизма корпоративной жизни.

Сотни выдающихся ученых, издавая труды в нашем Издательстве, оставляли после себя не только книги, но и неизгладимый след от своих устных знаний и мыслей.

Долгое время заказчиками издательско-полиграфического комплекса были: Академия русского балета имени Вагановой, Государственная консерватория, Санкт-Петербургский университет культуры и искусств, Финансово-экономический университет имени Вознесенского, Инженерно-экономический университет, Лесотехническая академия, ФГУП «Тест», медицинские вузы города. Отдельные vip-заказы исполнялись для Совета Федерации РФ, Правительства Санкт-Петербурга и ряда других организаций.

Такие издания, как «Технология прокатного производства» А.И. Рудского, «Атомная физика» А.А. Матышева, «Математика» А.П. Аксенова, «История Санкт-Петербургского политехнического института» Б.Н. Меншуткина, «Экологическая роль электромагнетизма» В.В. Александрова, «Теория систем» В.Н. Волковой и А.А. Денисова и многие другие работы внесли неоценимый вклад в отечественную науку.

Более десяти тысяч наименований книг выпустило Издательство Политехнического университета за годы своей работы с 1996 по 2014 год. Мы всегда имели одну цель: университетское издательство призвано зафиксировать и обнародовать всякое новое научное слово, не зависимо от мнения возможных оппонентов. Именно в этом и заключается миссия современного научного издательства!

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Васильев Ю.С., Чепарухин В.В.** От «Известий» до «Трудов». Историко-аналитический обзор. (1904—2007) // История науки и техники. 2011. № 6. С. 50—61.
2. Издания Студенческой кассы взаимопомощи Политехнического института 1903–1930 гг. в Фундаментальной библиотеке СПбГПУ : библиогр. указ. /

Сост.: И. А. Брюханова [и др.]; под ред. Е. В. Дементьевой. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2009.

3. **Иванов А.В.** Двадцать лет назад: хроника создания одного журнала // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2015. № 2(219). С. 191—196. DOI 10.5862/JEST.219.21.



4. **Иванов А.В.** Информационные управленческие технологии в издательской деятельности. Издание второе, перераб. и доп. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. 187 с.

5. **Иванов А.В., Поляков А.О.** Функциональность информационных систем и глобальные хранилища научных текстов: Монография. СПб.: Наука, 2012.

6. **Иванов А.В., Блинов Л.Н.** Физико-химические основы полиграфического производства: Учеб. пособие СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011.

7. **Иванов А.В., Поляков А.О.** Функциональность информационных систем и глобальные хранилища научных текстов. СПб.: Наука, 2012. 238 с.

8. **Иванов А.В.** Цифровые печатные системы в университетском книгоиздании // Высшее образование в России. 2009. № 1. С. 48–56.

9. **Кузнецов Д.И.** Перед взрывом. СПб., 1999.

10. **Меншуткин Б.Н.** История Санкт-Петербургского политехнического института (1899–1930). СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013.

11. **Мутовкин А.** История цензуры в России [Электр. ресурс] ([http://www.promgups.com/blog/wp-content/uploads/2007/02/1\\_9.pdf](http://www.promgups.com/blog/wp-content/uploads/2007/02/1_9.pdf))

12. Нормы выработки редактора. К вопросу об организации издательской деятельности в современном вузе // Университетская книга. 2012. № 8. С. 70–73.

13. <http://www.unkniga.ru/vuz/1013-normy-vyrabotki-redaktora.html>

14. **Поляков А.О., Иванов А.В.** Информационные технологии в книжном деле: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004.

15. Проблемы университетского книгоиздания. СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация университетов России, 2007. 122 с.

16. Сетевая летопись mediabooks.ru. 1997–2012. СПб., 2012.

17. Не только печать: решения хехох для вузов и учреждений культуры // Университетская книга. № 2. 2014. С. 86–88.

18. **Фигурнов В.Э.** IBM PC для пользователя. М.: ИНФРА-М, 1997

19. **Егоров С.Н., Цыпленков П.В.** Колбасно-демократическая революция в России. 1989–1993. СПб., 2014.

## REFERENCES

1. **Vasilyev Yu.S., Cheparukhin V.V.** Ot «Izvestiy» do «Trudov». Istoriko-analiticheskiy obzor. (1904–2007). [From "News" to "Works". Historical and analytical review. (1904–2007)]. *Istoriya nauki i tekhniki*. 2011. № 6. S. 50–61 (rus)

2. Izdaniya Studencheskoy kassy vzaimopomoshchi Politekhnicheskogo instituta 1903–1930 gg. v Fundamentalnoy biblioteke SPbGPU [Publications of Student Mutual Benefit Fund of Polytechnic University 1903–1930 rr. in Fundamental Library of SPbSPU : bibliography] : bibliogr. ukaz. / Sost.: I. A. Bryukhanova [i dr.]; pod red. Ye. V. Dement'yevoy. SPb. : Izd-vo Politekh. un-ta, 2009. (rus)

3. **Ivanov A.V.** Dvadsat let nazad: khronika sozdaniya odnogo zhurnala. [Twenty Years Ago: the Chronicle of Creation of One Magazine]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2015. № 2(219). S. 191–196. DOI 10.5862/JEST.219.21 (rus)

4. **Ivanov A.V.** Informatsionnyye upravlencheskiye tekhnologii v izdatelskoy deyatel'nosti. [Information Management Technologies in Publishing. Second edition, revised and enlarged] // Izdaniye vtoroye, pererab. i dop. SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2003. 187 s.

5. **Ivanov A.V., Polyakov A.O.** Funktsionalnost informatsionnykh sistem i globalnyye khranilishcha nauchnykh tekстов. [The Functionality of the Information Systems and Global Repository of Scientific Texts]: Monografiya. SPb.: Nauka, 2012. (rus)

6. **Ivanov A.V., Blinov L.N.** Fiziko-khimicheskiye osnovy poligraficheskogo proizvodstva [Physico-

chemical basis of the printing industry]: ucheb. posobiye. SPb.: Izd-vo Politekh. un-ta, 2011. (rus)

7. **Ivanov A.V., Polyakov A.O.** Funktsionalnost informatsionnykh sistem i globalnyye khranilishcha nauchnykh tekстов. [The Functionality of the Information Systems and Global Repository of Scientific Texts] SPb.: Nauka, 2012. 238 s. (rus)

8. **Ivanov A.V.** Tsifrovyye pechatnyye sistemy v universitetskom knigoizdani. [Digital Printing Systems in the University Book Publishing]. *Vysseye obrazovaniye v Rossii*. 2009. № 1. (rus)

9. **Kuznetsov D.I.** Pered vzryvom [Before the Explosion]. SPb., 1999. (rus)

10. **Menshutkin B.N.** Istoriya Sankt-Peterburgskogo politekhnicheskogo instituta (1899–1930). [History of the St. Petersburg Polytechnic Institute (1899–1930)]. SPb.: Izd-vo Politekh. un-ta, 2013. (rus)

11. **Mutovkin A.** Istoriya tsenzury v Rossii [The History of Censorship in Russia] [elektron. resurs] ([http://www.promgups.com/blog/wp-content/uploads/2007/02/1\\_9.pdf](http://www.promgups.com/blog/wp-content/uploads/2007/02/1_9.pdf)) (rus)

12. Нормы выработки редактора. К вопросу об организационной деятельности в современном вузе. [The Working Standards of Editor. To the Question of the Organization of Publishing Activities in a Modern High School] // *Universitetskaya kniga*. 2012. № 8. S. 70–73.

13. <http://www.unkniga.ru/vuz/1013-normy-vyrabotki-redaktora.html> [elektron. resurs]. (rus)

14. **Polyakov A.O., Ivanov A.V.** Informatsionnyye tekhnologii v knizhnom dele [Information Technology in



the Book Business]: ucheb. posobiye. SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2004. (rus)

15. Problemy universitetskogo knigoizdaniya [Problems of University Publishing]. SPb.: Izdatelsko-poligraficheskaya assotsiatsiya universitetov Rossii, 2007. 122 s. (rus)

16. Setevaya letopis mediabooks.ru [Network Chronicle of Mediabooks.ru]. 1997–2012. SPb., 2012 (rus)

17. Ne tolko pechat: resheniya xerox dlya vuzov i uchrezhdeniy kultury. [Not only print: xerox solutions for

schools and institutions of culture]. Universitetskaya kniga. 2014. № 2. S. 86–88.

18. **Figurnov V.E.** IBM PC dlya polzovatelya [IBM PC for User]. M.: INFRA-M, 1997. (rus)

19. **Yegorov S.N., Tsyplenkov P.V.** Kolbasno-demokraticeskaya revolyutsiya v Rossii. 1989–1993. [Sausage-Democratic Revolution in Russia. 1989-1993]. SPb., 2014. (rus)

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

**ИВАНОВ Александр Васильевич** — доктор технических наук директор Издательства Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.  
195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.  
E-mail: ivanov.mediabooks@gmail.com

**IVANOV Aleksander V.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.  
E-mail: ivanov.mediabooks@gmail.com



DOI 10.5862/JEST.243.20

УДК 621.3

*В.Я. Фролов, И.И. Иванов*

**ПЕРВЫЙ РУССКИЙ ПРОФЕССОР ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ  
(К 150-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ  
МИХАИЛА АНДРЕЕВИЧА ШАТЕЛЕНА)**

*V.Ya. Frolov, I.I. Ivanov*

**THE FIRST RUSSIAN PROFESSOR OF ELECTRICAL ENGINEERING  
(DEDICATED TO THE 150TH ANNIVERSARY  
OF THE BIRTH OF MIKHAIL A. CHATELAIN)**

Очерк посвящен жизни, педагогической и научной деятельности крупного ученого-электрика, организатора высшего электротехнического образования в России, члена-корреспондента Академии наук СССР, Героя Социалистического Труда М. А. Шателена, одного из организаторов Политехнического института.

М.А. ШАТЕЛЕН; ЭЛЕКТРОТЕХНИКА; ПЛАН ГОЭЛРО; ЧЛЕН-КОРРЕСПОНДЕНТ АН СССР; ГЕРОЙ СОЦИАЛИСТИЧЕСКОГО ТРУДА.

The essay is dedicated to the life, teaching and research activities of Mikhail A. Chatelain, a prominent electrical engineering scholar and proponent of higher education in electrical engineering in Russia, corresponding member of the Academy of Sciences of the USSR, Hero of Socialist Labor, who was one of the founders of the Polytechnic Institute.

M. CHATELAIN; ELECTRICAL ENGINEERING; GOELRO PLAN; CORRESPONDING MEMBER OF THE USSR ACADEMY OF SCIENCES; HERO OF SOCIALIST LABOR.

Михаил Андреевич Шателен родился в 1866 году в г. Анапа (Краснодарский край). Фамилия «Шателен» имеет французское происхождение; его предки приехали в Россию из Франции в конце XVIII века.

В 1888 году М.А. Шателен окончил физико-математический факультет Санкт-Петербургского университета и решением Совета факультета был оставлен при университете для подготовки к профессорскому званию.

В том же году для получения инженерного образования Михаил Андреевич уехал в Париж, где прослушал ряд курсов в высших технических школах и в Сорбонне. Одновременно для практического изучения электротехники Михаил Андреевич поступил рабочим в компанию Эдисона. Через два года он, уже шеф-монтер, принимал участие в

сооружении первой в Европе электрической станции переменного тока и прокладке кабельной линии высокого напряжения в Париже.

По возвращении в 1890 году в Санкт-Петербург Михаил Андреевич стал работать в университете на кафедре физики.

В 1893 году Михаил Андреевич принял участие в конкурсе на должность первого в России профессора электротехники в Петербургском электротехническом институте и был утвержден на ней после успешного прочтения в Совете института двух публичных лекций. Одновременно с работой в Электротехническом институте Михаил Андреевич читал лекции по физике в Горном институте.

Впервые в России Михаил Андреевич организовал преподавание электротехники как спе-



М.А. Шателен

циальной науки. В 1899–1900 годах им были изданы курсы «Электричество», «Электрические измерения», «Курс переменных токов». Это были первые курсы электротехнической науки как самостоятельной дисциплины в высшей школе России.

В конце 1899 года состоялся Первый всероссийский электротехнический съезд, прошедший при активном участии Михаила Андреевича. В 1900 году Шателен был избран Почетным членом Французского общества электротехников и Почетным секретарем Американского института инженеров-электриков, а на Международном конгрессе электриков в Париже избран вице-президентом секции электрических измерений, членом специальной Международной электротехнической комиссии (МЭК); на Всемирной выставке 1900 года в Париже он был членом жюри по электротехнике.

Весной 1901 года по приказу министра внутренних дел М.А. Шателен в числе других про-

фессоров был уволен из Электротехнического института «за проявление сочувствия к революционно-демократически настроенному студенчеству».

Но уже в июле 1901 года министр финансов С.Ю. Витте пригласил Михаила Андреевича для работ по организации Политехнического института в качестве декана электромеханического отделения и профессора электротехники. В 1902 году лекцией М.А. Шателена по созданному им курсу «Энциклопедия электротехники» начались занятия на электромеханическом отделении института [1].

Вся последующая жизнь и деятельность Михаила Андреевича была тесно связана с Политехническим институтом. В новом институте у М.А. Шателена появилась возможность реализовать в обучении инженеров идею тесной связи теории с практикой. Разработка планов преподавания и программ велась при его непосредственном участии. Шателен провел большую работу по организации электроизмерительной лаборатории, по ее оборудованию и постановке в ней студенческих работ. Им была создана группа лабораторий: гальванометрическая, магнитная, сетевая, фотометрическая и др., а также эталонная лаборатория, которая обслуживала не только Политехнический институт, но и ряд других учреждений, в том числе и Главную палату мер и весов.

В 1902 году в Политехническом институте М.А. Шателен основал кафедру общей электротехники, заведующим которой он оставался всю жизнь. С первых лет существования кафедры под его руководством трудился большой коллектив преподавателей, ставших впоследствии крупными учеными: А.А. Горев, Г.А. Люст, А.М. Залеский, Е.Г. Шрамков и многие другие. Результатом их совместного труда стало формирование научной школы электротехники и электроэнергетики, положившей в стране начало организации высшего электротехнического образования и создания электротехники как науки [1].

В последующие годы в Политехническом институте М.А. Шателеном был поставлен общий курс электротехники, написаны «Лекции по электротехнике», выдержавшие до 1916 года пять изданий, впервые написаны на русском

языке курсы «Электрические измерения» и «Переменные токи».

Одновременно с организацией учебного процесса М.А. Шателен работал и в области прикладной электротехники. В 1901 году он разработал новый прибор — курбограф («прадед» современного осциллографа), а также первые приборы для определения магнитных свойств стали, вел исследования в области электросварки и многих другие.

К этому же времени относится начало его активной деятельности в Русском техническом обществе и в журнале «Электричество». До последних дней своей жизни он был почетным председателем Общества энергетиков.

В начале XX века учебная работа в Политехническом институте, как и в других вузах, часто останавливалась из-за студенческих волнений, демонстраций, забастовок. В феврале 1907 года после повального обыска в зданиях института М.А. Шателен, как и другие члены Правления, на основании обвинения в «противозаконном бездействии власти» [2, 3] был снят с поста декана и предан суду. По решению суда Сената М.А. Шателену был объявлен строгий выговор.

В 1911 году М.А. Шателен организовал первую в России лабораторию высоких напряжений и опытную линию электропередачи высокого напряжения на 150 кВ. В этой лаборатории под его научным руководством и при личном участии



Стол, за которым работал М. А. Шателен, сохранен на кафедре общей электроники





Заседание кафедры общей электротехники. 1950-е годы

был проведен ряд работ, послуживших основой для развития высоковольтной техники в России (защита от перенапряжений, высоковольтная изоляция, высоковольтные измерения и т. д.). «Михаил Андреевич обладал исключительной энергией, инициативой, был выдающимся организатором, а также обладал особым даром отгадывать в молодых силах будущих ученых» [4]. «Он сумел объединить вокруг себя молодых преподавателей из числа окончивших первые выпуски, заинтересовал их новыми специальностями, поручил подготовку специальных курсов по отдельным областям» [4].

В научной деятельности Михаила Андреевича особо выделяются три направления: электрические измерения, осветительная техника и электрификация народного хозяйства.

С 1900 года он был одним из основных работников Международной электротехнической комиссии.

В 1903 году недалеко от г. Пятигорска на реке Подкумок М.А. Шателен принял участие в строительстве первой в России гидроэлектростанции «Белый Уголь». Станция мощностью 700 кВт посылала энергию на 18 с лишним вёрст, в Пя-

тигорск, где приводила в движение трамвай, освещала 4 города-курорта. В 1913 году под руководством М.А. Шателена была осуществлена параллельная работа первой государственной гидроэлектростанции России «Белый Уголь» и тепловой электростанции «Тепловая» (г. Пятигорск), что стало первым в мире опытом создания электроэнергетической системы.

Первая мировая война, начавшаяся в 1914 году, прервала учебный процесс в Политехническом институте. Многие десятки студентов ушли добровольцами на фронт или были мобилизованы как офицеры запаса. В военное ведомство вступил в звании прапорщика и 50-летний М.А. Шателен. Во время Первой мировой войны он выполнил большую работу по изучению и практическому применению электризации токами высокого напряжения проволоочных заграждений, по созданию рациональных типов передвижных электростанций для питания этих заграждений, в области прожекторного и ракетного освещения, а также телефонов для разведчиков.

Михаил Андреевич Шателен относится к плеяде тех научных и творческих работников,



которые душой и сердцем приняли Октябрьскую революцию 1917 года.

1 декабря 1918 года на первом заседании нового состава Совета института М.А. Шателен был избран ректором. Деятельность Михаила Андреевича на этом посту была направлена не только на восстановление учебной и научной работы, но и на развитие института. Однако в этой должности он пробыл совсем непродолжительное время. Уже в марте 1919 года он отказывается от поста ректора из-за отсутствия «реальной поддержки со стороны властей» и из-за разногласий с Комитетом бедноты [5]. Официальной причиной была названа болезнь: «На основании постановления Совета института, ввиду отказа профессора М.А. Шателена (вследствие болезни) от должности ректора института, в общем собрании факультетов, состоявшемся 19 сего (1919 года) марта, были произведены выборы нового ректора» [6].

Особое место в жизни и работе Михаила Андреевича всегда занимала деятельность по электрификации страны. В 1920 году он вошел в состав Государственной комиссии по электрификации России (ГОЭЛРО) и был назначен уполномоченным по Петрограду и Северному району страны. План электрификации Северного района, составленный при его участии, был особо отмечен Государственной комиссией и послужил образцом для составления планов по другим районам. С 1921 по 1932 годы в рамках работ по плану ГОЭЛРО М.А. Шателен был членом комиссии по электрификации Урала и Донбасса, экспертом проектов Волховстроя, Свирьстроя, Днепростроя, председателем бюро «Волховстрой—Электроток». С основанием в 1921 году Госплана СССР М. А. Шателен был назначен его членом и принимал участие в разработке Генерального плана электрификации страны. В 1922 году по его инициативе возобновился выход журнала «Электричество». В 1924 году М.А. Шателен был приглашен в Главную палату мер и весов в качестве старшего метролога, создал там Эталонную фотометрическую лабораторию и стал ею заведовать. С 1929 по 1932 год он руководил всей деятельностью Главной палаты, занимая пост президента.

М.А. Шателен принимал активное участие в работе международных съездов, обществ и организаций, связанных с электротехникой и энергетикой. В 1923 году он участвовал в Международной конференции по сетям высокого напряжения, был избран членом совета конференции и вице-президентом. В 1926 году избран членом совета Международной электротехнической комиссии. С 1933 года он — заместитель председателя комитета по участию СССР в международных энергетических объединениях.

В 1931 году Михаил Андреевич Шателен был избран членом-корреспондентом АН СССР. В этом же году он участвовал в организации Энергетического института АН СССР.

Все эти годы продолжалась работа Шателена в Политехническом институте.

С первых дней Великой Отечественной войны Михаил Андреевич работал в комиссии Научно-технического комитета помощи фронту; он вошел в состав комиссии по рассмотрению и реализации оборонных предложений, организованную в июле 1941 года под руководством академика Н.Н. Семенова, и в состав подкомиссии по оборонным мероприятиям при исполкоме Ленсовета депутатов трудящихся.

В сентябре 1941 года М.А. Шателен был эвакуирован в Ташкент, где принял участие в организации работы оборонных предприятий, научных и учебных учреждений, научно-инженерных обществ и организаций. В эти годы он был профессором Ленинградского политехнического института, находящегося в эвакуации, и Среднеазиатского индустриального института, где организовал кафедру общей электротехники и электротехническую лабораторию. Участвовал в организации Узбекского филиала АН СССР, был его председателем. Организовал и был первым директором Энергетического института Узбекского филиала АН СССР.

В 1944 году Михаил Андреевич вместе с Политехническим институтом возвратился в Ленинград. В этом же году за научные заслуги он был награжден Орденом Ленина и медалью «За оборону Ленинграда», а в 1945 году — медалью «За доблестный труд в Великой Отечественной войне 1941—1945 гг.». В 1945 году М.А. Шателен

создал в Ленинграде Энергетическую группу Энергетического института, преобразованную в 1950 году в Энергетическую лабораторию, научное руководство которой Михаил Андреевич осуществлял до последних дней своей жизни.

Большое внимание М.А. Шателен уделял истории науки и техники. При Политехническом институте он создал музей, отражающий историю электротехники, где собрал образцы свечей Яблочкова, лампы Лодыгина—Дидрихсона, различные виды осветительной аппаратуры, электроизмерительных приборов и пр. Им написан ряд статей и книг по истории развития электротехники.

Он был живым свидетелем, а в ряде случаев и сподвижником крупнейших изобретателей и ученых-электротехников, таких, как П.Н. Яблочков, А.Н. Лодыгин, Н.Г. Славянов, А.С. Попов и др. В 1949 году вышел в свет научно-исторический труд М.А. Шателена «Русские электротехники второй половины XIX века», удостоенный Сталинской премии. В последующие годы Шателен дополнил книгу новыми главами. В 1955 году, ко дню 90-летия Шателена, вышло третье, значительно расширенное издание книги.

В 1956 году М.А. Шателену было присвоено звание Героя Социалистического Труда с вручением ему Ордена Ленина и золотой медали «Серп и Молот». Его именем названа улица в Санкт-Петербурге (в районе станции метро «пл. Муже-

ства» между улицами Политехнической и Курчатова).

Скончался Михаил Андреевич Шателен 31 января 1957 года.

Весь трудовой жизненный путь М.А. Шателена — пример беззаветного служения Родине, своему народу. Инженер, организатор, общественный деятель, автор научных трудов, Михаил Андреевич большую часть своей трудовой жизни отдал педагогической деятельности. С его именем связаны выделение электротехники из курса физики как самостоятельной дисциплины, организация электротехнического образования в нашей стране.

Коллеги М.А. Шателена, которым довелось работать вместе с ним, в своих воспоминаниях характеризовали его как человека высоких личных качеств, ученого-патриота, обладающего изумительной энергией, любящего жизнь и людей, у которого всегда можно найти участие, получить совет и моральную поддержку, как человека, которому хочется подражать.

Таким был и остается в памяти всей электротехнической и научной общественности страны Михаил Андреевич Шателен — Герой Социалистического Труда, член-корреспондент Академии наук СССР, заслуженный деятель науки и техники РСФСР и Узбекской ССР, лауреат Сталинской премии, почетный председатель Научно-технического общества энергетической промышленности. Стопятидесятилетие со дня его рождения отмечается в 2016 году.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Политехники: выдающиеся ученые, основатели научных школ и направлений. Электромеханический факультет / Под ред. проф. В.С. Тарасова; Ленингр. гос. техн. ун-т. Ленинград, 1990.
2. **Исьянова Т.Н.** Шателен Михаил Андреевич, ректор Политехнического института (1.12.1918 - 19.03.1919) // Научно-технические ведомости СПбГТУ. 1999. №2. С. 135—141.
3. **Меншуткин Б.Н.** История Санкт-Петербургского политехнического института с его основания до Октябрьской революции. 1899—1917 гг. [машинопись] / Архив Историко-технического музея СПбПУ. 1927.
4. **Вечорин Е.Л.** Михаил Андреевич Шателен // Санкт-Петербургский Политехнический институт Императора Петра Великого. Юбилейный сборник № 2. Париж — Нью-Йорк: Изд-во Объединения С.-Петербургских политехников, 1958.
5. **Меншуткин Б.Н.** История Санкт-Петербургского политехнического института. 1917—1930 гг. [машинопись] / Архив Историко-технического музея СПбПУ.
6. **Левинсон-Лессинг Ф.Ю.** / Архив СПбПУ, д. 230, оп. 38.

## REFERENCES

1. Politehniki: vydayushchiyesya uchenyye, osnovateli nauchnykh shkol i napravleniy: Elektromekhanicheskiy fakultet [Polytechnicians: outstanding scientists, founders of scientific schools and directions: Electromechanical Faculty] / Prof. V.S. Tarasov, Ed.. Leningrad: Leningr. gos. tekhn. un-t. publ., 1990. 80 p. (rus)
2. **Isyanova T.N.** Shatelain Mikhail Andreyevich, rektor Politekhnikeskogo instituta (1.12.1918 - 19.03.1919) [Shatelain Michael Andreyevich, rector of Polytechnic institute (1.12.1918 - 19.03.1919)]. *St. Petersburg State Politechnical University Journal*. St. Petersburg: SPbGPU Publ. 1999. № 2. S. 135–141. (rus)
3. **Menshutkin B.N.** Istoriya Sankt-Peterburgskogo politekhnikeskogo instituta s yego osnovaniya do Oktyabrskoy revolyutsii. 1899–1917 gg. [History of St. Petersburg Polytechnic institute from its founding until the October Revolution. 1899–1917] / 1927. Archive of Historical and Technical Museum of SPbPU. (rus)
4. **Vechorin Ye.L.** Mikhail Andreyevich Shatelen [Michael Andreyevich Shatelain]. *Sankt-Peterburgskiy Politekhnikeskoy institut Imperatora Petra Velikogo. Yubileynyy sbornik № 2*. Parizh — Nyu-York: Izd. Obyedineniya S.-Peterburgskikh politekhnikov, 1958. (rus)
5. **Menshutkin B.N.** Istoriya Sankt-Peterburgskogo politekhnikeskogo instituta. 1917–1930 gg. [History of St. Petersburg Polytechnic institute. 1917–1930] / Archive of Historical and Technical Museum of SPbPU. (rus)
6. **Levinson-Lessing F. Yu.** / Archive of SPbPU. Delo 230, op.38. (rus)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

**ФРОЛОВ Владимир Яковлевич** — доктор технических наук профессор, заведующий кафедрой Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.  
195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.  
E-mail: frolov.eed@gmail.com

**FROLOV Vladimir Ya.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.  
E-mail: frolov.eed@gmail.com

**ИВАНОВ Иван Иванович** — кандидат технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.  
195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.  
E-mail: eie@spbstu.ru

**IVANOV Ivan I.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.  
E-mail: eie@spbstu.ru

DOI 10.5862/JEST.243.21

УДК 001:929:66

*А.Г. Морачевский*

**АКАДЕМИК НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ СЕМЕНОВ  
(К 120-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ)**

*A.G. Morachevskij*

**ACADEMICIAN NIKOLAI SEMYONOV  
(ON THE 120TH ANNIVERSARY OF HIS BIRTH)**

Очерк посвящен жизни, научной и педагогической деятельности выдающегося ученого в области химической физики, действительного члена Академии наук СССР и многих академий других стран, лауреата Нобелевской премии по химии 1956 года Николая Николаевича Семенова, длительное время преподававшего в Петроградском (Ленинградском) политехническом институте.

**Н.Н. СЕМЕНОВ; ЛАУРЕАТ НОБЕЛЕВСКОЙ ПРЕМИИ; ДЕЙСТВИТЕЛЬНЫЙ ЧЛЕН АКАДЕМИИ НАУК СССР; ХИМИЯ; ФИЗИКА; ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ.**

The essay is dedicated to the life and scientific and pedagogical activity of outstanding scientist in the field of chemical physics, a member of the Academy of Sciences of the USSR and of many academies of other countries, Nobel Prize in Chemistry in 1956 Nikolay Nikolaevich Semenov, a long time taught at the Petrograd (Leningrad) Polytechnic Institute.

**N.N. SEMENOV; NOBEL LAUREATE; FULL MEMBER OF THE USSR ACADEMY OF SCIENCES; CHEMISTRY; PHYSICS; POLYTECHNICAL INSTITUTE.**

Физик и химик, один из основателей новой научной дисциплины — химической физики, Н.Н. Семенов по праву входит в число самых выдающихся ученых XX века. На юбилейных торжествах в Москве в 1996 году по поводу столетия со дня рождения ученого директор ЮНЕСКО Ф. Майер в своем выступлении отметил: «Талант не может принадлежать одной стране. Он принадлежит миру». Действительный член АН СССР с 1932 года Н.Н. Семенов был избран почетным членом Английского химического общества (1943), почетным членом Лондонского королевского общества (1958), почетным членом Нью-Йоркской академии наук (1962), иностранным членом Национальной академии наук США (1963), членом Французской академии наук (1978), членом Немецкой академии естествоиспытателей «Леопольдина» (1959), почет-

ным членом Индийской академии наук (1959), членом Академий наук Венгрии (1961), Румынии (1965), Чехословакии (1965), ГДР (1966), Болгарии (1969), Польши (1975). Н.Н. Семенов был почетным доктором восьми зарубежных университетов и институтов.

С 1920 по 1941 год научная и педагогическая деятельность Н.Н. Семенова была связана с Петроградским (Ленинградским) политехническим институтом, а семья Семеновых жила в профессорском корпусе института. Особенно тесной была связь до реорганизации Политехнического института в 1930 году.

Николай Николаевич Семенов родился 15 апреля 1896 года в г. Саратове. Его отец, Николай Александрович, служил в Удельном ведомстве, последний его чин — статский советник. Мать, Елена Александровна, еще до замужества

окончила в Петербурге Высшие женские математические курсы. Н.Н. Семенов первоначально учился в Вольском реальном училище, затем — в Самарском реальном училище, которое окончил с отличием в 1913 году. После сдачи экзамена по латинскому языку в первой мужской гимназии в Самаре он поступил на математическое отделение физико-математического факультета Санкт-Петербургского (Петроградского) университета. Уже в первые годы обучения он принимал активное участие в работе семинаров, которые проводили известные физики того времени — профессора Университета И.И. Боргман и Д.С. Рождественский. В 1915–1916 годах Н.Н. Семенов познакомился с преподавателем физики в Политехническом институте А.Ф. Иоффе, который в те годы был также приват-доцентом Университета. В 1916–1917 годах Н.Н. Семенов работал под руководством А.Ф. Иоффе в физической лаборатории Политехнического института, изучал ионизацию паров металлов. В марте 1917 года он закончил Петроградский университет с дипломом первой степени и по рекомендации Д.С. Рождественского был оставлен на кафедре физики Университета для подготовки к преподавательской деятельности.

Весной 1918 года Н.Н. Семенов поехал к родителям в Самару на период каникул. Однако события Гражданской войны привели к тому, что молодой ученый оказался в Томске, в то время единственном городе в Сибири, где были высшие учебные заведения — Университет и Технологический институт. Томский период жизни Н.Н. Семенова подробно описан в работе [1].

В марте 1920 года А.Ф. Иоффе предложил Н.Н. Семенову занять должность заведующего лабораторией электронных явлений в создаваемом Физико-техническом институте. По возвращении в Петроград молодой ученый, наряду с руководством лабораторией, занимает должность заместителя директора Физико-технического института по административно-хозяйственной части, оказывает большую помощь А.Ф. Иоффе в поисках необходимых материалов в тяжелейший для страны период. В число учреждений АН СССР ФТИ вошел только в 1939 году.



Н. Н. Семенов

Первоначально весь штат лаборатории Н.Н. Семенова состоял из нескольких увлеченных наукой студентов Политехнического института, наиболее активными были будущие академики В.Н. Кондратьев и Ю.Б. Харитон. В 1927 году Н.Н. Семенов совместно с ними опубликовал книгу компилятивного характера под названием «Электронная химия» [2], в которой были описаны все достижения мировой науки по применению новых физических представлений к проблемам химического строения и химических превращений. Как отмечал Н.Н. Семенов, название «электронная химия» и «химическая физика» — синонимы, но в дальнейшем привилось второе название. Химическая физика, созданная учеными ряда стран в двадцатых годах прошлого века, это — в основном электронно-квантовая теория строения веществ и их превращений. Становление и развитие химической физики особенно большое влияние оказало на химическую кинетику, учение о механизме и скоростях химических реакций.

В дальнейшем лаборатория Н.Н. Семенова превратилась в химико-физический сектор ФТИ, а в 1931 году на его базе был создан Институт химической физики. В 1943 году, после возвращения из эвакуации в Казань, институт переезжает в Москву и вскоре становится одним



из крупнейших научных центров АН СССР. Академик Н.Н. Семенов возглавляет его до конца жизни.

Среди ряда научных направлений, которыми занимался Н.Н. Семенов со своими учениками, начиная с 1925 года центральное место занимает изучение цепных реакций. Реакции с неразветвленными цепями подробно изучены немецким ученым М. Боденштейном; реакции с разветвленными цепями в двадцатые годы прошлого века изучались рядом ученых, среди которых были английский профессор С. Хиншелвуд и Н.Н. Семенов. Первые закономерности, относящиеся к разветвленным цепным реакциям, были установлены в лаборатории Н.Н. Семенова на примере окисления паров фосфора при низких давлениях. В работе «К теории процессов горения» [3] Н.Н. Семенов предложил убедительное объяснение механизма окисления фосфора на основании представлений о разветвленных цепных реакциях.

К началу тридцатых годов прошлого века в лабораториях Н.Н. Семенова, С. Хиншелвуда и других ученых был накоплен большой экспериментальный материал о кинетике разветвленных цепных реакций, который Н.Н. Семенов обобщил в монографии «Цепные реакции» [4]. Через год под названием «Химическая кинетика и цепные реакции», которое более правильно отражало содержание книги, чем заголовок русского оригинала, она была издана в Англии [5]. В 1933 году на русском языке вышел перевод книги Хиншелвуда, изданной в Англии в 1929 году [6].

Книга Н.Н. Семенова «Цепные реакции» подобно, в свое время, монографии Я. Вант-Гоффа «Очерки по химической динамике» (1884) во многом определила развитие химической кинетики на последующие десятилетия. В настоящее время теория цепных реакций является, по существу, важнейшей кинетической теорией, на основании которой разрабатываются промышленные химические процессы [7]. Исследованиями школ Н.Н. Семенова и С. Хиншелвуда в 1940–1970 годах были подтверждены основные положения теории разветвленных цепных реакций, выявлены механизмы некоторых превращений, установлены взаимосвязи между строением веществ и особенностями их реакций, была

уточнена роль ингибиторов и катализаторов в реакциях, показана применимость основных положений цепной теории для анализа таких химических превращений, как реакции полимеризации, и для физических процессов (ядерные реакции, деление урана).

На соискание Нобелевской премии Н.Н. Семенова представляли ежегодно с 1946–1949 года (сведения о номинаторах за вторую половину XX века пока Нобелевским комитетом не разглашаются). Его выдвигали профессор Оксфордского университета С. Хиншелвуд (Англия), лауреат Нобелевской премии по химии в 1926 года Т. Сведберг (Швеция). Однако в СССР в эти годы усиленно занимались борьбой с низкопоклонством перед Западом, изымали ссылки на работы иностранных ученых из статей и диссертаций, о необходимых при выдвижении на премию контактах с Нобелевским комитетом не могло быть и речи. В печати старались не упоминать, что лауреатами Нобелевской премии были русские ученые И.П. Павлов (1904 г.) и И.И. Мечников (1916 г.), писатель И.А. Бунин (1933 г.). Н.Н. Семенова упрекали в том, что главную книгу своей жизни — «Цепные реакции» — он посвятил иностранному ученому С. Аррениусу и Я. Вант-Гоффу. Истинная картина взаимоотношений между властными структурами СССР, главным образом — Отделом науки ЦК КПСС, и учреждениями Нобелевского комитета на основании архивных документов описана в книге А.М. Блоха [8]. Времена меняются, и в 1956 году Н.Н. Семенову и С. Хиншелвуду была присуждена Нобелевская премия по химии «За исследования механизма химических реакций». Суть открытия заключалась в установлении механизма газофазных реакций, в частности гомогенного мономолекулярного разложения (Хиншелвуд) и разветвленных химических реакций (Семенов, Хиншелвуд) [9].

Расширенный текст нобелевской лекции Н.Н. Семенова на тему «О некоторых проблемах цепных реакций и теории горения», прочитанной в Стокгольме 11 декабря 1956 года, был опубликован [10].

Как уже упоминалось, с 1920 года Н.Н. Семенов преподавал в Политехническом институте (с 1925 года — доцент на кафедре «Экспери-

ментальная физика», с 1928 года — профессор). С 1944 года Н.Н. Семенов был профессором Московского университета. Огромная заслуга Н.Н. Семенова заключается в создании уникальной научной школы в области химической кинетики. Среди его учеников — такие выдающиеся ученые, как Ю.Б. Харитон, А.Ф. Вальтер, В.Н. Кондратьев, А.И. Шальников, Я.Б. Зельдович, А.А. Ковальский, Ф.И. Дубовицкий, Н.М. Эмануэль, В.И. Гольданский, А.Е. Шилов и многие другие. Среди них — академики и члены-корреспонденты АН СССР, лауреаты Ленинской и Государственной премий, Герои Социалистического Труда.

Н.Н. Семенов занимал ответственные посты в Академии наук СССР: с 1957 по 1971 год он — академик-секретарь Отделения химических наук, с 1963 по 1971 — вице-президент, с 1971 года — член Президиума АН СССР.

Начиная с 1943 года в руководимом Н.Н. Семеновым Институте химической физики активно велись работы, связанные с реализацией Атомного проекта в СССР, выполнены фундаментальные исследования в области горения и взрыва. Под его руководством решены крупные технические проблемы, однако к непосредственному участию в Атомном проекте Н.Н. Семенов не привлекался. Самое активное участие в создании ядерного оружия принимали ближайшие ученики Н.Н. Семенова — Ю.Б. Харитон, Я.Б. Зельдович, К.И. Щелкин. Каждый из них трижды удостоивался звания Героя Социалистического труда, имел много других наград.

К середине 50-х годов прошлого века Н.Н. Семенов пришел к заключению, что как бы ни была значительна область цепных реакций, она не охватывает многие типы реакций, например большинство ионных реакций в растворах, многие реакции гомогенного и гетерогенного катализа, реакции с участием комплексов металлов [11, 12]. В связи с этим в Институте химической физики появился целый ряд новых направлений исследований, среди которых: некоторые проблемы строения вещества; квантовые эффекты в реакциях при низких температурах; электронная проводимость и сверхпроводимость органических соединений; металлокомплексный катализ и др. Многих Н.Н. Семенов увлек

проблемами, которые связаны с биологией. Как отмечает академик А.Е. Шилов, один из учеников Н.Н. Семенова уже в послевоенный период, отказ от того, чтобы считать цепные реакции единственным объектом исследований Института, и широкий охват новых научных направлений, осуществленные по инициативе Н.Н. Семенова, можно назвать его научным подвигом [12].

Н.Н. Семенов все годы решительно выступал против любых проявлений лженауки не только в физике, но и в других областях знания, резко критиковал антинаучные идеи Т.Д. Лысенко, поддерживал ученых, занимавшихся генетикой [13].

Несмотря на огромную загруженность Н.Н. Семенова научной, педагогической и административной работой, он выполнял большое число других поручений. Член КПСС с 1947 года Н.Н. Семенов в 1961–1966 годах избирался кандидатом в члены ЦК КПСС. Опубликованы его выступления на XXII съезде КПСС (октябрь 1961 г.), на пленумах ЦК КПСС (декабрь 1963 г., февраль 1964 г.) [14]. Эти и другие выступления ученого на съездах и конференциях, статьи в центральных органах печати посвящены конкретным проблемам науки и образования в нашей стране. Н.Н. Семенов был депутатом Верховного Совета СССР V–VII созывов. С 1960 по 1963 год он занимал пост председателя правления Всесоюзного общества «Знание».

Заслуги Н.Н. Семенова в научной, педагогической, организаторской деятельности отмечены высокими государственными наградами: ему дважды присвоено звание Героя Социалистического Труда (1966, 1976), он лауреат Ленинской (1976) и двух Сталинских (Государственных) премий (1941, 1949). Н.Н. Семенов был награжден девятью орденами Ленина, орденами Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени, многими медалями. Академия наук в 1970 году удостоила ученого своей высшей награды — Золотой медали имени М.В. Ломоносова.

Главным увлечением в жизни Н.Н. Семенова была наука. Но он любил также музыку, живопись, поэзию, общество интересных людей. Как отмечают люди, близко знавшие ученого, для Николая Николаевича был интересен каж-

дый человек независимо от своего положения и возраста.

Николай Николаевич Семенов скончался 25 сентября 1986 года. Его жизни и научной деятельности посвящена огромная литература. В связи со столетием со дня рождения ученого (1996 г.) в журнале «Химическая физика» в двух номерах (№ 4, 5) опубликованы статьи, развивающие традиционные и новые направления

исследований школы химической физики, которую создал и бессменно возглавлял академик Н.Н. Семенов. Два номера журнала «Природа» за 1996 год (№ 3, 4) полностью посвящены жизни и деятельности академика Н.Н. Семенова. Большая и содержательная статья написана к 70-летию Н.Н. Семенова академиком Н.М. Эмануэлем [15], к 100-летию вышла статья академиков В.И. Гольданского и А.Е. Шилова [16].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Майер Г.В., Фоминых С.Ф. Томский период в жизни академика Н.Н. Семенова // Вестник РАН. 2005. Т.75, № 4. С. 360–363.
2. Кондратьев В.Н., Семенов Н.Н., Харитон Ю.Б. Электронная химия // Под ред. и с предисл. А.Ф. Иоффе. М.-Л.: Госиздат, 1927. 160 с.
3. Semenov N.N. Zur Theorie des Verbrennungsprozesses // Z.Phys. 1928. Bd. 48. S. 571–582.
4. Семенов Н.Н. Цепные реакции. Л.: Госхимтехиздат, 1934. 555 с.
5. Semenov N.N. Chemical Kinetics and Chain Reactions. London, Oxford: Univ. Press. 1935. 480 p.
6. Гиншельвуд Ч.Н. Кинетика газовых реакций / Перев. с англ. под ред. Н.Н. Семенова. Гостехтеориздат, 1933. 191 с.
7. История учения о химическом процессе. Всеобщая история химии. М.: Наука, 1981. 448 с.
8. Блох А.М. Советский Союз в интерьере Нобелевских премий. Факты. Документы. Размышления. Комментарии / Под ред. А.И. Мелуа. СПб.: Гуманистика, 2001. 608 с.
9. Зеленин К.Н., Ноздрачев А.Д., Поляков Е.Л. Нобелевские премии по химии за 100 лет. СПб.: Гуманистика, 2003. С. 399–408.
10. Семенов Н.Н. О некоторых проблемах цепных реакций и теории горения // Успехи химии. 1957. Т. 26, № 3. С. 273–291.
11. Шилов А.Е. Н.Н. Семенов и химия XX века // Природа. 1989. № 7. С. 72–80.
12. Шилов А.Е. Н.Н. Семенов и наука XX века // Наука и человечество. Международный ежегодник. М.: Знание, 1997. С. 46–54.
13. Семенов Н.Н. Отповедь лженауке / Публикация Ю.И. Соловьева // Вестник РАН. 1996. Т. 66, № 4. С. 339–347.
14. Семенов Н.Н. Наука и общество. Статьи и речи. М.: Наука, 1981. 488 с.
15. Эмануэль Н.М. Выдающийся ученый и его научная школа // Вестник АН СССР. 1966. № 4. С. 93–100.
16. Гольданский В.И., Шилов А.Е. Предтеча научно-технической революции XX века // Вестник РАН. 1996. Т. 66, № 4. С. 333–347.

## REFERENCES

1. Mayer G.V., Fominykh S.F. Tomskiy period v zhizni akademika N.N. Semenova [Tomsk period in the life of academician N.N. Semenova]. *Vestnik RAN*. 2005. T.75, № 4. S. 360–363. (rus.)
2. Kondratyev V.N., Semenov N.N., Khariton Yu.B. Elektronnaya khimiya [Electronic chemistry] / Pod red. i s predisl. A.F. Ioffe. M.-L.: Gosizdat, 1927. 160 s. (rus.)
3. Semenov N.N. Zur Theorie des Verbrennungsprozesses. *Z.Phys.* 1928. Bd. 48. S. 571–582.
4. Semenov N.N. Tsepnyye reaktsii [Chain reactions]. L.: Goskhimtekhnizdat, 1934. 555 s. (rus.)
5. Semenov N.N. Chemical Kinetics and Chain Reactions. London, Oxford: Univ. Press. 1935. 480 p.
6. Ginshelevud Ch.N. Kinetika gazovykh reaktsiy [The kinetics of gas reactions] / Perev. s angl. pod red. N.N. Semenova. Gostekhteorizdat, 1933. 191 s. (rus.)
7. Istoriya ucheniya o khimicheskom protsesse. Vseobshchaya istoriya khimii [History of the chemical process of learning]. M.: Nauka, 1981. 448 s. (rus.)
8. Blokh A.M. Sovetskiy Soyuz v interyere Nobelevskikh premiy. Fakty. Dokumenty. Razmyshleniya. Kommentarii [The Soviet Union in the interior of the Nobel Prizes. Data. Documentation. Reflections. Comments]. Pod red. A.I. Melua. SPb.: Gumanistika, 2001. 608 s. (rus.)
9. Zelenin K.N., Nozdrachev A.D., Polyakov Ye.L. Nobelevskie premii po khimii za 100 let [Nobel Prize in Chemistry for 100 years]. SPb.: Gumanistika, 2003. S. 399–408. (rus.)
10. Semenov N.N. O nekotorykh problemakh tsepnykh reaktsiy i teorii goreniya [On some problems of chain reactions and combustion theory]. *Uspekhi khimii*. 1957. T. 26, № 3. S. 273–291. (rus.)

11. **Shilov A.Ye.** N.N. Semenov i khimiya XX veka [N.N. Semenov and the chemistry of the XX century]. *Priroda*. 1989. № 7. S. 72–80. (rus.)
12. **Shilov A.Ye.** N.N. Semenov i nauka XX veka [N.N. Semenov and science of XX century]. *Nauka i chelovechestvo. Mezhdunarodnyy yezhegodnik*. M.: Izd-vo Znaniye, 1997. S. 46–54. (rus.)
13. **Semenov N.N.** Odpoved lzhenauke [Rebuke pseudoscience] / Publikatsiya Yu.I. Solovyeva. *Vestnik RAN*. 1996. T. 66, № 4. S. 339–347. (rus.)
14. **Semenov N.N.** Nauka i obshchestvo. Stat'ii i rechi [Science and Society. Articles and speeches]. M.: Nauka, 1981. 488 s. (rus.)
15. **Emanuel N.M.** Vydayushchiysya uchenyy i yego nauchnaya shkola [An outstanding scientist and his scientific school]. *Vestnik AN SSSR*. 1966. № 4. S. 93–100. (rus.)
16. **Goldanskiy V.I., Shilov A.Ye.** Predtecha nauchno-tekhnicheskoy revolyutsii XX veka [Forerunner of the technological revolution of XX century]. *Vestnik RAN*. 1996. T. 66, № 4. S. 333–347. (rus.)

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

**МОРАЧЕВСКИЙ Андрей Георгиевич** — доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.  
195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.  
E-mail: andrey.morachevsky@gmail.com

**MORACHEVSKIY Andrey G.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.  
E-mail: andrey.morachevsky@gmail.com

DOI 10.5862/JEST.243.22

УДК 001:929

*Н.П. Шаплыгин*

**АКАДЕМИК БОРИС ГРИГОРЬЕВИЧ ГАЛЕРКИН  
(К 145-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ)**

*N.P. Shaplygin*

**ACADEMICIAN BORIS GALERKIN  
(DEDICATED TO THE 145TH ANNIVERSARY OF HIS BIRTH)**

Статья посвящена одному из выдающихся механиков первой половины XX века — академику АН СССР Борису Григорьевичу Галеркину. В 1899 году он окончил механическое отделение Санкт-Петербургского технологического института императора Николая Первого, а карьеру ученого он начал в Политехническом институте, пополнив ряд профессоров-механиков, таких, как В.Л. Кирпичев, И.В. Мещерский, С.П. Тимошенко, А.П. Фан-дер-Флит. В последние годы жизни он стал одним из основателей Института механики АН СССР. Лауреат Сталинской премии за 1942 год.

УЧЕНЫЙ-МЕХАНИК; ВЫПУСКНИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА; ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ТРУДЫ; РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИЙ; ПРЕПОДАВАТЕЛЬ; ПРОФЕССОР ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА; АКАДЕМИК АН СССР.

The article is dedicated to Boris Grigorievich Galerkin, one of the greatest engineers of the first half of the 20th century, academician of the Academy of Sciences of the USSR, who in 1899 graduated from the mechanical department of the St. Petersburg Technological Institute of Emperor Nicholas I. He started his career as a scientist at the Polytechnic Institute, among such mechanics scholars as V.L. Kearney-Chev, I.V. Meshchersky, S.P. Tymoshenko, A.P. Van der Fleet. He founded the Institute of Mechanics of the Academy of Sciences of the USSR in the last years of his life. He won the Stalin Prize in 1942.

MECHANICS SCHOLAR; TECHNOLOGICAL INSTITUTE SCHOLAR; BASIC SCIENTIFIC WORK; ANALYSIS OF STRUCTURES; LECTURER; PROFESSORS OF POLYTECHNIC INSTITUTE; ACADEMY OF SCIENCES OF THE USSR.

Борис Григорьевич Галеркин родился 20 февраля (4 марта) 1871 года в ремесленной семье в городе Полоцке Витебской губернии Российской империи. Его родители имели в городе Витебске дом, но полного достатка в семье не было, и в возрасте двенадцати лет он вынужден был подрабатывать перепиской бумаг в Сиротском доме. В 1890 году он окончил в г. Полоцке начальное (реальное) училище, а экзамены за дополнительный класс, которые давали возможность поступать в вуз, он сдал экстерном в Минске в 1893 году. В этом же году он поступил на

механическое отделение Санкт-Петербургского технологического института Императора Николая I. Это было время, когда социал-демократические идеи увлекали студентов, в том числе и студентов технологов. В 1899 году Б.Г. Галеркин окончил институт и в этом же году стал членом РСДРП. В последующие несколько лет он работал инженером-конструктором на Харьковском заводе Русского паровозостроительного и механического общества и по заданию партии проводил занятия в рабочей среде, в конце 1903 года — инженером на строящейся линии Восточно-Ки-



тайской железной дороги. В 1904 году Б.Г. Галеркин — уже в Петербурге на Северном механическом заводе (завод Тельмаса), где заведует техническим отделом. В 1905 году он принял участие в организации Союза инженеров в Петербурге и в том же году был арестован за подготовку всеобщей забастовки инженеров. В 1906 году Б.Г. Галеркин входил в состав Петербургского комитета РСДРП от меньшевистской фракции. 23 июля (5 августа) 1906 года полиции удалось задержать почти всех членов партии, принимавших участие в заседании Комитета. Петербургская судебная палата в своем заседании 13 (26) марта 1907 вынесла достаточно мягкий приговор участникам заседания, несмотря на то, что некоторые члены комитета отстреливались. Б.Г. Галеркин, как и другие 8 человек, был приговорен к 1,5 годам тюремного заключения, которое он отбывал в тюрьме «Кресты». Находясь в заключении, он занимался работой по проектированию и строительству котельной электростанции Общества электрического освещения (1886 г., Петербург). В этот период он отошел от революционной деятельности и больше к ней не возвращался. В анкетах в советское время он также старался не вспоминать о своем революционном прошлом. В 1909—1917 годах Б.Г. Галеркин работал в Политехническом институте преподавателем по найму на механическом отделении. В первое время он руководил упражнениями и проектированием по курсу строительной механики на этом же отделении. Профессором по кафедре строительной механики был известный ученый В.Л. Кирпичев, у которого на лекциях аудитории всегда были заполнены студентами. С 1912 года Б.Г. Галеркин преподавал дисциплину — электрические станции и подъемные машины. Школа механиков в Политехническом была представлена такими профессорами, как И.Г. Бубнов, С.И. Дружинин, А.Н. Крылов, И.В. Мещерский, С.П. Тимошенко, А.П. Фан-дер-Флит.

В Известиях Политехнического института за 1909 год (том XII) была опубликована первая статья Б.Г. Галеркина «Теория продольного изгиба и опыт применения теории продольного изгиба к монтажным стойкам, стойкам с жесткими соединениями и системам стоек». Работа



Б.Г. Галеркин

занимала 130 страниц текста и была написана в «Крестах». Начиная с 1909 года Борис Григорьевич, как и другие преподаватели Политехнического института, в каникулярное время ездил за границу для знакомства с сооружениями и пополнения знаний. За время до начала Первой мировой войны он посетил Германию, Австрию, Швейцарию, Бельгию, Швецию; при этом он владел тремя иностранными языками: немецким, английским и французским. С ноября 1911 года одновременно преподавал в Женском политехническом институте. В 1914—1915 годах Б.Г. Галеркин выполнил проект фахверкового трехэтажного здания с металлическим каркасом для котельной электростанции «Общества электрического освещения» (1886 г.) в Петербурге, признанное впоследствии одним из выдающихся сооружений в Европе. В 1910—1918 годах он опубликовал семь статей, из них четыре — в «Известиях» Политехнического института и три в «Вестнике инженеров». Эти работы были посвящены исследованию стержневых систем и пластинок.

В 1915 году Б.Г. Галеркин в «Вестнике инженеров» (Том 1, № 9) опубликовал статью «Стержни и пластинки. Ряды в некоторых вопросах

упругого равновесия стержней и пластинок», в которой предложил приближенный метод решения краевых задач с применением дифференциальных уравнений. Метод, предложенный Б.Г. Галеркиным, широко применяется как для решения дифференциальных уравнений с частными производными, так и в качестве основы метода конечных элементов. В то же время И.Г. Бубнов указал на аналогичную процедуру расчета для приближенного решения задач вариационного исчисления. Отметим, что Б.Г. Галеркин не связывал свой метод с решением вариационных задач, а считал его более общим для решения дифференциальных уравнений. В задачах равновесия Б.Г. Галеркин трактовал свой метод на основе начальных перемещений.

Метод Галеркина (Бубнова—Галеркина) решения дифференциальных уравнений достаточно широко известен в мировом научном сообществе. В настоящее время метод Бубнова—Галеркина служит основой алгоритмов для решения большого числа задач в области математической физики, механики, термодинамики, электродинамики и др. Существует много программных комплексов, реализующих метод Бубнова—Галеркина. В январе 1919 года Борис Григорьевич стал профессором по кафедре строительных сооружений во 2-м Политехническом институте, где он работал по совместительству, оставаясь на основной работе преподавателем механического факультета в 1-м Политехническом институте. В марте 1920 года в Политехническом институте была учреждена профессорская кафедра строительной механики, которую занял Б.Г. Галеркин. В 1922 году Борис Григорьевич перешел работать на инженерно-строительный факультет, который был ближе ему по научной и инженерной деятельности. Кроме того, там оказалась вакантной профессорская кафедра по строительной механике и теории упругости.

Первого декабря 1923 года Б.Г. Галеркин стал деканом инженерно-строительного факультета. По его предложению Правление института дало согласие на присоединение кабинета статистики сооружений, созданного им на механическом факультете, к кабинету строительной механики при Музее строительного искусства. В тот период инженерно-строительный институт имел наи-

меньшее число учебно-вспомогательных учреждений: у него были только кабинет геодезии и музей строительного искусства. В двадцатые годы факультетами руководили президиумы, состоящие из декана и двух помощников — секретаря (студент, член партии) и преподавателя, без согласования с которыми нельзя было принять ни одного решения. В феврале 1925 года коллегия Главпрофобра Наркомпроса решила ликвидировать сухопутно-дорожное отделение инженерно-строительного факультета. Правление института, получив решение Главпрофобра, постановило 5-го марта: принять к сведению и сообщить декану факультета. Б.Г. Галеркин сразу же отправился в Москву и от туда прислал телеграмму: «Ректору. Сухопутно-дорожное отделение сохраняется».

В январе 1928 года Б.Г. Галеркин был избран членом-корреспондентом АН СССР по разряду математических наук (математика) Отделения физико-математических наук. В 20-х годах Б.Г. Галеркиным было опубликовано более двадцати научных статей в разных изданиях. Уже в 20-х годах он имел высокий авторитет в научных кругах и среди инженеров-проектировщиков.

Летом 1929 года по инициативе Б.Г. Галеркина Свирьстрой субсидирует строительство пристройки к гидробашне и оборудует в ней гидротехническую лабораторию, которая впоследствии была передана в собственность ЛПИ.

В сентябре 1929 года на заседании Правления института он выступил по вопросу организации в ЛПИ факультета водного хозяйства на базе гидротехнического отделения инженерно-строительного факультета. В октябре этого года был создан факультет водного хозяйства, деканом которого стал профессор Н.Н. Павловский. В результате на инженерно-строительном факультете осталось только отделение сухопутного дорожного строительства. В октябре Б.Г. Галеркин оставил пост декана факультета. А менее чем через год, в июне 1930 года, Ленинградский политехнический институт имени М.И. Калинина был ликвидирован и на базе его факультетов было создано порядка десяти отраслевых вузов, из которых шесть остались на площадке в Лесном. Одним из них был Ленинградский гидро-

технический институт, образованный из факультета водного хозяйства.

В 1924–1929 годах Б.Г. Галеркин — профессор по кафедре теории упругости в Ленинградском институте инженеров путей сообщения и по кафедре строительной механики в Ленинградском университете.

В июне 1934 года был образован Ленинградский индустриальный институт в результате объединения шести отраслевых вузов, находившихся на площадке в Лесном. В составе ЛИИ было двенадцать факультетов, в том числе один из крупнейших — гидротехнический, который включал 11 кафедр. В августе был утвержден Научно-технический совет ЛИИ, членом которого стал Б.Г. Галеркин. В этом же году Б.Г. Галеркин был утвержден ВАК в ученой степени доктора технических наук без защиты диссертации, а в 1935 году АН СССР присвоила ему степень доктора математики.

В конце 20-х годов Борис Григорьевич был признанным авторитетом среди ученых с мировым именем по промышленному строительству. Ему принадлежит общее решение задач упругости через три независимые бигармонические функции. Он составил получившие широкое применение таблицы для расчета плотин и подпорных стен трапецеидального профиля, а также аналитические выражения для определения коэффициента упругого отпора в гидротехнических туннелях кругового очертания. Консультировал строительные проекты ГРЭС «Красный Октябрь», Волховской и Днепроградской ГЭС. Его приглашали в качестве эксперта для оценки качества проектирования в стране ряда крупных сооружений. Он был членом советов как проектных институтов (Гипромез, Гипрометцвет), так и научно-исследовательских институтов Гидротехники и др. Борис Григорьевич был членом Правительственной комиссии по приемке в эксплуатацию Днепроградской гидроэлектростанции. В 1934 году ему присвоено звание Заслуженного деятеля науки и техники РСФСР.

С 1930 года Б.Г. Галеркин — профессор, а затем заведующий кафедрой в Институте промыш-

ленного строительства. С 1933 года он входил в состав Высшей аттестационной комиссии Всесоюзного комитета по высшему техническому образованию СССР, преобразованному затем во Всесоюзный комитет по делам высшей школы (ВКВШ) при СНК СССР, был председателем Всесоюзного научного инженерно-технического общества строителей и его Ленинградского отделения. Постановлением Совнаркома в апреле 1936 года Борис Григорьевич назначен председателем экспертной комиссии по проверке проекта стального каркаса с конструкциями стен и перекрытий Дворца Советов в Москве.

В начале июня 1935 года Б.Г. Галеркин был избран академиком Академии наук СССР по Отделению математических и естественных наук (секция математики). В 1939 году в Академии наук был создан Институт механики, и первым его директором был назначен Б.Г. Галеркин. Руководству этим институтом были посвящены последние годы жизни Бориса Григорьевича. В том же 1939 году Институт инженеров промышленного строительства был преобразован в Высшее военноморское инженерно-строительное училище. Борис Григорьевич был назначен начальником кафедры строительной механики училища.

В связи с началом Великой Отечественной войны летом 1941 года при Ленинградском горкоме ВКП(б) и горсовете была создана Комиссия по руководству строительством оборонительных сооружений. В составе комиссии были и академики, среди них единственный строитель — Борис Григорьевич Галеркин, который, по существу, руководил комиссией. После эвакуации в Москву Борис Григорьевич вошел в состав Военно-инженерной комиссии при АН СССР. Непрерывная и напряженная работа требовала много сил далеко не молодого человека. В 1943 году ему было присвоено воинское звание инженер-генерал-лейтенанта. Труд Б.Г. Галеркина был удостоен правительственных наград: орденов Ленина в 1940 и 1945 годах, Сталинской премии в 1942 году.

Летом 1945 года здоровье Б.Г. Галеркина серьезно ухудшилось, и 12 июля Борис Григорьевич скончался в Москве. Похоронен он на Литераторских мостках Волковского кладбища в Петербурге.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Личные дела профессорско-преподавательского состава, рабочих и служащих Ленинградского политехнического института уволенных в 1941 г. / Архив СПбПУ Петра Великого. оп. 45, д. 999, л. 144.
2. **Журавлева И.В., Исыанова Т.И., Моторина Л.А., Нагибина А.Г., Смирнова А.А.** Галеркин Борис Григорьевич (1871–1945) // Научно-технические ведомости. 2000. № 7. (rus)
3. Санкт-Петербургский государственный политехнический университет: Биографии. Галеркин Борис Григорьевич. СПб.: Гуманистика, 2006. 912 с., ил.

## REFERENCES

1. Lichnyye dela professorsko-prepodavatelskogo sostava, rabochikh i sluzhashchikh Leningradskogo politekhnicheskogo instituta uvolennykh v 1941 g.x[ Personal files of the faculty, staff and workers of the Leningrad Polytechnic Institute, retired in 1941] / Arkhiv SPbPU Petra Velikogo. op. 45, d. 999, l. 144. (rus.)
2. **Zhuravleva I.V., Isyanova T.I., Motorina L.A., Nagibina A.G., Smirnova A.A.** Galerkin Boris Grigoryevich (1871–1945). *Naucno-tekhnicheskie vedomosti*. 2000. № 1. (rus)
3. Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy politekhnicheskij universitet: Biografii. Galerkin Boris Grigoryevich [Saint-Petersburg State Polytechnical University: Biographies. Boris Galerkin]. SPb.: Gumanistika, 2006. 912 s., il. (rus.)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

**ШАПЛЫГИН** Николай Павлович — доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

E-mail: interserv@stu.neva.ru

**SHAPLYGIN Nikolai P.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

E-mail: interserv@stu.neva.ru

Научное издание

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбПУ**

**№2(243)2016**

Учредитель — Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства  
в сфере массовых коммуникаций и охраны культурного наследия  
(свидетельство ПИ № ФС77-25981 от 13 октября 2006 г.)

Научный редактор, корректор — канд. техн. наук доцент *Л.В. Спиридонова*  
Технический секретарь — *О.А. Матенев*  
Компьютерная верстка *Г.Н. Кинзябулатовой*

Телефон редакции (812) 294-47-72

E-mail: [ntv-nauka@spbstu.ru](mailto:ntv-nauka@spbstu.ru)

Подписано в печать 28.06.2016. Формат 60×84 1/8. Бум. тип. № 1.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 27.25. Тираж 1000. Заказ 117.

Отпечатано с готового оригинал-макета,  
предоставленного Издательством Политехнического университета,  
в Типографии 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 ПИ № ФС77-25981 от 13 октября 2006г.) и распространяется по подписке через объединенный каталог «Пресса России» (индекс 18390);

— имеет международный стандартный номер сериального периодического издания (ISSN 1994-2354);

— внесен Высшей аттестационной комиссией Минобробразования 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 ВИНИТИ РАН и включены в фонд научно-технической литературы (НТЛ) ВИНИТИ 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 повторений, 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.;

