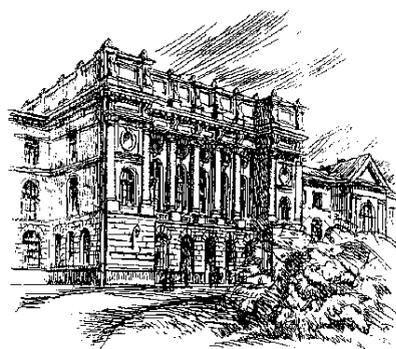


2(195)/2014



# Научно-технические ведомости СПбГПУ

Санкт-Петербург. Издательство Политехнического университета

Министерство образования и науки РФ

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

# НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбГПУ

(прежнее название «Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование»)

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

*Васильев Ю.С.*, академик РАН (председатель);  
*Алферов Ж.И.*, академик РАН;  
*Згуровский М.З.*, ин. член РАН, академик НАН Украины;  
*Костюк В.В.*, академик РАН;  
*Лагарьков А.Н.*, академик РАН;  
*Лопота В.А.*, чл.-корр. РАН;  
*Окрепилов В.В.*, академик РАН;  
*Патон Б.Е.*, академик НАН Украины и РАН;  
*Примаков Е.М.*, академик 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.*, академик РАН (главный редактор);  
*Кондратьев С.Ю.*, д-р техн. наук, профессор  
(зам. главного редактора);  
*Аксёнов Л.Б.*, д-р техн. наук, профессор;  
*Башикарёв А.Я.*, д-р техн. наук, профессор;  
*Боронин В.Н.*, д-р техн. наук, профессор;  
*Гордеев С.К.*, д-р техн. наук, ст. научн. сотр.;  
*Гуменюк В.И.*, д-р техн. наук, профессор;  
*Дегтярева Р.В.*, д-р ист. наук, профессор;  
*Иванов А.В.*, д-р техн. наук;  
*Кириллов А.И.*, д-р техн. наук, профессор;  
*Титков В.В.*, д-р техн. наук, профессор;  
*Толочко О.В.*, д-р техн. наук, профессор

## EDITORIAL COUNCIL

*Vasiliev Yu.S.* — full member of the Russian Academy of Sciences, President of the St.Petersburg State Polytechnical University (head of the editorial council);  
*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;  
*Lopota V.A.* — corresponding 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;  
*Primakov E.M.* — full member of the Russian Academy of Sciences;  
*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.* — full member of the Russian Academy of Sciences, President of the St.Petersburg State Polytechnical University (editor-in-chief);  
*Kondrat'ev S.Yu.* — Dr.Sc. (tech.), prof.  
(deputy editor-in-chief);  
*Aksyonov L.B.* — Dr.Sc. (tech.), prof.;  
*Bashkarev A.Ya.* — Dr.Sc. (tech.), prof.;  
*Boronin V.N.* — Dr.Sc. (tech.), prof.;  
*Gordeev S.K.* — Dr.Sc. (tech.), prof.;  
*Gumenyuk V.I.* — Dr.Sc. (tech.), prof.;  
*Degtyareva R.V.* — Dr.Sc. (history), prof.;  
*Ivanov A.V.* — Dr.Sc. (tech.), prof.;  
*Kirillov A.I.* — Dr.Sc. (tech.), prof.;  
*Titkov V.V.* — Dr.Sc. (tech.), prof.;  
*Tolochko O.V.* — Dr.Sc. (tech.), prof.

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

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

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

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

Подписной индекс **18390** в каталоге «Газеты. Журналы» агентства «Роспечать».

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 государственный политехнический университет, 2014

## Содержание

<b>Железняков А.Б.</b> <i>Космическая деятельность стран мира в 2013 году</i> .....	7
<b>Борисенков И.Л., Калинов М.И., Родионов В.А.</b> <i>Отечественные космические системы радиолокационного и радиоэлектронного мониторинга земной поверхности</i> .....	18
<b>Энергетика. Электротехника</b>	
<b>Васильев Ю.С., Амосов Н.Т.</b> <i>Атомные станции малой мощности</i> .....	26
<b>Фам А.Х., Рассохин В.А., Андреев К.Д.</b> <i>Расчетный анализ тепловой схемы парогазовой установки для энергетики Вьетнама</i> .....	34
<b>Петросова Д.В., Спиридонова Т.И., Дуванова И.А.</b> <i>Альтернативный взгляд на тепловой насос с вертикальным коллектором</i> .....	41
<b>Шонин О.Б., Пронько В.С.</b> <i>Повышение энергетической эффективности главных вентиляторных установок шахт на основе многоцелевой системы управления частотно-регулируемым приводом</i> .	49
<b>Галышев Ю.В., Шабанов А.Ю., Зайцев А.Б., Немчикова М.Н.</b> <i>Задание граничных условий теплообмена в рабочих полостях головки цилиндра четырехтактного двигателя внутреннего сгорания</i> .....	58
<b>Нгуен К.К., Ласкин А.С.</b> <i>Численное моделирование влияния осевого зазора на нестационарные силы в турбинной ступени</i> .....	65
<b>Шонин О.Б., Пронько В.С.</b> <i>Минимизация потерь в частотно-регулируемом приводе вентиляторов главного проветривания шахт</i> .....	70
<b>Вакуленко А.М.</b> <i>Методология численного расчета разрушающей ледовой нагрузки от кия тороса</i>	78
<b>Металлургия и материаловедение</b>	
<b>Рудской А.И., Соколов Ю.А., Копаев В.Н.</b> <i>Математическая модель управляемого нагрева подложек прямоугольной формы при получении порошковых материалов</i> .....	85
<b>Кондратьев С.Ю., Швецов О.В., Альхименко А.А.</b> <i>Изменение механических свойств алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1 в коррозионно-активной среде нефтяных скважин</i> .....	93
<b>Ширяева Л.С., Гарбузова А.К., Галевский Г.В.</b> <i>Производство и применение карбида титана (оценка, тенденции, прогнозы)</i> .....	100
<b>Рудской А.И., Соколов Ю.А., Копаев В.Н.</b> <i>Определение температурного поля при сканировании поверхности электронным лучом в технологии синтеза порошковых изделий</i> .....	109
<b>Кононов П.В.</b> <i>Моделирование процесса угловой раскатки конуса на торце трубчатой заготовки</i>	117
<b>Кондратьев С.Ю., Пташник А.В., Анастасиади Г.П., Петров С.Н.</b> <i>Количественная оценка содержания фаз в жаропрочных сплавах Х25Н35</i> .....	121
<b>Кононов А.А.</b> <i>Влияние режимов горячей прокатки на размер зерна анизотропной электротехнической стали</i> .....	128
<b>Шаболдо О.П., Виторский Я.М., Шамшурин А.И., Кононов А.А.</b> <i>Формирование структуры β-титанового сплава в процессе холодной деформации и последующей термической обработки</i> .....	134
<b>Попович А.А., Максимов М.Ю., Никифорова О.В., Хайдоров А.Д.</b> <i>Применение метода атомно-слоевого осаждения для создания тонкопленочных литий-ионных аккумуляторов на основе оксида олова</i> .....	141

<b>Лебедева О.С., Лебедев Н.Г.</b> <i>Пьезорезистивный эффект в примесных однослойных углеродных нанотрубках в приближении «Хаббард-1»</i> .....	149
<b>Кузькин А.Ю., Латышев Д.В., Петров М.Ю., Попов В.А.</b> <i>Механические свойства материалов при статическом нагружении трубчатых образцов в условиях плоского и объемного напряженных состояний</i> .....	162
<b>Безенкин Н.В.</b> <i>Влияние предварительной пластической деформации на структуру и свойства медных поковок стенок кристаллизаторов</i> .....	174

### Машиностроение

<b>Кожубаев Ю.Н., Семенов И.М.</b> <i>Системы управления ленточным конвейером</i> .....	181
<b>Жуков Э.Л., Любомудров С.А., Радкевич М.М., Ротаренко О.Ю.</b> <i>Влияние параметров резания на качество поверхности деталей из перспективных труднообрабатываемых сплавов</i> .....	187
<b>Козарь И.И., Колодяжный Д.Ю., Радкевич М.М., Цимко Т.А.</b> <i>Математическая модель погрешности при точении труднообрабатываемых сплавов</i> .....	194

### Техносферная безопасность

<b>Дубаренко К.А., Авакян С.В., Баранова Л.А., Воронин Н.А., Никольский Г.А.</b> <i>Возможности прогноза погоднo-климатических характеристик с учетом солнечно-геомагнитной активности</i> ..	202
<b>Гуменюк В.И., Гренчук А.М.</b> <i>О возможности массового применения средств диагностики пожаро-опасного состояния электрооборудования</i> .....	210

### Знаменательные даты

<b>Федотов А.И.</b> <i>Попечительскому совету СПбГПУ — 10 лет</i> .....	216
<b>Семенов А.С.</b> <i>К 85-летию со дня рождения Леонида Борисовича Гецова</i> .....	221
<b>Васильев Ю.С.</b> <i>Профессор Александр Александрович Морозов</i> .....	224
<b>Морачевский А.Г., Фирсова Е.Г.</b> <i>Профессор Павел Павлович Федотьев (к 150-летию со дня рождения)</i> .....	228

## Contents

<b>Zheleznyakov A.B.</b> <i>Cosmic activities countries of the world in 2013</i> .....	7
<b>Borisenkov I.L., Kalinov M.I., Rodionov V.A.</b> <i>Domestic space systems of the radar and radio-electronic monitoring of the earth's surface</i> .....	18

### Energetics. Electrical engineering

<b>Vasilyev Yu.S., Amosov N.T.</b> <i>Low-power nuclear power plants</i> .....	26
<b>Fam A.H., Rassokhin V.A., Andreev K.D.</b> <i>The calculative investigation a thermal scheme of the combined turbine for energy plant of Vietnam</i> .....	34
<b>Petrosova D.V., Spiridonova T.I., Duvanova I.A.</b> <i>Alternative view on heat pump with vertical collector</i> .....	41
<b>Shonin O.B., Pronko V.S.</b> <i>Energy efficiency improvement of mine main fan installations by means of the multipurpose control system for VFD</i> .....	49
<b>Galyshev Y.V., Shabanov A.Y., Zaytsev A.B., Nemchikova M.N.</b> <i>The boundary conditions of heat transfer in the working cavity of the cylinder head of the four-stroke internal combustion engine</i> .....	58
<b>Nguyen Q.Q., Laskin A.S.</b> <i>Numerical investigation of the influences of axial spacing between blade rows in a axial turbine on aerodynamic force</i> .....	65
<b>Shonin O.B., Pronko V.S.</b> <i>Minimization of energy losses in variable frequency electric drive of main mine fans</i> .....	70
<b>Vakulenko A.M.</b> <i>Methodology of numerical calculation of breaking load from ice ridge keel</i> .....	78

### Metallurgy and materials technology

<b>Rudskoi A.I., Sokolov Yu.A., Kopaev V.N.</b> <i>Mathematical model of operated heating of substrates rectangular shape receipt powder materials</i> .....	85
<b>Kondrat'ev S.Yu., Shvecov O.V., Alhimenko A.A.</b> <i>The changing of mechanical properties of aluminium alloys D16T and 1953T1 in the corrosion environment of oil wells</i> .....	93
<b>Shiryaeva L.S., Garbuzova A.K., Galevsky G.V.</b> <i>Production and use of titanium carbide (assessment, trends, forecasts)</i> .....	100
<b>Rudskoi A.I., Sokolov Yu.A., Kopaev V.N.</b> <i>Determination of temperature field at surface scanning by electronic beam synthesis technologies of powder products</i> .....	109
<b>Kononov P.V.</b> <i>Modelling process angle rolling cone at the end of the tubular blank</i> .....	117
<b>Kondrat'ev S.Yu., Ptashnik A.V., Anastasiadi G.P., Petrov S.N.</b> <i>Quantitative assessment of the content of phases in heat resisting alloys Cr25Ni35</i> .....	121
<b>Kononov A.A.</b> <i>Influence of hot rolling modes on grain-oriented silicon steel grain size</i> .....	128
<b>Shaboldo O.P., Vitorsky Ya.M., Shamshurin A.I., Kononov A.A.</b> <i><math>\beta</math>-Ti alloy structure formation during cold deformation processing and consequent heat treatment</i> .....	134
<b>Popovich A.A., Maximov M.Yu., Nikiphorova O.V., Khaydorov A.D.</b> <i>Atomic layer deposition application for developing thin film li-ion batteries based on tin oxide (IV)</i> .....	141

<b>Lebedeva O.S., Lebedev N.G.</b> <i>The piezoresistive effect in doped single-walled carbon nanotubes in the «Hubbard-I» approach</i> .....	149
<b>Kuzkin A.U., Latyshev D.V., Petrov M.U., Popov V.A.</b> <i>The mechanical properties of materials with the static load of tubular models under the conditions of the flat and volumetric stressed states</i> .....	162
<b>Bezenkin N.V.</b> <i>The effect of plastic deformation on structure and properties of copper plates in casting mold</i> .....	174

### Mechanical engineering

<b>Kozhubaev Yu.N., Semenov I.M.</b> <i>Control systems for belt conveyors</i> .....	181
<b>Zhukov E.L., Lyubomudrov S.A., Radkevich M.M., Rotarenko O.Y.</b> <i>The influence of the cutting parameters on the surface quality of details made from promising hard-to-process materials</i> .....	187
<b>Kozar I.I., Kolodyazhniy D.Yu., Radkevich M.M., Tsimko T.A.</b> <i>A mathematical model of error for intractable alloys turning</i> .....	194

### Technosphere safety

<b>Avakyan S.V., Baranova L.A., Voronin N.A., Dubarenko K.A., Nikolskiy G.A.</b> <i>The ability of forecasting the weather and climatic parameters subject to solar geomagnetic activity</i> .....	202
<b>Gumenyuk V.I., Grenchuk A.M.</b> <i>About the possibility of mass usage of tools intended for the diagnostics of the electrical equipment fire state</i> .....	210

### Memorable dates

<b>Fedotov A.I.</b> <i>Polytechnic University the Board of Trustees — 10 years</i> .....	216
<b>Semenov A.S.</b> <i>The 85 th anniversary of the birthday of Leonid Getsov</i> .....	221
<b>Vasiliev Yu.S.</b> <i>Professor Alexander Morozov</i> .....	224
<b>Morachevskiy A.G., Firsova E.G.</b> <i>Professor Fedot'ev Pavel P. (the 150 th anniversary of his birth)</i> .....	228

УДК 629.78

*А.Б. Железняков*

## **КОСМИЧЕСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ СТРАН МИРА В 2013 ГОДУ**

*A.B. Zheleznyakov*

### **COSMIC ACTIVITIES COUNTRIES OF THE WORLD IN 2013**

Космонавтика — та сфера деятельности человечества, которая определяет его будущее. Год от года увеличивается количество стран, запускающих собственные спутники или использующих результаты космической деятельности. Длительное время на околоземной орбите работает Международная космическая станция. Возрастает число космических аппаратов, направляемых к другим планетам.

В статье приведена обобщенная информация о результатах космической деятельности стран мира в 2013 году. Дан анализ изменений, происшедших в течение года, и прогноз развития космонавтики в 2014 году.

КОСМОНАВТИКА; СПУТНИК; КОСМИЧЕСКИЙ КОРАБЛЬ; КОСМОНАВТ; СТЫКОВКА; КОСМОДРОМ; ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ; МЕЖПЛАНЕТНЫЕ ПОЛЕТЫ; НАВИГАЦИЯ.

Astronautics is the field of mankind activity, which shapes a way of our future. From year to year increases the number of countries launching their own satellites or using results of space activity. The International space station has been working in the Earth orbit for a long time. The number of the spacecrafts coursed to other planets grows.

The summarized information on results of space activity of the countries worldwide in 2013 is presented in this work. Analysis of the changes within the year and the perspectives of astronautics development in 2014 are given.

ASTRONAUTICS; SATELLITE; SPACECRAFT; ASTRONAUT; DOCKING; LAUNCH-VEHICLE SITE; TELECOMMUNICATIONS; INTERPLANETARY FLIGHTS; NAVIGATION.

В начале минувшего года стартовал международный проект, который сразу же привлек к себе огромное внимание. Голландская компания Mars One начала отбор будущих космонавтов, первые из которых должны в 2023 году отправиться на Марс и основать там колонию. Их возвращение на Землю не запланировано.

Несмотря на то, что вероятность осуществления данного проекта близка к нулю (к указанному сроку человечество не будет располагать техническими средствами, делающими полет к Красной планете и нахождение на ней в течение длительного времени реальными), желание участвовать в нем выразили около 200 тысяч человек. Больше всего заявок поступило из

США — 24 %. На втором месте Индия — 10 % от общего числа запросов. Далее следуют: Китай (6 %), Бразилия (5 %), Великобритания, Канада, Россия, Мексика (по 4 %) и другие. Из общего числа кандидатов отборочный комитет Mars One отберет потенциальных переселенцев.

Но не Mars One и другие аналогичные проекты определяли тенденции развития мировой космонавтики.

#### **Основные события года**

##### **Начало реформы ракетно-космической отрасли России**

О том, что ракетно-космическая отрасль России нуждается в реформировании, стали активно говорить ровно три года назад. Хотя не-

обходимость этого появилась гораздо раньше, еще до того, как началась нескончаемая серия аварий с нашими ракетами и спутниками.

Первым «шагом» реформы стала смена руководства в Федеральном космическом агентстве. В октябре был отправлен в отставку Владимир Поповкин, возглавлявший Роскосмос чуть больше двух лет. На его место пришел Олег Остапенко. Произошли и другие кадровые перемены в агентстве.

2 декабря президент России В.В. Путин подписал указ о реформировании ракетно-космической отрасли. Документ предусматривает создание Объединенной ракетно-космической корпорации, в состав которой войдут практически все предприятия отрасли, ранее подведомственные Роскосмосу. Функции самого агентства также меняются, у него останутся только центральный аппарат, научные учреждения и наземная инфраструктура.

Надо отметить, что выбранный вариант предстоящих изменений не дает гарантии исправления ситуации в отрасли. Есть опасения, что положение дел может ухудшиться и к существующим ныне проблемам добавятся новые.

К тому же, на формирование корпорации уйдет не менее полутора лет. То есть первые плоды реформ мы будем «пожинать» не ранее 2015 года. А о том, правильный ли мы выбрали путь, можно будет говорить еще через несколько лет.

#### Южная Корея — 11-я космическая держава

30 января 2013 года с южнокорейского космодрома Наро состоялся запуск ракеты-носителя KSLV\*-1 (часто она называется также как космодром — (나로호 Наро) с исследовательским спутником STSAT\*\*-2C. Старт был успешным, и Южная Корея вошла в «Большой космический клуб» на правах 11-го его участника.

«Путь к славе» для Южной Кореи был непростым. Создание собственного космического носителя заняло почти 10 лет и велось с помощью российского Центра имени М.В. Хруничева (изготовление первой ступени ракеты).

Первые две попытки стать космической державой Южная Корея предприняла в 2009 и 2010

\* KSLV — Korean Space Launch Vehicle — «Корейский космический носитель».

\*\* STSAT — Science and Technology Satellite — «Научный и технологический спутник».

годах. Оба старта, к сожалению, были неудачными.

Два года ушло на то, чтобы подготовиться к третьему пуску. Его несколько раз откладывали, опасаясь новой неудачи. Сначала старт перенесли с августа 2012 года на октябрь, потом на ноябрь, затем на январь 2013 года. И вот в самом конце первого месяца наступившего года пуск состоялся и был успешным.

Единственное, что омрачало праздник южнокорейских ракетчиков, — Северная Корея запустила свой спутник на полтора месяца раньше, чем это сделала Южная Корея. В этом вопросе идеи чучхе\*\*\* оказались эффективнее рыночной экономики.

Тем не менее, успешный запуск носителя KSLV-1 дал мощный импульс для продолжения в Южной Корее работ по ракетной тематике. Государством поставлена задача к 2020 году создать более мощную ракету KSLV-2, которая будет разработана уже без иностранной помощи.

#### Запуск индийского марсианского зонда «Мангальян»

Миссия межпланетного зонда «Мангальян» к Марсу стала огромным достижением космонавтики Индии. В предыдущие годы к Красной планете летали только космические аппараты России (еще во времена СССР), США, Японии и Европы. Да и то европейский аппарат вывела на просторы Солнечной системы российская ракета-носитель, а японская миссия оказалась неудачной.

Запуск «Мангальяна» состоялся 5 ноября 2013 года из Космического центра имени Дхавана Сатиша на острове Шрихарикота. Почти месяц космический аппарат находился на околоземной орбите, постоянно увеличивая высоту своей орбиты в апогее. Поздним вечером 30 ноября двигатели аппарата были вновь включены и он отправился к Марсу, окрестностей которого должен достигнуть в сентябре 2014 года.

Одна из главных задач миссии — «научиться летать» к другим планетам. Именно поэтому научная программа «Мангальяны» не столь обширна, как, например, у его американского собрата зонда MAVEN\*\*\*\*, отправившегося к Красной пла-

\*\*\* Чучхэ (кор. 주체) — северокорейская идеология, провозглашенная в 1955 году Ким Ир Сенем.

\*\*\*\* MAVEN — Mars Atmosphere and Volatile Evolution — «Эволюция атмосферы и летучих веществ на Марсе».

нете двумя неделями позднее. Если удастся выйти на ареоцентрическую орбиту, то индийцы намерены изучить марсианскую атмосферу и провести фотографирование поверхности Марса.

#### Мягкая посадка на Луну станции «Чаньэ-3»

Первым небесным телом, на поверхность которого совершил мягкую посадку земной аппарат, была Луна. Более 35 лет там не прилунялась ни одна станция. Предыдущий раз земной аппарат мягко сел на поверхность Луны в августе 1976 года (советская межпланетная станция «Луна-24»). После долгого перерыва лунное безмолвие было нарушено — на поверхность естественного спутника нашей планеты опустился китайский зонд «Чаньэ-3» (嫦娥三号). Случилось это 14 декабря 2013 года. Через несколько часов на поверхность ночного светила съехал луноход «Юйту» (玉兔).

Свою программу изучения Луны Китай объявил почти 10 лет назад. На первом этапе было запланировано изучение естественного спутника нашей планеты с селеноцентрической орбиты. Этот этап был успешно реализован полетом станций «Чаньэ-1» (嫦娥一号) и «Чаньэ-2» (嫦娥二号). Второй этап предусматривает изучение Луны непосредственно с поверхности. Этим займутся «Чаньэ-3» и «Юйту». На третьем этапе запланировано освоение технологии возвращения на Землю. Для этого предполагается запустить автоматическую станцию, которая мягко опустится на лунную поверхность, возьмет образцы грунта и совершит обратный перелет по маршруту «Луна — Земля».

Нетрудно заметить, что китайская программа почти в точности повторяет то, что было сделано в нашей стране в 1960—1970-е годы.

Одновременно с реализацией третьего этапа китайские конструкторы должны определиться с дальнейшими шагами по освоению Луны: отправлять или нет туда человека. И, хотя о пилотируемой миссии в Поднебесной говорят с осторожностью, велика вероятность, что будет выбран именно такой путь. По крайней мере, американский космонавт Базз Олдрин (Buzz Aldrin), второй человек, ступивший на лунную поверхность, полагает именно так. В начале декабря 2013 года он высказал мнение, что следующим землянином, который прибудет на Луну, будет именно китаец.

#### Авария ракеты-носителя «Протон-М»

Аварию ракеты-носителя «Протон-М», случившуюся 2 июля 2013 года, можно было наблюдать в прямом эфире.

Тот из читателей, кто видел эти кадры (думаю, что видели почти все, если не в прямом эфире, то в записи), помнит огромную ракету, взмывшую в небо, ее отклонение от траектории сначала вправо, потом влево, затем опять вправо и эффектный «кульбит», закончившийся падением на землю и мощным взрывом.

Эти кадры напоминают хроникальные съемки начала 1960-х годов, когда, бывало, аварии ракет происходили по такому же сценарию. Но тогда это было объяснимым явлением, тогда ракеты еще только учились летать. Последняя катастрофа — из ряда вон выходящая. Особенно, когда стала известна причина, по которой носитель не смог выполнить свое задание. Расследование, которое провела аварийная комиссия, выявило, что к падению ракету привели ... неправильно установленные датчики угловых скоростей. При монтаже их установили с ошибкой в 180°.

Авария «Протона-М» всколыхнула все российское общество. Именно гибель ракеты на старте стала той «последней каплей», которая заставила правительство больше не тянуть с реформой.

#### Полет биологического спутника «Бион-М» № 1

В последние годы полеты космических аппаратов с биологическими объектами на борту (не считая, естественно, пилотируемых полетов) стали не столь уж частым явлением. Поэтому старт «Биона» ожидали в минувшем году с большим нетерпением.

Спутник «Бион-М» № 1 был запущен 19 апреля 2013 года с космодрома Байконур. В «экипаж» космического аппарата вошли 45 мышей, 8 монгольских песчанок, 15 гекконов, улитки, ракообразные, рыбы и различные микроорганизмы. В программе исследований приняли участие 20 российских институтов и 15 зарубежных университетов. Головную роль в формировании и реализации научной программы играл Институт медико-биологических проблем.

Экспедиция была рассчитана на месяц и завершилась 19 мая мягкой посадкой спускаемого аппарата. В целом она была успешной. За ис-

ключением «большой ложки дегтя» — из-за отказа аппаратуры в ходе космического полета погибли все песчанки и больше половины мышей. Тем не менее специалисты остались довольны результатами миссии, так как оставшихся в живых животных оказалось достаточно для проведения необходимых исследований.

#### **Начало коммерческой эксплуатации частных носителей**

В минувшем году частная космонавтика двинулась вперед. Свои очередные полеты совершил грузовой корабль «Драгон» (Dragon) компании «Спейс-Х» (SpaceX). Начались полеты к МКС корабля «Сигнус» (Cygnus) компании «Орбитал Сайнсес Корпорэйшн» (Orbital Sciences Corporation).

Основным достижением «частников» в 2013 году следует признать начало коммерческой эксплуатации ракеты-носителя Falcon-9 (версия v.1.1) компании «Спейс-Х». Свой квалификационный полет ракета совершила в конце сентября прошлого года, а в первых числах декабря уже вывела на орбиту телекоммуникационный спутник SES-8.

Учитывая низкую стоимость услуг от компании «Спейс-Х» (55 миллионов долларов за пуск, что существенно ниже, чем при использовании ракет «Протон-М», «Ариан-5» (Ariane-5) и «Зенит-3SL»), можно считать, что на мировом рынке пусковых услуг появился новый сильный игрок.

#### **«Зенит» подвел «Морской старт»**

Наилучшие условия для запуска космических носителей — на экваторе, где можно максимально эффективно использовать скорость вращения Земли. А если при этом место старта удалено от густонаселенных районов, то можно говорить о двойном эффекте при ведении такой пусковой деятельности. На этих двух постулатах и зиждется идея морского космодрома.

Проект «Си лонч» родился в 1995 году, когда ряд компаний США, России, Украины и Норвегии образовали международный консорциум для эксплуатации морской стартовой платформы «Одиссей». Первый старт состоялся 27 марта 1999 года и был успешным. В том же году началась коммерческая эксплуатация космодрома.

В последующие годы у проекта «Си лонч» были и взлеты, и падения, и банкротство в 2009 году, и возрождение, благодаря финансо-

вой поддержке со стороны Ракетно-космической корпорации «Энергия». Еще год назад у международного консорциума были неплохие перспективы. Но все испортила авария 1 февраля 2013 года. На 12-й секунде полета ракеты система управления зафиксировала превышение допустимого угла вращения носителя вокруг продольной оси и запустила программу аварийного выключения двигателя первой ступени. Двигатель был выключен на 20-й секунде полета, а на 56-й секунде ракета упала в океан в 2,5 километрах от стартовой платформы.

Февральская авария вновь остро поставила вопрос о будущем «морского космодрома». И тут вопрос даже не в том, что консорциум понес финансовые потери и был подпорчен его имидж. Самым неприятным в этом деле стала та «подковерная возня» (иначе и не назовешь), которую устроили некоторые чиновники Федерального космического агентства вокруг проекта. Лишь смена руководства Роскосмоса в октябре 2013 года несколько разрядила ситуацию.

#### **Полеты иранских обезьян**

В 2013 году в Иране были осуществлены два полета по суборбитальной траектории с «участием» обезьян. О первом пуске было объявлено 28 января 2013 года, о втором — 14 декабря. Это совсем не значит, что пуски состоялись именно в эти дни. Учитывая закрытость иранской космической программы, возможно, что эти старты состоялись и накануне, и двумя днями ранее. Впрочем, не это самое главное.

Эксперименты с животными начались в Иране несколько лет назад. В 2011–2012 годах состоялись два полета ракет с «капсулой жизни», как именуют иранские специалисты кабину корабля. В обоих случаях там находились обезьяны и обе они на Землю не вернулись. А вот два пуска, состоявшиеся в 2013 году, были успешными. И надо признать весомость достижений иранских ракетчиков. Пусть даже обезьяны совершили лишь «прыжки в космос», а не орбитальные полеты. Все равно надо признать весомость этих экспериментов.

#### **Продолжение работы на МКС**

Весь 2013 год продолжалась работа на борту Международной космической станции. Именно работа, каждодневная, кропотливая, может быть, рутинная. Но очень нужная человечеству работа.

Экипажи сменяли друг друга, принимали и разгружали грузовые корабли, провели десятки технических, технологических, медико-биологических и прочих экспериментов, выходили в открытый космос. Сделано очень много.

Из самых ярких достижений можно выделить, пожалуй, два момента.

Во-первых, теперь пилотируемые корабли добираются до станции по «короткой схеме» — за шесть часов, а не за двое суток, как это было раньше. Все запущенные в минувшем году «Союзы» использовали именно эту схему.

Во-вторых, во время внекорабельной деятельности 9 ноября в космосе прошла эстафета олимпийского огня. Естественно, это была пропагандистская акция, призванная показать роль России и в космонавтике, и в спорте. Но смотрелось это действие красиво.

### Пилотируемые полеты

В ушедшем году в космос стартовали пять пилотируемых кораблей — четыре российских и один китайский. Точно такое же количество пусков кораблей с космонавтами на борту было и годом раньше.

Еще два полета, начатые в 2012 году, завершились весной 2013 года.

Все состоявшиеся полеты были плановыми.

Вероятнее всего, в период 2014–2016 годов сохранится аналогичная интенсивность пилотируемой космической деятельности — ежегодно будет производиться 4–5 пусков. Увеличение количества миссий космонавтов на орбиту возможно лишь после 2017 года.

В цифрах же 2013-й год выглядит так.

На околоземной орбите в 2013 году работал 21 космонавт. Ровно столько же было и годом раньше.

Из тех, кто побывал на орбите в минувшем году, девять имели российское гражданство, шестеро — американское, трое — китайское, один — итальянское, один — японское, один — канадское.

Можно заметить, что эти данные практически «под копирку» повторяют информацию из предыдущего обзора. Единственное отличие — гражданство космонавта Европейского космического агентства: гражданин Италии сменил подданного Нидерландов.

В 2013 году в космосе побывало шесть «новичков»: двое россиян, двое китайцев, один американец и один итальянец.

Кстати, впервые за последние три года среди новичков значится американец. До 2010 года именно американцы составляли основной контингент «впервые летавших».

Среди тех, кто летал в 2013 году, были две женщины: американка Карен Найберг (Karen Nyberg) и китайка Ван Япин (王亚平).

Шесть космонавтов — россияне Олег Новицкий, Евгений Тарелкин и Роман Романенко, американцы Кевин Форд (Kevin Ford) и Томас Машберн (Thomas Marsburn), канадец Крис Хэдфилд (Chris Hadfield) — отправились на орбиту еще в 2012 году, а возвратились на Землю весной 2013 года. Еще шестеро — россияне Олег Котов, Сергей Рязанский и Михаил Тюрин, американцы Майкл Хопкинс (Michael Hopkins) и Ричард Матраккио (Richard Mastraccio), японец Коити Ваката (若田 光一) — встретили наступление 2014 года на околоземной орбите. Их возвращение на Землю запланировано на следующую весну.

Общий «налет» в 2013 году составил 2088,9 чел.-дн. (5,72 чел.-лет) Это почти на 153 чел.-дн. больше, чем годом ранее. За последние три года впервые суммарная продолжительность полетов увеличилась, а не уменьшилась.

А всего за период с 1961-го по 2013 год включительно земляне пробыли в космосе 118,2 чел.-лет.

По состоянию на 01.01.2014 в орбитальных космических полетах приняли участие 533 человека из 35 стран. В числе летавших в космос — 476 мужчин и 57 женщин.

В 2013 году было выполнено 11 выходов в открытый космос. Это на шесть выходов больше, чем было совершено в 2012 году.

Шесть выходов были осуществлены из российского модуля «Пирс» и пять из американского модуля «Квест» (Quest). Такое же количество раз использовались российские скафандры «Орлан-МК» и американские EMU (Extravehicular Mobility Unit).

Восемь выходов носили плановый характер, три были внеплановыми.

Во внекорабельной деятельности участвовали 11 человек (в 2012 году — 6 человек, в 2011 году — 11 человек, в 2010 году — 14, в 2009 году — 21, в 2008 году — 20).

Американец Кристофер Кэссиди (Christopher Cassidy), россияне Федор Юрчихин и Алек-

сандр Мисуркин по три раза покидали борт станции. Итальянец Лука Пармитано (Luca Parmitano), американцы Ричард Мастраккио и Майкл Хопкинс, россияне Олег Котов и Сергей Рязанский выходили в открытый космос по два раза. Россияне Павел Виноградов и Роман Романенко, а также американец Томас Маршберн выходили в открытый космос по одному разу.

Россияне Олег Котов и Сергей Рязанский во время работы за бортом станции 27 декабря установили рекорд продолжительности работы в российских скафандрах — 8 час. 7 мин.

Примечательно, что предыдущий рекордный показатель по работе вне борта станции в российских скафандрах был также установлен в 2013 году. Во время внекорабельной деятельности 16 августа космонавты Федор Юрчихин и Александр Мисуркин работали за бортом 7 часов 29 минут. Никто не ожидал, что этот рекорд продержится всего 4 месяца и 11 дней.

Общая продолжительность пребывания космонавтов в открытом космосе в 2013 году составила 5 дн. 9 час. 26 мин. По сравнению с предыдущим годом рост в два раза.

### Запуски космических аппаратов

Прежде, чем оценить пусковую деятельность космических держав в числах, необходимо сделать одну оговорку.

При анализе пусковой деятельности стран мира учитывается информация об аварийном пуске носителя Safir-1B, имевшем место в Иране в феврале 2013 года. Официальный Тегеран данное сообщение никак не комментировал, не подтвердил, но и не опроверг.

Несмотря на это, сведения об аварии кажутся мне весьма достоверными. Поэтому данный факт я учитываю при подведении статистических итогов за минувший год, хотя не все аналитики это делают. Это тот самый случай, когда «сколько людей — столько и мнений».

В минувшем году в различных странах мира стартовали 82 ракеты-носителя, целью которых был вывод на околоземную орбиту полезной нагрузки различного назначения. 78 пусков были успешными, четыре — аварийными.

Число запущенных в 2013 году носителей по сравнению с предыдущим годом увеличилось на 6 единиц (на 9,26 %).

Уровень аварийности РН при космических запусках в 2013 году составил 4,87 %, что значительно выше, чем годом ранее. Причем у США, Индии, Японии, Южной Кореи, консорциума Agianespace все носители выполнили свою задачу. У России аварийность составила 3,12 %, у Китая — 6,67 %. У Ирана и консорциума Sea Launch аварийными оказались единственные проведенные ими пуски, т.е. 100 %.

По сравнению с 2012 годом, когда свою лепту в уровень аварийности вносили новички «Большого космического клуба», в минувшем году ракеты на старте теряли признанные «мэтры» — Россия, Китай, консорциум Sea Launch.

Аварии российско-украинской ракеты «Зенит-3SL» в феврале и российского «Протона-М» в июле очень досадны. Особенно последствия этих происшествий, когда технические аспекты были отодвинуты на задний план политическими факторами.

Китайцы в декабре перенесли гибель своего «Чанчжэн-4В» (长征四号乙) очень спокойно, сочтя его «рабочим моментом». В принципе, так оно и есть. И надо отдать должное китайским коллегам, которые хорошо понимают, что путь к звездам «усыпан не розами», а является «тернистой дорогой познания». Было бы хорошо и в России не искать «правых и виноватых», а работать, работать и работать.

Как и все последние годы больше всего запусков в 2013 году «выполнила» Россия — 32 пуска (39,02 %). С учетом пусков по программам Sea Launch и «Союз» в Куру» это число увеличивается до 35 (42,68 %). Ну что ж, 2/5 мирового рынка космических запусков — совсем не плохо. Если, конечно, оценивать эффективность ракетно-космической отрасли только по этому показателю. Чего, в принципе, делать нельзя.

По сравнению с 2012 годом пусковая активность России возросла почти на 33,33 % (на 8 пусков) и вернулась к уровню 2011 года.

Возросло число пусков отечественных носителей в интересах национальной космической программы. Если в 2012 году таковых было четыре, то в 2013 году уже 12. Налицо — позитивные сдвиги.

Восемь российских пусков состоялись по программе МКС. Столько же было и годом ранее.

В 2013 году в США было запущено 19 ракет-носителей, что на шесть пусков (на 46,15 %)

больше, чем за предыдущий год. Это второй показатель в общемировом рейтинге, и достигнут он благодаря участникам — компаниям «Спейс-Х» и «Орбитал Сайнс Корпорэйшн».

Как и раньше, основное внимание в американской программе отводилось запускам спутников военного назначения, исследовательских космических аппаратов и отработке перспективных технологий.

Китай, «обещавший» в 2013 году произвести запуски 20 носителей, «остановился» на цифре 15. За год пусковой «показатель» Китая упал на четыре пуска (на 21,1 %). Причем один пуск у китайцев был аварийным.

Уменьшение произошло из-за отсрочки ряда пусков. Задержки были связаны, во-первых, с корректировкой национальной космической программы, во-вторых, с рядом технических проблем, возникших при подготовке некоторых стартов.

Все прочие страны не сильно изменили интенсивность своей пусковой деятельности. Поскольку речь идет о нескольких пусках в год, делать какие-то далеко идущие выводы не следует.

Можно только отметить тяжелое положение консорциума Sea Launch, возвратившегося на рынок в 2012 году, но пережившего «удар» в минувшем году. Говорить о том, как сложатся у «морского старта» дела в будущем очень сложно, особенно учитывая неоднозначную позицию Роскосмоса по этому вопросу. Остается только следить, как будут развиваться события в наступившем году, и только потом высказывать долгосрочный прогноз.

В результате пусков РН в 2013 году на околоземную орбиту были выведены 212 космических аппаратов. Это на 77 спутников больше, чем годом ранее.

В это число включены и четыре микроспутника, запущенные с МКС.

Шесть спутников были утеряны в результате аварий. При дальнейшем анализе эти аппараты также учитываются.

Столь значительное увеличение числа запущенных космических аппаратов связано с тем, что в течение года были выполнены несколько кластерных запусков, в ходе которых на орбиту выводилось большое (в двух случаях около

30 спутников за запуск) количество небольших по размерам и массе спутников.

Как и по числу запущенных ракет, Россия лидирует и по этому показателю (87 космических аппаратов). Причем прирост количества запущенных спутников у наших ракетчиков составил 53 штуки. Опять же за счет кластерных запусков. Если же в «копилку» внести и пять аппаратов, запущенных из Куру с помощью российских «Союзов», то эта цифра становится еще более убедительной.

Значительно увеличилось число запущенных космических аппаратов у американцев — с 29 до 68. И также за счет ряда кластерных пусков.

Китай несколько уменьшил число запущенных спутников — с 29 до 22 штук. Однако порядок величины остался прежним. Правда, китайцы переместились на твердое третье место — в 2012 году они делили 2–3 места с американцами.

У других стран количество запущенных спутников исчисляется единицами, и анализ их деятельности особого смысла не имеет.

Можно только отметить, что показатели «Арианспейс» (Arianespace) и Японии в последние годы приобрели некую стабильность.

Если же говорить о национальной принадлежности выведенных на орбиту космических аппаратов, то картина будет отличаться от показателей пусковой деятельности. Многие страны обзавелись собственными спутниками. Но с запуском им помогали «корифеи»: Россия, США и Китай.

По числу принадлежащих им космических аппаратов лидерство, как и все последние годы, остается за США. Причем отрыв в 2013 году от «преследователей» вновь значительно увеличился.

Россия вернула себе утерянное годом ранее второе место и чуть-чуть пополнила свою орбитальную группировку. Правда, не столь существенно, как ожидалось и как хотелось бы.

При запусках КА в 2013-м году были использованы ракеты-носители 27 типов, что значительно больше, чем в 2012 году.

Свои первые успешные полеты выполнили южнокорейский носитель KSLV-1, японский Epsilon (イプシロンロケット), китайский «Куайчжоу» (快舟), ракеты-носители компании «Орби-

тал Сайнс Корпорэйшн» Antares и Minotaur-5, а также российский носитель «Союз-2.1в», стартовавший в самом конце декабря.

Однако в целом картина использования РН различных типов осталась прежней — лидируют российские «Союзы» и «Протоны». И будут лидировать еще не менее трех лет. А там — как получится.

Из других новостей по носителям можно отметить пуск ракеты Pegasus-XL. Судя по отсутствию заказов на использование этой ракеты, стоит ожидать ее «простой» в ближайшие годы. Ориентировочно, года 3—4.

Так и не взлетела в 2013 году долгожданная «Ангара» — первый пуск вновь отложен. Хочется надеяться, что в наступившем году первый старт все-таки состоится. Хотя, учитывая события предыдущих лет, полной уверенности в этом пока нет.

В качестве стартовых площадок в 2013 году было использовано 15 космодромов.

Первым успешным пуском отметился космодром Наро в Южной Корее. Начал функционировать Средне-Атлантический региональный космопорт, расположившийся на территории ракетного полигона на острове Уоллопс штата Вирджиния (США).

Все прочие стартовые комплексы уже были задействованы в предыдущие годы.

Поступили, правда, пока неподтвержденные данные о начале строительства нового космодрома в Иране.

Продолжается строительство новых космодромов в России и Китае. Строят новые стартовые комплексы в КНДР, США и Китае.

По-прежнему мировым лидером по числу пусков остается арендованный Россией космодром Байконур в Казахстане — 23 пуска. Увеличение по сравнению с предыдущим годом составило два пуска. Хотя ожидался больший прирост. Но авария «Протона-М» в июле «спутала карты». Тем не менее доля Байконура в мировой пусковой деятельности составила в 2013 году 28,04 % (+0,41 по сравнению с 2012 годом). Стабильный показатель.

Ближайший «преследователь» — космодром на мысе Канаверал (штат Флорида, США). Однако он «отстает» от Байконура более чем в два раза.

Если судить по числам, то наилучшие перспективы на будущее — у Средне-Атлантического регионального космопорта. Тем более, что у компании «Орбитал Сайнс Корпорэйшн» немало заказов на носители Antares и Minotaur.

### На межпланетных трассах

В 2013 году к другим планетам были запущены четыре межпланетные станции. Две из них отправились на свидание с Красной планетой, а две другие будут изучать Луну.

Основной целью американской миссии MAVEN, начатой 18 ноября 2013 года, является изучение современного состояния и эволюции атмосферы Марса, в частности потери планетой своей атмосферы. Космический аппарат должен провести измерения скорости потери атмосферы, что позволит понять, какую роль сыграла потеря в ходе изменения марсианского климата. Полет зонда станет последней в серии миссий НАСА, предназначенных для поиска и изучения следов воды, органических веществ и «экологических ниш», пригодных для жизни в прошлом Марса.

На ареоцентрическую орбиту MAVEN должен выйти 22 сентября 2014 года. Пять недель уйдут на формирование рабочей орбиты, на проверку научного оборудования и тестовые измерения.

Научная программа миссии рассчитана на один земной год.

На две недели раньше, чем MAVEN, 5 ноября, состоялся запуск индийского марсианского зонда «Мангальян». Это первый космический аппарата, который Индия отправила в сторону Красной планеты.

Основной задачей полета для индийцев является отработка технологий, необходимых для межпланетных перелетов. Если удастся выйти на орбиту вокруг Марса (эта операция запланирована на 24 сентября 2014 года), то с помощью пяти приборов, установленных на борту, будет вестись изучение марсианской атмосферы, а также съемка поверхности планеты.

Если MAVEN и «Мангальян» начнут свою работу только осенью наступившего года, то лунные зонды — американский LADEE и китайский «Чанъэ-3» — уже активно изучают Луну. Все правильно, до небесной соседки Земли лететь гораздо ближе, чем до Марса.

Американская станция LADEE была запущена 7 сентября 2013 года. Почти месяц потребовался ей, чтобы выйти на селеноцентрическую орбиту, где она оказалась лишь 6 октября. В течение следующих двух недель осуществлялось маневрирование аппарата, что позволило ему занять круговую орбиту высотой около 250 километров. С середины ноября после проверки работы оборудования началось выполнение научной программы миссии.

Вторым аппаратом, направленным к Луне, стал китайский лунник «Чаньэ-3», запущенный 1 декабря 2013 года. Это уже третья автоматическая станция, которую Китай направляет к ночному светилу.

«Чаньэ-3» состоит из двух частей — посадочной ступени и лунохода «Юйту». Имя для ровера было выбрано путем интернет-голосования.

Мягкая посадка станции на Луну была произведена 14 декабря в Заливе Радуги. Вскоре на лунную поверхность съехал луноход, оснащенный двумя парами камер (навигационные и панорамные), альфа-рентгеновским спектрометром и инфракрасным спектрометром. Кроме того, на его донной части смонтирован радиолокатор, позволяющий изучить структуру грунта до глубины порядка 30 метров и коры Луны до отметки в несколько сотен метров.

Из других свершений на межпланетных трассах можно отметить следующие.

Специалисты NASA подтвердили, что межпланетный зонд «Вояджер-1» наконец-то вышел на межзвездные просторы. И случилось это еще 25 августа 2012 года. Хотя не все согласны с этим утверждением. Есть мнение, что космический аппарат еще не скоро достигнет границ Солнечной системы. Но надо признать, что человечеством пройден определенный рубеж в его познании Вселенной.

Где-то на окраинах Солнечной системы находятся и три других межпланетных космических аппарата: «Вояджер-2» (Voyager-2), «Пионер-10» (Pioneer-10) и «Пионер-11» (Pioneer-11). В ближайшие годы и они, как и «Вояджер-1», выйдут за пределы Солнечной системы и устремятся к звездам. «Пионеры» давно замолчали, от «Вояджера-2» информация скудна и отрывочна... И все равно мы помним о них, как о наших посланцах в иные миры.

Продолжает свой полет межпланетный зонд «Нью-Горизонс» (New Horizons). До пункта назначения — Плутона — ему осталось менее 5 астрономических единиц и менее двух лет пути. Плановый срок прибытия — 2015 год.

В середине минувшего года зонд провел фотографирование Плутона и его спутника Харона. Камера сделала снимки при гораздо большем фазовом угле (угол между Солнцем, Плутоном и космическим аппаратом), чем можно достигнуть с Земли или околоземной орбиты. Это может дать важную информацию о свойствах поверхностей Плутона и Харона. Например, о наличии слоя мелких частиц, покрывающих поверхность.

Продолжает «кружить» вокруг Сатурна межпланетный зонд «Кассини» (Cassini).

В течение года аппарат совершил девять пролетов близ спутников окольцованного гиганта. Собраны новые данные о Сатурне, его спутниках, его кольцах, что позволит ученым выяснить новые подробности о планетарной системе одной из крупнейших планет Солнечной системы.

Например, было зафиксировано рождение еще одного спутника Сатурна. Сделали это британские астрономы, изучившие тысячи снимков кольца планеты, сделанные камерами «Кассини». Спутник получил условное название Пеги. Его диаметр составляет всего один километр, что не позволяет увидеть «новорожденного» с Земли.

Третий год продолжается полет американского межпланетного зонда «Джуно» (Juno). 9 октября станция совершила гравитационный маневр в поле тяготения Земли, пройдя на удалении в 559 километров от земной поверхности. Прибытие к Юпитеру, который является целью космического аппарата, ожидается в июле 2016 года.

В поясе астероидов между орбитами Марса и Юпитера работает американский зонд «Доун» (Dawn). Сейчас он летит к (1) Церере, на орбиту вокруг которой должен выйти в феврале 2015 года.

Весь минувший год в бездействии находился европейский межпланетный зонд «Розетта» (Rosetta). Но скоро он будет вновь включен и в январе — марте 2014 года приблизится к комете 67P / Чуримова — Герасименко. На август

намечено картографирование кометы, а в ноябре на ядро кометы должен совершить посадку спускаемый аппарат межпланетной станции.

В течение года достаточно активно изучался Марс. На его поверхности работали два американских космических аппарата, марсоходы «Оппортьюнити» (Opportunity) и «Кьюриосити» (Curiosity), а на ареоцентрической орбите — американские зонды «Марс Одиссей» (Mars Odyssey) и MRO\*, а также европейский зонд «Марс-Экспресс» (Mars Express). Общими усилиями они сделали немало открытий, но вот жизни на Красной планете пока не обнаружили. Поэтому до сих пор актуально: «Есть ли жизнь на Марсе, нет ли жизни на Марсе — науке это неизвестно».

Продолжает удаляться от Земли китайский космический аппарат «Чанъэ-2». После успешной работы близ Луны, в точке Лагранжа  $L_2$ , в окрестностях астероида (4179) Таутатис, зонд взял курс в глубины Солнечной системы и успешно туда движется. В конце ноября 2013 года он удалился от Земли на расстояние более 60 миллионов километров.

Кроме вышеназванных LADEE и «Чанъэ-3», изучением Луны заняты американские LRO\*\*, ARTEMIS\*\*\* P1 и ARTEMIS-P2. Все три зонда находятся на селеноцентрической орбите. ARTEMIS-ы для такой миссии не предназначались. Первоначально с их помощью из точек Лагранжа изучались магнитные суббури. Однако после завершения основной миссии их «перепрофилировали» и направили к Луне.

Венеру исследует европейский зонд «Венера-экспресс» (Venus Express). И делает это уже седьмой год. Учитывая состояние бортового оборудования, можно надеяться, что аппарат проработает еще несколько лет, во много раз превысив расчетный срок.

А вот японскому зонду «Акацуки» (あかつき) еще только предстоит выйти на орбиту вокруг

Венеры. Если, конечно, получится — в 2010 году это сделать не удалось, зонд промчался мимо Утренней звезды. Будем надеяться, что в ноябре 2015 года все пройдет нормально, хотя шансы на успех и невелики.

Третий год изучает Меркурий, кружа по орбите вокруг него, американский зонд «Мессенджер».

Как видите, жизнь на межпланетных трассах достаточно интересна и «бьет ключом». Единственное, что расстраивает, — это отсутствие на просторах Солнечной системы работающих российских космических аппаратов. Конечно, нашего «железа» там довольно много. И на Луне, и на Марсе, и на просторах между планетами. Но это всего лишь «памятники былого величия».

Что можно ждать от наступившего года и на что надеяться?

В первую очередь, надеемся, что стартовавшая в конце 2013 года реформа ракетно-космической отрасли России будет продолжаться. Какие-то ощутимые ее плоды мы вряд ли увидим. Но движение вперед должно ощущаться.

Хотя бы в плане определения приоритетов космической деятельности России на ближайшее будущее. У российской космонавтики до сих пор нет ясной и четкой цели. Все идеи, изложенные в таких «руководящих» документах, как «Основы государственной политики Российской Федерации в области космической деятельности на период до 2030 года и дальнейшую перспективу», утвержденных президентом РФ в апреле 2013 года, носят расплывчатый характер.

О необходимости пересмотра «Основ...» сказал и недавно назначенный глава Роскосмоса Олег Остапенко. Он прав, и хочется надеяться, что его слова не разойдутся с делом и приведут к конкретному результату.

\* MRO — Mars Reconnaissance Orbiter — «Марсианский орбитальный разведчик».

\*\* LRO — Lunar Reconnaissance Orbiter — «Лунный орбитальный разведчик».

\*\*\* ARTEMIS — Acceleration, Reconnection, Turbulence and Electrodynamics of the Moon's Interaction with the Sun — «Ускорение, перезамыкание линий магнитного поля, возмущение и электродинамика взаимодействия Луны с Солнцем».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Железняков А.Б., Кораблев В.В. Космический взлет двух Корей // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2013. № 4(183), Т. 1. С. 20–30.
2. Железняков А.Б. Космическая деятельность стран мира в 2012 году // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2013. № 1(166). С. 18–26.
3. Железняков А.Б. Космонавтика: Итоги 2009 года // Инновации. 2010. № 4. С. 18–21.
4. Железняков А.Б. Космонавтика: Итоги 2011 года // Инновации, 2012. № 2. С. 3–6.
5. Железняков А.Б. Освоение космического пространства как глобальная задача человечества // Инновации, 2011. № 5. С. 12–15.
6. Железняков А.Б., Кораблев В.В. От «Ариабды» до полета на Марс // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2013. № 2(171). С. 38–43.

## REFERENCES

1. Zheleznyakov A.B., Korablev V.V. Kosmicheskiy vzlet dvukh Korey. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*. 2013. № 4(183), T. 1. S. 20–30. (rus)
2. Zheleznyakov A.B. Kosmicheskaya deyatel'nost stran mira v 2012 godu. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*. 2013. № 1(166). S. 18–26. (rus)
3. Zheleznyakov A.B. Kosmonavtika: Itogi 2009 goda. *Innovatsii*. 2010. № 4. S. 18–21. (rus)
4. Zheleznyakov A.B. Kosmonavtika: Itogi 2011 goda. *Innovatsii*. 2012. № 2. S. 3–6. (rus)
5. Zheleznyakov A.B. Osvoyeniye kosmicheskogo prostranstva kak global'naya zadacha chelovechestva. *Innovatsii*. 2011. № 5. S. 12–15. (rus)
6. Zheleznyakov A.B., Korablev V.V. Ot «Ariabady» do poleta na Mars. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*. 2013. № 2(171). S. 38–42. (rus)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ /AUTHORS

**ЖЕЛЕЗНЯКОВ Александр Борисович** — академик Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, советник президента ракетно-космической корпорации «Энергия»; 194064, Тихорецкий пр. 21, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: zheleznyakov@rtc.ru

**ZHELEZNYAKOV, Alexander B.** — Rocket and Space Corporation «Energia», 194064, Tikhoretsky Prospect 21, St. Petersburg, Russia; e-mail: zheleznyakov@rtc.ru

УДК 629.78

*И.Л. Борисенков, М.И. Калинов, В.А. Родионов*

## **ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ РАДИОЛОКАЦИОННОГО И РАДИОЭЛЕКТРОННОГО МОНИТОРИНГА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

*I.L. Borisenkov, M.I. Kalinov, V.A. Rodionov*

### **DOMESTIC SPACE SYSTEMS OF THE RADAR AND RADIO-ELECTRONIC MONITORING OF THE EARTH'S SURFACE**

Рассмотрены история создания и опыт применения отечественных космических систем радиолокационного и радиоэлектронного мониторинга земной поверхности. Определены основные направления их дальнейшего развития. Представлены оценки периодичности обнаружения объектов мониторинга.

КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ; МОНИТОРИНГ; РАДИОЛОКАТОР; ЗЕМНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ; НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ.

Considered are the history of creation and experience of application of domestic space systems of radar and electronic monitoring of the earth surface. Defines the main directions of their further development. Presents estimates of the detection frequency of monitoring objects.

SPACE SYSTEMS; MONITORING; RADAR; SURFACE; DIRECTION OF DEVELOPMENT.

4 октября 1957 года в нашей стране был успешно выведен на околоземную орбиту первый искусственный спутник Земли. Он положил начало космической эре в развитии человечества. Всего за 1957–2014 годы запущено более трех тысяч космических аппаратов (КА) различного целевого назначения. В настоящее время в околоземном космическом пространстве активно функционируют свыше тысячи КА, а космической деятельностью занимаются более 40 стран. В состав орбитальной группировки Российской Федерации входит свыше 100 космических аппаратов.

В современных условиях решение задач информационного обеспечения данными об обстановке невозможно без применения космических систем (КС) радиолокационного и радиоэлектронного мониторинга (РРМ) земной поверхности (ЗП), которые применяются в глобальном масштабе с высокой оперативностью и требуемой периодичностью для осуществления контроля параметров и состояния объектов мони-

торинга (ОМ) независимо от их действий, погоды и времени суток. При этом под мониторингом подразумевается система (процесс) сбора (регистрации), хранения и анализа небольшого количества признаков (параметров) описания объекта для вынесения суждения о его поведении (состоянии).

В начале 70-х годов прошлого века в нашей стране была создана система морской космической разведки и целеуказания (МКРЦ), предназначенная для добывания информации о надводной обстановке и выдачи ее потребителям в интересах применения сил и средств флота [1]. В состав системы входили космические аппараты (КА) радиолокационной и радиотехнической разведки (рис. 1, 2).

Система МКРЦ эксплуатировалась почти 40 лет, успешно решая задачи мониторинга морской поверхности и обеспечивая данными о надводной обстановке органы управления различных иерархических уровней. За это время КА системы зафиксировали десятки тысяч объектов

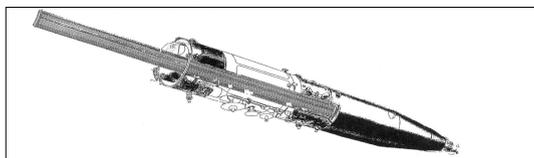


Рис. 1. КА радиолокационной разведки

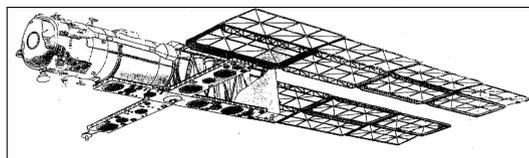


Рис. 2. КА радиотехнической разведки

надводной обстановки, при этом общее количество обнаружений этих объектов превышает несколько миллионов.

С конца 1980-х годов эксплуатация КА радиолокационной разведки (РЛР) была прекращена из-за нескольких нештатных ситуаций с бортовой ядерной энергетической установкой (ЯЭУ), служившей источником электропитания для радиолокационной станции (РЛС) бокового обзора (БО), установленной на КА. В 1990-х годах на околоземной орбите активно функционировало до 4–6 КА радиотехнической разведки (РТР) системы МКРЦ. При этом периодичность обнаружения объектов мониторинга на морской поверхности составляла несколько часов. На завершающей стадии эксплуатации в составе орбитальной группировки системы было не более 1–2 КА. Всего было запущено свыше 80 КА системы МКРЦ.

Параллельно с системой МКРЦ задачи радиотехнического мониторинга земной (в ограниченном объеме — морской) поверхности решались также и КС радиоэлектронного наблюдения (РЭН). С 1968 по 1982 года в нашей стране было запущено более 30 КА обзорных радиотехнических наблюдений (рис. 3).

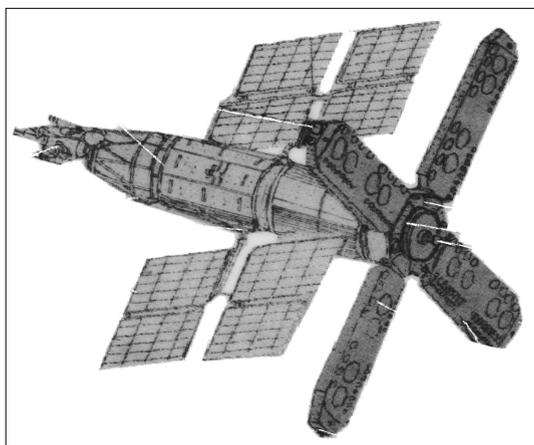


Рис. 3 — КА системы радиоэлектронного наблюдения

Последующие модификации этих КА предназначались уже для детальных радиотехнических измерений с приемом, анализом и высокоточной привязкой к местности источников радиотехнических сигналов. В ходе их испытаний было показано, что получаемая информация позволяет не только обнаружить источники радиоизлучения (ИРИ) и определить их местоположение, но и точно установить их назначение, характеристики и режимы функционирования. С 1970 по 1994 год на орбиту было выведено свыше 70 таких КА [2].

В 1980-х годах была создана новая модификация КА РЭН, оснащенная аппаратурой для наблюдения не только РЛС, но и других источников радиоизлучений, что позволило обеспечить решение задач РЭН в полном объеме. Всего на околоземную орбиту было выведено более 100 КА космической системы РЭН. С 2009 года задачи радиотехнического мониторинга земной поверхности решаются КА нового поколения (рис. 4).

Специфический вид КС радиоэлектронного мониторинга морской поверхности — международная космическая система поиска и спасения судов и летательных аппаратов, терпящих

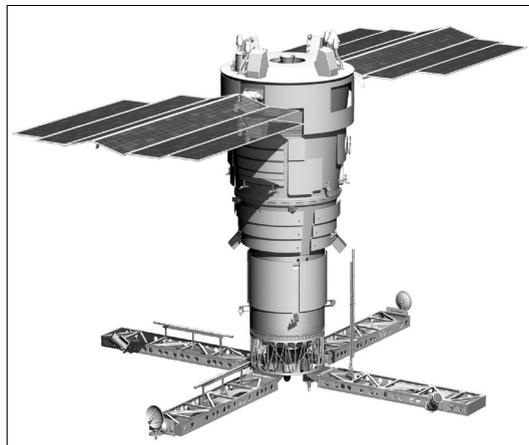


Рис. 4. КА радиотехнического мониторинга нового поколения

бедствие, КОСПАС-САРСАТ [3]. Первый КА этой системы был запущен в нашей стране в 1982 году (рис. 5). Система позволяет обнаруживать терпящие бедствие объекты в любых районах нашей планеты и доставлять информацию об этих объектах силам и средствам спасения. Время устаревания информации при этом не превышает одного часа. Сочетание высокой точности определения координат объекта, терпящего бедствие, и минимально возможного (по сравнению с другими средствами) времени устаревания информации позволяют системе решать поставленные задачи с высокой эффективностью. На счету системы КОСПАС—САРСАТ десятки тысяч спасенных человеческих жизней.

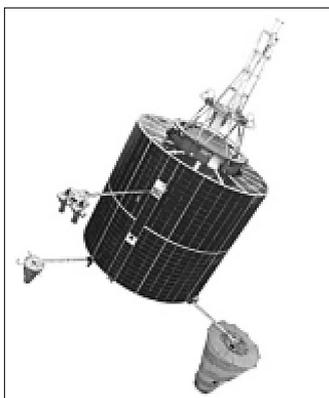


Рис. 5. КА системы КОСПАС—САРСАТ

Помимо космических аппаратов радиолокационной разведки с ЯЭУ, входивших в состав системы МКРЦ, в нашей стране на рубеже 80–90-х годов прошлого века было запущено несколько КА, имевших в качестве бортового локатора РЛС с синтезированием апертуры (РСА) (рис. 6). Синтезирование апертуры позволило бортовой РЛС КА получать высокую разрешающую способность (до единиц—десятков метров) и более достоверно проводить классификацию объектов, обнаруженных на земной

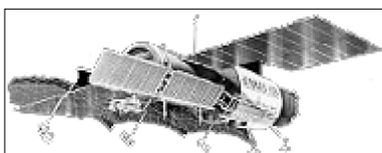


Рис. 6. КА «Алмаз» с РСА

поверхности. Испытания КА прошли успешно, но серийно они не производились и для решения практических задач мониторинга земной поверхности не использовались [4].

Задачи мониторинга поверхности Мирового океана (состояния водной поверхности и ледяного покрова) более 20 лет (1983—2007 гг.) успешно решались советской (российско-украинской) космической системой «Океан», которая, по сути дела, являлась первой в мире оперативной радиолокационной океанографической космической системой (рис. 7). Космические аппараты этой системы функционировали до 2007 года. Всего на орбиту было выведено 8 КА системы «Океан» [5].

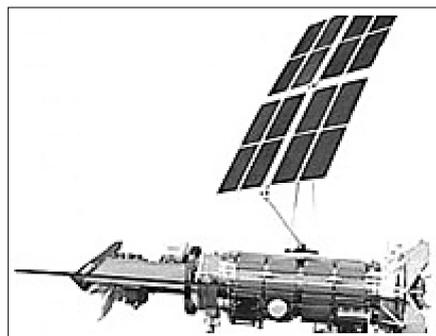


Рис. 7. КА «Океан-О»

В 2009 году был осуществлен запуск КА «Метеор-М», положивший начало воссозданию российской метеорологической орбитальной группировки (рис. 8). Гидрометеорологический космический аппарат «Метеор-М» создан на базе космической платформы типа «Ресурс» и в отличие от ранее существовавших метеорологических КА типа «Метеор» дополнительно имеет в составе бортового специального комплекса (БСК) РЛС БО. Это позволяет ему с разрешением 1–3 км получать радиолокационные изображения морской поверхности, осуществлять мониторинг ледового и снежного покровов, состояния гидрологических объектов, а также суши и растительности [6].

В соответствии с утвержденной в 2006 году Концепцией развития российской космической системы дистанционного зондирования Земли на период до 2025 года в нашей стране предусматривается создание космического комплекса (КК) всепогодного радиофизического наблюдения

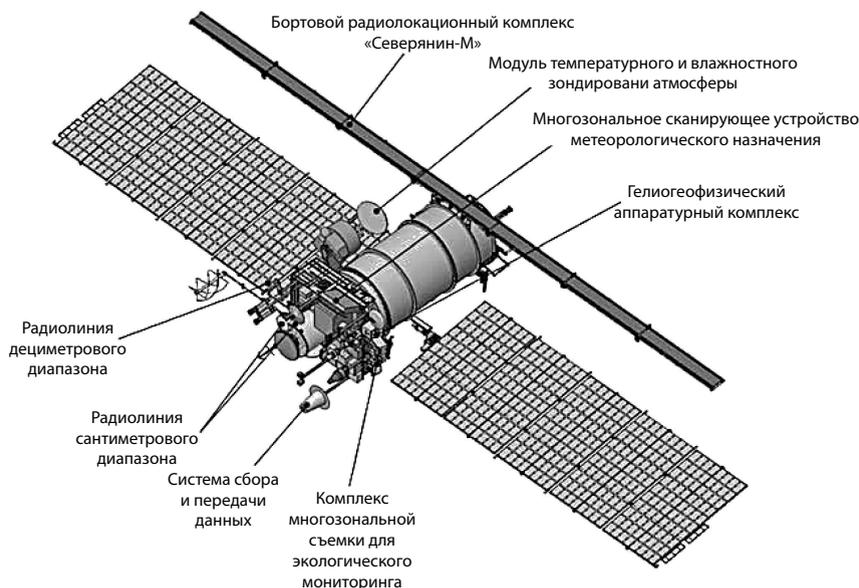


Рис. 8. Гидрометеорологический КА «Метеор-М»

Мирового океана и КК высокдетального радиолокационного наблюдения. Основные идеи Концепции в настоящее время реализуются при создании космических систем «Арктика-Р» и «Кондор» [6, 7].

Комплексное решение задач радиолокационного мониторинга в арктических районах планируется проводить в рамках инновационного проекта «Арктика-Р». Запуск космических аппаратов и начало штатной эксплуатации системы «Арктика-Р» планируется осуществить не позднее 2015 года. Космическая система «Арктика-Р» в составе двух радиолокационных КА и наземных станций приема-передачи данных предназначена для информационного обеспечения хозяйственной деятельности в Арктическом регионе, включая обеспечение разработки месторождений на шельфе, мониторинг ледовой обстановки и чрезвычайных ситуаций, контроль судоходства и хозяйственной инфраструктуры, обновление и создание топографических и тематических карт и др.

Космический аппарат «Арктика-Р» должен с высокой оперативностью обеспечивать детальную, обзорную и маршрутную съемку с разрешением 1–2 м, 3–5 м и до 150 м соответственно. Периодичность получения результатов радиолокационного наблюдения объектов в арктических районах составляет 4–6 часов (рис. 9).

В 2013 году на околоземную орбиту выведен малый космический аппарат «Кондор-Э» с универсальным многорежимным РСА ближнего дециметрового S-диапазона волн для обзора земной поверхности с пространственным разрешением до 1–2 м. Этот КА предназначен для решения широкого круга задач, в том числе задач мониторинга океана и ледовой разведки, экологического мониторинга моря и суши, мониторинга чрезвычайных ситуаций и контроля судоходства (рис. 10).

В целом, в 70–80-е годы прошлого века из общего количества запусков КА до 12–15 % составляли запуски КА, решавших задачи радиолокационного и радиоэлектронного мониторинга земной поверхности. Был получен большой



Рис. 9. КА «Арктика-Р»

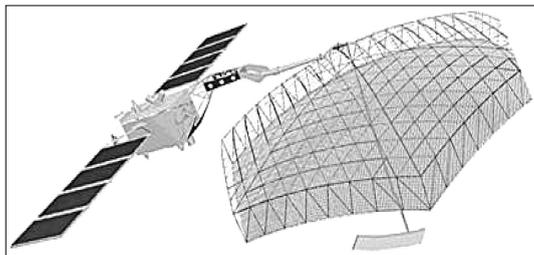


Рис. 10. КА «Кондор-Э»

опыт эксплуатации таких КА. Применение ядерной энергетической установки в качестве источника энергии для КА радиолокационной разведки (РЛР) в системе МКРЦ до сих пор не имеет аналогов в мире. Высокая оперативность доведения информации до потребителей обеспечивалась реализацией на борту КА режима передачи данных об обстановке в реальном масштабе времени. Сочетание разнородных источников данных (активная и пассивная радиолокация) в одной системе (МКРЦ) позволяло существенно повысить достоверность добываемой информации. Дополнительным фактором, повышающим вероятность правильной классификации обнаруженных объектов, был информационный обмен между различными космическими системами. Большой объем различных народно-хозяйственных задач решался на основе данных, получаемых от КА океанографической космической системы «Океан». При создании и эксплуатации космических систем КОСПАС—САРСАТ и «Океан» накоплен определенный опыт международного сотрудничества.

Вместе с тем опыт эксплуатации космических систем радиолокационного и радиоэлектронного мониторинга земной поверхности выявил и ряд существенных недостатков:

зачастую проявлялся «эффект неоднозначности» местоопределения источника радиоизлучения, связанный с особенностями применения фазового метода его пеленгации на земной поверхности;

кратковременный энергетический контакт низкоорбитальных КА РТР с ИРИ (нахождение КА в зоне радиовидимости ИРИ не превышало нескольких минут) не позволял зафиксировать достаточно большую выборку радиотехнических параметров ИРИ, необходимую для его достоверной классификации;

низкая (единицы км) разрешающая способность РЛС, устанавливаемых на КА, не позволяла производить правильную классификацию обнаруженных объектов мониторинга с высокой вероятностью при отсутствии априорных данных об этих объектах или большом времени их устаревания;

большое количество «мешающих объектов», фиксируемых БСК КА, (мощные береговые РЛС, малые острова, гидрометеообразования и т.п.) затрудняли процесс обработки полученных данных о морских объектах;

для получения приемлемых значений периодичности обнаружения объектов наблюдения в низких широтах (десять минут — единицы часов) требовалось иметь в составе орбитальной группировки не менее 6—12 низкоорбитальных КА.

Большой практический интерес представляет исследование информационных свойств КС, важнейшим из которых является периодичность обнаружения объектов мониторинга. Для выполнения подобных исследований удобно применять имитационно-моделирующий комплекс информационных космических систем, программное обеспечение которого поддерживается в актуальном состоянии в Санкт-Петербургском отделении секции прикладных проблем при Президиуме РАН.

Для определения периодичности (временных интервалов между обнаружениями объекта мониторинга) целесообразно воспользоваться статистическим подходом, основанным на моделировании процесса функционирования космической системы.

При моделировании процесса функционирования КС с КА на низких орбитах можно построить график, на котором отображается соответствующим символом обнаружение или необнаружение каждого из  $n$  объектов, имитирующих неопределенность положения ОМ, при пролете КА над заданным районом. После чего производится измерение интервалов между обнаружениями и, в конечном итоге, определяется периодичность обнаружения ОМ, которая отображается в форме гистограммы — статистической плотности распределения временных интервалов между обнаружениями с заданной дискретностью (рис. 11).

На основании этой гистограммы строится интегральный закон распределения, используемый

впоследствии для получения искомым оценок — значений интервалов времени между последовательными обнаружениями ОМ с вероятностью не ниже заданной (рис. 12). В верхней части рис. 12 для удобства приведены цифровые данные для статистической плотности  $f$  и закона распределения  $F$  по каждому из разрядов, на которые разделен интервал оценки.

Моделирование процесса функционирования КС производится с учетом множества факторов, имеющих случайный характер (местоположение ОМ в заданном районе, фиксация ОМ, его распознавание на пункте приема информации и т. п.).

В таблице представлен пример оценки периодичности обнаружения объектов мониторинга КА с шириной полосы обзора 1500–2000 км в районах Северо-Восточной Атлантики (СВА) и Средиземное море (СРМ) [8].

Нетрудно заметить, что даже при сравнительно большой ширине полосы обзора КА приемлемые интервалы времени (единицы часов) между обнаружениями ОМ могут быть получены только в высоких широтах, а в средних широтах — при большой (не менее 6 КА) орбитальной группировке КС РРМ ЗП.

Представленный пример наглядно свидетельствует, что для достижения высокой эффективности решения задач информационного обеспечения морской деятельности необходимо иметь достаточно большую (не менее 6 КА) орбитальную группировку космической системы радиолокационного мониторинга морской поверхности.

Обобщение имеющихся публикаций, отечественный и зарубежный опыт эксплуатации космических систем радиолокационного и радиоэлектронного мониторинга земной поверхности позволяют определить основные тенденции их развития:

Итервал времени между обнаружениями объектов

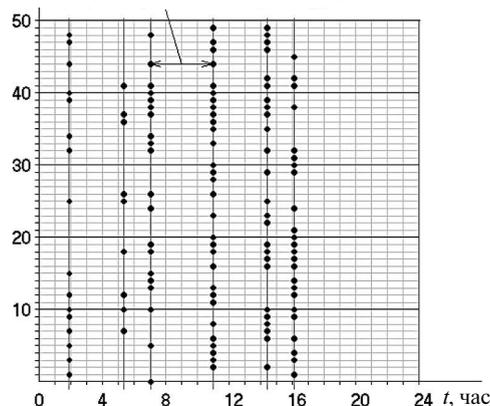


Рис. 11. К определению временных интервалов между обнаружениями объектов, имитирующих неопределенность положения ОМ

расширение диапазона высот КА, решающих задачи РРМ ЗП, путем установки дополнительной аппаратуры радиоэлектронного мониторинга на среднеорбитных, высокоэллиптических КА и КА на геостационарной орбите;

организационно-техническое и информационное объединение разнотипных и разновысотных КА космических систем РРМ ЗП в единую многоярусную орбитальную группировку, решающую задачи в интересах всех потребителей информации о надводной обстановке;

создание КА радиолокационного мониторинга с БСК, автоматически адаптирующимся к обстановке путем соответствующего изменения ширины полосы обзора и разрешающей способности бортового локатора;

разработка КА с многоканальным БСК (многоспектрального оптико-электронного, радиоэлектронного и радиолокационного мониторинга), способным адаптироваться к обстановке и функционировать в условиях искусственных и естественных помех;

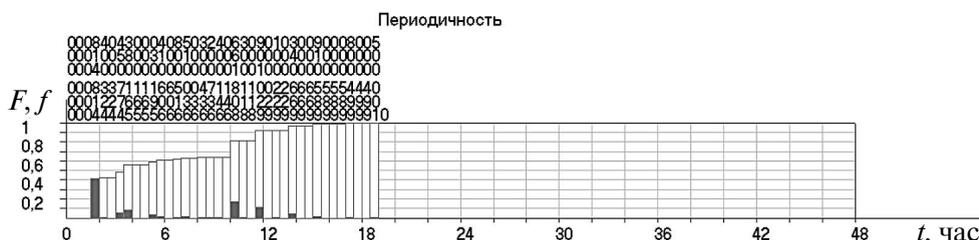


Рис. 12. Построение закона распределения временных интервалов между обнаружениями объектов в КС РРМ ЗП (вариант)

**Значения интервалов времени между обнаружениями объектов мониторинга с вероятностью не ниже 0,8 при применении космической системы РЛМ МП (вариант)**

Район	Количество КА	Интервалы времени, час
СВА	1	19,0
СВА	3	3,5
СВА	6	2,0
СРМ	1	47,0
СРМ	3	15,5
СРМ	6	4,0

совершенствование методов мониторинга (применение многопозиционного зондирования, применение расширенных режимов работы (широкозахватные с высоким разрешением, скошенного обзора, многолучевые с селекцией движущихся целей, с применением межвитковой интерферометрии для повышения разрешения поперек трассы полета), совместное применение угломерного, разностно-временного и разностно-доплеровского методов пеленга-

ции, взаимный обмен между КА априорными и оперативными данными об обстановке и т.д.); совместное применение КА оптико-электронного наблюдения и КА с РСА;

совершенствование системы планирования применения КА (оптимальное распределение ресурса БСК, рациональное сочетание обзорных и детальных режимов, внедрение элементов искусственного интеллекта для адаптации режимов работы БСК к текущей фоновой обстановке в заданном районе мониторинга);

разработка и применение нового поколения КА радиолокационного мониторинга с бортовой ЯЭУ на радиационно неопасных орбитах (высота полета КА не менее 1000–1500 км).

Для дальнейшего развития космических систем, решающих задачи радиолокационного и радиоэлектронного мониторинга земной поверхности в нашей стране, потребуется осуществить большой комплекс организационно-технических и кадровых мероприятий, а также значительно активизировать работы, длительное время ведущиеся в этом направлении, при их безусловном и достаточном финансировании.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Землянов А.Б., Коссов Г.Л., Траубе В.А. Система морской космической разведки и целеуказания. СПб.: ЗАО «Геоид», 2002. 214 с.
2. Железняков А.Б. Спутники радиотехнической разведки «Целина»: история создания и эксплуатации // Тр. Общероссийской научно-технической конференции «Третьи Уткинские чтения». СПб.: Изд-во БГТУ, 2007. Т.2 С. 81–83.
3. Балашов А.И., Зурабов Ю.Г., Пчеляков Л.С., Рогальский В.И., Шебшаевич В.С. Международная космическая радиотехническая система обнаружения терпящих бедствие. М.: Радио и связь, 1987. 326 с.
4. Гарбук С.В., Гершензон В.Е. Космические системы дистанционного зондирования Земли. М.: Изд-во А и Б, 1997. 296 с.
5. Пустовойтенко В.В., Терехин Ю.В. [и др.]. Этапы и результаты развития технологии дистанционного зондирования морских акваторий (к 30-летию от-

ечественной спутниковой океанологии) // Тр. 17-й Междун. Крымск. конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (CriMiCo 2007)». Севастополь: Вебер, 2007. С.15–25.

6. Официальный сайт Федерального космического агентства. <http://www.federspace.ru>.

7. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. М.: Радиотехника, 2010. 682 с.

8. Завилевич Д.Н., Калинов М.И., Родионов В.А., Торгашов А.А. Исследование периодичности обнаружения объектов наблюдения при совместном применении космических систем наблюдения с космическими аппаратами на средних и низких орбитах // Актуальные проблемы защиты и безопасности. Труды 16-й Всероссийской научно-практической конференции. СПб.: Изд-во НПО Спецматериалов, 2013. Том 4. С. 316–321.

**REFERENCES**

1. Zemlyanov A.B., Kossov G.L., Traube V.A. Sistema morskoy kosmicheskoy razvedki i tseleukazaniya. SPb.: ZAO «Geoid», 2002. 214 s. (rus)
2. Zheleznyakov A.B. Sputniki radiotekhnicheskoy razvedki «Tselina»: istoriya sozdaniya i ekspluatatsii Tr:

*Obshcherossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Treti Utkinskiye chteniya» SPb.: Izd-vo BGTU, 2007. T. 2. S. 81–83. (rus)*

3. Balashov A.I., Zurabov Yu.G., Pchelyakov L.S., Rogalskiy V.I., Shebshayevich V.S. Mezhdunarodnaya

kosmicheskaya radiotekhnicheskaya sistema obnaruzheniya terpyashchikh bedstviye. M.: Radio i svyaz, 1987. 326 s. (rus)

4. **Garbuk S.V., Gershenson V.Ye.** Kosmicheskiye sistemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli. M.: Izdatelstvo A i B, 1997. 296 s. (rus)

5. **Pustovoytenko V.V., Terekhin Yu.V. [i dr.]**. Etapy i rezultaty razvitiya tekhnologii distantsionnogo zondirovaniya morskikh akvatoriy (k 30-letiyu otechestvennoy sputnikovoy okeanologii) *Tr. 17-y Mezhdun. Krymsk. konf. «SVCh-tekhnika i telekommunikatsionnyye tekhnologii (CriMiCo 2007)»*. Sevastopol: Veber, 2007. S. 15–25. (rus)

6. Ofitsialnyy sayt Federalnogo kosmicheskogo agentstva. <http://www.federspace.ru>.

7. **Verba V.S., Neronskiy L.B., Osipov I.G., Turuk V.E.** Radiolokatsionnyye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya. M.: Radiotekhnika, 2010. 682 s. (rus)

8. **Zavilevich D.N., Kalinov M.I., Rodionov V.A., Torgashov A.A.** Issledovaniye periodichnosti obnaruzheniya obyektov nablyudeniya pri sovmestnom primenenii kosmicheskikh sistem nablyudeniya s kosmicheskimi apparatami na srednikh i nizkikh orbitakh. *Aktualnyye problemy zashchity i bezopasnosti. Trudy 16-y Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. SPb.: Izd-vo NPO Spetsmaterialov, 2013. Tom 4. S. 316–321.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**БОРИСЕНКОВ Игорь Леонидович** — кандидат технических наук заместитель председателя секции Российской академии наук. 119333, г. Москва, ул. Губкина, 3. E-mail: borisenkov46@yandex.ru

**КАЛИНОВ Михаил Иванович** — доктор технических наук ведущий научный сотрудник Российской академии наук. 119333, г. Москва, ул. Губкина, 3. E-mail: cesavo@mail.ru

**РОДИОНОВ Владислав Александрович** — доктор технических наук начальник отделения Российской академии наук. 119333, г. Москва, ул. Губкина, 3. E-mail: var1959@mail.ru

#### AUTHORS

**BORISENKOV Igor L.** — *Russian Academy of Sciences*. Ul. Gubkina, 3, Moskva, Russia, 119333. E-mail: borisenkov46@yandex.ru

**KALINOV Mikhail I.** — *Russian Academy of Sciences*. Ul. Gubkina, 3, Moskva, Russia, 119333. E-mail: cesavo@mail.ru

**RODIONOV Vladislav A.** — *Russian Academy of Sciences*. Ul. Gubkina, 3, Moskva, Russia, 119333. E-mail: var1959@mail.ru

УДК 697.34(075.8)

*Ю.С. Васильев, Н.Т. Амосов*

## **АТОМНЫЕ СТАНЦИИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ**

*Yu.S. Vasiliev, N.T. Amosov*

### **LOW-POWER NUCLEAR POWER PLANTS**

Анализ результатов работы международной конференции по проблеме развития атомных станций малой мощности для энергообеспечения удаленных малонаселенных районов Крайнего Севера, Сибири и Дальнего Востока.

АТОМНЫЕ СТАНЦИИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ; ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ; ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИИ; ОПРЕСНИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС; ЭНЕРГОБЛОК; РЕАКТОРНАЯ УСТАНОВКА; ЯДЕРНАЯ ПАРПРОИЗВОДЯЩАЯ УСТАНОВКА.

Analysis of the results of an international conference on the development of nuclear power station is for energy supply remote sparsely populated areas of the Far North, Siberia, and Far East.

LOW-POWER NUCLEAR POWER PLANTS; ENERGY SUPPLY; NUCLEAR POWER TECHNOLOGIES; DESALINATION COMPLEX; POWER GENERATION UNIT; REACTOR PLANT; NUCLEAR STEAM SUPPLY SYSTEM.

Международная конференция по развитию атомных источников энергии (мощности) проходила в Москве в Президентском зале Главного здания Президиума РАН в период с 3 по 5 декабря 2013 года под председательством академика РАН А.А. Саркисова.

В работе конференции приняли участие представители многих стран и организаций. Были заслушаны доклады сотрудников Министерства энергетики США, Агентства по ядерной энергии ОЭСР (Организация экономического сотрудничества и развития), Национального агентства по атомной энергии Индонезии, Дирекции по строительству военных кораблей (DCNS) Франции, Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ).

С российской стороны в работе международной конференции приняли участие представители следующих организаций: Института проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (ИБРАЭ РАН), ОАО «Концерн Рос-

энергоатом», ОКБМ «Африкантов», ОАО «Атом-энергопроект», Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Института энергетических исследований РАН (ИНЭИ РАН), НИЦ «Курчатовский институт», ФГУП «Крыловский научный центр», ЗАО «ЦКБ «ОСК — Айсберг», ЗАО «Атомэнерго», ОАО «Ижорские заводы», Национального исследовательского ядерного университета (МИФИ), ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургского государственного политехнического университета», МГТУ имени Н.Э. Баумана, ОАО «НИКИЭТ им. Н.А. Доллежалея» и ряда других.

Открывая работу конференции, академик А.А. Саркисов отметил, что около двух третей территории России находятся вне зоны централизованного энергообеспечения. Это, главным образом, удаленные малонаселенные районы, но именно они представляют особую стратегическую ценность из-за большого содержания в их недрах полезных ископаемых.

Характерный пример — Сибирь, которая составляет 57 % территории России, а по численности и плотности населения, а также по природным условиям очень близка к Канаде.

На территории Сибири проживает только 15 % населения России, причем максимальная концентрация трудовых ресурсов — в районе Транссибирской железнодорожной магистрали. Однако северная, наиболее холодная и малонаселенная часть Сибири таит в себе огромные природные ресурсы. Именно здесь, в этом слабо освоенном регионе добывают более 90 % газа, сосредоточены 70 % запасов российской нефти, большие запасы цветных, редких металлов, химического сырья, половина запасов древесины.

Удаленные труднодоступные регионы Крайнего Севера, Сибири и Дальнего Востока, где сконцентрированы основные национальные запасы углеводородов и других полезных ископаемых, расположены в зоне автономной электроэнергетики. Многочисленные действующие маломощные, устаревшие котельные, дизельные и мазутные энергоустановки находятся в ведении местных властей, отдельных предприятий, в том числе частных. При реализации процедуры северного завоза их эксплуатация сопряжена со значительными организационными и финансовыми трудностями по доставке топлива и запасных частей, с возрастающими затратами на закупку топлива и его транспортировку в условиях бездорожья и короткой навигации в Сибири.

Одним из возможных путей решения этой проблемы могло бы стать широкое внедрение атомных станций малой мощности (АСММ) — плавучих, транспортабельных и стационарных. При этом наиболее перспективными проектами представляются серийно изготавливаемые компактные мобильные атомные энергоблоки, модули для которых в полной заводской готовности доставляются к месту дислокации, монтируются и работают без перегрузки активных зон до 20–30 лет, а затем возвращаются на предприятие-изготовитель.

Для удаленных регионов с учетом трудоемкого и дорогостоящего северного завоза АСММ могут стать основой энергоснабжения как для промышленного развития, так и для поддержания социальной сферы.

Оценка возможности использования атомных источников энергии малой мощности в том

или ином конкретном регионе должна производиться на основе всестороннего анализа проблем, связанных с их эксплуатацией.

Первоначально необходимо исходя из их экономического состояния и перспектив развития регионов произвести оценку их потребности в АСММ. Затем на основе сравнительного анализа конкурентоспособности определить источники, применение которых наиболее целесообразно для тех или иных потребителей энергии. Только в результате такого анализа будут определены место, роль и объем использования атомных источников энергии малой мощности для отдаленных регионов.

Определенная «конкуренция» существует и среди типов атомных источников энергии, которая также должна рассматриваться в зависимости от конкретных условий. Выбор того или иного типа атомного источника энергии малой мощности должен быть однозначно обоснован с точки зрения экономической эффективности, ядерной и экологической безопасности, а также других определяющих факторов.

Кроме того, использование атомных источников энергии малой мощности связано с необходимостью решения целого ряда проблем, связанных с нераспространением ядерных материалов, обеспечением ядерной и радиационной безопасности, подготовкой персонала, развитием специальной нормативно-правовой базы и др.

В заключение своего выступления академик Саркисов отметил, что, несмотря на огромный экономический потенциал и стратегическое значение для развития страны Сибири, северных и восточных территорий, в Российской Федерации отсутствует единая программа энергоснабжения регионов, не обеспеченных централизованным энергоснабжением.

Разработка единой концепции и программы энергообеспечения этих регионов — одна из наиболее приоритетных задач современного этапа развития отечественной энергетики.

Один из проектов по использованию АСММ — это проект ПАТЭС (Плавучая атомная тепловая электростанция), который с 2007 года реализует ОАО «Концерн Росэнергоатом». О проблемах и перспективах строительства плавучей атомной теплоэлектростанции (ПАТЭС) мощностью 70 МВт с реакторными установками

КЛТ-40С поделился в своем докладе представитель Дирекции строящихся плавучих атомных теплоэлектростанций (филиал ОАО «Концерн Росэнергоатом») М.В. Шурочков.

ПАТЭС — это энергоисточник, который создается на базе российских технологий атомного судостроения и предназначен для надежного круглогодичного энергоснабжения районов Арктики и Дальнего Востока России, а также других изолированных, топливодефицитных районов в России и за рубежом

Спроектированный с учетом современных российских и международных требований безопасности плавучий энергетический блок имеет на борту две реакторные установки КЛТ-40С. Прототипы этих реакторов успешно эксплуатировались на атомных ледоколах «Таймыр» и «Вайгач» и лихтеровозе «Севморпуть».

Реакторы КЛТ-40С оснащены современными системами безопасности, в том числе основанными на пассивных (то есть, не зависящих от участия человека и автоматики) принципах срабатывания. Суммарная электрическая мощность двух установок составляет 70 МВт электрической и 50 Гкал/час тепловой мощности.

В процессе эксплуатации предусматриваются три средних ремонта через каждые 12 лет, на время которых плавэнергоблок будет уходить на докование, замену выработавшего свой ресурс оборудования и перегрузку топлива. Общий срок эксплуатации плавэнергоблока составит 36 лет (без учета времени на ремонтное обслуживание и транспортировку).

Все операции с ядерным топливом и радиоактивными отходами осуществляются на плавучем энергоблоке. По окончании эксплуатации ПЭБ будет транспортирован на судоремонтный завод, специализирующийся на ремонте и утилизации кораблей и судов с АЭУ. Береговые сооружения могут использоваться в составе ПАТЭС с новым ПЭБ, переоборудоваться по другому назначению или утилизироваться до состояния «зеленой лужайки».

Строительство головного плавучего энергоблока проекта 20870 ведется на ООО «Балтийский завод — Судостроение» (г. Санкт-Петербург) с 2009 года.

В настоящее время ПЭБ находится на достроечной набережной завода. На нем уже установлены реакторные и паротурбинные установ-

ки, завершаются корпусные работы, ведется монтаж электротехнического оборудования и общесудовых систем. Пусконаладочные работы и проведение испытаний ПЭБ запланированы на 2016 год.

Общая техническая готовность ПЭБ составляет 75%. Пунктом размещения головной станции выбран г. Певек Чукотского АО. После получения положительного заключения ФГУ «Главгосэкспертиза России» на проектную документацию ПАТЭС в г. Певеке в 2014 году начнутся работы по строительству береговых и гидротехнических сооружений, а также энергосетей на площадке размещения станции. Ввод в эксплуатацию запланирован в 2018 году.

В докладе представителя НИЦ «Курчатовский институт» Т. Д. Щепетиной рассматривались вопросы влияния малых АЭС на гармонизацию топливно-энергетического комплекса страны. Было отмечено, что исследование вопросов энергетической безопасности свидетельствует о сокращении возможностей по добыче нефти и газа. Однако существуют большие запасы неконвенционной нефти (тяжелая нефть, остающаяся в скважинах, а также различные битуминозные пески — сланцы). Кроме того, разведаны большие запасы углеводородного сырья в северных морях, однако выход в эти новые районы добычи сопряжен со значительными материальными затратами. К тому же, без эффективных стартовых источников энергии их освоение невозможно. Инерционность топливно-энергетических отраслей и сложившиеся традиции потребления побуждают направить усилия на сохранение сложившейся инфраструктуры использования нефтегазового топлива, в частности для транспорта, на ближайшую и среднесрочную перспективу.

В этом контексте следует рассмотреть гармонизирующую роль атомной энергетики применительно к использованию АСММ для поддержания добывающих отраслей. Например, затраты газа на собственные технологические нужды при транспорте и сжижении достигают 30–40%; их можно уменьшить, переложив энергозатраты на АСММ.

Низкие темпы прироста разведанных запасов нефти при коэффициенте извлечения 0,3–0,35 ведут к падающей добыче. Но в освоенных местах добычи есть сложившаяся инфраструк-

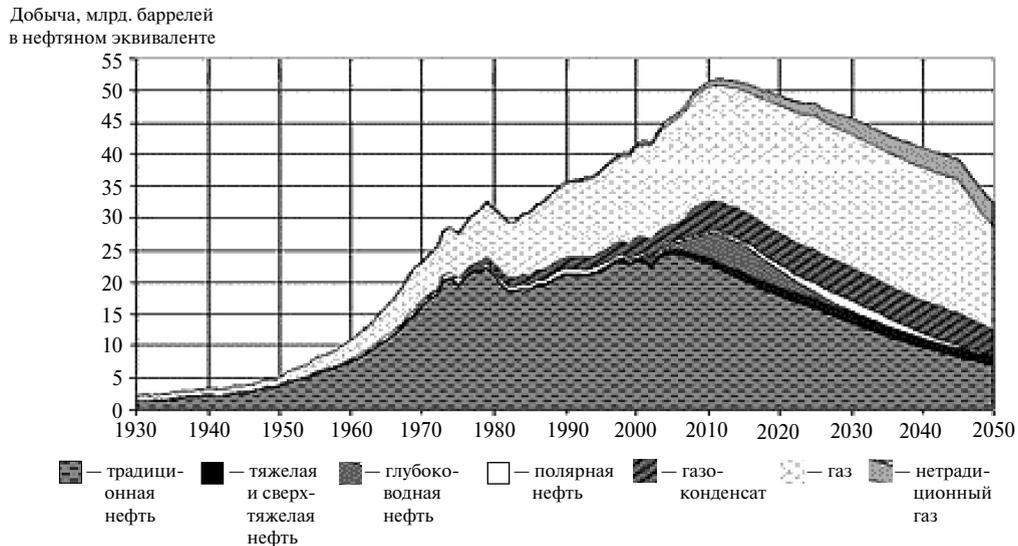


Рис. Прогноз добычи нефти и природного газа на основе данных о запасах на 2006 год

тура и поселки, которые станут ненужными при прекращении добычи (при этом в недрах останется 65–70 % запасов трудноизвлекаемой тяжелой нефти).

Существуют тепловые методы интенсификации добычи, которые можно осуществить с помощью тепловой энергии от АСММ, продлив тем самым срок активной жизни месторождений со всей инфраструктурой. Транспортировка такого сырья также проблематична, поэтому целесообразно организовать на месте переработку неконвенционных видов нефти в легкие нефтепродукты и моторные топлива с помощью энергии АСММ и получаемого на месте водорода.

Реализация такого высокотехнологичного производственного кластера более эффективна, чем высокочеловеческое освоение нового месторождения. Такой подход к продлению жизни уже освоенных месторождений благодаря интенсификации добычи и расширению деятельности за счет переработки на месте даст толчок к практической реализации проектов АСММ.

Созданию морских атомных водоопреснительных комплексов, использующих энергетические модули с реакторными установками, посвятил свой доклад представитель ЗАО «Атомэнерго» В.В. Рыжков. В докладе анализировались возможности решения проблемы дефицита пресной воды путем создания сети морских водоопреснительных комплексов большой производительности, которые бы использовали

в качестве источника энергии модули с ядерными энергетическими установками.

Рассматривались два варианта реализации опреснительных комплексов производительностью около 1 000 000 м<sup>3</sup>/сутки и около 250 000–300 000 м<sup>3</sup>/сутки на основе реакторных установок РИТМ-200М.

Составные части морских водоопреснительных комплексов: атомные энергетические модули, блоки опреснителей, заводы по выработке морской соли, жидкого хлора и др., хозяйственно-бытовые блоки, системы выдачи пресной питьевой воды на берег и на суда-продуктовозы, резервуары для накопления пресной питьевой воды, помещения для размещения энергетических модулей и блоков опреснителей.

Одно из предложений — использовать плавающий энергетический модуль, включающий две реакторные установки РИТМ-200М с водо-водяным реактором и паротурбинную установку с двумя турбинами и электрогенераторами.

Также была произведена оценка методов опреснения воды и рассмотрена поэтапная реализация проекта создания пилотного образца морского опреснительного комплекса.

В докладе О.Г. Комлева, представителя ОАО «АКМЭ-инжиниринг», были представлены результаты оценки возможности разработки на примере безопасной реакторной установки малой мощности, которая носит название «свинцово-висмутовый быстрый реактор СВБР-100».

Возможность использования подобной реакторной установки для энергоснабжения регионов, не обеспеченных централизованным энергоснабжением, опирается на критически осмысленный уникальный опыт разработки и эксплуатации реакторов с тяжелым жидкотеплоносителем (ТЖМТ) «свинец — висмут» на российских транспортных установках (15 реакторов, 80 реакторо-лет) и на опыт эксплуатации быстрых реакторов с натриевым теплоносителем.

Низкие по сравнению с натрием теплопередающие свойства свинцово-висмутового теплоносителя (СВТ) не позволяют получить достаточно высокую энергонапряженность активной зоны и короткое время удвоения плутония даже при коэффициенте воспроизводства, заметно превышающем единицу. В то же время природные свойства ТЖМТ дают возможность значительно упростить и удешевить реакторную установку. Именно поэтому предлагаемая инновационная ЯЭТ позволяет устранить конфликт между требованиями экономики и безопасности.

Важной отличительной особенностью рассматриваемой ЯЭТ является использование реакторов малой мощности — около 100 МВт (э) в качестве функционально законченных парогенерирующих модулей, на основе которых могут создаваться ядерные энергоблоки различного назначения любой необходимой мощности, кратной 100 МВт (э).

Такой нетрадиционный подход к формированию ЯППУ энергоблока — наиболее экономически эффективен, если РУ обладает развитыми свойствами внутренней самозащищенности и пассивной безопасности. Реакторная установка (РУ) СВБР-100 разработана как унифицированная реакторная установка с мощностью около 100 МВт (э) для многоцелевого применения в составе модульных атомных станций или в качестве автономных энергоисточников.

При использовании технологии СВБР для региональной энергетики нужно иметь в виду следующие их характерные особенности:

реактор работает на быстрых нейтронах с химически инертным СВТ — эвтектическим сплавом «свинец — висмут» — в первом контуре. Температура кипения СВТ — 1670 °С, температура плавления — 123,5 °С;

интегральная компоновка реактора предполагает, что все оборудование первого контура размещено в едином прочном корпусе реакторного моноблока с полным исключением арматуры и трубопроводов СВТ;

реакторный моноблок имеет защитный кожух и размещен в железобетонной шахте, которая заполняется водой при полном обесточивании для пассивного отвода тепла при расхолаживании РУ;

реактор имеет двухконтурную схему теплоотвода и парогенератор (ПГ) с многократной естественной циркуляцией по второму контуру;

в теплоотводящих контурах реакторного моноблока обеспечена естественная циркуляция теплоносителей, достаточная для пассивного расхолаживания реактора без опасного перегрева активной зоны;

значительно сокращено количество специальных систем безопасности, при этом функции безопасности выполняют системы нормальной эксплуатации;

основные компоненты реакторного моноблока и реакторной установки выполнены в виде отдельных модулей, при этом обеспечена возможность их замены и ремонта;

предусмотрена единовременная покассетная выгрузка топлива по окончании кампании активной зоны и загрузка свежего топлива в виде единого картриджа (новая активная зона);

ремонт оборудования первого контура и перегрузка топлива могут проводиться без дренирования СВТ при поддержании его в жидком состоянии за счет остаточного энерговыделения активной зоны или работы системы обогрева.

Инновационная ядерная энергетическая технология на базе унифицированных модульных многоцелевых реакторов с химически инертным свинцово-висмутовым теплоносителем позволит обеспечить высокий уровень социальной приемлемости таких реакторов и расширить область их применения в ядерной энергетике.

Модульная структура ЯППУ создает возможность перехода на прогрессивные технологии типового проектирования энергоблоков различной мощности. Необходимо создавать блоки на базе серийно изготавливаемых в заводских условиях унифицированных реакторных модулей и ориентироваться на поточные методы выполнения строительно-монтажных

работ. Это позволит значительно сократить сроки строительства атомных станций, а также перейти к техническому обслуживанию реакторных модулей на сервисной основе для снижения численности эксплуатационного персонала и соответствующих затрат.

Консервативный подход, принятый при разработке реакторной установки, предопределил высокий потенциал ее дальнейшего совершенствования. К перспективным разработкам можно отнести: повышение температуры оболочки ТВЭЛА, переход на прямоточный парогенератор, использование нитридного топлива и др.

Реализация намеченных мер требует выполнения соответствующих НИОКР. Однако ожидаемые результаты исследовательских работ позволят снизить удельные капитальные затраты на строительство модульной атомной станции и сроки строительства до значений, характерных для парогазовых ТЭС. Это повысит ее конкурентоспособность на рынке инвестиций и будет при широком внедрении такой ядерной энерготехнологии сдерживать рост цен на электроэнергию.

Федеральная целевая программа «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010–2015 годов и на перспективу до 2020 года» предусматривает создание головного опытно-промышленного энергоблока с реакторной установкой типа СВБР-100. Затраты на демонстрацию этой ЯЭТ носят однократный характер, так как на базе испытанного унифицированного реакторного модуля могут создаваться ядерные энергоблоки различной мощности и назначения без проведения дополнительных НИОКР.

Для реализации этой технологии Росатом и ООО «ЕвроСибЭнерго» создали совместное государственно-частное предприятие ОАО «АКМЭ-инжиниринг».

Опытно-промышленный энергоблок с реактором СВБР-100 предположительно должен быть введен в эксплуатацию в 2017 году.

В докладе, в котором оценивались границы эффективности технико-экономических параметров атомных станций малой мощности, Д.О. Смоленцев, представитель ИБРАЭ РАН, привел результаты анализа использования энергоустановок малой мощности для децентрализованного энергоснабжения.

Обеспечение электроэнергией регионов, не входящих в единую энергосистему (ЕЭС) страны, сегодня составляет большую проблему, которая требует наискорейшего решения. На смену отработавшим эксплуатационный срок электростанциям должны прийти новые, более совершенные в экономическом и техническом плане энергоустановки.

В основном обеспечение энергоресурсами районов, не входящих в ЕЭС, происходит путем завоза топлива из соседних регионов. Ежегодно на осуществление процедуры северного завоза из областных и федеральных бюджетов выделяют сотни миллионов рублей. В Якутии доля транспортной составляющей в стоимости топливно-энергетических ресурсов доходит до 70–80 %, что увеличивает стоимость и без того дорогостоящего сырья в два-четыре раза, сюда же следует отнести затраты на долгосрочное хранение топлива. Снизить зависимость регионов от завозных энергоресурсов — также первоочередная задача.

Одним из наиболее ярких примеров региона с децентрализованной энергосистемой в силу его протяженности и удаленности друг от друга потребителей является Республика Саха (Якутия). Об этом свидетельствует «Программа оптимизации локальной энергетики Республики Саха на 2008–2013 годы». В ней отражены все упомянутые проблемы. Основные цели плана мероприятий программы:

доведение к 2015 году среднеотпускного тарифа на электроэнергию в Якутии до среднероссийского уровня;

создание технологических предпосылок по снижению затрат на завоз и использование дизельного топлива в электроэнергетике;

замещение локальной дизельной генерации централизованными энергоисточниками за счет строительства линий электропередач.

Большинство проводимых оценок было ориентировано на сравнение современных и устаревших в моральном и техническом плане технологий. Очевидно, что новые технологии на фоне традиционных выглядят сверхэффективными и сверхвыгодными. Поэтому текущие исследования подтверждают необходимость замены, однако пути решения проблемы неоднозначны.

Из-за сильных географических и социально-экономических различий районов задача о вы-

боре энергетической альтернативы должна решаться для каждой площадки индивидуально с учетом всей описанной специфики.

Исследования, проводимые в рамках данной тематики, направлены на создание и отладку методики сравнительной экономической оценки, выявление критических характеристик энергоустановок. Создание и анализ инвестиционных моделей, отражающих особенности перспективных энергоустановок, поможет дать ответ на вопрос, какая из существующих альтернатив при прочих равных условиях наиболее приемлема для рассматриваемого района, не входящего в ЕЭС.

В качестве альтернативных источников энергии для расчета экономической эффективности и последующей сравнительной оценки были выбраны: атомная станция малой мощности, конденсационная электростанция (КЭС), работающая на угле, и ветро-дизельный комплекс (ВДЭК).

В качестве топлива, используемого КЭС, был выбран уголь — из-за его стабильной цены по сравнению с нефтепродуктами, локальной распространенности и в связи с неоднократным упоминанием в федеральных программах о необходимости увеличения доли угля в энергобалансе страны.

Результаты расчета экономической эффективности показали, что на данном этапе развития ветроэнергетики она не может конкурировать с представителями традиционной энергетики.

Что касается КЭС, то ее показатели сильно зависят от стоимости топлива (уголь). АСММ становится сравнимой по экономической привлекательности с проектом КЭС при цене на уголь от 4000 руб./т условного топлива.

Кроме того, необходимо отметить, что проект КЭС окупается быстрее, чем АСММ, что связано с высокими капиталовложениями в атомной энергетике. Но для проекта КЭС чистый дисконтированный доход накапливается более медленными темпами из-за большой топливной составляющей в эксплуатационных затратах, которая зависит от базовой стоимости топлива.

Определение зон экономически целесообразного применения АСММ обусловлено их сравнительной оценкой с прочими альтерна-

тивами в части себестоимости вырабатываемой продукции при обеспечении равного энергетического эффекта в целевых регионах использования. Следовательно, прогнозируемая стоимость электроэнергии в зонах централизованного энергоснабжения и в локальных системах, а также электроэнергии, вырабатываемой отдельными генерирующими установками, влияет на технико-экономические характеристики АСММ, которые определяют эффективность использования атомной генерации.

Кроме того, в докладе были приведены результаты чувствительности показателей экономической эффективности АСММ к технико-экономическим характеристикам. Представлены интервалы и пороговые значения технико-экономических характеристик АСММ, при которых они конкурентоспособны по сравнению с прочими энергетическими альтернативами в целевых регионах использования.

В рамках основной тематики конференции были заслушаны доклады по проблемам, связанным с такими вопросами, как оценка рисков атомно-энергетических проектов, ответственность за ядерный ущерб при строительстве и эксплуатации АСММ, страхование гражданской ответственности за ядерные риски, особенности физической защиты транспортабельных атомных энергетических установок, кадровое обеспечение транспортабельных атомных энергетических установок и ряд других.

В заключительном слове академик А.А. Саркисов выразил общее мнение участников конференции о перспективности дальнейших работ по развитию атомных энергетических установок малой мощности и АСММ, а также выразил благодарность участникам конференции за продуктивную работу.

Работа конференции позволила оценить возможность решения проблемы развития атомных станций малой мощности с различных точек зрения и в то же время поставила новые задачи перед учеными Академии наук, научно-исследовательскими институтами, высших учебных заведений и проектными институтами.

Очевидно, что назрела необходимость концентрации общих усилий и создания кластера организаций, работающих над этой проблемой. Такая мобилизация сил позволит разработать

стратегию и сосредоточить внимание на решении первоочередных вопросов, что значительно ускорит внедрение АСММ в удаленных малонаселенных районах Крайнего Севера и Дальнего Востока.

Хотелось бы выразить пожелание ученым Санкт-Петербургского политехнического университета активнее подключаться к работе над этой интересной и перспективной крупномасштабной задачей.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ВАСИЛЬЕВ Юрий Сергеевич** — доктор технических наук профессор, президент Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, академик РАН; 195251, ул. Политехническая 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: president@spbstu.ru

**АМОСОВ Николай Тимофеевич** — кандидат технических наук профессор кафедры атомной и тепловой энергетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: nwp\_amossov@mail.ru

#### AUTHORS

**VASILIEV Yuriy S.** — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Polytechnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: president@spbstu.ru

**AMOSOV Nikolay T.** — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Polytechnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: nwp\_amossov@mail.ru

УДК 621.311.238

*А.Х. Фам, В.А. Рассохин, К.Д. Андреев*

## РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ТЕПЛОВОЙ СХЕМЫ ПАРОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИКИ ВЬЕТНАМА

*A.H. Fam, V.A. Rassokhin, K.D. Andreev*

### CALCULATIVE INVESTIGATION A THERMAL SCHEME OF THE COMBINED TURBINE FOR ENERGY PLANT OF VIETNAM

Представлено краткое описание трех компьютерных программ расчета тепловых схем газотурбинных и комбинированных энергоустановок: PIGPU, КГПТУ и GateCycle. Для оценки разброса результатов проведены сравнительные расчеты двух комбинированных установок и сделаны выводы о применимости программ. Приведены некоторые результаты расчетного анализа комбинированной установки, предназначенной для энергетической системы Вьетнама. ГАЗОТУРБИНАЯ УСТАНОВКА; КОМБИНИРОВАННАЯ УСТАНОВКА; КОТЕЛ-УТИЛИЗАТОР; ПАРАМЕТР; ПОКАЗАТЕЛЬ.

A brief description of three calculation programs for thermal schemes of gas-turbine and combined engines: PIGPU, KGPTU and GateCycle is presented. For estimation of the scatter of results the comparative calculations of two combined plants are carried out and conclusions about the applicability of the programs are made. Some results of computational analysis of combined plant for Vietnam energy system are presented.

GAS TURBINE; COMBINED INSTALLATION; HEAT RECOVERY STEAM GENERATOR; PARAMETER; INDEX.

Комбинированные газопаротурбинные установки (КГПТУ) широко применяются в различных отраслях промышленности, особенно в электроэнергетике (в том числе — в мировой) и в судовой энергетике. Вследствие того, что доля газа в топливном балансе мира высока (более 60 %), внедрение высокоэффективных газопаровых технологий — общепризнанная стратегия развития тепловой энергетики. Многие страны применяют КГПТУ с утилизационными котлами (КУ) для новых электростанций, работающих на природном газе. Сейчас их КПД уже достиг 52–54 %, а в ближайшей перспективе возрастет до 58–60 % [1].

Разработаны газотурбинные двигатели нового поколения, на базе которых будут создаваться КГПТУ. Это требует и новых программных продуктов на основе математических моделей оборудования с большим числом уровней по давлению котлов-утилизаторов, впрыском пара в газотурбинную часть, паровым охлаждением лопаток газовой турбины. Во Вьетнаме работает

ряд различных тепловых электростанций, построенных по комбинированному парогазовому циклу [1]. Среди них — установки Siemens, Alstom, General Electric. Повышение их КПД — актуальная задача.

**Программы расчета тепловых схем комбинированных турбоустановок.** Для сравнения были выбраны три программных продукта: программа PIGPU, написанная авторами; программа КГПТУ, разработанная Морским техническим университетом (г. Санкт-Петербург); программа GateCycle компании General Electric. Выбор именно этих программ диктовался прежде всего их доступностью.

**Собственная программа PIGPU.** Программа PIGPU предназначена для расчета параметров газотурбинных установок (ГТУ) и комбинированных газопаротурбинных установок [2]. Она позволяет выполнить расчеты параметров тепловой схемы и основных показателей ГТУ, включая установки с охлаждением. Программа PIGPU позволяет также выполнить расчеты

КГПТУ с котлом-утилизатором одного уровня давления и двух уровней давлений, с комбинаций различных сочетаний газовых, паровых контуров и котлов-утилизаторов (например, 2 ГТУ+ + 2 КУ+1ПТУ с двумя уровнями давлений в котле-утилизаторе). Программа имеет ограничения по диапазону параметров цикла: температура газа перед турбинной  $t_3^* \leq 2000$  °С, степень повышения давления  $\pi_k \leq 50$ , диапазон изменения высокого давления 3,5–8 МПа, диапазон изменения низкого давления 0,5–0,7 МПа [2].

**Программа КГПТУ Морского технического университета.** Программа КГПТУ (рис. 1) предназначена для расчета параметров электроэнергетических и судовых комбинированных газопаротурбинных установок [3]. Она предоставлена авторами для использования в СПбГПУ.

Компьютерная программа КГПТУ может быть использована для расчета 12 вариантов схем энергетических КГПТУ — трехконтурной тепловой схемы КГПТУ с промежуточным перегревом (две или три паровые турбины) и без него (две или три паровые турбины), двухконтурной тепловой схемы КГПТУ с промежуточным перегревом (две или три паровые турбины) и без него (одна или две паровые турбины), одноконтурной тепловой схемы КГПТУ с промежуточным перегревом (две или три паровые турбины) и без него (одна или две паровые турбины), а также 4 вариантов схем судовых КГПТУ. Программа имеет отдельное окно для расчета энтальпии

продуктов сгорания при использовании в качестве топлива природного газа или жидкого топлива и окно для расчета свойств воды и водяного пара [4].

**Программа GateCycle фирмы General Electric.** Программное обеспечение GateCycle компании GE представляет собой одно из наиболее мощных из существующих, гибких и многофункциональных приложений для расчета теплового баланса. GateCycle позволяет определить характеристики работы ПГУ, паросиловых установок на традиционных видах топлива, систем когенерации, усовершенствованных газотурбинных циклов и других энергосистем [5].

Коммерческий пакет GateCycle, разработанный компанией General Electric и предоставленный кафедре ТГиАД СПбГПУ для использования в учебных целях [6], позволяет выполнить расчет и оптимизацию параметров оборудования на стадии проектирования, расчет характеристик газопаровых, газотурбинных и паротурбинных установок разнообразных схем для работы на различных видах топлива. Программа дает возможность рассчитывать практически любые схемы турбинных (и не только) установок любой сложности. Схемы ограничены лишь набором стандартных агрегатов.

Программа GateCycle предназначена для расчета термодинамических параметров оборудования и применяется, в частности, при проектировании тепловых и парогазовых

Электроэнергетические КГПТУ

	Трехконтурная	Двухконтурная	Одноконтурная
С промперегревом	Две паровые турбины	Две паровые турбины	Две паровые турбины
	Три паровые турбины	Три паровые турбины	Три паровые турбины
Без промперегревом	Две паровые турбины	Одна паровая турбины	Одна паровая турбины
	Три паровые турбины	Две паровые турбины	Две паровые турбины

Судовые КГПТУ

Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Открытая схема ТУК
-----------	-----------	-----------	--------------------

Выход

Рис. 1. Программное окно для выбора схем КГПТУ

электростанций. Она позволяет анализировать и обрабатывать различные схемы на предмет их эффективности и рассчитывать термодинамические показатели оборудования при переменных режимах работы [7]. Пользователи имеют возможность моделировать турбинные и транспортные наземные энергоустановки практически любого типа с помощью одного пакета программ, позволяющего вводить характеристики узлов в виде уравнений или таблиц, моделировать контуры управления и изменять неограниченное количество параметров модели в процессе оптимизации. Программа GateCycle успешно применяется как инструмент оптими-

зации проекта или моделирования работы существующей энергоустановки и станции в целом [6].

**Сравнение результатов расчетов.** Ниже приведены результаты расчетов показателей двух КГПТУ с одноконтурным КУ и с двухконтурным КУ. Схема КГПТУ с одноконтурным КУ [8], в которой в качестве ГТУ использована известная установка V.64.2 фирмы Siemens [9], приведена на рис. 2, а полученные в расчете данные сведены в табл. 1. В схеме КГПТУ с двухконтурным КУ в качестве ГТУ использована та же ГТУ V.64.2 фирмы Siemens. Результаты расчета этой схемы сведены в табл. 2.

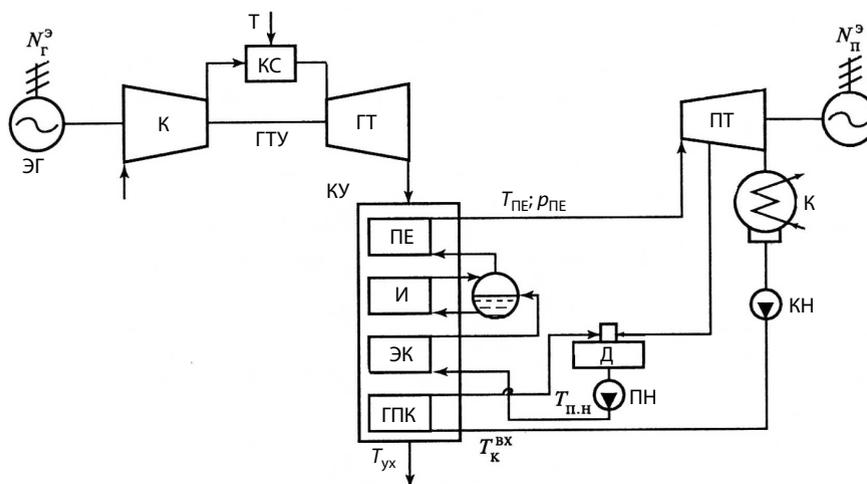


Рис. 2. Схема КГПТУ с одноконтурным КУ:

ЭГ — электрогенератор; К — компрессор; КС — камера сгорания; ГТ — газовая турбина; ГТУ — газотурбинная установка; КУ — котел-утилизатор; ПТ — паровая турбина; Д — деаэрактор; ПН — питательный насос; КН — конденсационный насос; ЭК — экономайзер; ПЕ — пароперегреватель; И — испаритель; ГПК — газовый подогреватель конденсата

Таблица 1

Исходные данные и результаты расчета тепловой схемы КГПТУ с одноконтурным КУ

Параметры, ед. измерения	Результаты расчета КГПТУ по программам		
	P1GPU	КГПТУ	Gate Cycle
Мощность ГТД, МВт	110	110	110
Расход газов, кг/с	356	356	356
Температура газа за турбиной, °С	550	550	550
КПД ГТД, %	35,0864	35,0864	35,0864
Температура наружного воздуха, °С	15	15	15
Давление наружного воздуха, МПа	0,1	0,1	0,1
Давление в конденсаторе, МПа	0,005	0,005	0,005
Давление в контурах КУ, МПа	5	5	5

Окончание табл. 1

Параметры, ед. измерения	Результаты расчета КГПТУ по программам		
	P1GPU	КГПТУ	Gate Cycle
Давление в деаэраторе, МПа	0,5	0,5	0,5
КПД парового контура	89	89	89
Параметры пара за контурами:			
давление, МПа	5	5	5
температура, °С	520	520	520
расход, кг/с	43,76	43,76	43,76
Температура уходящих газов, °С	194	195,4	195,4
Мощность КГПТУ, МВт	157,1	157,38	157,37
КПД КГПТУ, %	50,17	50,2	50,2

Таблица 2

**Исходные данные и результаты расчета тепловой схемы КГПТУ с двухконтурным КУ**

Параметры, ед. измерения	Результаты расчета КГПТУ по программам		
	P1GPU	КГПТУ	Gate Cycle
Мощность ГТД, МВт	110	110	110
Расход газов, кг/с	356	356	356
Температура газа за турбиной, С	550	550	550
КПД ГТД, %	35	35	35
Температура наружного воздуха, С	15	15	35
Давление наружного воздуха, МПа	0,1	0,1	15
Давление в конденсаторе, МПа	0,005	0,005	0,005
Высокое давление в контурах КУ, МПа	5	5	5
Низкое давление в контурах КУ, МПа	0,5	0,5	0,5
Давление в деаэраторе, МПа	0,5	0,5	0,5
КПД части высокого давления, %	89	89	89
КПД части низкого давления, %	84	84	84
Параметры пара за высокими контурами:			
давление, МПа	5	5	5
температура, °С	520	520	520
расход, кг/с	87,4	87,5	87,4
Параметры пара за низкими контурами:			
давление, МПа	0,5	0,5	0,5
температура, °С	204,7	205	205
расход, кг/с	21,4	21,4	21,4
Температура уходящих газов, °С	121	120	120
Мощность КГПТУ, МВт	326,4	326,3	326
КПД КГПТУ, %	51,9	51,9	51,9

Как следует из сравнения полученных данных, все три программы дают весьма близкие и хорошо совпадающие с опубликованными данными результаты [9, 10] для обеих схем КГПТУ. Поскольку программа RIGPU не позволяет проектировать КГПТУ с тремя уровнями давления в котле-утилизаторе, для дальнейших расчетов была выбрана простая и удобная при использовании программа Морского технического университета.

**Расчет КГПТУ, предназначенной для энергетической систем Вьетнама.** Расчеты выполнены

с целью установить влияние температуры газа перед газовой турбиной на КПД комбинированной парогазовой установки мощностью 450 МВт. В качестве объекта исследования была выбрана работающая в составе энергетической системы Вьетнама ГТУ GE13E2 фирмы Alstom. Для парового контура выбрана паровая турбина Т-150–7,7 производства АО «ЛМЗ». Диапазон изменения начальной температуры газа 1050–1250 °С. Результаты расчетов сведены в табл. 3 и представлены на рис. 3.

Таблица 3

**Влияние начальных температур газов  $T_3$  на КПД ПГУ мощностью 450 МВт**

Параметры, ед. измерения	Значения параметров при разных начальных температурах газов, °С				
	1050	1100	1150	1200	1250
<i>Газовая часть</i>					
Мощность ГТД, МВт	154,9/154,9*	154,9/154,9*	154,9/154,9*	154,9/154,9*	154,9/154,9*
Расход газов, кг/с	532	532	532	532	532
Температура газа за турбиной, °С	495	524/524*	553	582	611
КПД ГТД, %	35,7	35,7	35,7	35,7	35,7
Степень повышения давления воздуха в компрессоре	14,6	14,6	14,6	14,6	14,6
Коэффициент избытка воздуха	2,58	2,55	2,52	2,41	2,26
<i>Паровая часть</i>					
КПД части высокого давления, %	83	83	83	83	83
КПД части низкого давления, %	82	82	82	82	82
Давление в конденсаторе, МПа	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
Давление в деаэраторе, МПа	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Параметры пара за высокими контурами: давление, МПа температура, °С расход, кг/с	7,6/7,6* 481 109,7	7,6/7,6* 510/510 122,4	7,6/7,6* 539 134,5	7,6/7,6* 568 146,2	7,6/7,6* 597 157,6
Параметры пара за низкими контурами: давление, МПа температура, °С расход, кг/с	0,62/0,62* 201,6 36,6	0,62/0,62* 194,6/195* 33,3	0,62/0,62* 188 30,1	0,62/0,62* 181,7 27,1	0,62/0,62* 175,7 24,1
Температура на выходе из нагревателя, °С	90	90	90	90	90
Расход охлаждающей воды, т/ч Расход пара на деаэратор, кг/с	55765 19,9	60063 20,9	64316 21,8	68635 22,7	73003 23,5
Мощность вспомогательных механизмов, кВт Температура уходящих газов, °С	3536 136,8	3857 134,7	4168 132,7	4478 130,8	4785,6 129

Окончание табл. 3

Параметры, ед. измерения	Значения параметров при разных начальных температурах газов, °С				
	1050	1100	1150	1200	1250
Мощность ПТ, МВт	140,9	157,6/160*	174,7	192,6	211,3
Мощность ПГТ, МВт	447,1	463,6/462,8*	480,4	497,97	516,3
КПД ПГУ, %	51,5	53,4/53*	55,35	57,3	59,49

\*Параметры реальной установки

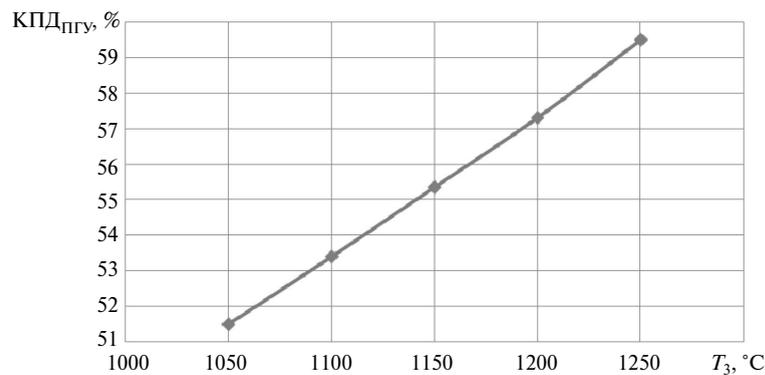


Рис. 3. Влияние начальной температуры на КПД ПГУ

На рис. 3 видно, что с повышением начальной температуры показатели установки резко возрастают. Уже при  $t_3=1100$  °С КПД установки превышает 53 %. Повышение температуры приводит к значительному росту КПД, который при  $t_3=1250$  °С достигает 59,5 %.

Проведены расчеты типовых схем комбинированных парогазовых установок, на основании

которых выбрана программа для анализа комбинированной установки, предназначенной для энергетической системы Вьетнама, в составе газовой турбины GE13E2 фирмы Alstom и паровой турбины Т-150–7,7 производства АО «ЛМЗ». Выполненные расчеты показали значительный рост КПД установки при увеличении начальной температуры рабочего тела в газовом контуре.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фам Х.А., Рассохин А.В., Андреев К.Д. Состояние и перспективы развития энергетики Вьетнама // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 1 (166). С. 32–35.
2. Фам Х.А., Андреев К.Д. Методика и программа расчета параметров комбинированной турбоустановки // XXXIX неделя науки СПбГПУ: материалы международной научно-практической конференции, 6–11 дек. 2010 г. Ч. 3: Энергомашиностроительный факультет. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. С. 35
3. Тихомиров Б.А., Льюнг Л.К. Сравнение эффективности охлаждения газовой турбины воздухом и паром в комбинированных газопаротурбинных установках // Энергетические машины и установки. 2008. № 1–2. С. 10–19.
4. Льюнг Л.К. Разработка математической модели и компьютерной программы для определения эффективности судовых и энергетических комбинированных газопаротурбинных установок: Дисс. ... кандидата технических наук. 2005. 155 с.
5. Определение теплового баланса при моделировании электростанции (GateCycle) [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.spektr-ksk.ru/prigor.php?id=2504>.
6. Тисленко В.А., Оленников С.Ю. Расчет и выбор параметров газотурбинной установки в программном комплексе Gatecycle // XL Неделя науки СПбГПУ: материалы международной научно-практической конференции, 5–10 дек. 2011 г. Ч. 3. Энергомашиностроительный факультет. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. С. 58–59.

7. Забота о состоянии промышленного оборудования Россия и страны СНГ [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://site.ge-energy.com/prod\\_serv/products/oc/ru/downloads/M\\_C\\_RUS\\_2012\\_LO.pdf](http://site.ge-energy.com/prod_serv/products/oc/ru/downloads/M_C_RUS_2012_LO.pdf)

8. **Лыков А.В.** Расчет тепловой схемы парогазовой установки на базе ГТУ Taurus 60S в программе GateCycle [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://dl.unilib.neva.ru/dl/2/3393.pdf>.

9. **Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н.** Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростаций: учебное пособие для вузов / Под ред. С.В. Цанева. 3-е изд., стереот. М.: Издательский дом МЭИ, 2009. 584 с.

10. **Трухний А.Д., Петрунин С.В.** Расчет тепловых схем парогазовых установок утилизационного типа: Методическое пособие по курсу «Энергетические установки». М.: Изд-во МЭИ, 2001. 24 с.

## REFERENCES

1. **Fam Kh.A., Rassokhin A.V., Andreev K.D.** Sos-toianie i perspektivy razvitiia energetiki V'etnama. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU*. 2013. № 1 (166). S. 32–35. (rus.)

2. **Fam. Kh.A., Andreev K.D.** Metodika i programma rascheta parametrov kombinirovannoi turboustanovki. *XXXIX nedelya nauki SPbGPU: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*, 6–11 dek. 2010 g. — Ch. 3: Energomashinostroitel'nyi fakul'tet. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2010. S. 35. (rus.)

3. **Tikhomirov B.A., Lyong L.K.** Sravnenie effektivnosti okhlazhdeniya gazovoi turbiny vozdukhom i parom v kombinirovannykh gazoparoturbinykh ustanovkakh. *Energeticheskie mashiny i ustanovki*. 2008. № 1–2. S. 10–19. (rus.)

4. **Lyong L.K.** Razrabotka matematicheskoi modeli i komp'yuternoi programmy dlia opredeleniia effektivnosti sudovykh i energeticheskikh kombinirovannykh gazoparoturbinykh ustanovok: Diss. ... kand. tekhn. nauk, 2005 g. 155 s. (rus.)

5. Opredelenie teplovogo balansa pri modelirovanii elektrostantsii (GateCycle) [Elektronnyi resurs] // Rezhim dostupa: <http://www.spektr-ksk.ru/pribor.php?id=2504>.

6. **Tislenko V.A., Olennikov S.Iu.** Raschet i vybor parametrov gazoturbinnoi ustanovki v programmnom komplekse Gatecycle: *XL Nedelya nauki SPbGPU: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*, 5–10 dek. 2011 g. Ch. 3: Energomashinostroitel'nyi fakul'tet. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2011. S. 58–59. (rus.)

7. Zabota o sostoianii promyshlennogo oborudovaniia Rossiia i strany SNG [Elektronnyi resurs]. Rezhim dostupa: [http://site.ge-energy.com/prod\\_serv/products/oc/ru/downloads/M\\_C\\_RUS\\_2012\\_LO.pdf](http://site.ge-energy.com/prod_serv/products/oc/ru/downloads/M_C_RUS_2012_LO.pdf) (rus.)

8. **Lykov A.V.** Raschet teplovoi skhemy parogazovoi ustanovki na baze GTU Taurus 60S v programme GateCycle [Elektronnyi resurs]. Rezhim dostupa: <http://dl.unilib.neva.ru/dl/2/3393.pdf>. (rus.)

9. **Tsanev S.V., Burov V.D., Remezov A.N.** Gazoturbinye i parogazovye ustanovki teplovykh elektrostatsii: uchebnoe posobie dlia vuzov / Pod red. S.V. Tsaneva. 3-e izd., stereot. M.: Izdatel'skii dom MEI, 2009. 584 s. (rus.)

10. **Trukhnii A.D., Petrunin S.V.** Raschet teplovykh skhem porogazovykh ustanovok utilizatsionnogo tipa: Metodicheskoe posobie po kursu «Energeticheskie ustanovki». M.: Izdatel'stvo MEI, 2001. 24 s. (rus.)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ФАМ Ан Хоан** — аспирант кафедры турбин, гидромашин и авиационных двигателей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: [sdd85@mail.ru](mailto:sdd85@mail.ru)

**РАССОХИН Виктор Александрович** — доктор технических наук профессор заведующий кафедрой турбин, гидромашин и авиационных двигателей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: [v-rassokhin@yandex.ru](mailto:v-rassokhin@yandex.ru)

**АНДРЕЕВ Константин Дмитриевич** — кандидат технических наук доцент кафедры турбин, гидромашин и авиационных двигателей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: [visantiya@freemail.ru](mailto:visantiya@freemail.ru)

## AUTHORS

**PHAM An H.** — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: [sdd85@mail.ru](mailto:sdd85@mail.ru)

**RASSOKHIN Viktor A.** — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: [v-rassokhin@yandex.ru](mailto:v-rassokhin@yandex.ru)

**ANDREEV Konstantin D.** — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: [visantiya@freemail.ru](mailto:visantiya@freemail.ru)



УДК 62-69

*Д.В. Петросова, Т.И. Спиридонова, И.А. Дуванова*

## **АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ВЗГЛЯД НА ТЕПЛОВОЙ НАСОС С ВЕРТИКАЛЬНЫМ КОЛЛЕКТОРОМ**

*D.V. Petrosova, T.I. Spiridonova, I.A. Duvanova*

### **ALTERNATIVE VIEW ON HEAT PUMP WITH VERTICAL COLLECTOR**

На российском рынке теплотехники все большую популярность приобретают тепловые насосы, уже успешно зарекомендовавшие себя за рубежом. Возникает вопрос об эффективности теплового насоса и о возможности применения на практике более выгодных вариантов. В статье произведено сравнение теплового насоса с пеллетным комбо-бойлером, которое позволило оценить с альтернативной точки зрения целесообразность использования теплового насоса с вертикальным коллектором в условиях Ленинградской области.

ТЕПЛОТЕХНИКА; ТЕПЛОВОЙ НАСОС; ПЕЛЛЕТНЫЙ КОМБО-БОЙЛЕР; ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ; ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ; ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ; СРОК ОКУПАЕМОСТИ.

Day by day thermal pumps get increasing popularity in the Russian market of thermotechnics. Thermal pumps have already successfully proved its efficiency abroad. But efficiency of geothermal heat pump with vertical collector in Russian conditions (Leningrad area) has questioned. Therefore, authors have reviewed a possibility of applying more favorable options in practice.

HEATING ENGINEERING; HEAT PUMP; PELLET COMBO-BOILER; ENERGY EFFICIENCY; ENERGY SAVING; LIFE CYCLE; PAYBACK PERIOD.

В настоящее время, к сожалению, не во всех населенных пунктах Ленинградской области есть широкий выбор источников энергии. В связи с этим обстоятельством на российском рынке теплотехники все большую популярность набирают тепловые насосы, которые уже успешно зарекомендовали себя в таких европейских странах, как Германия, Финляндия, Швеция.

Производители знают, в чем заинтересованы потребители, имеющие индивидуальные загородные дома (в нашем случае — жители Ленинградской области):

в низких затратах на оборудование и эксплуатацию;

в экологической безопасности установки;

в пожарной безопасности;

в длительном сроке службы установки;

в многофункциональности установки (отопление помещений и нагрев воды).

Обобщая, можно сказать, что потребитель заинтересован в комплексно-эффективной уста-

новке. Такой установкой, по убеждениям многих производителей, является тепловой насос.

Тепловой насос — устройство, осуществляющее нагрев воды в системе водоснабжения и теплоносителя в системе отопления за счет преобразования энергии, полученной из окружающей среды [9, 10].

Возникает вопрос: действительно ли тепловой насос так эффективен, как об этом заявляют производители, или же можно подобрать более выгодные варианты. В нашей статье произведено сравнение теплового насоса с функционально-схожим пеллетным комбо-котлом.

#### **Обзор иностранной и отечественной литературы**

Уже более десяти лет ученые и инженеры-практики занимаются разработками в области теплотехники для индивидуального жилищного строительства [1, 5–7]. Один из самых широких обзоров тепловых насосов представлен авторами K.J. Chua, S.K. Chou, W.M. Yang [13]. Более по-

дробно рассмотрели геотермальные тепловые насосы Л. Милова [2], В. Райх [3], В. Кутилов [4].

В работе Н. Кайдаловой и В. Крюкова [8] сделано принципиальное сравнение теплового насоса и комбо-бойлера для практического применения на территории Финляндии. Они установили, что тепловой насос оказался более выгодным вариантом, чем другие установки.

В [9, 10] авторы сделали предположение о невыгодности использования геотермального теплового насоса на различных территориях в России по климатическим и экономическим соображениям.

Несмотря на то, что в научной литературе имеется большое разнообразие публикаций по теплотехнике [11, 12], ни в одной из них не была произведена независимая сравнительная оценка тепловых установок применительно к территории Ленинградской области.

#### Постановка задачи

Цель исследования — выявление наиболее оптимальной установки для условной модели загородного дома.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) произвести сравнительный анализ теплового насоса и пеллетного комбо-котла по техническим характеристикам;
- 2) выполнить экономический анализ жизненного цикла обеих установок.

#### Описание исследования

*Исходные данные.* Условная модель представляет собой двухэтажный загородный дом площадью 200 м<sup>2</sup> и объемом 600 м<sup>3</sup>, расположенный в окрестностях Санкт-Петербурга в радиусе до 50 км от границы города. Площадь участка 288 м<sup>2</sup> (2,9–3 соток). Количество жильцов — четыре. Расчетные теплотери здания составляют 15,2 кВт.

Представлены к рассмотрению две тепловые установки: пеллетный комбо-бойлер мощностью 20 кВт с коэффициентом полезного действия  $\eta = 90\%$  и геотермальный тепловой насос с вертикальным коллектором мощностью 8,2 кВт и коэффициентом преобразования теплового насоса  $COP=2,5$ .

#### Выбор установок с учетом климатических и практических условий

*Тепловой насос.* На современном рынке теплотехнической продукции тепловой насос представлен в широком ассортименте в зависимости от источника энергии [2, 14]. По результатам сравнения, отраженного в таблице, для исследования утверджен именно геотермальный тепловой насос замкнутого типа. В свою очередь, он может быть представлен в четырех вариантах: с горизонтальным и вертикальным коллектором, водным коллектором и с непо-

Типы тепловых насосов в зависимости от источников энергии

Источники энергии		Тепловые насосы
Воздух	–	Климатические условия существенно отличаются от среднеевропейских. Например, интегральная характеристика $D'_d$ отопительного периода для Санкт-Петербурга составляет $D'_d = (t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}) T_{\text{от}} = (20 - (-1,8)) 220 = 4796$ °С сут., в то время как для Дании — 2779 °С сут., Германии — 3163 °С сут. [9, 10]. По этим характеристикам судят о производительности теплового насоса: чем больше число $D'_d$ у рассматриваемой территории, тем менее выгодно устанавливать там тепловой насос [14]
Грунт	+	Обычно дополняется умеренным использованием электроэнергии. При этом применение только электроэнергии необходимо при наружных температурах ниже –25 °С. При более высоких температурах (от +10 °С) используется режим автономной работы
Грунтовые воды	–	Нет гарантии, что в условиях той или иной местности будут обеспечены необходимый объем и качество грунтовых вод. Условия эксплуатации усложняются тем, что температура грунтовых вод должна быть не ниже +7 °С, а это невозможно в климатических условиях Ленинградской области [23]

средственным теплообменом. Недостаток горизонтального коллектора — распределение труб кольцами или по кривой гармонической траектории в подземном слое занимает от трети до половины рассматриваемого участка в зависимости от мощности и исключает возможность распространения сельскохозяйственных культур на поверхности земли непосредственно над коллектором. В связи с ограниченными по площади условиями использование вертикального коллектора более целесообразно.

*Пеллетный комбо-бойлер.* На рис. 1 приведены данные о средней стоимости топлива.

Наряду с энергией грунта, твердое топливо (пеллеты) и централизованный газ — самые недорогие виды источников энергии, соответствующие поставленной задаче как в экономическом, так и в экологическом планах.

В сравнении, производимом в данной статье, не рассматривается применение магистрального газа, несмотря на то, что стоимость и происхождение ресурса «говорят сами за себя». Точное расположение объекта условной модели неизвестно, а от этого фактора существенно зависит стоимость прокладки газопровода к населенному пункту. Более того, в нашем исследовании делается основной акцент на максимальную автономность установки, а прокладка газопровода делает обитателей дома зависимыми от магистральной сети.

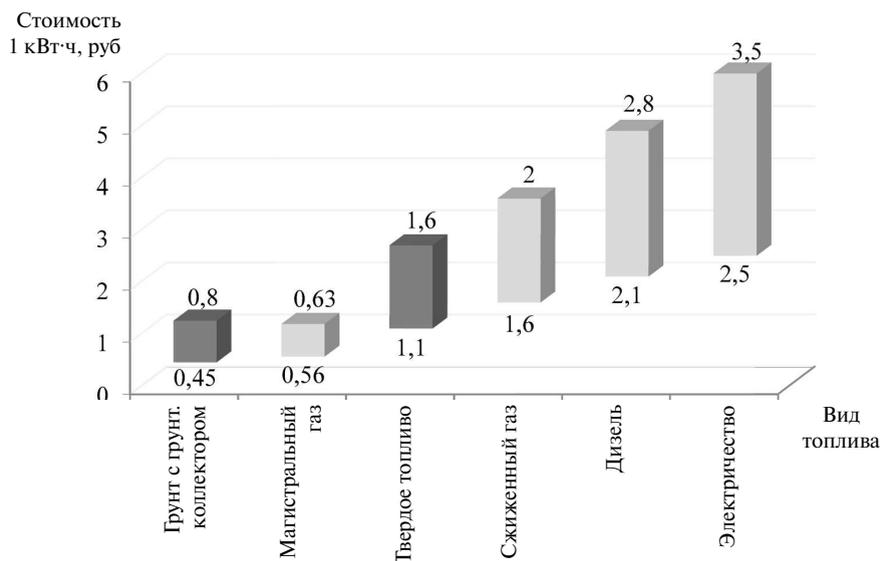


Рис. 1. Стоимость 1 кВт·ч [9, 10]

### Экономический анализ

*Капитальные затраты* (рис. 2):  
для пеллетного комбо-бойлера:

$$C_{пб} = c_1 + c_2 + c_3 =$$

$$= 130000 + 18000 + 19500 = 167500 \text{ руб.} =$$

$$= 3722 \text{ €},$$

где  $c_1$  — стоимость бойлера;  $c_2$  — стоимость бункера для хранения пеллет;  $c_3$  — стоимость установки (15 % от стоимости бойлера);

*для геотермального теплового насоса с вертикальным коллектором*

$$C_{гтн} = c_a + c_b + c_c =$$

$$= 498508 + 74776 + 240000 = 813284 \text{ руб.} =$$

$$= 18073 \text{ €}.$$

Здесь  $c_a$  — стоимость теплового насоса (включая среднюю стоимость доставки или покупку на вторичном рынке с учетом НДС = 18 %);  $c_b$  — стоимость установки (15 % от стоимости установки);  $c_c$  — общая стоимость теплообменника (4 вертикальных шпура, углубленных в грунт на 60 метров).

*Эксплуатационные затраты* (рис. 3):  
для пеллетного комбо-бойлера

$$O_{пб} = m + c_f =$$

$$= 5025 + 60000 = 65025 \text{ руб.} = 1327 \text{ €}.$$

где  $m$  — эксплуатационные расходы (3 % от капитальных затрат);  $c_f$  — стоимость топлива в год,

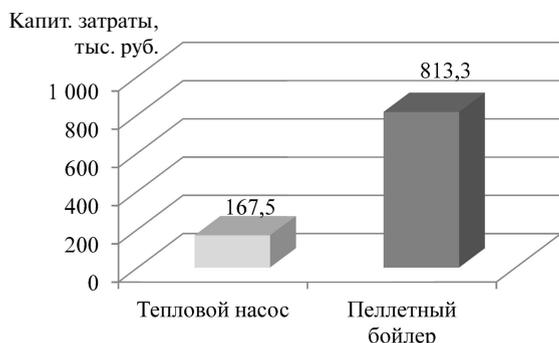


Рис. 2. Капитальные затраты

$$c_f = c_p \times z_p = 6000 \times 10 = 60000 \text{ руб.} = 1225 \text{ €},$$

$c_p$  — стоимость пеллет за одну тонну;  $z_p$  — средний годовой объем затрачиваемого топлива;

для геотермального теплового насоса с вертикальным коллектором

$$O_{г.т.н.} = m + c_e = 24398 + 17200 = 41598 \text{ руб.} = 849 \text{ €}.$$

где  $c_e$  — стоимость электричества за год,

$$c_e = \frac{Q_a \times p_e}{\eta_v} = \frac{20000 \times 2,15}{2,5} = 17200 \text{ руб} = 351 \text{ €};$$

$Q_a$  — годовое потребление энергии;  $p_e$  — средняя стоимость потребления электроэнергии;  $\eta_v$  — коэффициент преобразования теплового насоса (COP).

Длительность жизненного цикла установки и связь с суммарными затратами. На рис. 4 представлен график линейной зависимости суммарных затрат от времени эксплуатации рассматриваемых установок.

На рис. 4 проиллюстрирован прогноз продолжительности функционирования теплового

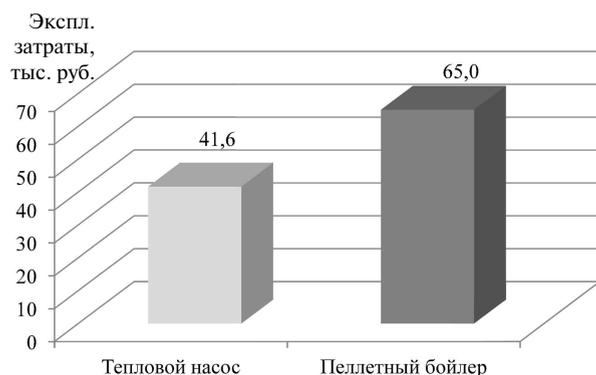


Рис. 3. Эксплуатационные затраты

насоса и пеллетного комбо-бойлера. В среднем жизненный цикл теплового насоса составляет 15 лет [9, 13]. Важно обратить внимание на разницу в суммарных затратах. Если на первом году эксплуатации она незначительна и оценивается в 25 тыс. рублей (510 €), то на конец пятнадцатого года использования разница увеличится почти в 15 раз. В результате итоговые потери могут оказаться серьезными для среднестатистических семей, проживающих в Ленинградской области, годовой доход которых составляет (по данным Федеральной службы государственной статистики за 2013 год) 712 320 тыс. рублей (14 537 €).

Геотермальный тепловой насос, как и пеллетный комбо-бойлер, вполне универсальны при эксплуатации в Ленинградской области. Обычно работа насоса дополняется умеренным использованием электроэнергии. При этом применение только электроэнергии необходимо при наружных температурах ниже  $-25^\circ\text{C}$ . При более высоких температурах (от переходной  $+10^\circ\text{C}$  и выше) используется режим автономной работы. С другой стороны, использование электричества в работе пеллетного комбо-бойлера необходимо прежде всего для осуществления автоматизации процесса работы (подача пеллет из бункера и др.).

Существует теория о том, что тепловые насосы используют низкопотенциальную энергию грунта, и в процессе эксплуатации насоса потенциал грунтового массива уменьшается [22]. Ставится под сомнение полноценная пригодность таких земель для использования в сельскохозяйственных целях через 15 лет эксплуатации насоса, ибо может быть нарушен местный баланс экосистем.

Тепловой насос с вертикальным коллектором и пеллетный комбо-бойлер так или иначе нуждаются в электрической энергии:

в случае использования пеллетного комбо-бойлера электричество обеспечивает автономную работу;

при использовании теплового насоса обеспечивается бесперебойная работа.

Жизненный цикл пеллетного комбо-бойлера намного (более чем на 10 лет) продолжительнее, чем у теплового насоса.

Установка, ремонт и обслуживание установки пеллетного комбо-бойлера проще, чем у теплового насоса, так как она автоматизирована и все ее элементы находятся на поверхности земли.

Пеллетный комбо-бойлер выигрывает у теплового насоса по капитальным затратам в пять раз. Но эксплуатационные затраты теплового насоса на 36 % меньше, чем у пеллетного комбо-бойлера.

Суммарные затраты демонстрируют, что пеллетный комбо-бойлер не только служит дольше, но он по расчетным данным после 15 лет эксплуатации дешевле на 366 тысяч рублей (7470 €).

Основываясь на проведенном сравнительном анализе тепловых установок для загородного жилого дома, расположенного в окрестностях Санкт-Петербурга, авторы отдают предпочтение пеллетному комбо-бойлеру.



Рис. 4. Суммарные затраты и жизненный цикл установок (—◆— П.Б.; —▲— Т.Н.)

### Практические рекомендации

Важно ответственно подходить к выбору тепловой установки. В наши дни особое внимание следует уделять инновациям, тщательно изучая

все свойства той или иной предлагаемой на рынке установки, с целью выбрать из них оптимальную по цене и наиболее качественную, экологически чистую.



Рис. 5. Карта производителей тепловых насосов в России и Европе (месторасположение производств выделено точками)

Потребитель должен оценить предстоящие затраты на установку и эксплуатацию оборудования и сравнить возможные варианты затрат на примере представленного в статье расчета.

Потребителям следует принять во внимание то, что более 85 % производителей тепловых насосов находятся в странах Европейского Союза, а именно в Великобритании, Голландии, Польше, Швеции, Финляндии, Германии, и др.

Стоимость теплового насоса в России возрастает прямопропорционально расстоянию, а следовательно, и стоимости доставки. Есть предположение, что в будущем ситуация на российском рынке теплотехники в области производства тепловых насосов изменится в лучшую сторону, и тогда капитальные затраты на тепловой насос станут значительно ниже, что будет более благоприятно сказываться на потребительском спросе.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бабич А.С., Сотникова О.А., Головинский П.А.** Аккумулирование теплоты в геологических системах теплоснабжения с тепловыми насосами // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2009. № 1. С. 50–57.
2. **Милова Л.** Геотермальные тепловые насосы. Обзор рынка // Сантехника, отопление, кондиционирование. 2012. № 10 (130). С. 34–39.
3. **Райх В.** Геотермальные тепловые насосы // Сантехника, отопление, кондиционирование. 2011. № 1 (109). С. 80–83.
4. **Кутилов В.** Геотермальные тепловые насосы // Сантехника, отопление, кондиционирование. 2012. № 6 (126). С. 58–61.
5. **Почекуни П.С., Гульков А.Н.** Особенности теплоснабжения с использованием геотермальных тепловых насосов // Вологдинские чтения. 2003. № 37. С. 49–51.
6. **Бызов А.П.** Оценка вероятности поражения человека тепловым излучением с учетом перемещения в безопасную зону // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2011. № 3(130). С. 247–252.
7. **Кондратьева Е.А., Кондратьев А.А., Сергеев В.В., Симонов А.М.** Выбор параметров тепловых насосов с центробежными компрессорами // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 4(183), Т. 1. С. 128–135.
8. **Kaydalova N., Kryukov V.** Comparison of heat pump system and boiler plant for one-family house. Heat sources in one-family house / Thesis of Mikkeli University of applied Sciences. Building Services Engineering. 2010. P. 1–43.
9. **Спиридонова Т.И., Курасова Е.В., Дуванова И.А., Вилинская А.О.** Эффективная тепловая установка для загородного дома северо-западного региона // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2013. №7(12). С. 124–132.
10. **Spiridonova T.I., Kurasova E.V., Duvanova I.A., Vilinskaya A.O.** Energy efficiency heating installation of country house in Northern-western region // Construction of Unique Buildings and Structures. 2013. №7 (12). P. 133–140.
11. **Morten B. Clarke.** Towards an intermittency-friendly energy system: Comparing electric boilers and heat pumps in distributed cogeneration // Applied Energy. Vol.91. Issue 1. 2012. Pp. 349–365.
12. **Daniel Setrak Sowmya, Racine T.A. Prado.** Assessment of energy efficiency in electric storage water heaters // Energy and Buildings. Vol. 40. Issue 12. 2008. Pp. 2128–2132.
13. **Chua K.J., Chou S.K., Yang W.M.** Advances in heat pump systems: A review // Applied Energy. 2010. Vol. 10. Pp. 3612–3622.
14. **Семёнов Б.А., Соловьев В.А.** Проблемы и особенности использования грунтовых тепловых насосов для автономного теплоснабжения объектов в центральных регионах России // Вестник СГТУ. 2009. №1. С. 167–172.
15. **Недвиг П.Н.** Возможности использования тепловых аккумуляторов и низкопотенциального тепла земли при отоплении индивидуальных домов // Инженерно-строительный журнал. 2010. №3. С. 11–14.
16. **Feng Li, Guozhong Zheng, Zhe Tia.** Optimal operation strategy of the hybrid heating system composed of centrifugal heat pumps and gas boilers // Energy and Buildings. Vol. 58. 2013. Pp. 27–36.
17. **Hepbasli A, Balta MT.** A study on modeling and performance assessment of a heat pump system for utilizing low temperature geothermal resources in buildings // Building Environment. 2007. №42 (10). Pp. 3747–56.
18. **Long J.Y., Zhu D.S.** Numerical and experimental study on heat pump waterheater with PCM for thermal storage // Energy Buildings. 2008. №40(4). Pp. 666–72.
19. **Бутузов В.А.** Перспективы применения тепловых насосов // Промышленная энергетика. 2005. № 10. С. 8–15.
20. **Калинин М.И., Кудрявцев Е.П., Баранов А.В.** Методы расчета и рекомендации по эффективному использованию приповерхностных геотермальных ресурсов в центральных регионах России // Новости теплоснабжения. 2007. № 10. С. 26–33.
21. Комитет по природным ресурсам Ленинградской области [электронный ресурс] <http://www.nature.lenobl.ru/> (дата обращения 13.03.2014)

22. **Штым А.С., Журмилова И.А., Савина Т.Г.** Восстановление энергетического потенциала системы теплосбора геотермальных тепловых насосов //

Вологодские чтения. 2012. № 80. С. 51–53.

23. **СНиП 23–01–99\***. Строительная климатология.

## REFERENCES

- Babich A.S., Sotnikova O.A., Golovinskiy P.A.** Akkumulirovaniye teploty v geliogruntovykh sistemakh teplosnabzheniya s teplovymi nasosami. *Nauchnyy vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitelstvo i arkhitektura*. 2009. № 1. S. 50–57. (rus.)
- Milova L.** Geotermalnyye teplovyye nasosy. Obzor rynka. *Santekhnika, otopleniye, konditsionirovaniye*. 2012. № 10 (130). S. 34–39. (rus.)
- Raykh V.** Geotermalnyye teplovyye nasosy. *Santekhnika, otopleniye, konditsionirovaniye*. 2011. № 1 (109). S. 80–83. (rus.)
- Kutilov V.** Geotermalnyye teplovyye nasosy. *Santekhnika, otopleniye, konditsionirovaniye*. 2012. № 6 (126). S. 58–61. (rus.)
- Pochekuni P.S., Gulkov A.N.** Osobennosti teplosnabzheniya s ispolzovaniyem geotermalnykh teplovykh nasosov. *Vologdinskiye chteniya*. 2003. № 37. S. 49–51. (rus.)
- Byzov A.P.** Otsenka veroyatnosti porazheniya cheloveka teplovym izlucheniyyem s uchetom peremeshcheniya v bezopasnuyu zonu. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2011. № 3(130). S. 247–252. (rus.)
- Kondratyeva Ye.A., Kondratyev A.A., Sergeev V.V., Simonov A.M.** Vybory parametrov teplovykh nasosov s tsestrobezhnymi kompressorami. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2013. № 4(183), T. 1. S. 128–135. (rus.)
- Kaydalova N., Kryukov V.** Comparison of heat pump system and boiler plant for one-family house. Heat sources in one-family house. *Thesis of Mikkeli University of applied Sciences. Building Services Engineering*. 2010. P. 1–43.
- Spiridonova T.I., Kurasova Ye.V., Duvanova I.A., Vilinskaya A.O.** Effektivnaya teplovaya ustanovka dlya zagorodnogo doma severo-zapadnogo regiona. *Stroitelstvo unikalnykh zdaniy i sooruzheniy*. 2013. №7(12). S. 124–132. (rus.)
- Spiridonova T.I., Kurasova E.V., Duvanova I.A., Vilinskaya A.O.** Energy efficiency heating installation of country house in Northern-western region. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2013. №7 (12). P. 133–140.
- Morten B. Blarke.** Towards an intermittency-friendly energy system: Comparing electric boilers and heat pumps in distributed cogeneration. *Applied Energy*. Vol. 91. Issue 1. 2012. P. 349–365.
- Daniel Setrak Sowmya, Racine T.A. Prado.** Assessment of energy efficiency in electric storage water heaters. *Energy and Buildings*. Vol. 40. Issue 12. 2008. Pp. 2128–2132.
- Chua K.J., Chou S.K., Yang W.M.** Advances in heat pump systems: A review // *Applied Energy*. 2010. Vol. 10. Pp. 3612–3622.
- Semenov B.A., Solovyev V.A.** Problemy i osobennosti ispolzovaniya gruntovykh teplovykh nasosov dlya avtonomnogo teplosnabzheniya obyektov v tsestralnykh regionakh Rossii. *Vestnik SGTU*. 2009. №1. S. 167–172.
- Nedviga P.N.** Vozmozhnosti ispolzovaniya teplovykh akkumulyatorov i nizkopotentsialnogo tepla zemli pri otoplenii individualnykh domov. *Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal*. 2010. №3. S. 11–14.
- Feng Li, Guozhong Zheng, Zhe Tia.** Optimal operation strategy of the hybrid heating system composed of centrifugal heat pumps and gas boilers. *Energy and Buildings*. Vol. 58. 2013. Pp. 27–36.
- Hepbasli A., Balta M.T.** A study on modeling and performance assessment of a heat pump system for utilizing low temperature geothermal resources in buildings. *Building Environment*. 2007. №42 (10). Pp. 3747–56.
- Long J.Y., Zhu D.S.** Numerical and experimental study on heat pump waterheater with PCM for thermal storage. *Energy Buildings*. 2008. №40(4). Pp. 666–72.
- Butuzov V.A.** Perspektivy primeneniya teplovykh nasosov. *Promyshlennaya energetika*. 2005. № 10. S. 8–15. (rus.)
- Kalinin M.I., Kudryavtsev Ye.P., Baranov A.V.** Metody rascheta i rekomendatsii po effektivnomu ispolzovaniyu pripoverkhnostnykh geotermalnykh resursov v tsestralnykh regionakh Rossii. *Novosti teplosnabzheniya*. 2007. № 10. S. 26–33. (rus.)
- Komitet po prirodnykh resursam Leningradskoy oblasti [elektronnyy resurs] <http://www.nature.lenobl.ru/> (data obrashcheniya 13.03.2014) (rus.)
- Shtym A.S., Zhurmiлова I.A., Savina T.G.** Vostanovleniye energeticheskogo potentsiala sistemy teplosbora geotermalnykh teplovykh nasosov. *Vologdinskiye chteniya*. 2012. № 80. S. 51–53. (rus.)
- СНиП 23–01–99\***. Stroitel'naya klimatologiya.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ПЕТРОСОВА Дарья Владимировна** — кандидат технических наук старший преподаватель кафедры гидравлики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: d\_kuzmenko@list.ru

**СПИРИДОНОВА Татьяна Игоревна** — студент кафедры строительства уникальных зданий и сооружений Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: spiridonova-mail@yandex.ru

**ДУВАНОВА Ирина Александровна** — студент кафедры строительства уникальных зданий и сооружений Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: duvanova.i@mail.ru

### AUTHORS

**PETROSOVA Darya V.** — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: d\_kuzmenko@list.ru

**SPIRIDONOVA Tatiana I.** — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: spiridonova-mail@yandex.ru

**DUVANOVA Irina A.** — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: duvanova.i@mail.ru



УДК 622.4:62–5

*О.Б. Шонин, В.С. Пронько*

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ГЛАВНЫХ ВЕНТИЛЯТОРНЫХ УСТАНОВОК ШАХТ  
НА ОСНОВЕ МНОГОЦЕЛЕВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ ПРИВОДОМ**

*O.B. Shonin, V.S. Pronko*

**ENERGY EFFICIENCY IMPROVEMENT OF MINE  
MAIN FAN INSTALLATIONS BY MEANS  
OF THE MULTIPURPOSE CONTROL SYSTEM FOR VFD**

На базе анализа ресурсов энергосбережения в энергоемкой системе проветривания шахт обоснована многоцелевая система автоматического управления частотно-регулируемым приводом вентилятора главного проветривания, обеспечивающая минимизацию потерь в различных сечениях энергетического потока. На основе моделей вентиляторов и сети дана оценка энергетического эффекта от использования частотного способа регулирования. Для осевых вентиляторов предложена методика выбора оптимальных параметров комбинированного управления, позволяющая получить максимально возможный КПД.

ШАХТНАЯ ВЕНТИЛЯЦИЯ; ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ; ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД; КОМБИНИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВЕНТИЛЯТОРОМ.

The paper analyzes energy saving potentials in a mine ventilation system of high power consumption in order to substantiate multipurpose control system for a main fan adjustable speed drive to minimize energy losses at different cross-sections of an energy flow. Modes of mine fans at minimum energy losses due to frequency control application have been derived on the basis of modeling of fan operational characteristics and variation of equivalent ventilation system resistance during the life time of a ventilator. An iterative search method for choosing the optimal parameters of complex axial fan control has been proposed to achieve maximum available efficiency at the specific mode of fan operation.

MINE VENTILATION; ENERGY SAVING; VARIABLE FREQUENCY ELECTRIC DRIVES; COMBINED FAN CONTROL.

Проветривание подземных выработок — одна из энергоемких операций горного производства. Затраты на вентиляцию могут достигать до 50 % общей энергии, потребляемой горным предприятием, а доля этих затрат в себестоимости продукции — до 30 %. Годовая плата за электроэнергию на проветривание может составлять до 40 % стоимости главной вентиляционной установки (ГВУ). Одна из причин высоких затрат на проветривание — принятая практика работы ГВУ с постоянной производительностью без учета реальной потребности шахты в свежем воздухе. Другая причина — низкий эксплуатационный КПД вентиляторов главного проветривания

(ВГП), значение которого 30–40 % находится вне области промышленного использования [1, 2].

При существующих тенденциях роста цен на электроэнергию и увеличения глубины залегания разрабатываемых месторождений низкая энергетическая эффективность системы вентиляции шахт становится одним из основных факторов, влияющих на экономические показатели горного предприятия. Поэтому выявление возможностей по снижению затрат на проветривание и разработка соответствующих мер и средств — важная и актуальная задача по повышению рентабельности производства и конкурентоспособности предприятия. Оче-

видно, что меры по энергосбережению не должны противоречить регламентирующим документам [3].

Цель нашей работы — анализ ресурсов энергосбережения в системе шахтной вентиляции, разработка многоцелевой системы автоматического управления ВГП, обеспечивающей минимизацию потерь в различных сечениях энергетического потока, и рекомендаций по поддержанию оптимальных режимов ВГП на протяжении срока эксплуатации вентиляторов.

### Многоцелевая система автоматического управления ВГП

Повышение энергетической эффективности ГВУ прежде всего связано с реализацией схемы вентиляции в соответствии с реальными потребностями шахты в проветривании, которая бы исключала излишнее поступление воздуха в шахту [4]. Реализация такого подхода возможна на основе эффективной входящей в состав шахтной системы управления процессом добычи полезных ископаемых системы автоматического управления ГВУ, которая обеспечивает:

динамику проветривания в соответствии с потребностью шахты в свежем воздухе в за-

висимости от числа рабочих в шахте, особенностей ведения взрывных работ, длительности работы дизельного оборудования, проведения ремонтных работ, возникновения аварийных ситуаций и т.д.;

компенсацию возмущений, вносимых колебаниями температуры воздуха на поверхности, случайными изменениями, связанными с движением внутришахтного транспорта, открытием/закрытием дверей и перемычек;

эффективный режим проветривания в соответствии с изменением эквивалентного сопротивления вентиляционной сети шахты в процессе освоения разрабатываемого месторождения.

Другая составляющая повышения эффективности ГВУ связана с выявлением ресурсов энергосбережения и разработкой мер по минимизации потерь во всех элементах системы передачи и преобразования энергии «распределительная сеть — преобразователи частоты — двигатель — вентилятор — вентиляционная сеть» [5, 6]. Для решения этой задачи рассматривается система многоцелевого управления частотно-регулируемым приводом ВГП, показанная на рис. 1.

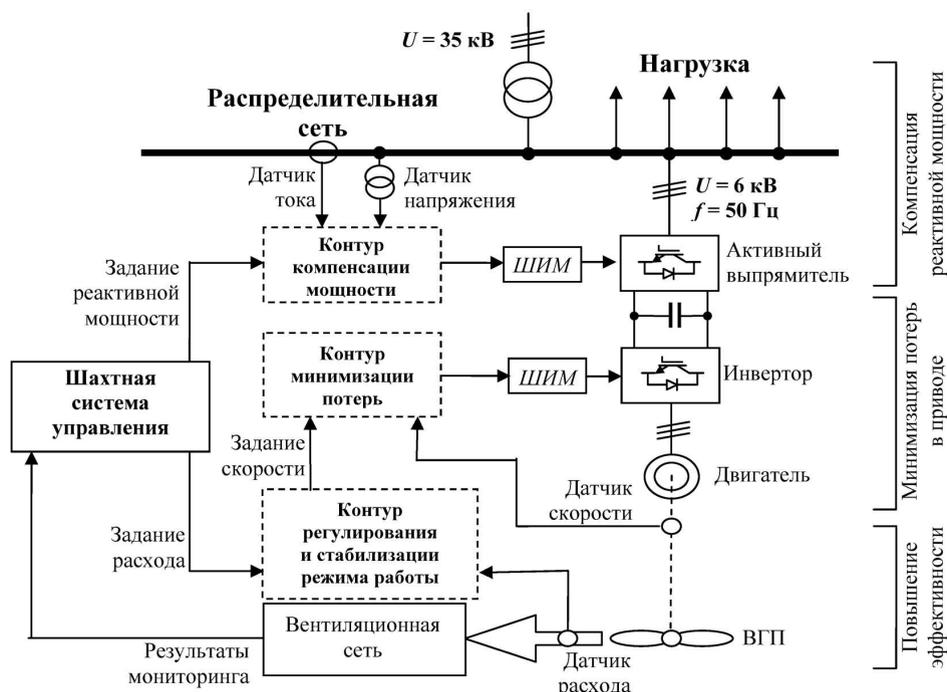


Рис. 1. Структура многоконтурной системы управления частотно-регулируемым вентилятором главного проветривания

Привод центробежного или осевого вентилятора осуществляется высоковольтным асинхронным двигателем, который питается от многоуровневых преобразователей частоты. Входной преобразователь выполнен по топологии активного выпрямителя и подключен непосредственно к сети 6 кВ без согласующего трансформатора. В пределах пропускной способности установки активный выпрямитель используется для коррекции показателей качества энергии сети в соответствии с сигналами контура компенсации возмущений в сети. Активный выпрямитель может выполнять функции компенсатора реактивной мощности, активного фильтра для подавления высших гармоник, компенсатора асимметрии и провалов напряжения [7]. Режим проветривания задается шахтной системой управления в соответствии с текущим состоянием технологического процесса. Режим реализуется системой скалярного частотного управления приводом, в которой используются энергосберегающие алгоритмы, обеспечивающие минимизацию потерь энергии в преобразователе частоты и двигателе.

Наиболее значимый энергосберегающий эффект дает минимизация потерь в ВГП за счет учета в системе управления многих факторов, влияющих на эксплуатационный КПД и его изменение в течение срока службы вентилятора [8]. К таким факторам относятся: тип вентилятора, максимальная производительность, координаты точки с наибольшим КПД, способ регулирования производительности вентилятора, траектория движения рабочей точки в системе координат «давление — производительность» в пределах срока службы вентилятора. Ниже дан сравнительный анализ энергетической эффективности способов управления центробежными вентиляторами серии ВЦД и осевыми вентиляторами серии ВОД.

#### Аэродинамический и частотный способы управления режимом вентилятора

Характеристики центробежных вентиляторов представляют собой зависимости давления  $H$  и мощности  $P_s$  на валу от производительности  $Q$  при различных положениях лопаток рабочего колеса или различных углах наклона лопаток направляющего аппарата  $\alpha$ . Для аналитических расчетов использовались полиномиальные аппроксимации экспериментальных данных

$$H(Q) = a_0 Q^2 + a_1 Q + a_2; \quad P_s(Q) = b_0 Q^2 + b_1 Q + b_2; \\ \eta(Q) = H \cdot Q / P_s. \quad (1)$$

Коэффициенты полиномов принимают различные значения в зависимости от угла  $\alpha$  наклона лопаток, который изменяется в диапазоне 0; 10; ... 70°. Полученные характеристики соответствуют номинальной скорости вращения вала вентилятора.

Для получения характеристик частотного способа управления вентилятором воспользуемся формулами подобия [9]

$$Q = Q_0 \bar{\omega}; \quad H = H_0 \bar{\omega}^2; \quad P = P_0 \bar{\omega}^3, \quad (2),$$

где  $\bar{\omega} = \omega / \omega_0$ ,  $P_0$ ,  $H_0$ ,  $Q_0$  — параметры режима при номинальной скорости вращения  $\omega_0$ .

При заданном значении угла  $\alpha$  имеем

$$H(Q, \bar{\omega}) = a_0 Q^2 + a_1 Q \bar{\omega} + a_2 \bar{\omega}^2; \\ P_s(Q, \bar{\omega}) = b_0 Q^2 \bar{\omega} + b_1 Q \bar{\omega}^2 + b_2 \bar{\omega}^3. \quad (3)$$

Для центробежного вентилятора ВЦД-32М с координатами номинального режима  $\alpha = 0^\circ$ ,  $H_0 = 4200$  Па,  $Q_0 = 200$  м<sup>3</sup>/с,  $P_{s0} = 1,2$  МВт,  $\eta_0 = 84\%$  коэффициенты полиномов принимают значения  $a_0 = -0,08$ ,  $a_1 = 13,3$ ,  $a_2 = 4920$  и  $b_0 = -9,42 \cdot 10^{-3}$ ,  $b_1 = 4,64$ ,  $b_2 = 487,5$ .

Характеристики вентилятора, построенные по формулам (1) при постоянной частоте вращения и различных углах наклона лопаток, показаны на рис. 2. Характеристики вентилятора при частотном регулировании производительности в соответствии с формулой (3) представлены на рис. 3.

Из графика зависимости КПД вентилятора от производительности (рис. 2, в) видно, что при аэродинамическом способе регулирования режима проветривания увеличение угла наклона приводит к падению КПД за счет роста аэродинамических потерь. При частотном способе регулирования (рис. 3, в) максимальное значение КПД вентилятора (84%) остается неизменным во всем диапазоне регулирования.

При известном аэродинамическом сопротивлении  $R$  вентиляционной сети режим работы вентилятора определяется точкой пересечения характеристики вентилятора с характеристикой сети. Угол наклона лопаток, обеспечивающий требуемый режим проветривания, находится из уравнения

$$a_0(\alpha)Q^2 + a_1(\alpha)Q + a_2(\alpha) = RQ^2, \\ \omega = \omega_0 = \text{const}. \quad (4)$$

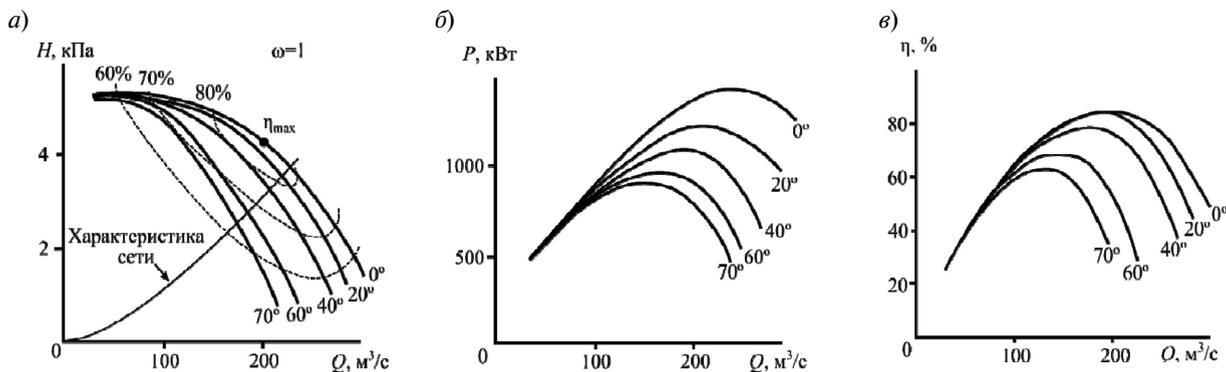


Рис. 2. Характеристики центробежного вентилятора ВЦД-32М при аэродинамическом способе регулирования: давление (а), мощность на валу (б) и КПД вентилятора (в)

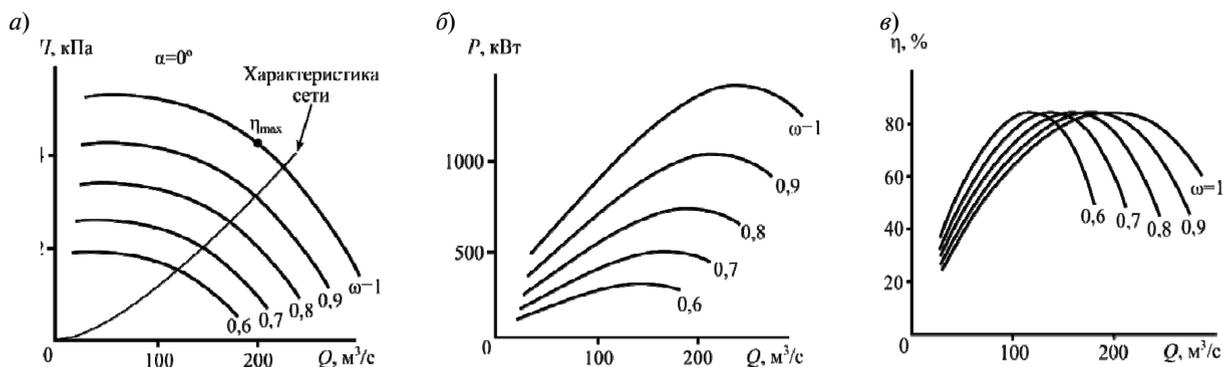


Рис. 3. Характеристики центробежного вентилятора ВЦД-32М при частотном способе регулирования: давление (а), мощность на валу (б) и КПД вентилятора (в)

Как правило, при аэродинамическом регулировании вентилятор из-за конструктивных особенностей имеет несколько фиксированных положений лопаток без возможности плавного регулирования. В таком случае не всегда возможно точно установить необходимый режим проветривания, и вентилятору приходится работать с завышенной производительностью.

При частотном регулировании требуемая скорость определяется из уравнения

$$a_0 Q^2 + a_1 Q \omega + a_2 \omega^2 = R Q^2, \quad \alpha = \text{const.} \quad (5)$$

Изменение режима проветривания при механическом способе управления достигается перемещением рабочей точки вдоль характеристики сети за счет варьирования угла наклона лопаток (см. рис. 2, а). При частотном способе управления перемещение рабочей точки осуществляется за счет изменения частоты вращения (см. рис. 3, а). В первом случае регулирование сопровождается изменением

КПД вентилятора, во втором случае КПД в соответствии с формулами подобия (2) остается постоянной величиной.

Если стоит задача поддержания требуемого значения потока  $Q_a$  при изменении сопротивления сети  $R = R_a \pm \Delta R$ , то стабилизация режима может быть осуществлена путем коррекции частоты вращения в пределах  $\omega = \omega_a \pm \Delta\omega$ , как показано на рис. 4. Приращение частоты  $\Delta\omega$  находится из уравнения

$$a_2 \Delta\omega^2 + \Delta\omega (2\omega_a a_2 + a_1 Q_a) - \Delta R Q_a^2 = 0. \quad (6)$$

Стабилизация потока осуществляется системой управления приводом (см. рис. 1) по сигналу ПИ-регулятора, вырабатывающего сигнал управления при появлении ошибки  $\Delta Q = Q - Q_a$  между действительным  $Q$  и требуемым  $Q_a$  значениями производительности.

Произведем сравнительную оценку эффективности методов управления на примере 10-летнего цикла работы вентилятора на одной

из шахт объединения «Воркутауголь». В течение срока службы ГВУ происходит значительное увеличение числа и глубины горных выработок, что приводит к росту требуемой производительности вентилятора. Вентилятор выбирается так, чтобы в конце срока службы он вышел на номинальную производительность. В связи с этим большую часть времени ГВУ работает с неполной нагрузкой.

Годовые рабочие точки получим, усреднив требуемый режим работы вентилятора за год. Движение таких точек для рассматриваемого примера показано на рис. 5. Из рисунка видно, что максимальная эффективность ГВУ достигается в том случае, когда траектория движения рабочих точек за время срока службы вентилятора совпадает с линией максимального КПД. На практике такие случаи встречаются редко и возможны, как правило, при проектировании специального вентилятора.

На рис. 6, а приведены результаты расчета мощности  $P_s$  на валу вентилятора ВЦД-32М при аэродинамическом (кривая 1) и частотном (кривая 2) способе управления. Расчет выполнен для случая, когда режим проветривания в конце срока службы соответствует рабочей точке вентилятора с максимальным значением КПД.

Выбор двигателя для привода осуществляется исходя из максимальной расчетной мощности на валу  $P_s = 1025$  кВт с коэффициентом запаса  $K_p = 1,1$ . В случае аэродинамического способа регулирования принят синхронный двигатель, позволяющий обеспечивать коэффициент мощности  $\chi = \cos \phi = 1$ . При использовании частотного регулирования использован асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, обладающий конструктивной простотой и большей надежностью. Из-за высокого уровня напряжения 6 кВ преобразователь частоты выполнен по многоуровневой структуре [10]. Основной недостаток асинхронного привода — низкий коэффициент мощности — устраняется за счет использования активного выпрямителя.

Энергосберегающий эффект от применения частотного способа рассчитывался с учетом зависимости КПД привода от режима работы. В выбранном синхронном электроприводе СДВ 15–64–10 1250 кВт при изменении нагрузки в диапазоне регулирования КПД практически не

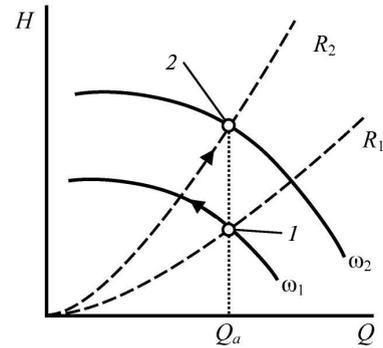


Рис. 4. Стабилизация потока при флуктуациях сопротивления сети

изменяется и остается равным номинальному значению 95 %.

В асинхронном электроприводе HXR 560LU10 1230 кВт фирмы АВВ с уменьшением частоты вращения до  $0,6\omega_0$  происходит падение КПД с 97 до 87 % [11]. На рис. 6, б показано изменение общего КПД ВГП  $\eta$ , равного произведению КПД двигателя и КПД вентилятора. Энергосберегающий эффект за весь срок службы составляет

$$\Delta W = \int_0^T \Delta P(t) dt \approx 13,5 \cdot 10^6 \text{ кВт}\cdot\text{ч};$$

$$\Delta P = P_a(1/\eta_1 - 1/\eta_2); P_a = HQ.$$

Здесь индекс 1 относится к аэродинамическому способу управления, индекс 2 — к регулированию производительности изменением скорости вращения вала вентилятора.

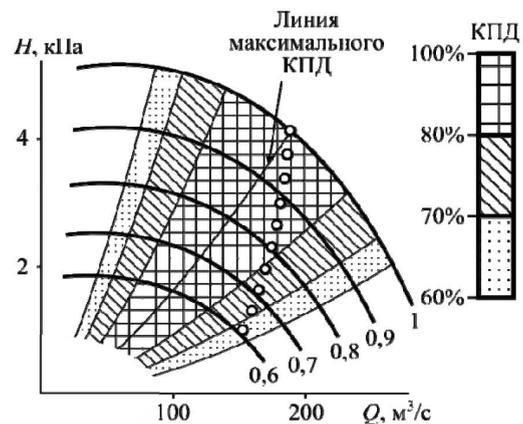


Рис.5. КПД вентилятора ВЦД-32М при частотном управлении и изменение рабочих точек проветривания за время эксплуатации вентилятора

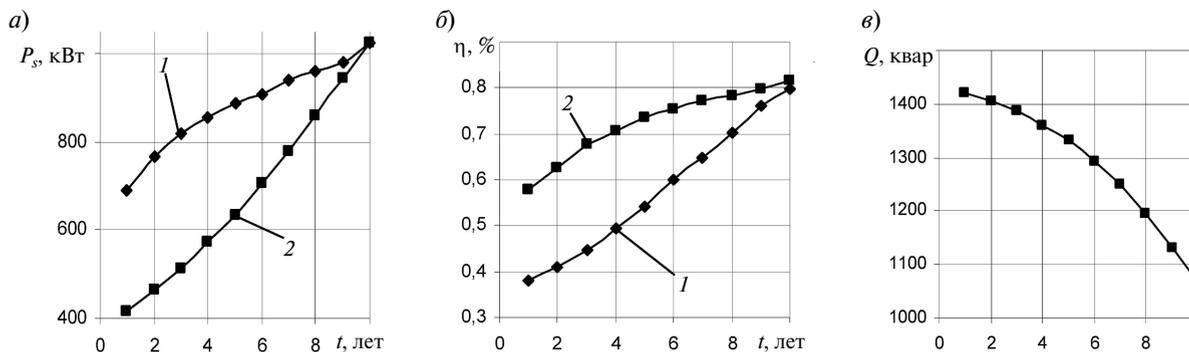


Рис. 6. Изменение мощности вентилятора (а), КПД ГВУ (б) и ресурса реактивной мощности, генерируемой активным выпрямителем, (в) при механическом (1) и частотном управлении (2)

Из закона подобия (2) следует, что при диапазоне регулирования скорости 0,6–1 привод вентиляционной установки загружен на начальном этапе эксплуатации незначительно, до уровня 25 % от номинальной мощности. Для полного использования установленной мощности входной преобразователь целесообразно применять не только для питания привода, но и для коррекции показателей качества напряжения питающей сети, в частности для компенсации реактивной мощности других потребителей. С этой целью в качестве входного преобразователя привода следует использовать активный выпрямитель. Ресурс реактивной мощности  $Q_{VAR}(t) = \sqrt{S^2 - P(t)^2}$ , которую способен генерировать активный выпрямитель при расчетной полной мощности электропривода  $S = 1,5$  МВА, показан на рис. 6, в. Реализация высоковольтных преобразователей на основе многоуровневой структуры позволяет отказаться от согласующе-

го трансформатора и обеспечить тем самым дополнительный экономический эффект.

### Комбинированный способ регулирования

Для центробежных вентиляторов точка с максимальным значением КПД находится на кривой  $H(Q)$ , соответствующей начальному значению угла направляющего аппарата  $\alpha_m = 0^\circ$  при изменении угла в пределах 0; 10; ... 70° (см. рис. 2, а). Для осевых вентиляторов эта точка лежит на характеристике  $H(Q)$ , соответствующей среднему значению угла наклона лопаток рабочего колеса ( $\alpha_m = 50^\circ$ ) при изменении этого параметра в пределах 30; 35; ... 65°.

Указанная особенность характеристик осевых вентиляторов показывает, что для получения максимального значения КПД целесообразно использовать комбинированный способ управления, при котором оптимальный режим достигается при определенном сочетании регулируемых параметров  $\alpha$  и  $\omega$ .

Сравнение частотного и комбинированного методов управления режимом проветривания производилось на примере осевого вентилятора ВО-22 со следующими координатами точки максимального КПД:  $\eta_0 = 88\%$ ,  $H_0 = 2500$  Па,  $Q_0 = 100$  м<sup>3</sup>/с,  $P_{s0} = 800$  кВт. Коэффициенты аппроксимирующих полиномов (1), (3) при угле  $\alpha = 50^\circ$  принимают значения:  $a_0 = -0,066$ ,  $a_1 = 12,124$ ,  $a_2 = -263,6$  и  $b_0 = -0,055$ ,  $b_1 = 12,04$ ,  $b_2 = -279,3$ . Характеристики осевого вентилятора ВО-22  $H(Q)$  для значений угла  $\alpha = 30; 35; \dots 65^\circ$  представлены на рис. 7. На том же рисунке показаны зоны постоянного КПД при частотном способе регулирования и положение годовых рабочих точек за 10-летний цикл работы.

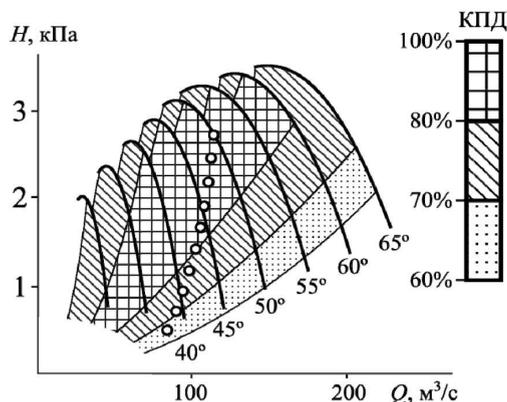


Рис. 7. КПД осевого вентилятора ВО-22 с указанием рабочих точек за 10-летний цикл работы

Поиск комбинаций параметров регулирования  $\alpha$ ,  $\omega$ , обеспечивающих максимальный КПД для каждой рабочей точки, осуществлялся автоматически с помощью программы, алгоритм которой приведен на рис. 8.

В качестве исходных данных расчета использовалась совокупность характеристик вентилятора  $\{H_j(Q); P_j(Q)\}$ , полученных при различных углах  $\alpha_j$  наклона лопаток, и траектория движения рабочих точек  $\{H_i; Q_i\}$ , каждая из которых соответствовала  $i$ -му году срока службы вентилятора. Для каждой точки  $H_i, Q_i$  вычислялось аэродинамическое сопротивление  $R_i = H_i / Q_i^2$ . Для каждой характеристики  $H_j(Q)$ , соответствующей углу  $\alpha_j$ , из уравнения (5) определялась частота  $\omega_{ij}$ . Затем вычислялась мощность на валу  $P_{ij}$  и КПД  $\eta_{ij}$ . Из полученного массива данных  $\{\eta_{ij}\}$  программа выбирает максимальное значение и соответствующие этому значению параметры регулирования. Результаты расчета при частотном и комбинированном способах управления вентилятором ВО-22 для обеспечения годовых рабочих точек проветривания, показанных на рис. 7, представлены в таблице.

Как видно из таблицы, использование комбинированного способа управления позволяет увеличить КПД вентилятора до 9 % по сравнению с частотным методом. Наибольшее приращение КПД имеет место на начальном этапе проветривания, когда вентилятор в значительной степени не догружен по мощности.

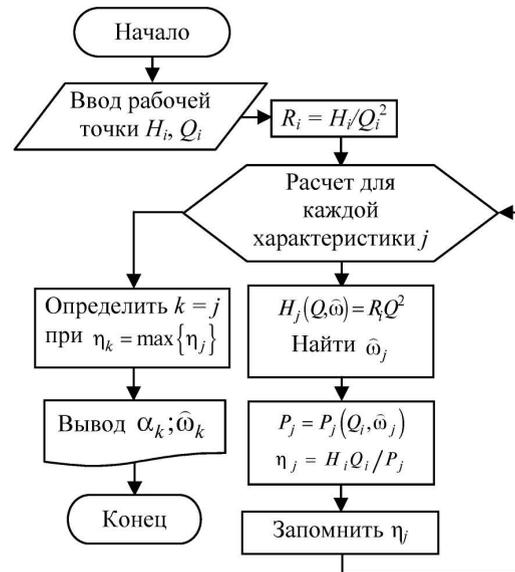


Рис. 8. Алгоритм расчета параметров режима работы ВПП из условия обеспечения максимального КПД в заданной рабочей точке

Иллюстрация поиска комбинаций угла наклона и скорости вращения для рабочей точки 5 из таблицы дана на рис. 9.

В верхней правой части рисунка показаны характеристики при номинальной скорости вращения  $\bar{\omega} = 1$ , в левой нижней части — рабочая точка и характеристики вентилятора при скорости  $\bar{\omega} < 1$ . Жирными линиями выделены характеристики, которые смещаются в область рабочей точки в результате изменения частоты. В первом случае (рис. 9, а) рабочая точка при

### Сравнение частотного и комбинированного методов

Рабочая точка	При частотном регулировании, $\alpha = 50^\circ$		При комбинированном регулировании			Приращение КПД $\Delta\eta = \eta_2 - \eta_1$
	$\eta_1, \%$	Скорость, о.е.	$\eta_2, \%$	Угол, $\alpha$	Скорость, о.е.	
1	57,6	0,64	66,8	65	0,44	+9,2
2	62,9	0,69	71,0	65	0,48	+8,1
3	67,4	0,73	74,2	65	0,52	+6,8
4	72,5	0,76	77,3	65	0,55	+4,8
5	77,1	0,80	80,1	60	0,64	+3,0
6	80,1	0,84	82,0	55	0,74	+1,9
7	83,3	0,88	84,2	55	0,79	+0,9
8	84,8	0,91	85,0	55	0,82	+0,2
9	86,0	0,94	86,0	50	0,94	0
10	86,6	0,97	86,6	50	0,97	0

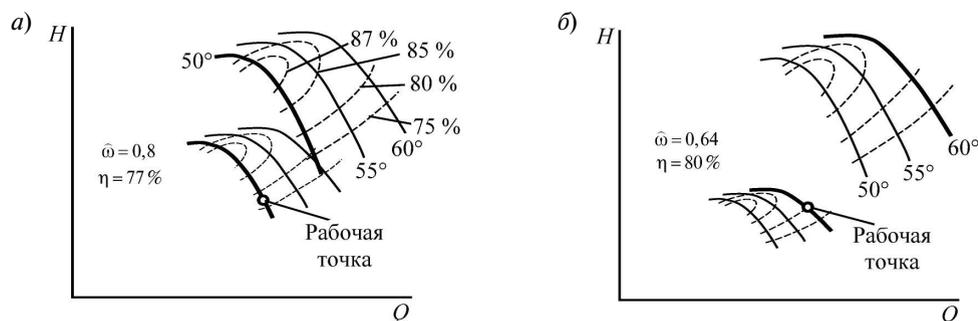


Рис. 9. Поиск максимального значения КПД путем изменения угла  $\alpha$  наклона лопаток и скорости вращения  $\omega$

КПД 77 % задается углом  $\alpha = 50^\circ$  и скоростью  $\bar{\omega} = 0,8$ . Если изменить параметры регулирования до значений  $\alpha = 60^\circ$  и  $\bar{\omega} = 0,64$ , то при том же режиме проветривания КПД вентилятора повысится до значения 80 % (рис. 9, б).

Аналогичный подход к выбору комбинации угла наклона лопаток и скорости вращения имеет место и при оперативном управлении ВГП согласно программе проветривания, учитывающей реальную потребность шахты в воздухе в зависимости от особенностей ведения горных работ в соответствии с той или иной стадией горно-технологического цикла.

Повышение энергетической эффективности главных вентиляционных установок шахт связано с применением многоцелевой системы управления частотно-регулируемым приводом, обеспечивающей, с одной стороны, режим рационального проветривания шахт в соответствии

с реальными потребностями в свежем воздухе и, с другой, — минимизацию потерь энергии в вентиляторе и приводе. В результате сравнительного анализа эффективности методов управления вентиляторными главного проветривания установлено, что наибольший энергетический эффект от применения частотного метода управления производительностью вентилятора достигается при совпадении траектории движения годовых рабочих точек проветривания с линией максимального КПД, по которой перемещается рабочая точка при частотном методе управления. На основе разработанной методики выбора оптимальных параметров для комбинированного метода управления осевыми вентиляторными показано, что увеличение КПД вентилятора за счет перехода от частотного метода управления к комбинированному методу может достигать 9 % и более в зависимости от траектории движения рабочих точек в течение срока эксплуатации вентилятора.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петров Н.Н., Попов Н.А., Зедгенизов Д.В., Михайлов А.И., Заболотских В.В. Пути модернизации устаревшего парка главных вентиляторов шахт // Безопасность труда в промышленности. 2000. № 11. С. 36–39.
2. Петров Н.Н., Попов Н.А. Пути повышения экономичности и надежности проветривания рудников // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2004. № 5. С. 131–137.
3. Единые правила безопасности при разработке рудных, нерудных и россыпных месторождений полезных ископаемых подземным способом: ПБ 06–111–95. — М: Госгортехнадзор, 1995. 192 с.
4. Bartsch E., Laine M., Andersen M. The Application and Implementation of Optimized Mine Ventilation on

- Demand (OMVOD) at the Xstrata Nickel Rim South Mine, Sudbury, Ontario // Proceedings of 13th United States/North American Mine Ventilation Symposium, 2010.
5. Пронько В.С., Шонин О.Б. Энергосбережение в стационарных установках горных предприятий на основе экстремального управления частотно-регулируемым приводом // Труды I международной научно-практической конференции «Технические науки: современные проблемы и перспективы развития», Йошкар-Ола, 2013, С. 87–89
6. Shonin O.B., Pronko V.S. Increasing energy efficiency of mine ventilation systems via multipurpose control of a main fan adjustable speed electric drive // ANNUAL of the University of Mining and Geology «St. Ivan Rilski». 2013. Vol. 56, Part III. P. 163–169.

7. **Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi.** Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. Wiley, 2000. 452 p.

8. **Ушаков К.З., Бурчаков А.С., Пучков Л.А., Медведев И.И.** Аэрология горных предприятий. М.: Недра, 1987. 421 с.

9. **Калинушкин М.П.** Вентиляторные установки. М.: Высшая школа, 1962. 294 с.

10. **Шонин О.Б.** Наблюдатель напряжений на плавающих конденсаторах в схеме стабилизации сбалансированного режима четырехуровневого инвертора для высоковольтного электропривода // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. №1(166). С. 106–112.

11. Electric Motor Efficiency under Variable Frequencies and Loads / USA. Irrigation Training & Research Center. 2006. 65 pp.

## REFERENCES

1. **Petrov N.N., Popov N.A., Zedgenizov D.V., Mikhaylov A.I., Zabolotskikh V.V.** Puti modernizatsii ustarevshego parka glavnykh ventilatorov shakht. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*. 2000. № 11. S. 36–39. (rus.)

2. **Petrov N.N., Popov N.A.** Puti povysheniya ekonomichnosti i nadezhnosti provetrivaniya rudnikov. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2004. № 5. S. 131–137. (rus.)

3. Yedinyye pravila bezopasnosti pri razrabotke rudnykh, nerudnykh i rossypnykh mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh podzemnym sposobom: PB 06-111-95. M.: Gosortekhnadkhor, 1995. 192 s.

4. Bartsch E., Laine M., Andersen M. The Application and Implementation of Optimized Mine Ventilation on Demand (OMVOD) at the Xstrata Nickel Rim South Mine, Sudbury, Ontario. *Proceedings of 13th United States/North American Mine Ventilation Symposium*, 2010.

5. **Pronko V.S., Shonin O.B.** Energoberezheniye v statsionarnykh ustanovkakh gornykh predpriyatiy na osnove ekstremalnogo upravleniya chastotno-reguliruyemyim privodom. *Trudy I mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Tekhnicheskiye nauki: sovremennyye problemy*

*i perspektivy razvitiya»*. Yoshkar-Ola, 2013. S. 87–89. (rus.)

6. **Shonin O.B., Pronko V.S.** Increasing energy efficiency of mine ventilation systems via multipurpose control of a main fan adjustable speed electric drive. *ANNUAL of the University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”*, 2013. Vol. 56, Part III. P. 163–169.

7. **Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi.** Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. Wiley, 2000. 452 pp.

8. **Ushakov K.Z., Burchakov A.S., Puchkov L.A., Medvedev I.I.** Aerologiya gornykh predpriyatiy. M.: Nedra, 1987. 421 s. (rus.)

9. **Kalinushkin M.P.** Ventilyatornyye ustanovki. M.: Vysshaya shkola, 1962. 294 s. (rus.)

10. **Shonin O.B.** Nablyudatel napryazheniy na plavayushchikh kondensatorakh v skheme stabilizatsii sbalansirovannogo rezhima chetyrehurovneвого инвертора для высоковольтного электропривода. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2013. №1(166). S. 106–112. (rus.)

11. Electric Motor Efficiency under Variable Frequencies and Loads / USA. Irrigation Training & Research Center. 2006. 65 p.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ШОНИН Олег Борисович** — доктор технических наук профессор кафедры электротехники, электроэнергетики, электромеханики Национального минерально-сырьевого университета "Горный"; 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д. 2; E-mail: ninosh\_eltech@mail.ru

**ПРОНЬКО Владимир Сергеевич** — аспирант кафедры электротехники, электроэнергетики, электромеханики Национального минерально-сырьевого университета "Горный". 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д. 2. E-mail: pronko.vr@gmail.com

## AUTHORS

**SHONIN, Oleg B.** — National Mineral Resources University. 2, line 21 V.O., St. Petersburg, Russia, 199106. E-mail: ninosh\_eltech@mail.ru

**PRONKO, Vladimir S.** — National Mineral Resources University. 2, line 21 V.O., St. Petersburg, Russia, 199106. E-mail: pronko.vr@gmail.com

УДК 621.43.01

*Ю.В. Галышев, А.Ю. Шабанов,  
А.Б. Зайцев, М.Н. Немчинова*

## **ЗАДАНИЕ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ ТЕПЛООБМЕНА В РАБОЧИХ ПОЛОСТЯХ ГОЛОВКИ ЦИЛИНДРА ЧЕТЫРЕХТАКТНОГО ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**

*Yu.V. Galyshev, A.Yu. Shabanov,  
A.B. Zaytsev, M.N. Nemchikova*

## **THE BOUNDARY CONDITIONS OF HEAT TRANSFER IN THE WORKING CAVITY OF THE CYLINDER HEAD OF THE FOUR-STROKE INTERNAL COMBUSTION ENGINE**

В статье описывается предложенная авторами модель задания граничных условий теплового нагружения головки цилиндра высокофорсированного дизельного или газопоршневого двигателя, построенная на единой методологической базе. Согласованные дискретные модели корпуса головки цилиндра и рабочих полостей — камеры сгорания, газоздушных каналов и полостей охлаждения — позволяют вести сквозное моделирование всех процессов, что значительно облегчает процедуру расчета параметров работоспособности головки и повышает точность и достоверность получаемых результатов.

ДВИГАТЕЛЬ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ; ГОЛОВКА ЦИЛИНДРА; ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ; ТЕПЛОЕ НАГРУЖЕНИЕ; ДИСКРЕТНЫЕ МОДЕЛИ.

This article describes the proposed model by specifying the boundary conditions of the thermal load of the cylinder head of a high-powered diesel or gas engine, based on common methodological basis. Concerted discrete models cylinder head and body cavities is the combustion chamber, the exhaust channels and cavities of the cooling, allow end-to-end modeling of all processes that simplifies the procedure of calculation of parameters capacity for heads work and increases the accuracy and reliability of the results.

INTERNAL COMBUSTION ENGINE; CYLINDER HEAD; BOUNDARY CONDITIONS; THE THERMAL LOADING; DISCRETE MODELS.

Задача статьи — сформулировать и обосновать базовый подход к моделированию теплового и напряженно-деформированного состояния головок цилиндров поршневых четырехтактных двигателей внутреннего сгорания на базе единых численных подходов, построенных на основе метода конечных элементов.

Головка цилиндра двигателя внутреннего сгорания — наиболее сложный и ответственный узел, проектирование которого усложнено из-за неоднозначности постановки задачи ее оптимизации. Действительно, при выборе конструктивной формы и исполнения головки цилиндра требуется одновременно обеспечить следующее:

эффективное протекание рабочего процесса в цилиндре ДВС, достигаемое оптимальной формой камеры сгорания, расположением форсунки или свечи зажигания;

максимально возможные параметры наполнения цилиндров, что достигается оптимизацией формы и размеров газоздушных каналов, впускных и выпускных клапанов, снижением аэродинамического сопротивления газоздушного тракта, а также настройкой системы газораспределения;

заданный уровень надежности работы узла, гарантируемый приемлемым уровнем теплонапряженного состояния головки цилиндров, а также минимальным уровнем деформирования

нижней плиты головки под воздействием сложного комплекса нагружения, который включает постоянно действующие монтажные усилия, а также газовые и тепловые нагрузки со стороны камеры сгорания и газозвдушных каналов;

приемлемые массо-габаритных размеры узла головки цилиндра.

Как следует из анализа вышеприведенных требований, их выполнение требует разнонаправленного подхода к выбору конструктивной формы головки цилиндра. Так, очевидно, что повышение прочностных свойств детали и ее жесткости требует увеличения толщины стенок корпуса головки цилиндра, особенно в зоне ее нижней плиты. В то же время оптимизация аэродинамического качества газозвдушных каналов и увеличение их пропускной способности, напротив, требуют применения стенок корпуса минимальной толщины, чтобы иметь возможность свободного расположения полостей каналов в нижней зоне головки. Компромиссы требуются также при оптимизации формы и расположения полостей охлаждения головки цилиндра. По условию наиболее эффективной работы системы охлаждения необходимо увеличивать их размер и располагать максимально близко к поверхностям нагрева. Однако это влечет за собой резкое снижение жесткости нижней плиты головки цилиндра и ухудшение условий работы газового стыка двигателя.

В целом весь процесс проектирования головки цилиндра так или иначе построен на решении подобных противоречий.

Очевидно, что решение всех этих задач чисто эмпирическим путем, без привлечения современных методов математического моделирования, крайне неэффективно.

Современные методы анализа параметров работоспособности сложных конструкций деталей, построенные на базе метода конечных элементов и интегрированные в инженерные графические пакеты, дают возможность практически точного расчета полей температур, напряжений и деформаций, что необходимо для анализа поведения разрабатываемой конструкции под действием рабочих нагрузок.

Однако степень точности и достоверность получаемых на стадии математического моделирования результатов будет зависеть от точности задания условий нагружения конструкции [1].

Для расчета температурного и напряженно-деформированного состояния головок цилиндров система теплового и механического нагружения достаточно сложна. Особенно это касается задания тепловых потоков по всем тепловоспринимающим и теплоотдающим поверхностям головки.

Далее будут рассмотрены возможные подходы к моделированию граничных условий теплового нагружения поверхностей нагрева и охлаждения головок цилиндров четырехтактного двигателя внутреннего сгорания (ГЦД), примененные авторами при разработке программно-методического комплекса по расчету параметров работоспособности ГЦД.

При формировании методик задания условий теплового нагружения поверхностей нагрева и охлаждения ГЦД необходимо было совместить выполнение требований достаточной точности результатов расчета и допустимых затрат на их получение. С целью определения пороговых значений допускаемой погрешности было проведено специальное исследование, при котором отслеживалась погрешность расчета температурного состояния ГЦД в наиболее критических зонах в зависимости от погрешности задания граничных условий теплового нагружения.

В качестве предельно допустимой погрешности расчета температур деталей была выбрана погрешность их замера в реальном эксперименте с помощью поверхностных термопар — примерно 2 %.

Проведенный анализ показал, что в большинстве случаев при погрешности задания локальных тепловых потоков, равной 5 %, обеспечивается необходимая точность определения распределения температур по огневой поверхности головки (т. е. в зоне расположения критических областей), уровень температуры в которой влияет на оценку работоспособности детали в целом. Точность задания интенсивности теплоотдачи напрямую зависит от точности определения скоростей обтекания стенок камеры сгорания рабочим телом. Поскольку обычно  $Nu_x \sim (Re_x)^k$ ,  $k < 1$ , то определение поля скоростей может быть проведено еще более грубо — допустимая относительная погрешность может доходить до  $\Delta u = \frac{\Delta \alpha}{k} \approx 7-10\%$ .

Полученные оценочные величины предельно допустимой погрешности определения скоростей обтекания тепловоспринимающих и теплоотдающих поверхностей ГЦД были приняты как опорные для выбора метода моделирования процессов газодинамики и гидродинамики в рабочих полостях головки.

В работах [2, 3] показано, что тепловое нагружение головки цилиндров и отвод теплоты от нее преимущественно производится по механизмам вынужденной конвекции. Это требует (для расчета коэффициентов теплоотдачи по всем поверхностям теплообмена) предварительного решения задачи обтекания рабочими телами поверхностей камеры сгорания, газозвушных каналов и полостей охлаждения.

В [3, 4] показано, что достаточная степень точности, позволяющая получить достоверные результаты по распределению температур в теле головки цилиндров, может быть обеспечена с использованием двухзонных газодинамических моделей, с помощью которых решаются две взаимосвязанные задачи — течение невязкого газа в ядре потока и обтекание зоны пограничного слоя, через

которую происходит основной теплообмен между рабочим телом и стенками камеры сгорания.

Такой подход позволяет, используя трехмерные модели процессов, получить полную картину течения рабочего тела в полости произвольной формы с точностью, достаточной для определения интенсивности теплоотдачи.

Модель движения рабочего тела в цилиндре учитывает переменность геометрии камеры сгорания, вызванную движением поршня. Пример трехмерных моделей камер сгорания дизельного двигателя, используемых для расчета полей скоростей и тепловых нагрузок на огневую поверхность поршня, приведен на рис. 1, а, б.

Расчет полей скоростей в объеме камеры сгорания, в частности около огневой поверхности головки цилиндра, позволяет решить задачу конвективного теплового нагружения детали. Конвективные тепловые потоки суммируются с лучистыми потоками, для определения которых используется известная зависимость, предложенная Г.Б. Розенблитом [7].

Особую роль в задании условий теплового нагружения ГЦД играет теплообмен по поверхностям газозвушных каналов (ГВК). Высокая интенсивность теплообмена при движении отработавших газов и свежего заряда по этим каналам в сочетании с большой площадью поверхности теплообмена, соизмеримой с площадью огневой поверхности нижней плиты головки, обеспечивают значительный вклад этой составляющей теплового баланса головки в ее температурное состояние.

Процесс теплообмена в ГВК принято разбивать на две фазы — при закрытых и открытых клапанах. В первой фазе интенсивность теплообмена в целом невелика. Она описывается механизмами свободной конвекции и, отчасти, вынужденной конвекции, определяемой остаточными колебаниями столба газа в канале под действием пульсаций давления во впускном и выпускном коллекторах. Геометрическая форма канала в данном случае не оказывает существенного влияния на распределение тепловых потоков по объему канала. Для расчета интенсивности теплообмена на этой фазе используется зависимость, предложенная в МГТУ [5].

При открытых клапанах в канале формируется скоростное поле, переменное по углу поворота коленчатого вала. При этом механизм теп-

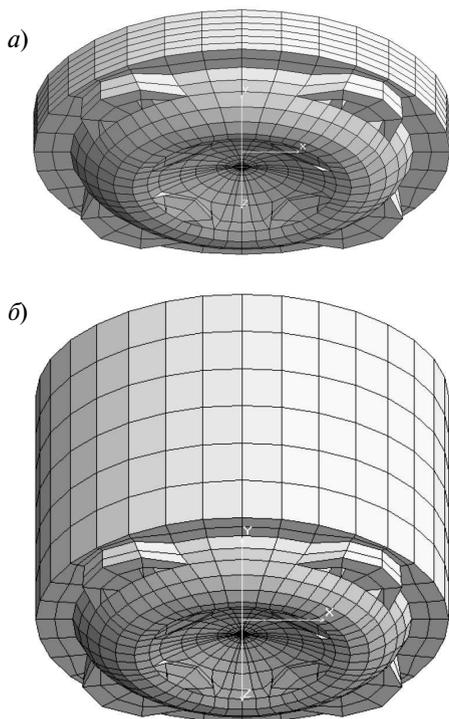


Рис. 1. Численные модели рабочего объема камеры сгорания дизельного двигателя для двух положений поршня: а —  $\varphi = 10^\circ$  п.к.в.; б —  $\varphi = 90^\circ$  п.к.в.

лообмена описывается законами вынужденной конвекции, интенсивность теплоотдачи зависит от величины и градиентности скорости потока газа, обтекающего расчетную точку поверхности канала. Поэтому расчет на этой фазе газообмена делится на две стадии — анализ мгновенного локального скоростного поля рабочего тела в объеме канала, проводимый в предположении невязкого рабочего тела, и решение задачи теплообмена через ламинарный или турбулентный пограничный слой, формируемый на стенках канала. При этом используются методики, разработанные в СПбГПУ [4, 8].

Расчеты ведутся с использованием полных трехмерных моделей газоздушных каналов с переменными граничными условиями на клапанных щелях и фланце патрубка. Примеры трехмерных моделей впускного и выпускного каналов приведены на рис. 2, *а*, *б*. Граничные условия для расчета мгновенных полей скоростей определяются исходя из расчета рабочего цикла, по действующим перепадам давлений на клапанной щели в зоне прифланцовки впускных и выпускных патрубков.

Отдельная и достаточно важная задача, решаемая при формировании общей схемы теплового нагружения головки цилиндра, — это расчет процесса теплообмена в полостях охлаждения ГЦД. Практически эта составляющая теплообмена отвечает за температурное состояние нижней плиты головки, т. е. той части, где сосредоточены все критические по уровню температур зоны.

Полости охлаждения головки отличаются сложной геометрической формой, поэтому этот расчет может быть лишь трехмерным. Известные методики расчета теплообмена в полостях охлаждения [3, 6] в основном имеют полуэмпи-

рический характер, что не позволяет обеспечить требуемую точность расчета.

Еще одной важной особенностью процесса теплообмена в полостях охлаждения головки цилиндра является то, что, в отличие от полостей охлаждения блока цилиндров, здесь более вероятно возникновение зон фазового перехода. Поэтому применительно к механизмам вынужденной конвекции, преобладающим в охлаждении блока цилиндров, в методику расчета теплообмена в ГЦД необходимо включать методику расчета теплоотдачи при кипении охлаждающей жидкости. Следовательно, параллельно с расчетом полей скоростей охлаждающей жидкости необходим расчет ее локальной температуры. Это означает, что требуется решение сопряженной задачи, которая учитывает реальное температурное состояние поверхностей охлаждения головки. Этот расчет ведется с использованием методик, предложенных в [8, 9]. На рис. 3 изображена численная модель полости охлаждения индивидуальной головки цилиндра высокофорсированного дизеля.

Таким образом, обеспечение требуемой точности и универсальности расчета тепловых нагрузок на все тепловоспринимающие и теплоотдающие поверхности головки цилиндра в силу высокой сложности геометрической формы детали требует применения современных методов трехмерного численного моделирования. Использование известных эмпирических зависимостей для задания граничных условий теплообмена может привести к критическому значению погрешности в расчете параметров работоспособности детали, что при современном уровне форсирования и, соответственно, тепловой напряженности ГЦД недопустимо.

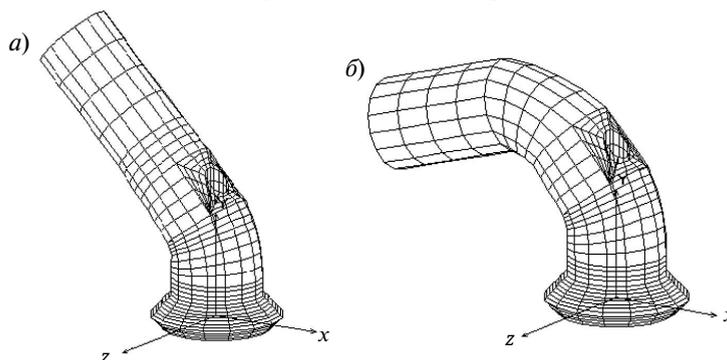


Рис. 2. Численные модели впускного (*а*) и выпускного (*б*) каналов

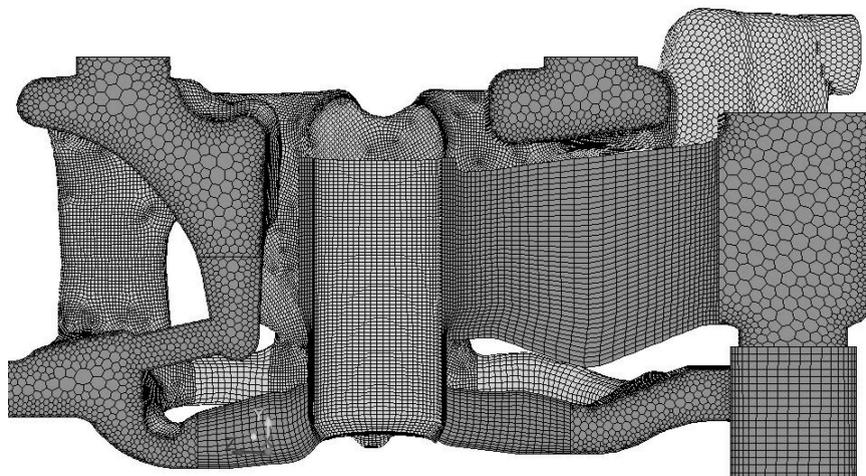


Рис. 3. Численная модель полости охлаждения головки цилиндра

В предложенной постановке общая трудоемкость расчета граничных условий теплового нагружения головки существенно превышает трудоемкость самого расчета температурного и напряженно-деформированного состояния детали, но это оправданно с точки зрения обеспечения достоверности и точности итогового результата.

На рис. 4 приведен пример расчета температурного состояния модели головки цилиндра высокофорсированного двигателя, в котором расчет граничных условий выполнен с использованием вышеописанных методик.

Таким образом, современное автоматизированное проектирование таких конструктивно сложных узлов, как головки цилиндров высокофорсированных двигателей внутреннего сгорания, требует применения сложных численных методов расчета параметров их работоспособности. При этом важнейшее звено — блоки расчета термических нагрузок на деталь, от точности и надежности работы которых зависит эффективность работы всего комплекса. С учетом требований точности задания граничных условий теплообмена, обеспечивающих необходимую точность расчета температур головки

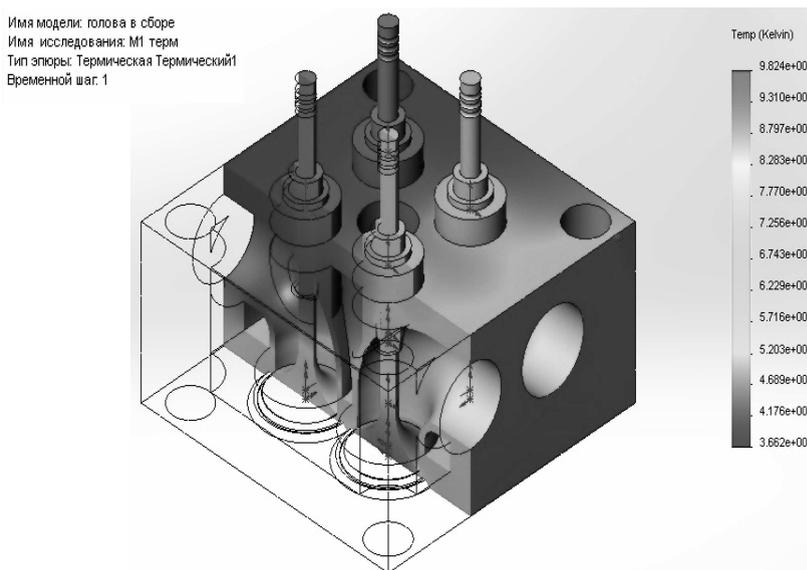


Рис. 4. Температурное состояние модели головки цилиндра высокофорсированного двигателя

цилиндра, в методиках расчета процессов газодинамики и теплообмена может быть использован метод конечных элементов как наиболее универсальный и адаптированный для использования в расчетных блоках систем автоматизированного проектирования.

Предложенный метод моделирования условий теплового нагружения головки цилиндра прошел апробацию в ходе проведения работ по реальному проектированию перспективных двигателей; тем не менее он находится в режиме постоянного совершенствования и уточнения.

Работа выполнена в ФБГОУ ВПО СПбГПУ за счет средств субсидии на реализацию комплексных проектов по созданию высокотехнологичного производства, выделяемой в рамках реализации постановления Правительства Российской Федерации № 218 от 9.04.2010 г. «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства» Министерством образования и науки Российской Федерации, договор № 02. G25.31.0094.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоцерковский О.М. Численное моделирование в механике сплошных сред. М.: Наука, 1982. 392 с.
2. Петриченко Р.М., Петриченко Р.М. Конвективный теплообмен в поршневых машинах. Л.: Машиностроение, 1979. 232 с.
3. Петриченко Р.М. Системы жидкостного охлаждения двигателей внутреннего сгорания. Л.: Машиностроение, 1975. 224 с.
4. Петриченко Р.М. Батурин С.А., Исаков Ю.Н. [и др.]. Элементы системы автоматизированного проектирования ДВС: Алгоритмы прикладных программ / Под общ. ред. Р.М. Петриченко. Л.: Машиностроение, 1990. 328 с.: ил.
5. Ивин В.И., Грехов Л.В. Физическая картина и метод расчета теплообмена в элементах выпускной системы двигателя // Двигателестроение. 1988. № 12. С. 16–19.
6. Мягков Л.Л., Маластовский Н.С. Моделирование теплового состояния крышки цилиндра дизеля

с учетом течения жидкости в полости охлаждения // Труды 16-й школы-семинара под рук. академика РАН А.И. Леонтьева. Санкт-Петербург, 21–25 мая 2007 г. 2007. Т. 2. С.

7. Розенблит Г.Б. Особенности расчета и задания граничных условий при моделировании температурных полей в клапане и крышке цилиндра дизеля // Двигателестроение, 1982. № 9. С. 21–24.

8. Шабанов А.Ю., Машкур М.А. Конечно-элементный метод расчета граничных условий теплового нагружения головки блока цилиндров поршневого двигателя // Деп. в ВИНТИ: № 1827-B2004 от 19.11.04., 17 с.

9. Чайнов Н.Д., Мягков Л.Л., Володин А.Х. [и др.]. Сопряженная задача теплообмена при определении температурного поля крышки цилиндра среднеоборотного дизеля // Двигатели внутреннего сгорания. 2009. № 2. Харьков.

### REFERENCES

1. Belotserkovskiy O.M. Chislennoye modelirovaniye v mekhanike sploshnykh sred. M.: Nauka, 1982. 392 s. (rus.)
2. Petrichenko R.M., Petrichenko M.R. Konvektivnyy teploobmen v porshnevnykh mashinakh. L.: Mashinostroyeniye, 1979. 232 s. (rus.)
3. Petrichenko R.M. Sistemy zhidkostnogo okhlazhdeniya dvigateley vnutrennego sgoraniya. L.: Mashinostroyeniye, 1975. 224 s. (rus.)
4. Petrichenko R.M., Baturin S.A., Isakov Yu.N. [i dr.] Elementy sistemy avtomatizirovannogo proyektirovaniya DVS: Algoritmy prikladnykh programm / Pod obshch. red. R.M. Petrichenko. L.: Mashinostroyeniye, 1990. 328 s.: il. (rus.)
5. Ivin V.I., Grekhov L.V. Fizicheskaya kartina i metod rascheta teploobmena v elementakh vypusknoy sistemy dvigatelya. *Dvigatelistroyeniye*, 1988. № 12. S. 16–19. (rus.)
6. Myagkov L.L., Malastovskiy N.S. Modelirovaniya

teplovogo sostoyaniya kryshki tsilindra dizelya s uchetom techeniya zhidkosti v polosti okhlazhdeniya. *Trudy 16 shkoly-seminara pod rukovodstvom akademika RAN A.I. Leontyeva*. Sankt-Peterburg, 21–25 maya 2007 g. 2007. T. 2. S. 21–24. (rus.)

7. Rozenblit G.B. Osobennosti rascheta i zadaniya granichnykh usloviy pri modelirovaniy temperaturnykh poley v klapane i kryshke tsilindra dizelya. *Dvigatelistroyeniye*, 1982. № 9. (rus.)

8. Shabanov A.Yu., Mashkur M.A. Konechno-elementnyy metod rascheta granichnykh usloviy teplovogo nagruzheniya golovki bloka tsilindrov porshnevoego dvigatelya // *Dep. v VINITI: № 1827-B2004* ot 19.11.04., 17 s.

9. Chaynov N.D., Myagkov L.L., Volodin A.Kh. [i dr.]. Sopryazhennaya zadacha teploobmena pri opredelenii temperaturnogo polya kryshki tsilindra sredneoborotnogo dizelya. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*. 2009. № 2. Kharkov.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ГАЛЫШЕВ Юрий Виталиевич** — доктор технических наук заведующий кафедрой Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: galyshev57@yandex.ru

**ШАБАНОВ Александр Юрьевич** — кандидат технических наук профессор кафедры двигателей, автомобильных и гусеничных машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: aush2003@mail.ru

**ЗАЙЦЕВ Алексей Борисович** — кандидат технических наук доцент кафедры двигателей, автомобильных и гусеничных машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: abzaytsev@mail.ru

**НЕМЧИКОВА Мария Николаевна** — ассистент кафедры двигателей, автомобильных и гусеничных машин Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, без степени. 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: seriousnmn@yandex.ru

### AUTHORS

**GALYSHEV Yuriy V.** — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: galyshev57@yandex.ru

**SHABANOV Aleksandr Y.** — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: aush2003@mail.ru

**ZAYTSEV Aleksey B.** — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: abzaytsev@mail.ru

**NEMCHIKOVA Mariya N.** — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: seriousnmn@yandex.ru



УДК 621.165.001.5

*К.К. Нгуен, А.С. Ласкин*

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСЕВОГО ЗАЗОРА НА НЕСТАЦИОНАРНЫЕ СИЛЫ В ТУРБИННОЙ СТУПЕНИ**

*Q.Q. Nguyen, A.S. Laskin*

### **NUMERICAL INVESTIGATION OF THE INFLUENCES OF AXIAL SPACING BETWEEN BLADE ROWS IN A AXIAL TURBINE ON AERODYNAMIC FORCE**

Проведено численное исследование модели осевой турбины с целью определения уровней и характера нестационарных нагрузок, действующих на рабочие лопатки. Для корректности сопоставления моделировалась проточная часть, подобная ранее экспериментально исследованной на обращенной турбине ЛПИ. Выполнены расчеты на основе использования пакета ANSYS CFX, что позволило оценить изменения нестационарных параметров потока и аэродинамических нагрузок на рабочие лопатки в турбинной ступени при вариации межвенцовых осевых зазоров. Выявлена область осевых зазоров, соответствующих минимальному аэродинамическому возбуждению.

ОСЕВАЯ ТУРБИНА; ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ; ОСЕВОЙ ЗАЗОР; ПУЛЬСАЦИЯ ДАВЛЕНИЯ; НЕСТАЦИОНАРНАЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ СИЛА.

A numerical study of axial turbine used to determine the level and characteristics of unsteady aerodynamic forces on the rotor blades. Numerical calculations based on the using of the package ANSYS CFX, which made it possible to obtain time-dependent change in the flow parameters and the aerodynamic forces on the rotor blades with variation rotor-stator axial spacing. The axial spacing area which corresponds to the minimum aerodynamic excitation was carried out.

AXIAL TURBINE; NUMERICAL INVESTIGATION; CFX; AXIAL SPACING; PRESSURE FLUCTUATION; AERODYNAMIC FORCE.

Одна из важных практических задач проектирования ступени турбомашин — выбор зазора между сопловым (направляющим) и рабочим венцами. Величина осевого зазора в значительной степени может определять вибронпряженность лопаточного аппарата, КПД турбинной ступени и осевые габариты проточной части турбины [1–10], т. е. ее металлоемкость. Общеизвестно, что увеличение межвенцового осевого зазора благоприятно по соображениям как виброндежности рабочей лопатки (РЛ), так и КПД ступени. Но как показано в [3, 4], отмеченные аспекты влияния изменения осевого зазора проявляются не монотонно. Поэтому более подробное исследование влияния осевого зазора, в частности на величину возбуждающих нагрузок, — актуальная задача.

Первоначальные работы 60-х годов по влиянию осевого зазора на переменные аэродинамические силы были выполнены экспериментально в МЭИ и ЛПИ [1–4]. Для исследования нестационарного течения в ступени турбомашин в ЛПИ были созданы экспериментальные турбины; опытами на одной из них (обращенная радиальная турбина ЭТН-ЛПИ [1, 5]) были впервые оценены уровни нестационарных нагрузок, которые могли приводить к усталостным поломкам рабочих лопаток.

Сложные и дорогие экспериментальные исследования и сегодня чрезвычайно важны для тестирования результатов численного моделирования процессов в турбинах. Об этом, в частности, свидетельствуют работы [6, 7 и др.], где сочетаются экспериментальные и расчетные подходы.

В связи с развитием вычислительной гидродинамики и появлением коммерческих пакетов типа ANSYS CFX стали возможными исследования процессов нестационарных течений в турбомашинах. В настоящей статье представлены результаты численного моделирования влияния изменения межвенцовых осевых зазоров на величину переменных аэродинамических сил (ПАС), вызывающих колебания рабочих лопаток.

**Цель и задачи исследования.** В данной работе представлены результаты численного моделирования с помощью гидродинамического пакета ANSYS CFX 14.5 нестационарного течения в ступени дозвуковой турбины при изменении осевого зазора. Для описания трехмерного течения использовались осредненные по Рейнольдсу уравнения турбулентного течения жидкости (RANS). Основная задача — выполнение стационарных и нестационарных численных расчетов, которые позволили бы получить характеристики пульсаций давления и нестационарных аэродинамических сил на РЛ. Использована расчетная модель осевой ступени, соответствующая по геометрии венцам испытанной ранее радиальной обращенной турбины (Ласкин А.С., Кириллов И.И., 1966) со специальными измерительными лопатками, оснащенными датчиками давления. Использование направляющих и рабочих лопаток, подобных НЛ и РЛ в обращенной модели, позволяло сравнить численные расчеты с данными, полученными при экспериментальных исследованиях.

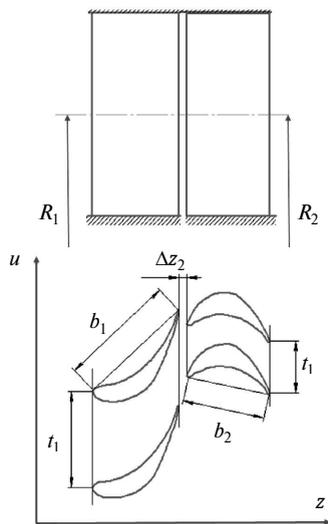


Рис. 1. Схема геометрической модели ступени осевой турбины

Отметим, что все численные моделирования выполняются на 6 узлах 24 ядер кластера Отделения вычислительных ресурсов СПбГПУ. Сформулированы рекомендации по выбору вычислительных опций, обеспечивающих приемлемую точность результатов моделирования.

**Расчетная модель.** Расчетная модель по форме НЛ и РЛ соответствует модели радиальной обращенной турбины ЭТН-1 ЛПИ [1]. Такой подход был принят, чтобы использовать результаты измерения нестационарных давлений из работ [1, 2, 4] как тестовые. Размеры НЛ, РЛ, формы профилей, хорды, шаги, углы установки были одинаковыми (рис. 1) и равными следующим:

*Геометрические параметры осевой турбины*

Размерность.....	Величина
Радиус среднего сечения $R_{1cp} = R_{2cp}$ .....	390,1 мм
Длина НЛ и РЛ $l_1 = l_2$ .....	60 мм
Хорда $b_1$ .....	59 мм
Угол $\alpha_1$ .....	19 град.
Угол $\beta_1$ .....	35 град.
Шаг $t_1$ .....	47,9 мм
Относительный шаг, $\bar{t}_1$ .....	0,8
Число сопловых лопаток, $m_1$ .....	51
Хорда $b_2$ .....	41 мм
Шаг $t_2$ .....	25,4 мм
Относительный шаг $\bar{t}_2$ .....	0,618
Угол $\alpha_2$ .....	65 град.
Угол $\beta_2$ .....	27 град.
Число рабочих лопаток $m_2$ .....	96
Осевой зазор ступени $\Delta z_1$ .....	4; 8; 12; 18; 27; 35 мм
Скорость вращения ротора, $\omega$ .....	104,7 рад/с

При расчетах осевой ступени диапазон измерения осевых зазоров был принят более широким по сравнению с зазорами при эксперименте. Он изменялся в пределах от 4 до 35 мм.

Конечно-элементная сетка построена на основе версии TurboGrid 15. Эта программа позволяет автоматически построить сетки для разных лопаточных венцов турбомашин. Кроме того, TurboGrid дает возможность быстро получить разные варианты геометрии проточной части с помощью файла языка CEL. Количество элементов у статора — 1,3 млн, у ротора — 2,2 млн. Число Рейнольдса —  $Re = 2,5 \cdot 10^5$ , размер ближайшей к поверхности лопатки ячейки —  $y^+ = 1$ . Такая построенная сетка имеет достаточное разрешение для получения точности моделирования турбулентного течения.

Поскольку отношение шагов  $t_1/t_2 = 1,882$  не соответствует строгой периодичности, для более

точного решения выбрана модель, которая состоит из одной лопатки статора и двух РЛ. Относительный градусный шаг  $7,0588/7,5 = 1,0625$  — находится в зоне рекомендованных в пакете ANSYS CFX. Всего количество сеточных элементов модели — 5,7 млн.

Рабочее тело — Air Ideal Gas, модель турбулентности —  $k-\omega$  SST двухпараметрическая модель Ментера, степень начальной турбулентности — 5%, опция расчета передачи тепла — Total Energy. Граничные условия: скорость на входе принята 26,5 м/с, чтобы получить отношение  $u/c_1 = 0,48$ , где  $u$  — окружная скорость ротора,  $c_1$  — скорость потока за НА; полная температура на входе — 313 К; статическое давление на выходе — 1 атм. Для стационарного расчета на поверхности сопряжения осреднение в окружном направлении параметров потока выполняется методом Stage.

Предварительный расчет для нестационарного варианта выполняется методом Frozen Rotor. Нестационарный расчет использует метод Transient Rotor-Stator. Расчетный шаг выбирается из 1/50 периода движения РЛ через один шаг НЛ статора. Осредненное число Куранта (Courant number) составляет 5,28 и находится в области рекомендаций программы. На поверхности РЛ в среднем сечении определяют точки для «измерения» нестационарных давлений. Схема точек «измерения» соответствует расположению датчиков при эксперименте ЛПИ (рис. 2).

При моделировании изменения зазора НА смещается вперед, а венец РК сохраняет свое положение. Решения разных вариантов выполняют-

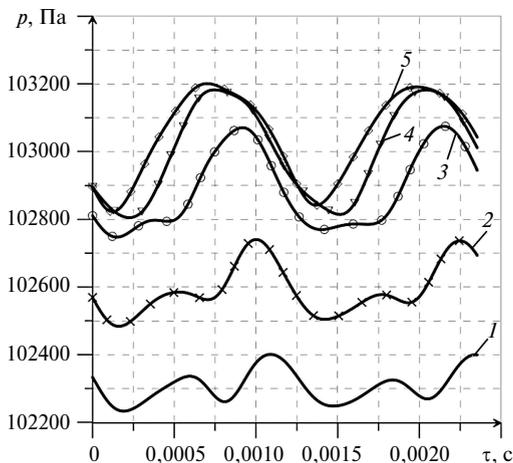


Рис. 3. Пульсация давления в точках 1–5 вогнутой стороны РЛ ( $\Delta z_1 = 12$  мм)

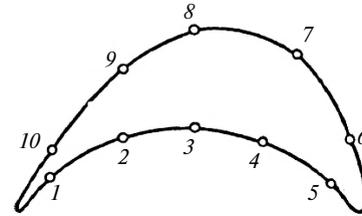


Рис. 2. Схема точек измерения нестационарных параметров

ся файлами на языках CCL и CEL, удобных для приготовления исходных и результатных файлов.

**Результаты.** Изменение статических давлений в разных точках профиля среднего сечения (см. рис. 2) представлено на рис. 3, 4. Пульсации давления имеют периодический характер с основной частотой  $\frac{\omega m l}{2\pi} = 849,8$  Гц (период  $T = 0,00118$  мс).

Нестационарные аэродинамические силы на РЛ вычисляются интегрированием мгновенных статических давлений на поверхности лопаток.

Результаты измерения размаха относительной аэродинамической силы  $\frac{\Delta P_u}{\bar{P}_u}$ , действующей на РЛ при изменении осевого зазора представлен на рис. 5. Значение относительного размаха аэродинамической силы определяется по соотношению

$$\frac{\Delta P_u}{\bar{P}_u} = \frac{P_{u \max} - P_{u \min}}{\bar{P}_u}, \quad (1)$$

где  $P_u$  — проекция нестационарной аэродинамической силы на направление  $u$ ;  $\bar{P}_u$  — осредненная по времени нестационарная аэродинамическая сила.

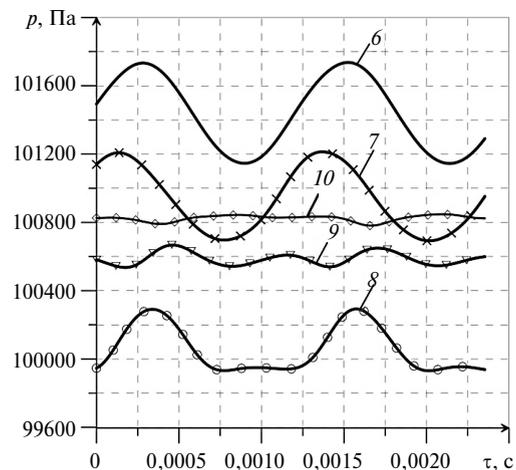


Рис. 4. Пульсация давления в точках 6–10 выпуклой стороны РЛ ( $\Delta z_1 = 12$  мм)

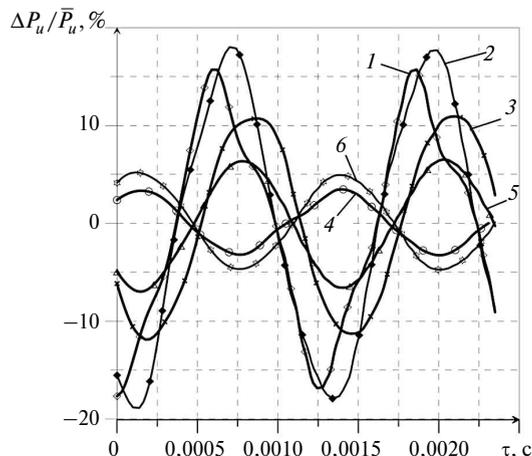


Рис. 5. Изменение  $\Delta P_u / \bar{P}_u$  во времени при различных осевых зазорах  $z$ : 4 (1), 8 (2), 12 (3), 18 (4), 27 (5) и 35 (6)

Изменение размаха аэродинамических сил находится в пределах 10–30 % от осредненных по периоду значений, что соответствует экспериментальным данным [1]. Этот уровень нестационарных нагрузок может быть опасным при околорезонансных режимах и низких уровнях демпфирования.

В работе [3] показано, что в качестве безразмерной характеристики осевого зазора целесообразно использовать величину  $\bar{\Delta z}_1 = \Delta z_1 / t_{1cp} \operatorname{tg} \alpha_{1cp}$ , где  $\Delta z_1$  — осевой зазор,  $t_{1cp}$  — шаг решетки,  $\alpha_{1cp}$  — угол абсолютной скорости на среднем сечении. Величина  $\bar{\Delta z}_1$  характеризует условия суперпозиции потенциальной и вязкой неравномерностей потока за НА. В исследуемой модели уровень относительных амплитуд  $\frac{\Delta P_u}{\bar{P}_u}$  переменных нагрузок составил 10–20 %. Введем понятие относительной аэродинамической силы в зависимости от относительного зазора  $\bar{\Delta z}_1$  по формуле

$$\delta P_u(\bar{\Delta z}_1) = \frac{\frac{\Delta P_u}{\bar{P}_u}(\bar{\Delta z}_1)}{\max\left(\frac{\Delta P_u}{\bar{P}_u}(\bar{\Delta z}_1)\right)}. \quad (2)$$

Зависимость относительной аэродинамической силы от безразмерной координаты  $\bar{\Delta z}_1$

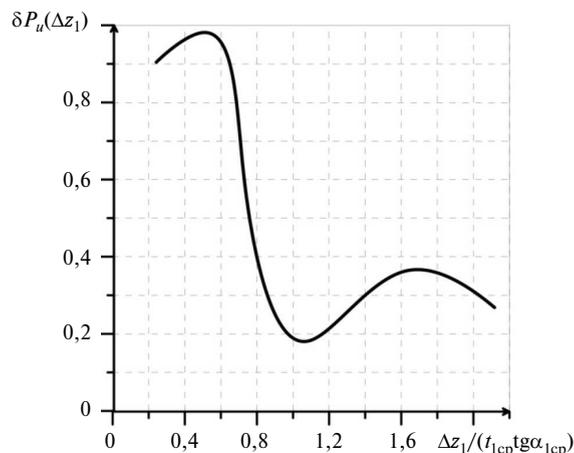


Рис. 6. Зависимость относительной аэродинамической силы от безразмерной координаты  $z_1 / (t_{1cp} \operatorname{tg} \alpha_{1cp})$

представлена на рис. 6, из которого следует, что при увеличении осевого зазора относительная аэродинамическая сила уменьшается, но не монотонно. Этот результат численного моделирования согласуется с данными эксперимента [3].

Результаты выполненных численных моделирований показывают:

характер изменения нестационарной аэродинамической силы близок к гармоническому; размахи амплитуд ПАС в диапазоне относительных зазоров  $\bar{\Delta z}_1 = 0,2-2,2$  изменяются в диапазоне от  $\bar{\Delta P}_u = 10\%$  до  $\bar{\Delta P}_u = 30\%$ ;

общая тенденция изменения ПАС при увеличении зазоров характеризуется уменьшением нестационарных сил, но это изменение не монотонно — имеется два максимума ПАС в области  $\bar{\Delta z}_1 = 0,6$  и  $\bar{\Delta z}_1 = 1,6$ ;

можно выделить область зазоров, в котором возбуждение минимально. Эта область зазоров  $\bar{\Delta z}_1 = 0,9-0,4$  может быть рекомендована для практического использования при проектировании турбинных ступеней близкой конфигурации.

Авторы выражают глубокую признательность кандидату технических наук С.А. Галаеву за ценные консультации при постановке численного моделирования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ласкин А.С., Кириллов И.И. Исследование переменных аэродинамических сил в турбинной решетке, обтекаемой нестационарным потоком // Энергомашиностроение. 1966. №12. С. 17–19.
2. Самойлович Г.С. Возбуждение колебаний лопаток турбомашин. Москва, 1975.
3. Ласкин А.С. Выбор оптимального осевого зазора, обеспечивающего минимум аэродинамического возбуждения колебаний рабочих лопаток газовой турбины // Энергомашиностроение. 1987. №2. С. 18–21.
4. Ласкин А.С. Метод определения оптимального осевого зазора в турбинной ступени // Проб. машиностроения. 1980. С. 73–77.
5. Афанасьева Н.Н., Ласкин А.С., Лапшин К.Л., Черников В.А. [и др.]. Аэродинамические характеристики ступеней тепловых турбин / Под ред. Черникова В.А. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1980. 263 с.
6. Funazaki K., Yamada K., Kikuchi M., Sato H. Detailed Studies on Aerodynamic Performance and Unsteady Flow Behaviors of a Single Turbine Stage with Variable Rotor-Stator Axial Gap // International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems (Japan). 2008. №2, вып. 1. С. 30–37.
7. Denos R., Busby J.A. [и др.]. Investigation of the Unsteady Rotor Aerodynamics in a Transonic Turbine Stage // Journal of Turbomachinery. 2001. №123, вып. 1. С. 81–89.
8. Hanoca P., Shobhavathy M. CFD Analysis to investigate the effect of axial spacing in a single stage transonic axial flow compressor // Symposium on Applied Aerodynamics and Design of Aerospace Vehicle (SAROD). Bangalore, 2011.
9. Venable B.L. Influence of Vane-Blade Spacing on Transonic Turbine Stage Aerodynamics: Part I — Time-Averaged Data and Analysis // Journal of Turbomachinery. 1999. №121, вып. 4. С. 663–672.
10. Yutaka Yamashita, Kiyoshi Segawa Shuichi Ozaki Experimental and numerical investigations of the influences of axial gap between blade rows on pressure fluctuation // ISUAAAT 13 - S9–4. Tokyo, Japan, 2013.

## REFERENCES

1. Laskin A.S., Kirillov I.I. Issledovaniye peremennykh aerodinamicheskikh sil v turbinnoy reshetke, obtekaemoy nestatsionarnym potokom. *Energomashinostroyeniye*. 1966. №12. S. 17–19. (rus.)
2. Samoylovich G.S. Vozbuzhdeniye kolebaniy lopatok turbomashin. Moskva, s.n., 1975. (rus.)
3. Laskin A.S. Vybora optimalnogo osevoogo zazora, obespchivayushcheno minimum aerodinamicheskogo vozbu-zhdeniya kolebaniy rabochikh lopatok gazovoy turbiny vyp. // Энергомашиностроение. 1987. №2. S.18–21. (rus.)
4. Laskin A.S. Metod opredeleniya optimalnogo osevo-go zazora v turbinnoy stupeni // *Prob. mashinostroyeniya*. 1980. С. 73–77. (rus.)
5. Afanasyeva N.N., Laskin A.S., Lapshin K.L., Chernikov V.A. [i dr.]. Aerodinamicheskiye kharakteristiki stupeney teplovykh turbin / Pod red. V.A. Chernikov. Lenin-grad: Mashinostroyeniye, Leningr. otd-niye, 1980. 263 s. (rus.)
6. Funazaki K., Yamada K., Kikuchi M., Sato H. Detailed Studies on Aerodynamic Performance and Unsteady Flow Behaviors of a Single Turbine Stage with Variable Rotor-Stator Axial Gap. *International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems* (Japan). 1. — 2008. №2, vyp. 1. S. 30–37.
7. Denos R., Busby J.A [i dr.]. Investigation of the Unsteady Rotor Aerodynamics in a Transonic Turbine Stage. *Journal of Turbomachinery*. 2001. №123, vyp. 1. S. 81–89.
8. Hanoca P., Shobhavathy M. CFD Analysis to investigate the effect of axial spacing in a single stage transonic axial flow compressor. *Symposium on Applied Aerodynamics and Design of Aerospace Vehicle (SAROD)*. Bangalore, 2011.
9. Venable B.L. Influence of Vane-Blade Spacing on Transonic Turbine Stage Aerodynamics: Part I - Time-Averaged Data and Analysis [Tekst] // Journal of Turbomachinery. 1999. №121, vyp. 4. S. 663–672.
10. Yutaka Yamashita, Kiyoshi Segawa Shuichi Ozaki. Experimental and numerical investigations of the influences of axial gap between blade rows on pressure fluctuation // *ISUAAAT 13 - S9–4*. Tokyo, Japan, 2013.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**НГУЕН Куок Куан** — аспирант кафедры турбин, гидромашин и авиационных двигателей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: tutu1402@gmail.com

**ЛАСКИН Александр Степанович** — доктор технических наук профессор кафедры турбин, гидромашин и авиационных двигателей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: a.s.laskin@mail.ru

## AUTHORS

**NGUYEN Quok Q.** — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: tutu1402@gmail.com

**LASKIN Alexandr S.** — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: a.s.laskin@mail.ru

УДК 621.3

*О.Б. Шонин, В.С. Пронько*

## **МИНИМИЗАЦИЯ ПОТЕРЬ В ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОМ ПРИВОДЕ ВЕНТИЛЯТОРОВ ГЛАВНОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ ШАХТ**

*O.B. Shonin, V.S. Pronko*

## **MINIMIZATION OF ENERGY LOSSES IN VARIABLE FREQUENCY ELECTRIC DRIVE OF MAIN MINE FANS**

Статья посвящена энергосберегающим алгоритмам скалярного частотного управления асинхронным приводом вентилятора главного проветривания. На основе модели двигателя и модели системы частотного управления вентилятором получены зависимости потерь энергии от потокосцепления для различных рабочих точек привода, позволившие сформулировать оптимальный закон управления. Рассмотрен энергосберегающий закон управления, основанный на градиентном алгоритме поиска минимума потерь. Выполнено моделирование оптимального алгоритма пуска двигателя, позволяющего снизить потери энергии и повысить коэффициент мощности.

ШАХТНАЯ ВЕНТИЛЯЦИЯ; ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ; ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД; МИНИМИЗАЦИЯ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ; МЕТОД ПОИСКА ЭКСТРЕМУМА; ОПТИМАЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ ПУСКА.

The paper is devoted to the substantiation of energy saving algorithms for a scalar frequency control system of a main mine fan drive. The algorithms have been based upon dependencies of energy losses on flux linkage which enabled to formulate an optimal control law. These dependencies have been derived from results of simulation on the basis of a drive model which takes into account all kinds of energy losses. Minimization of energy losses has been implemented by a gradient algorithm search method of loss function extremum. Modeling of an optimal algorithm for starting the motor has revealed reduction of energy losses and improvement of the power factor.

MINE VENTILATION; ENERGY SAVING; VARIABLE FREQUENCY ELECTRIC DRIVES; MINIMIZATION OF ENERGY LOSSES; SEARCH METHOD; OPTIMUM START-UP ALGORITHM.

На проветривание подземных выработок тратится до 50 % от общей энергии, потребляемой горным предприятием, а доля затрат на вентиляцию в себестоимости продукции достигает 30 %. Высокая энергоемкость процесса вентиляции шахт — следствие низкой энергетической эффективности главных вентиляционных установок (ГВУ) шахт и больших потерь на различных стадиях преобразования и передачи энергии.

Основная возможность повышения энергетической эффективности ГВУ шахт связана с реализацией современной концепции проветривания в соответствии с реальной потребностью шахты в свежем воздухе, зависящей от особенностей того или иного этапа ведения горных работ. Второй по значимости энергетический

эффект дает минимизация потерь в вентиляторах главного проветривания (ВГП), которые в большинстве работают с эксплуатационным КПД  $\eta = 30\text{--}40\%$  ниже границы области промышленного использования  $\eta = 60\%$ .

В работе [1] рассмотрены методы повышения КПД за счет использования частотного или комбинированного методов управления ВГП и выбора вентилятора из условия совпадения траектории годовых рабочих точек проветривания в координатах «давление — производительность» с линией движения точек с максимальным значением КПД при частотном методе управления. Для реализации этих методов предложено использовать высоковольтный частотно-регулируемый электропривод ВГП, построенный на

базе многоуровневого инвертора и многоуровневого активного выпрямителя. Частотное регулирование дает возможность не только повысить эксплуатационный КПД вентилятора, но и минимизировать потери энергии в приводе за счет использования экстремальных законов управления [2]. Минимизация потерь в приводе дает дополнительный энергосберегающий эффект. Поэтому разработка оптимальных законов управления и их реализация в составе существующих систем управления — актуальная задача.

Цель нашей работы — исследовать потери энергии в приводе при различных режимах работы вентилятора и построить на этой основе оптимальный закон управления. Дополнительная задача — оценить величину снижения потерь энергии при пуске двигателя за счет использования оптимального алгоритма пуска.

### Система скалярного частотного управления приводом вентилятора главного проветривания шахт

Управление ВГП, реализующее комплекс энергосберегающих мероприятий, осуществляется многоцелевой системой управления, описание которой дано в работе [1]. В настоящей статье рассмотрены отдельные аспекты этой системы: способ регулирования и стабилизации режима работы вентилятора в условиях изменения параметров вентиляционной сети и метод оптимального управления двигателем по критерию минимума потерь.

Количество воздуха, подаваемого в выработку, определяется шахтной системой контроля на основании плана ведения горных работ, состава шахтной атмосферы, количества рабочего персонала и пр. Объем подаваемого воздуха из-

меняется в зависимости от этапа ведения горных работ. В таких условиях ГВУ должна обеспечивать возможность оперативного регулирования производительности в широких пределах.

Существенное влияние на режим проветривания оказывают случайные колебания параметров вентиляционной сети, связанные с изменением температуры наружного воздуха, движением внутришахтного транспорта, открытием/закрытием дверей и перемычек. В связи с этим возникает задача стабилизации режима проветривания. С целью оперативного регулирования и стабилизации режима проветривания ВГП снабжается системой автоматического управления.

Система управления имеет подчиненную структуру и состоит из двух контуров (рис. 1). Внешний контур поддерживает заданную производительность вентилятора. Для этого сигнал датчика производительности сравнивается с заданием. По полученной ошибке регулятор формирует задание по скорости двигателя для внутреннего контура. Использование ПИ-регулирования позволяет исключить статическую ошибку и отклонение от заданного режима проветривания при возмущениях в вентиляционной сети.

Внутренний контур регулирует скорость двигателя и фактически является скалярной системой управления частотно-регулируемым электроприводом с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). По текущему рассогласованию скорости система формирует амплитуду и частоту модулирующего сигнала ШИМ, которые определяют амплитуду и частоту первой гармоники напряжения на выходе автономного инвертора напряжения (АИН). В традиционном

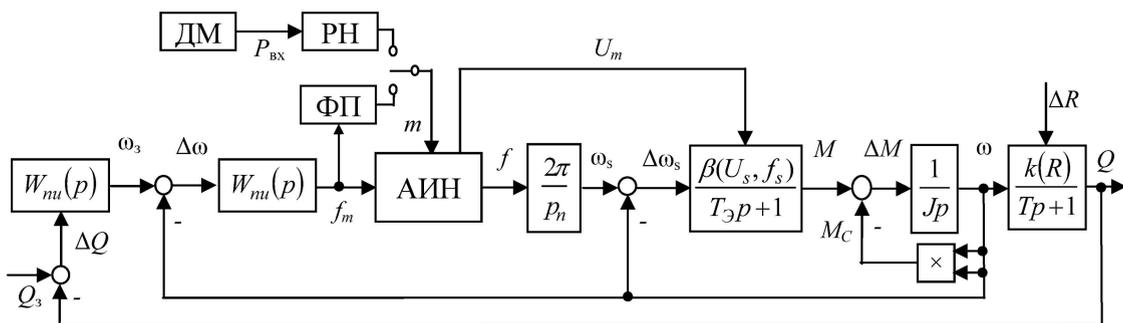


Рис. 1. Структурная схема системы управления вентилятором:

ДМ — датчик мощности, РН — регулятор напряжения, ФП — функциональный преобразователь, АИН — автономный инвертор напряжения

электроприводе амплитуда и частота жестко связаны законом управления, определяющим напряжение на выходе функционального преобразователя (ФП) (см. рис.1), на вход которого подается сигнал частоты. Для вентиляторов наиболее распространенным законом является зависимость  $U/f^2 = \text{const}$ .

В работе предложен энергосберегающий метод управления приводом, при котором оптимальный режим работы достигается изменением потокосцепления двигателя при компенсации отклонения по скорости двигателя за счет регулирования частоты внутренним контуром системы управления.

Рассмотрим передаточные функции системы, показанной на рис. 1. Асинхронный двигатель учтен передаточными функциями электрической и механической частей двигателя [4]:

$$W_{\text{эл}}(p) = \frac{M(p)}{\Delta\omega_s(p)} = \frac{\beta}{T_3 p + 1};$$

$$W_{\text{мех}}(p) = \frac{\omega(p)}{M(p)} = \frac{M - M_c}{Jp}. \quad (1)$$

Здесь  $\beta = 2M_k / \omega_{s0} s_k$  — жесткость характеристики;  $T_3 = 1 / \omega_{s0} s_k$  — постоянная времени;  $J$  — момент инерции на валу двигателя;  $M_c$  — момент сопротивления;  $M_k$  — критический момент;  $s_k$  — критическое скольжение;  $\omega_{s0}$  — номинальная частота вращения поля статора;  $\Delta\omega_s = (\omega_s - \omega)$ ;  $\omega$  — угловая скорость вращения ротора.

Передаточная функция объекта управления получена из уравнения режима работы вентилятора на сеть. При аэродинамическом способе управления рабочая точка определяется пересечением характеристики вентиляционной сети  $H(Q) = RQ^2$  и рабочей характеристики вентилятора  $H(Q) = a_0 Q^2 + a_1 Q + a_2$ , где  $R$  — сопротивление сети,  $a_j$  — коэффициенты, зависящие от угла наклона лопаток направляющего аппарата. При частотном управлении согласно законам подобия имеем  $RQ^2 = a_0 Q^2 + a_1 Q\omega + a_2 \omega^2$  [1]. Решение этого уравнения относительно  $Q$  дает

$$Q(\omega, R) = \omega k(R);$$

$$k(R) = \left( a_1 + \sqrt{a_1^2 - 4a_2(a_0 - R)} \right) / 2(R - a_0). \quad (2)$$

Тогда передаточная функция приобретает вид

$$W_{\text{оы}}(p) = Q(p) / \omega(p) = k(R) / (Tp + 1), \quad (3)$$

где  $T$  — постоянная времени, учитывающая инерционность процессов в вентиляторе и сети.

Работа системы управления рассмотрена на примере привода двигателя 4A355M4Y3 со следующими параметрами:  $P = 315$  кВт;  $U = 660$  В;  $f_0 = 50$  Гц,  $\omega_{s0} = 157$  с<sup>-1</sup>;  $M_k = 4414$  Нм;  $s_k = 0,05$ ;  $J = 8$  кгм<sup>2</sup>,  $c = 76,4$ ;  $p_n = 2$ . Параметры схемы замещения:  $R_1 = 0,012$  Ом,  $R_2 = 0,014$  Ом,  $L_{1\sigma} = 3,1 \cdot 10^{-4}$  Гн,  $L_{2\sigma} = 3,4 \cdot 10^{-4}$  Гн,  $R_m = 280$  Ом,  $L_m = 0,018$  Гн. Механическая нагрузка привода определяется вентиляторной характеристикой. В качестве объекта управления использован вентилятор ВО-14:  $T_{\text{оы}} = 10$  с,  $R_{\text{ном}} = 2,375$ ,  $k_{\text{оы}}(R_{\text{ном}}) = 0,255$ . Настройки регуляторов:  $T_{\text{пи}\omega} = 0,5$  с;  $k_{\text{пи}\omega} = 0,127$ ;  $T_{\text{пи}Q} = 0,2$  с;  $k_{\text{пи}Q} = 0,14$ .

Исследования проводились с помощью компьютерной модели асинхронного двигателя в пакете MATLAB/Simulink, которая учитывала нелинейность контура намагничивания и позволяла в соответствии с работой [5] отдельно определять потери от гистерезиса и потери от вихревых токов.

#### Влияние режима работы вентилятора на потери энергии в приводе

Для получения оптимальных законов управления сначала определялись потери энергии в приводе при независимом изменении потокосцепления для различных режимов работы вентилятора. При изменении потокосцепления скорость вращения ротора поддерживается постоянной за счет автоматического изменения частоты напряжения статора контуром регулирования скорости. Производительность и соответствующая скорость двигателя изменялись в диапазоне 40–100 % от номинальных значений.

На рис. 2 представлены графики потерь в стали и меди двигателя, полученные при поддержании скорости вращения  $\omega = 0,8\omega_0$  и варьирования потокосцепления двигателя. Как видно из графиков, при уменьшении потокосцепления от номинального значения потери в стали растут, потери в меди уменьшаются, а суммарные потери имеют минимум  $P_{\text{тmin}}$  при оптимальном значении потокосцепления  $\psi_e = 0,52\psi_0$ . Подобным образом ведут себя зависимости суммарных потерь от потокосцепления и для других значений скорости двигателя (рис. 3).

Из рис. 3 видно, что оптимальное потокосцепление и соответствующий минимум потерь изменяются в зависимости от режима работы привода. Кривой  $P_{\text{тmin}}(\psi_e)$  (линия 1 на рис. 3),

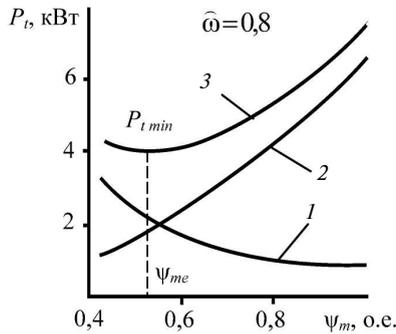


Рис. 2. Зависимость потерь в стали (1), меди (2) и суммарных потерь (3) от потокосцепления

проведенной через точки экстремумов, можно поставить в соответствие зависимость оптимального потокосцепления от скорости, которую можно выразить в виде скалярного закона управления, обеспечивающего режим минимальных потерь в приводе. В относительных единицах этот закон для исследуемой модели имеет вид  $U/f^{1,56} = 0,58$ . Для сравнения на рис. 3 показана мощность потерь (кривая 2) при традиционном законе скалярного управления для вентиляторной нагрузки привода:  $U/f^2 = 1$ . Сравнение потерь, соответствующих кривым 1 и 2 на рис. 3, показывает, что использование оптимального закона управления приводом позволяет снизить потери энергии на 5–10 % по сравнению с традиционным законом управления.

Оптимальный закон управления может быть непосредственно реализован в функциональном преобразователе ФП (см. рис. 1). Однако полученный закон справедлив именно для рассмотренного типа двигателя и не является общим. Для другого двигателя необходимо повторение процедуры вывода закона управления.

Экстремальный закон управления может быть осуществлен путем непосредственного вычисления оптимального значения потокосцепления по математической модели двигателя, заложенной в память микропроцессорного устройства [6]. Однако для нахождения оптимума требуется знание точных моделей многих видов потерь, учитывающих нелинейный характер намагничивания, температурную и частотную зависимости параметров двигателя и другие факторы. Это приводит к усложнению системы управления и необходимости применять адаптивный наблюдатель координат [7].

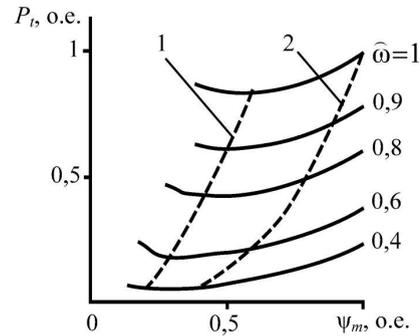


Рис. 3. Потери энергии при различных скоростях двигателя при оптимальном (1) и традиционном (2) законах управления

В работе использован итерационный метод поиска минимума потерь, лишенный указанных недостатков. Этот метод позволяет минимизировать потери энергии как в инверторе, так и двигателе [8]. Оптимальный режим работы двигателя определяется непосредственно во время работы привода.

#### Энергосберегающий алгоритм управления частотно-регулируемым приводом

В методе поиска используется регулятор напряжения РН (см. рис. 1), входным сигналом для которого служит мощность привода, измеряемая датчиком мощности ДМ через равные промежутки времени. По одному из алгоритмов регулятор ищет значение потока, при котором измеренная мощность будет минимальной для данной рабочей точки привода, определяемой скоростью и моментом. Минимум входной мощности соответствует минимуму потерь. К достоинствам данного метода относится инвариантность алгоритма к параметрам двигателя и их изменению в процессе работы.

Рассмотрим двухэтапный градиентный алгоритм поиска экстремума функции потерь, структурная схема которого показана на рис. 4.

На первом этапе грубого поиска определяется область, в которой находится экстремум. Отправной точкой поиска является начальное значение потокосцепления. На каждой итерации потокосцепление снижается на фиксированный шаг  $\Psi_i = \Psi_{i-1} + \Delta\Psi$  и затем вычисляется производная мощности  $\nabla P_i = (P_i - P_{i-1}) / (\Psi_i - \Psi_{i-1})$  ( $\Psi_i, P_i$  — потокосцепление и мощность на  $i$ -й итерации поиска), которая сравнивается с производной  $\nabla P_{i-1}$ , полученной на предыдущей

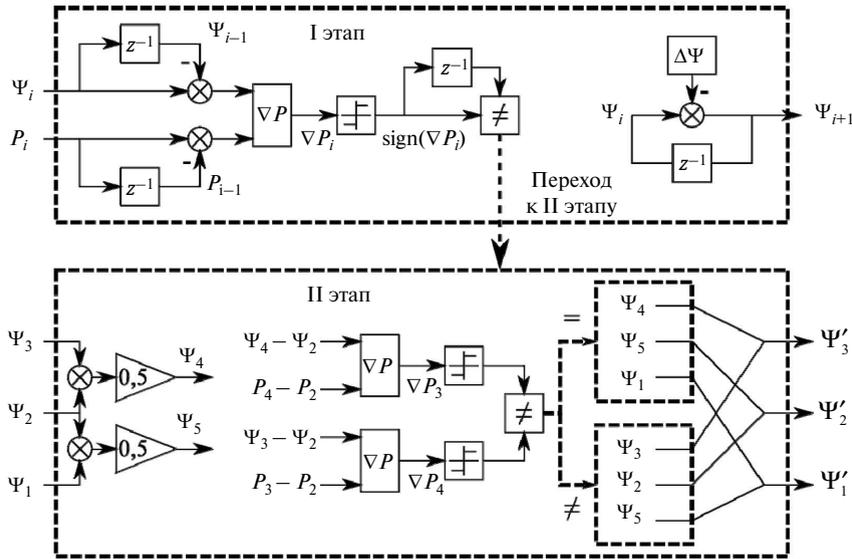


Рис. 4. Структурная схема регулятора напряжения, использующая градиентный алгоритм поиска

итерации. Различие знаков —  $\text{sign}(\nabla P_i) \neq \text{sign}(\nabla P_{i-1})$  — означает, что минимум находится в диапазоне  $[\Psi_i; \Psi_{i-2}]$ .

На второй фазе алгоритма происходит уточнение обнаруженной области. Работу алгоритма при этом иллюстрирует рис. 5, на котором показан момент времени непосредственно после перехода ко второму этапу поиска. Минимум мощности содержится в области  $[\Psi_3; \Psi_1]$ .

Последними точками, проверенными при поиске, являются точки  $\Psi_3$  и  $\Psi_2$  с соответствующими значениями производных —  $\nabla P_3$  и  $\nabla P_2$ . Алгоритм определяет значение мощности в точке  $\Psi_4 = (\Psi_3 + \Psi_2)/2$  и вычисляет соответствующую производную —  $\nabla P_4 = (P_4 - P_2)/(\Psi_4 - \Psi_2)$ . В результате сравнения производных  $\nabla P_4$  и  $\nabla P_3$  опре-

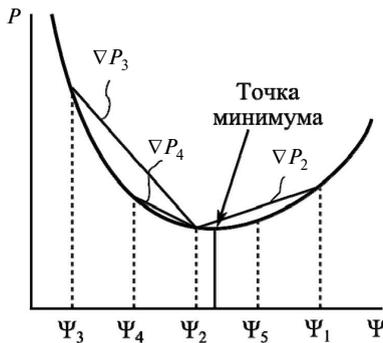


Рис. 5. К уточнению области поиска минимума мощности

деляется новый диапазон поиска экстремума. Если выполняется условие  $\text{sign}(\nabla P_4) = \text{sign}(\nabla P_3)$ , то поиск сужается до диапазона  $[\Psi_4; \Psi_1]$ . В противном случае минимум расположен в области  $[\Psi_5; \Psi_3]$ .

Иллюстрация работы градиентного метода поиска, использующего данные, полученные с помощью рассмотренной ранее модели привода, представлена на рис. 6. Потокосцепление намагничивающего контура изменяется от номинального значения до оптимального с 5 %-м шагом. Шаг по времени выбран из условия завершения переходного процесса в двигателе, вызванного изменением напряжения на предыдущем шаге. В исследуемой модели изменение потокосцепления происходило с интервалом 1,5 с.

Из диаграмм, представленных на рис. 6, следует, что время поиска экстремума составляет порядка 20 с. Это время намного меньше интервала времени между возможными изменениями механической нагрузки привода, соответствующим относительно медленным процессам изменения режима проветривания подземных работ.

### Минимизация потерь энергии при пуске двигателя

Пуск электропривода ВГП с большим моментом инерции на валу занимает продолжительное время и вследствие высоких значений пускового

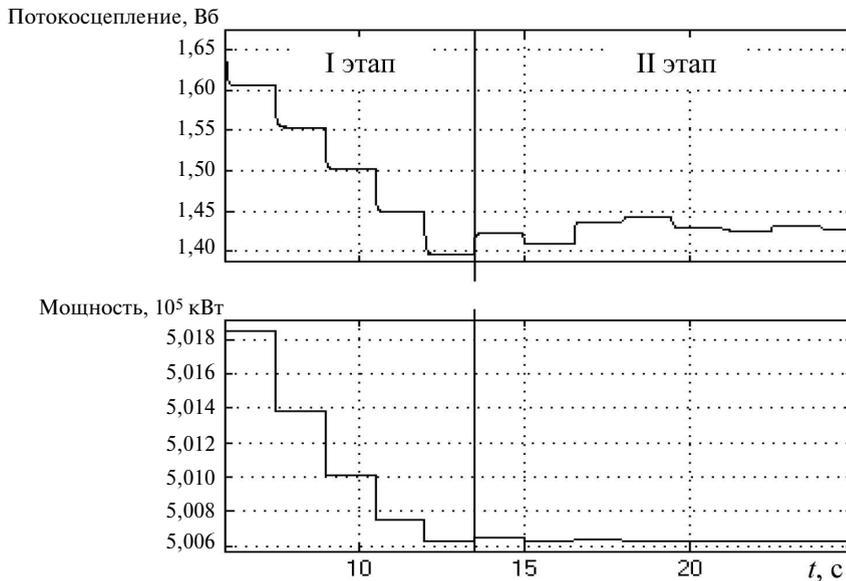


Рис. 6. Переходной процесс при поиске минимума градиентным алгоритмом

тока вызывает провалы напряжения в распределительной сети, а также дополнительные потери энергии. Частично данную проблему решает применение плавного пуска, при котором частота и амплитуда напряжения плавно изменяется по линейному закону от нуля до номинального значения. Показатели пускового режима можно улучшить, используя другие законы управления двигателем. Для иллюстрации возможностей энергосберегающего привода в пусковом режиме использовалась одна из разновидностей законов управления двигателем при пуске, полученных в работе [9] из условия минимизации функции потерь энергии в двигателе:

$$W_{st-l} = \int_0^{t_s} P_t(t) dt \rightarrow \min, \quad (5)$$

где  $P_t$  — мощность потерь,  $W_{st-l}$  — потери энергии за время пуска.

При плавном пуске частота линейно нарастает в течение заданного времени пуска  $t_s$ . Система управления изменяет амплитуду напряжения согласно закону управления исходя из значения частоты в каждый момент времени. Закон управления определяется соотношением между вектором напряжения  $\vec{U} = [0; \vec{U}_1; \vec{U}_2; \dots; U_{20}]^T$  и вектором частоты  $\vec{f} = [0; 0,05; 0,1; \dots; 1]^T$  (рис. 7). После окончания пуска система управления переключается на энергосберегающий алгоритм управления стационарным режимом.

Результаты компьютерного моделирования пуска электропривода мощностью 1,5 МВт при использовании оптимального и традиционного законов управления представлены на рис. 8. Из графиков видно, что применение оптимального закона управления позволяет снизить потери энергии в двигателе за время пуска на 25 % (рис. 8, б). При этом активная мощность двигателя (рис. 8, в) меняется незначительно, а реактивная мощность во время пуска снижается (рис. 8, г), что эквивалентно повышению коэффициента мощности.

Использование частотно-регулируемого привода вентиляторов главного проветривания — необходимое условие реализации современного подхода к организации вентиляции подземного пространства в соответствии с реальными потребностями шахты в свежем воздухе.

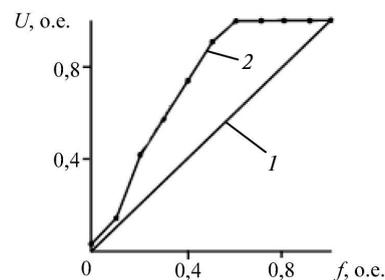


Рис. 7. Графики традиционного (1) и оптимального (2) законов пуска

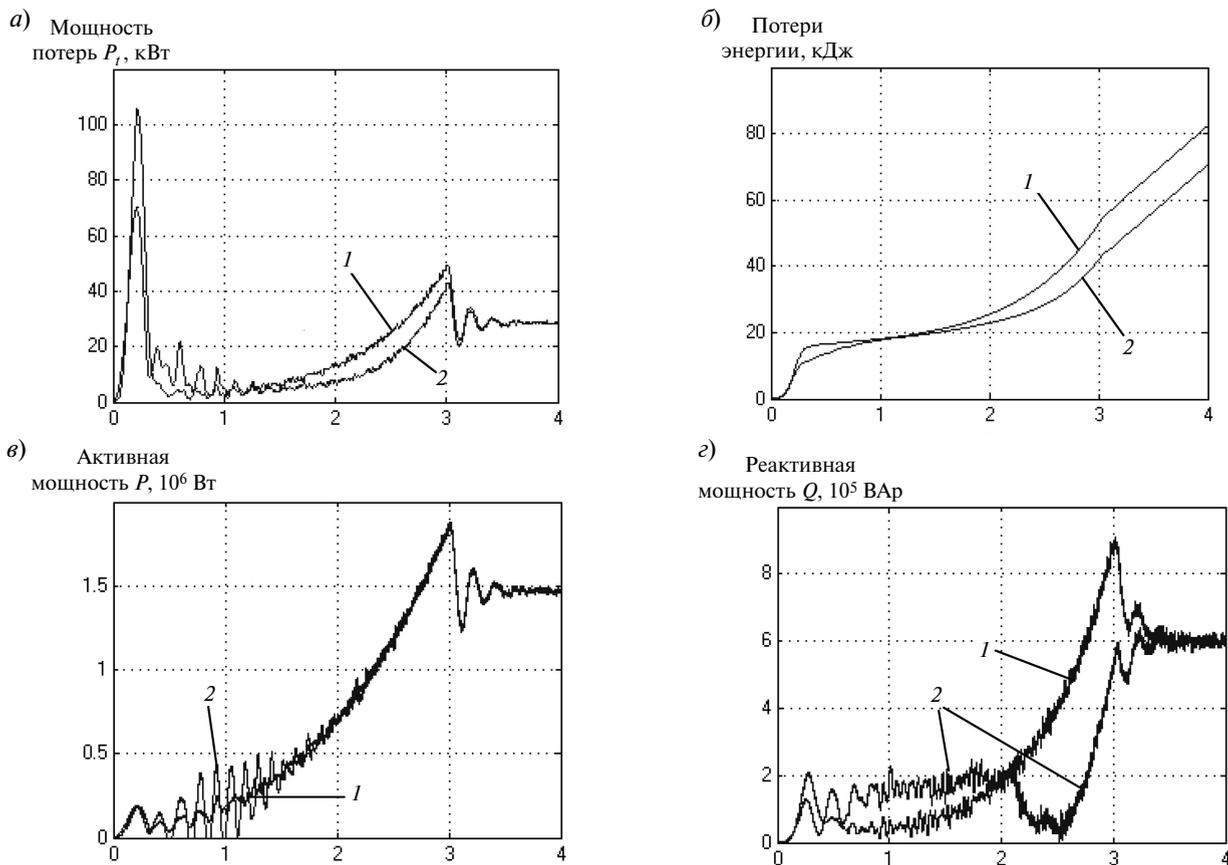


Рис. 8. Сравнение энергетических показателей процесса пуска двигателя при традиционном (кривые 1) и оптимальном (кривые 2) законе управления:

а — мощность потерь, б — потери энергии, в — потребляемая активная мощность и г — потребляемая реактивная мощность двигателя

Применение частотного управления позволяет не только повысить эксплуатационный КПД вентиляторов, но и обеспечить минимизацию потерь в приводе с помощью энергосберегающих алгоритмов управления. На основе компьютерной модели АД и модели скалярной системы управления приводом выявлены зависимости суммарных потерь энергии от потокосцепления при варьировании скорости вращения вала двигателя в пределах области частотного регулирования производительности вентилятора. Полученные зависимости позволили сформулировать экстремальный закон частотного управления, применение которого дает снижение потерь энергии на 5–10 % по сравнению с традиционным законом скалярного управления приводом с вентиляторной нагрузкой. В силу относитель-

но медленного изменения механической нагрузки привода ВГП целесообразно использовать рассмотренный в работе энергосберегающий алгоритм на основе градиентного метода поиска минимума потерь. С помощью компьютерного моделирования показано, что дополнительный энергосберегающий эффект дает применение специальных законов пуска двигателей, позволяющих минимизировать потери энергии в приводе при пуске и повысить коэффициент мощности за счет снижения потребляемой реактивной мощности. Дальнейшее развитие работ связано с повышением быстродействия поисковых алгоритмов на основе нейронных сетей и нечеткой логики, с одной стороны, и обоснования оптимальных алгоритмов пуска на основе генетических алгоритмов, с другой.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Пронько В.С., Шонин О.Б.** Повышение энергетической эффективности главных вентиляторных установок шахт на основе многоцелевой системы управления частотно-регулируемым приводом // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2014. №2(195). С. 49–57.
2. **Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н.** Энергосберегающий асинхронный электропривод. М.: АCADEMIA, 2004. 256 с.
3. **Бесекиерский В.А., Попов Е.П.** Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975. 768 с.
4. **Булгаков А.А.** Частотное управление асинхронными двигателями. 3-е изд. М.: Энергоиздат, 1982. 216 с.
5. **Виноградов А.В.** Учет потерь в стали, насыщения и поверхностного эффекта при моделировании динамических процессов в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе // Электротехника. 2005. № 5. С. 57–61.
6. **Thanga Raj C., Srivastava S.P., Pramod Agarwal.** Energy Efficient Control of Three-Phase Induction Motor. *International Journal of Computer and Electrical Engineering*. 2009. Vol. 1. №1. P. 107–112.
7. **Вдовин В.В., Панкратов В.В.** Синтез адаптивного наблюдателя координат бездатчикового асинхронного электропривода // Известия ТПУ. 2012. №4. С. 148–153.
8. **Chandan Chakaborty, Minh C. Ta, Toshiuki Uchida, Yoichi Hori.** Fast Search Controllers for Efficiency Maximization of Induction Motor Based on DC Link Power Measurement // *Proceedings of the Power Conversion Conference*, 2002. PCC-Osaka. 2002. P. 402–408.
9. **Браславский И.Я., Костылев А.В., Цибанов Д.В.** Оптимизация пусковых процессов в системе «реальная сеть-ПЧ-АД» // Труды международной 15-ой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока». Екатеринбург. 2012. С. 175–178.

## REFERENCES

1. **V.S. Pronko, O.B. Shonin.** Povysheniye energeticheskoy effektivnosti glavnykh ventilyatornykh ustanovok shakht na osnove mnogotselevoiy sistemy upravleniya chastotno-reguliruyemym privodom. *NTV SPbGPU*. 2014. № 2(195). S. 49–57. (rus.)
2. **Braslavskiy I.Ya., Ishmatov Z. Sh., Polyakov V. N.** Energosberegayushchiy asinkhronnyy elektroprivod. М.: АCADEMIA, 2004. (rus.)
3. **Besekerskiy V. A., Popov Ye. P.** Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya. М.: Nauka, 1975.
4. **Bulgakov A.A.** Chastotnoye upravleniye asinkhronnymi dvigatelyami. — 3-ye izd. М.: Energoizdat, 1982. (rus.)
5. **Vinogradov A.V.** Uchet poter vstali, nasyshcheniya i poverkhnostnogo effekta pri modelirovanii dinamicheskikh protsessov v chastotno-reguliruyemom asinkhronnom elektroprivode. *Elektrotekhnika*. 2005. № 5. S. 57–61. (rus.)
6. **Thanga Raj C., Srivastava S.P., Pramod Agarwal.** Energy Efficient Control of Three-Phase Induction Motor. *International Journal of Computer and Electrical Engineering*. 2009. №1. Vol. 1. P. 107–112.
7. **Vdovin V. V., Pankratov V. V.** Sintez adaptivnogo nablyudatelya koordinat bezdatchikovogo asinkhronnogo elektroprivoda. *Izvestiya TPU*. 2012. №4. (rus.)
8. **Chandan Chakaborty, Minh C. Ta, Toshiuki Uchida, Yoichi Hori.** Fast Search Controllers for Efficiency Maximization of Induction Motor Based on DC Link Power Measurement. *Proceedings of the Power Conversion Conference*, 2002. PCC-Osaka 2002. P. 402–408.
9. **Braslavskiy I.Ya., Kostylev A.V., Tsibanov D.V.** Optimizatsiya puskovykh protsessov v sisteme «realnaya set-PCh-AD». *Trudy mezhdunarodnoy 15-oy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Elektroprivody peremennogo toka"*. Yekaterinburg, 2012. S. 175–178. (rus.)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ШОНИН Олег Борисович** — доктор технических наук профессор кафедры электротехники, электро-энергетики, электромеханики Национального минерально-сырьевого университета "Горный"; 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д. 2; E-mail: ninosh\_eltech@mail.ru  
**ПРОНЬКО Владимир Сергеевич** — аспирант кафедры электротехники, электроэнергетики, электромеханики; Национального минерально-сырьевого университета "Горный". 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2. E-mail: pronko.vr@gmail.com

## AUTHORS

**SHONIN Oleg B.** — National Mineral Resources University. 2, line 21 V.O., St. Petersburg, Russia, 199106. E-mail: ninosh\_eltech@mail.ru  
**PRONKO Vladimir S.** — National Mineral Resources University. 2, line 21 V.O., St. Petersburg, Russia, 199106. E-mail: pronko.vr@gmail.com

УДК 627

*А.М. Вакуленко*

## МЕТОДОЛОГИЯ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА РАЗРУШАЮЩЕЙ ЛЕДОВОЙ НАГРУЗКИ ОТ КИЛЯ ТОРОСА

*A.M. Vakulenko*

### METHODOLOGY OF NUMERICAL CALCULATION OF BREAKING LOAD FROM ICE RIDGE KEEL

Рассматриваются моделирование численным методом разрушающей ледовой нагрузки от киля тороса при взаимодействии с гидротехническими сооружениями и сравнение полученных результатов с аналитическим методом. Изложена методология подобного численного расчета для гидротехнических сооружений произвольной формы. Показано, что результаты численного моделирования и аналитического решения для вертикального сооружения находятся в хорошем соответствии между собой.

КИЛЬ ТОРОСА; PLAXIS 2D; МКЭ; МОДЕЛЬ КУЛОНА-МОРА.

Presented herein are the results of numerical modeling of the breaking load from ice ridge keel interaction with a hydraulic structure, and the comparison of the last with analytical solution. The paper describes the methodology of the numerical calculations of the ice loads on arbitrary shape hydraulic structures. The results obtained from the numerical and analytical solutions for vertical structures are in a good correlation.

RIDGE KEEL; PLAXIS 2D; FEM; MOHR-COULOMB MODEL.

Арктика становится важным местом решения технических задач. В первую очередь это обусловлено открытием больших запасов нефти и газа, которые находятся на шельфе, для которого характерно наличие ледяного покрова. Наиболее часто встречающаяся опасность (риск), представляющая угрозу для гидротехнических сооружений (ГТС), — это взаимодействие с ледовыми образованиями [1–3]. Торос — ледовая формация, состоящая из ледяных блоков-обломков, образовавшихся в результате сжимающих или сдвиговых процессов в ледяном поле [3].

Ледяные образования, в том числе и торосистые льды, постоянно перемещаются под действием ветра и течения, препятствуют навигации и оказывают значительные нагрузки на ГТС [4], что необходимо учитывать при проектировании.

Торос состоит из большого числа произвольно расположенных блоков-обломков льда различных размеров и формы. Торос принято разделять на три части: парус, консолидированный слой и киль тороса. В расчетах поперечное се-

чение тороса представляют симметричным, в виде перевернутой трапеции [5].

В нормативных документах нагрузку, создаваемую торосом, определяют от каждой части в отдельности [5–7]. Существующие методы расчета сил от воздействия льда на сооружения в основном представляют собой аналитические, эмпирические и полуэмпирические формулы. Расчетные формулы ограничены в использовании, они в основном определяют нагрузки от киля тороса на вертикальное сооружение. В российских нормативных документах [6, 7] формулы для расчета нагрузки от киля тороса на наклонные сооружения позволяют определить нагрузку при ограниченном диапазоне углов наклона сооружения.

Объектом исследования является взаимодействие киля тороса с ГТС.

Предмет исследования — оценка численным и аналитическим методами разрушающих ледовых нагрузок в киле тороса на контакте с вертикальным сооружением.

Цель — разработка методологии численного расчета разрушающей нагрузки в киле тороса от взаимодействия льда с сооружениями произвольной формы с применением программного комплекса PLAXIS 2D.

Киль — подводная часть тороса, расположенная ниже его консолидированного слоя [6]. Осадка тороса может достигать более 25 м [3]. Теории разрушения килля тороса или его блоков-обломков основаны на идеях методов механики грунтов [8]. Согласно результатам наблюдений разрушение в результате сдвига является доминирующей моделью разрушения неконсолидированных или частично консолидированных обломков льда. Лед представляет собой зернистый материал со структурой, напоминающий песчаный грунт, поэтому для его описания можно использовать модель Кулона-Мора с прочностью на сдвиг  $\tau$  [10]. Сцепление  $c$ , угол внутреннего трения  $\varphi$  и эффективное нормальное давление  $\delta'$  — это параметры, контролирующие прочность на сдвиг неконсолидированных или частично консолидированных слоев согласно формуле

$$\tau = c + \delta' \operatorname{tg} \varphi. \quad (1)$$

Практическая ценность результатов численного моделирования зависит от нескольких факторов, а именно от адекватности континуальной модели льда и способа разрушения реальной системы ледяного образования перед сооружением. В частности, МКЭ может быть эффективным средством для изучения влияния граничных условий, геометрии и толщины ледяного образования и других физико-механических параметров. Континуальное предположение об использовании МКЭ может быть подвергнуто критике, так как размер ледяных блоков-обломков значителен по сравнению с зернистой структурой льда. Тем не менее некоторые авторы считают, что континуальное предположение применимо для решения разных задач [10, 11]. На основании анализа натурных опытов на продавливание килей однолетних торосов в Ботническом заливе Балтийского моря J. Heinonen в 2004 году предложил зависимость между сцеплением и углом внутреннего трения килля тороса для континуальной модели в соответствии с рис. 1 [9].

Механизм разрушения килля тороса моделируется в рамках теории сдвиговой прочности Кулона-Мора. Расчетные схемы представляют

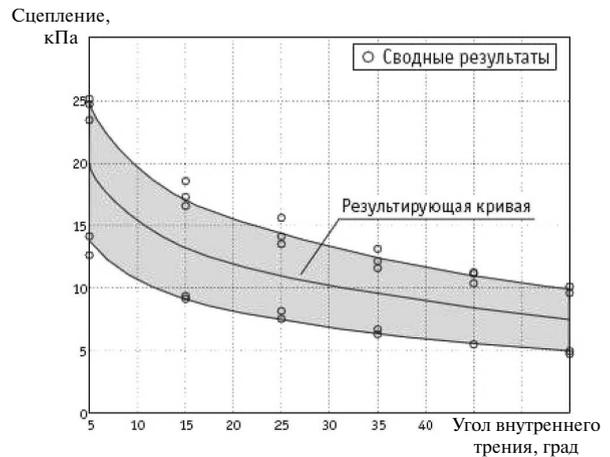


Рис. 1. Зависимость между сцеплением и углом внутреннего трения килля тороса, J. Heinonen (2004)

собой геометрические области, включающие киль тороса и внедряемое сооружение.

Для килля тороса и контактных элементов была принята упругоидеальнопластическая модель (с ограничением области растяжения), для сооружения — модель линейной упругости. В основу модели линейной упругости положен закон Гука об изотропном линейноупругом материале под нагрузкой. Закон Гука для изотропной линейной упругости может быть представлен в виде простейшей зависимости между напряжениями и деформациями. Эта зависимость содержит только два входных параметра — модуль Юнга и коэффициент Пуассона. В основном эта модель используется при моделировании таких материалов, как бетон, железобетон, металл, скальные породы. Упругоидеальнопластическая модель Кулона-Мора основана на параметрах грунта, которые хорошо известны в инженерной практике: модуле Юнга, коэффициенте Пуассона, сцеплении, угле внутреннего трения и угле дилатансии. Модель Кулона-Мора рекомендуется использовать, например, при определении предельных нагрузок.

Схема взаимодействия вертикального сооружения и килля тороса назначалась заданием глобального угла  $\alpha_k$  килля тороса в соответствии с рис. 2.

Конечно-элементные сетки образованы 15-тиузловыми треугольными элементами.

Зоны контакта сооружения со льдом моделируются специальными контактными элементами

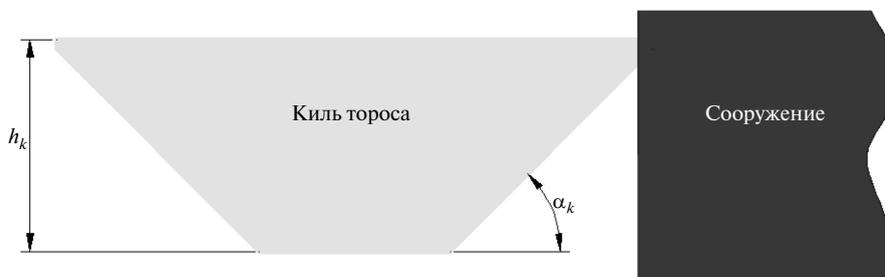


Рис. 2. Схема взаимодействия килля торося с сооружением

(интерфейсы), в которых параметры прочности могут быть снижены, чтобы соответствовать условию взаимодействия льда и контактного материала.

При воздействии килля торося с сооружением на границах расчетных областей принимаются следующие граничные условия: на нижней горизонтальной границе внедряемого сооружения — условие скользящей заделки (ненулевые горизонтальные и нулевые вертикальные перемещения), на задней границе килля торося — условие жесткой заделки (горизонтальные и вертикальные перемещения отсутствуют) [12]. На границе между килем торося и консолидированной частью зацеп ледяного образования моделируется сцеплением, которое в расчете согласно нормативному документу [6] принято равным 0,003 МПа.

Килль торося принимается намного длиннее, чем можно было бы предположить, чтобы избе-

жать влияния граничных условий на результат. На первом этапе к киллю торося применяются только силы плавучести. Плавучесть моделируется силой гравитации. Поскольку блоки-обломки килля торося легче воды, то килль торося для получения природного давления по глубине в его массиве моделируется перевернутым. Коэффициент гравитации рассчитывается таким образом, что при умножении на плотность килля торося результат будет равен силе его плавучести. На рис. 3 представлена геометрическая модель в PLAXIS 2D.

Коэффициент гравитации  $g'$  определяется по формуле

$$g' = g \left( \frac{\rho}{\rho_r} - 1 \right), \quad (2)$$

где  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  — ускорение свободного падения;  $\rho_r$  — плотность килля торося,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\rho$  — плотность воды,  $\text{кг/м}^3$ .

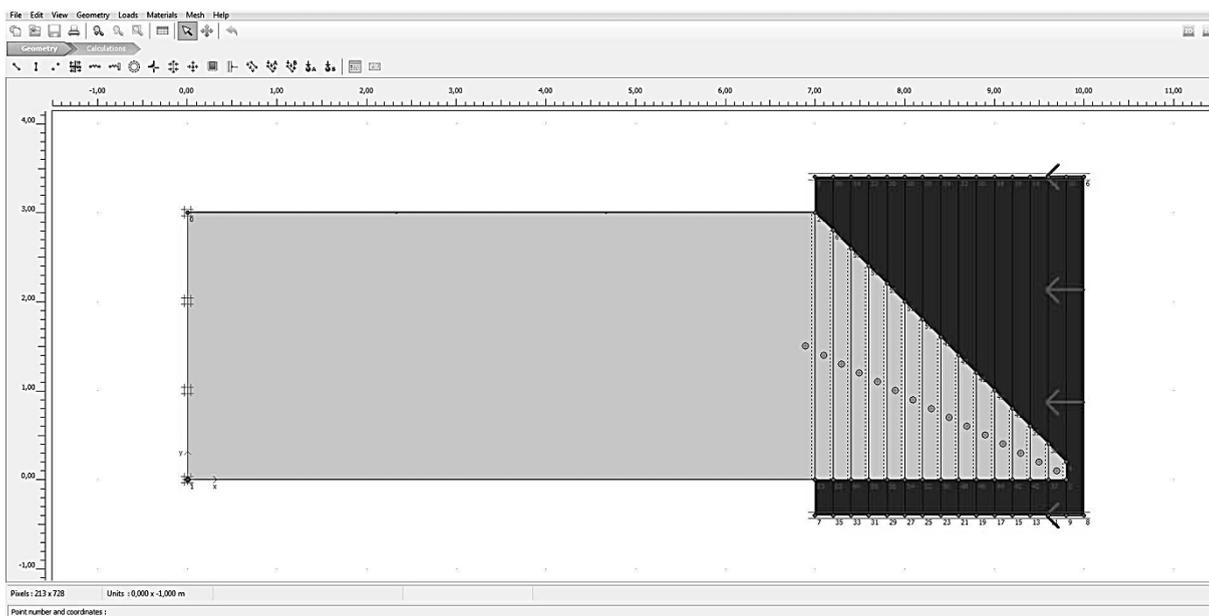


Рис. 3. Геометрическая модель в PLAXIS 2D

Удельная сила плавучести кия тороса (удельная архимедова сила) будет равна

$$\gamma_r = \rho_r g' \quad (3)$$

Плотность кия тороса определяется по следующей формуле:

$$\rho_r = (1 - \psi_k) \rho_i \quad (4)$$

где  $\rho_i$  — плотность льда, кг/м<sup>3</sup>;  $\psi_k$  — пористость кия тороса, %.

Для моделирования процесса внедрения сооружения в киль тороса с учетом изменяемой площади контактной зоны использована процедура наращивания расчетной области кия тороса по мере внедрения сооружения. Этот прием предполагает создание общей конечно-элементной схемы, отвечающей условиям задаваемого максимального внедрения сооружения в киль тороса.

На первом этапе расчетов моделируется ситуация касания сооружением поверхности кия тороса с помощью деактивирования (исключения) соответствующих зон общей расчетной области и рассчитывается напряженно-деформированное состояние системы «киль тороса — сооружение» по задаваемому на этом этапе перемещению сооружения, соответствующему предельному. На последующих этапах расчетов активируется (включается) зона, глубина которой подбирается по глубине разрушения кия на предыдущем этапе, и вновь рассчитывается напряженно-деформированное состояние, соответствующее предельному перемещению. В процессе поэтапного активирования таких зон требуется обнуление полученных на предыдущем этапе значений перемещений системы «киль тороса — сооружение», в то время как компоненты вектора напряжений суммируются от этапа к этапу, определяя тем самым последовательное развитие реактивного сопротивления кия тороса в процессе постепенного внедрения сооружения.

В расчетах взаимодействия сооружения с килем тороса скопление разрушенных блоков-обломков кия тороса не учитывается, предполагается, что они свободно перемещаются за пределы сооружения. Сооружение моделируется невесомым, чтобы избежать влияния на разрушающую нагрузку от кия тороса. Взаимодействие кия тороса с сооружением моделируется по напряжениям, а не по деформациям.

Ниже представлены физико-механические и геометрические характеристики кия тороса; одни параметры рассчитаны согласно формулам (2)–(4), другие приняты согласно нормативным документам [6]. Сцепление и угол внутреннего трения кия тороса приняты в соответствии с рис. 1. Характеристики кия тороса следующие:

$h_k$ .....	3,0 м
$\psi_k$ .....	30 %
$\alpha_k$ .....	45 град
$\rho_i$ .....	900 кг/м <sup>3</sup>
$\rho$ .....	1000 кг/м <sup>3</sup>
$\rho_r$ .....	630 кг/м <sup>3</sup>

Расчетные характеристики кия тороса и сооружения:

	Киль тороса/Сооружение (металл)
Объемный вес $\gamma$ , кН/м <sup>3</sup> .....	3,63/0,0
Модуль деформации $E$ , кН/м <sup>2</sup> .....	$8,3 \times 10^7 / 2,1 \times 10^{11}$
Коэффициент Пуассона $\nu$ .....	0,3/0,15
Сцепление $c$ , кН/м <sup>2</sup> .....	10/—
Угол внутреннего трения, $\phi$ , град. ....	20/—

На рис. 4 приведен графический материал, иллюстрирующий развитие напряженно-деформированного состояния кия тороса, соответствует приращению внедрения сооружения в киль тороса на глубине этого внедрения, равном 1,6 м. Рис. 4 отчетливо показывает, что разрушение кия тороса происходит в результате сдвига.

На рис. 5 представлен график горизонтальной разрушающей нагрузки кия тороса при взаимодействии с вертикальным сооружением в PLAXIS 2D.

Для сравнения с численными результатами, полученными в PLAXIS 2D, нагрузки от кия тороса были также рассчитаны по формулам нормативного документа [6].

Согласно [6] горизонтальная составляющая нагрузки  $F_{k,h}$ , МН, от подводной части ледяного образования вычисляется по формуле

$$F_{k,h} = 0,5 \left[ 10^{-6} (\rho - \rho_i) g (1 - \psi_k) (h_k - h_c)^2 k_k + c_k \operatorname{ctg} \phi_k (k_k - 1) (h_k - h_c) \right] b_k \quad (5)$$

где  $\rho$  — плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $\psi_k$  — пористость (пустотелость) ледяного образования, определяемая по опытным данным; при их отсутствии допускается принимать  $\psi_k = 0,3-0,4$ ;  $h_k$  — расчетная глубина ледяного образования, м;  $h_c$  —

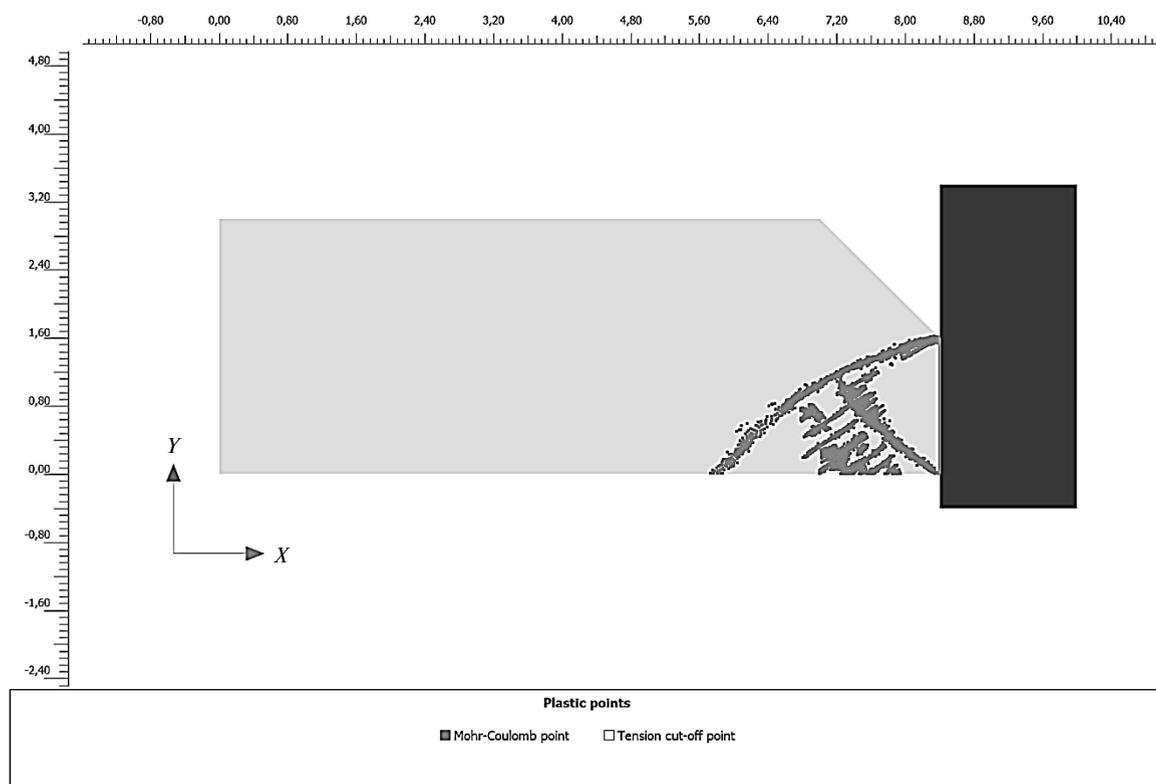


Рис. 4. Зоны пластических деформаций в PLAXIS 2D (темный кубик (точка Кулона-Мора) показывает, что напряжения имеют место на поверхности огибающей разрушения Кулона)

расчетная толщина консолидированной части, м;  $b_k$  — средняя ширина преграды по фронту в зоне действия ледяного образования, м;  $c_k$  — сцепление (с учетом зацепа) ледяного образования, МПа, определяемое по опытным данным; при их отсутствии допускается принимать  $c_k = 0,003-0,005$  МПа;  $\varphi_k$  — угол внутреннего трения ледяного образования, град., определяемый по опытным данным; при их отсутствии допускается принимать  $\varphi_k = 15-20^\circ$ ;  $k_k$  — коэффициент горизонтальной составляющей пассивного давления нагромождения обломков льда, вычисляемый по формулам

$$k_k = \left[ \frac{\cos(\varphi_k + 90 - \beta)}{\cos(90 - \beta) [1 - \sqrt{k_4}]^2} \right]^2; \quad (6)$$

$$k_4 = \frac{\sin(\varphi_k + \alpha_f) \sin \varphi_k}{\cos(90 - \beta - \alpha_f) \cos(90 - \beta)}. \quad (7)$$

Здесь  $\beta$  — угол наклона образующей конуса (передней грани сооружения откосного профиля)

к горизонту, град. (нагрузка на сооружение вертикального профиля определяется при  $\beta = 90^\circ$ );  $\alpha_f$  — угол трения между льдом и сооружением, град.;

$$\alpha_f = \arctg f, \quad (8)$$

где  $f$  — коэффициент трения между льдом и сооружением, определяемый по опытным данным; при их отсутствии допускается принимать для бетонных конструкций  $f=0,12$ , а для стальных —  $f=0,1-0,2$ .

В таблице сопоставлены результаты расчетов при взаимодействии с вертикальными сооружениями при различных значениях эффективной ширины сооружения  $D$  и коэффициенте трения между льдом и сооружением, равному  $f=0,18$ .

Как видим, результаты численного и аналитического решения имеют хорошее соответствие между собой для вертикальных сооружений. Следовательно, численный метод можно считать приемлемым для расчета ледовой нагрузки от килля торося на ГТС.

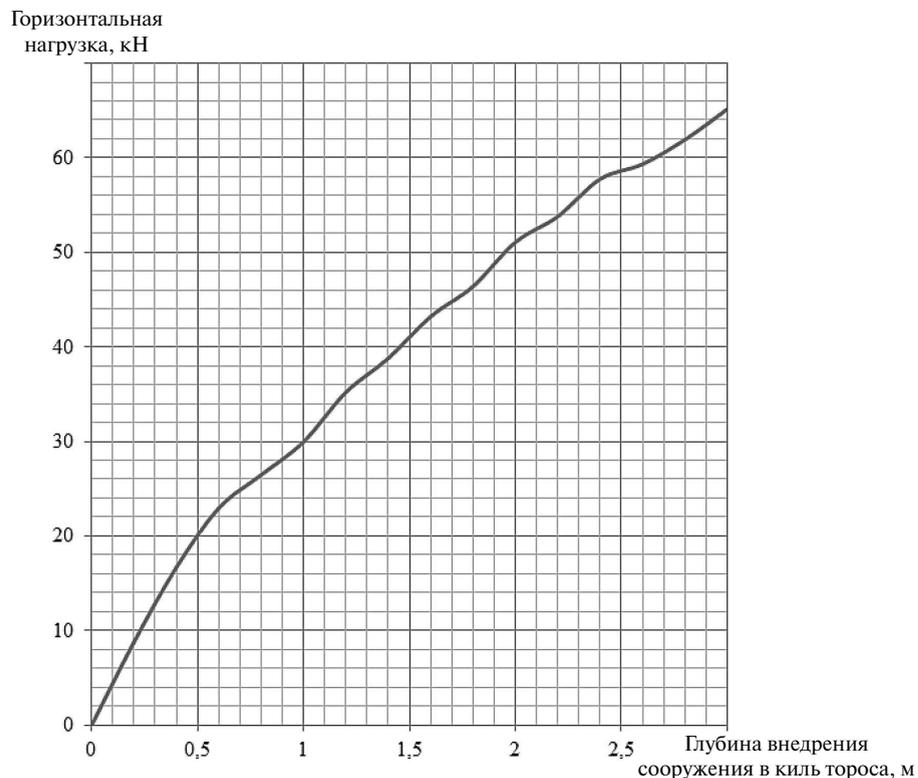


Рис. 5. График горизонтальной разрушающей нагрузки кия тороса при взаимодействии с вертикальным сооружением (моделирование в PLAXIS 2D)

#### Сводная таблица результатов

Способ получения результата	Максимальная горизонтальная нагрузка, МН			
	$D = 1\text{ м}$	$D = 10\text{ м}$	$D = 50\text{ м}$	$D = 100\text{ м}$
Аналитическое решение [6]	0,074	0,743	3,716	7,433
PLAXIS 2D	0,065	0,650	3,250	6,500

На основании выполненных серийных расчетов взаимодействия кия тороса с сооружениями с помощью PLAXIS 2D определены напряженно-деформированное состояние кия тороса при взаимодействии с вертикальным сооружением и максимальные силы от воздействия кия тороса в процессе этого взаимодействия; произведено сравнение с аналитическим решением. По результатам оценки установлено, что наиболее важными параметрами при моделировании являются свойства материала, граничные условия, геометрия кия тороса и сооружения, а так же трение между льдом и сооружением.

Результатом стала разработка методологии численного моделирования взаимодействия кия тороса с сооружениями произвольной формы в PLAXIS 2D. Произведено сравнение результата численного расчета **составляющей нагрузки от кия тороса на вертикальное сооружение** с требованиями нормативного документа [6]. Ценность данной работы заключается в том, что предложенная автором методология позволяет поэтапно определять значение и точку приложения максимальной разрушающей нагрузки от кия тороса при взаимодействии с сооружениями произвольной формы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Коржавин К.Н.** Воздействие льда на инженерные сооружения. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1962. 203 с.
2. **Tsinker G.** Marine Structures Engineering: Specialized Applications. Edition 1. Springer, 1995. 570 p.
3. **Лосет С., Шхинек К.Н., Гудместадт О., Хойланд К.** Воздействие льда на морские и береговые сооружения: Учебное пособие. СПб.: Лань, 2010. 272 с.
4. **Sanderson T.J.O.** Ice Mechanics. Risk to offshore structures. Graham and Trotman, 1988. 253 p.
5. **ISO/FDIS 19906**, 2010. Petroleum and natural gas industries — Arctic offshore structures; **ISO TC 67/SC 7**. Final Draft International Standard. / International Standardization organization. Geneva, Switzerland. 434 p.
6. **Свод правил СП 38.13330.2012.** Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). / Министерство регионального развития Российской Федерации. Москва, 2013.
7. **ВСН—41.88.** Проектирование ледостойких стационарных платформ / Миннефтепром. Москва, 1988.
8. **Иванов П.Л.** Грунты и основания гидротехнических сооружений. Механика грунтов: Учеб. для гидротехн. спец. вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1991. 447 с.
9. **Heinonen J.** Constitutive modeling of ice rubble in first-year ridge keel: PhD Thesis. / Helsinki University of Technology, Helsinki, Finland. Mode of access: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/2004/P536.pdf>.
10. **Timco G.W., Croasdale K., Wright B.** An overview of first-year sea ice ridges. Technical Report HYD-TR-047. PERD/CHC Report 5—112. August 2000. Mode of access: [ftp://ftp2.chc.nrc.ca/CRTReports/PERD/Ridge\\_00.pdf](ftp://ftp2.chc.nrc.ca/CRTReports/PERD/Ridge_00.pdf).
11. **Serré N., Liferov P.** Loads from ice ridge keels — experimental vs. numerical vs. analytical // Proceedings of the 20th IAHR International Symposium on Ice. Lahti, Finland, 2010.
12. PLAXIS. 2D, V.11. Руководство пользователя.

## REFERENCES

1. **KorzHAVIN K.N.** Action of ice on engineering structures. USSR Academic Science Siberian Branch, CRREL, Draft Translation No. 260. Hannover, 1971. (rus.)
2. **Tsinker G.** Marine Structures Engineering: Specialized Applications. Edition 1. Springer, 1995. 570 p.
3. **Loset S., ShkhineK K.N., Gudmestad O.T., Høyland K.V.** Actions from Ice on Arctic Offshore and Coastal Structures. St. Petersburg: Lan', 2010. 272 p. (rus.)
4. **Sanderson T.J.O.** Ice Mechanics. Risk to offshore structures. Graham and Trotman, 1988. 253 p.
5. **ISO/FDIS 19906**, 2010. Petroleum and natural gas industries — Arctic offshore structures; **ISO TC 67/SC 7**. Final Draft International Standard, International Standardization organization. Geneva, Switzerland, 434 p.
6. **Set of rules SR 38.13330.2012.** Loads and impacts on Hydraulic structures (from wave, ice and ships) / Ministry of Regional Development. Moscow, 2013. (rus.)
7. **VSN—41.88.** The design of ice-resistant stationary platform / Minnefteprom. Moscow, 1988. (rus.)
8. **Ivanov P.L.** Soils and bases of hydraulic structures. Mechanics of soils. Moscow. Higherschool, 1991. 447 p. (rus.)
9. **Heinonen J.** Constitutive modeling of ice rubble in first-year ridge keel: PhD Thesis. Helsinki University of Technology, Helsinki, Finland. Mode of access: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/2004/P536.pdf>.
10. **Timco G.W., Croasdale K., Wright B.** An overview of first-year sea ice ridges. Technical Report HYD-TR-047. PERD/CHC Report 5—112. August 2000. Mode of access: [ftp://ftp2.chc.nrc.ca/CRTReports/PERD/Ridge\\_00.pdf](ftp://ftp2.chc.nrc.ca/CRTReports/PERD/Ridge_00.pdf).
11. **Serré N., Liferov P.** Loads from ice ridge keels — experimental vs. numerical vs. analytical. *Proceedings of the 20th IAHR International Symposium on Ice*, Lahti, Finland, 2010.
12. PLAXIS. 2D, V.11. User's Guide.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**ВАКУЛЕНКО Алексей Михайлович** — аспирант кафедры водохозяйственного и гидротехнического строительства Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: [aleksejvakulenko@yandex.ru](mailto:aleksejvakulenko@yandex.ru)

## AUTHORS

**VAKULENKO Aleksei M.** — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: [aleksejvakulenko@yandex.ru](mailto:aleksejvakulenko@yandex.ru)

УДК 621.791.722: 621.762.04

*А.И. Рудской, Ю.А. Соколов, В.Н. Копаев*

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЯЕМОГО НАГРЕВА  
ПОДЛОЖЕК ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФОРМЫ  
ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*A.I. Rudskoi, Yu.A. Sokolov, V.N. Kopayev*

**MATHEMATICAL MODEL OF OPERATED HEATING  
OF SUBSTRATES RECTANGULAR SHAPE  
RECIPT POWDER MATERIALS**

Рассматривается методика управляемого нагрева поверхности подложки прямоугольной формы. Предлагаемая модель позволяет повысить уровень управляемости и повторяемости параметров технологического процесса, исключить влияние субъективных факторов.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ; НАГРЕВ ПОДЛОЖКИ; ТЕПЛОПЕРЕНОС; ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ.

The present article reveals the technique of operated heating of top surface of rectangular form's substrate. The offered model allows to raise level of controllability and repeatability of parameters of technological process' parameters and to exclude influence of subjective factors.

MATHEMATICAL MODELING, SUBSTRATE HEAT, CONDUCTION, TEMPERATURE FIELD.

Разработка новых и совершенствование известных технологий получения порошковых материалов — актуальная научная задача, имеющая важное промышленное значение [1–3]. В ряде технологических процессов как порошковой металлургии, так и лазерной обработки [4, 5] важно обеспечить равномерное температурное поле подложки и управляемое формирование структуры и свойств поверхностных слоев. Регулирование теплового режима подложки может быть реализовано на базе принципов адаптивного управления и математической модели (ММ), которая позволяет рассчитать плотность теплового потока по поверхности подложки, обеспечивающую требуемое температурное поле.

Адаптивное управление, основанное на обработке информации в реальном масштабе времени, использует в составе системы блок из-

мерения температурного поля в зоне нагрева (тепловизор) и устройство управления нагревом для получения заданного температурного поля. Оптическая камера, направленная на зону нагрева, обрабатывает сигналы, пропорциональные энергии излучения, и передает по цифровому протоколу информацию в компьютер.

Область подложки разбивается на малые прямоугольные элементы по горизонтали и вертикали, в каждом из которых сравнивается заданная и текущая температуры. Выполняется обработка полученных данных и выдача управляющих сигналов при рассогласовании температур.

Альтернатива адаптивному управлению — технология на базе ММ управления нагревом по поверхности подложки. При задании значений параметров (рабочая температура, время нагре-

ва или скорость нагрева, температурный градиент) необходимо подобрать функцию плотности теплового потока  $q$  от переменных  $x$  и  $y$  для обеспечения температурного поля близкого к равномерному.

Цель нашей работы — предложить математический аппарат управляемого нагрева подложек прямоугольной формы.

### Постановка задачи управляемого нагрева подложки

Алгоритм создания математического аппарата управляемого нагрева приведен на рис. 1. На первом этапе необходимо задать геометрию модели и материал подложки. Разработку модели целесообразно осуществлять в 3D-формате в современной CAD-системе, например SolidWorks. Следует отметить совместимость современных CAD и CAE систем, которые обеспечивают простую процедуру импортирования геометрической модели из SolidWorks в ANSYS. Далее необходимо выбрать конечные элементы, задать теплофизические свойства материалов и граничные условия.

Процесс происходит в вакуумной камере. Подложка представляет собой пластину из не-

ржавеющей стали, которая установлена на четыре опоры.

Процесс переноса тепла при нагреве подложки в рамках математической модели (ММ) включает в себя:

радиационное тепловое излучение между нагретой подложкой и внешней стенкой вакуумной камеры;

конвективный теплообмен через стенки рабочей камеры с окружающей средой;

теплопроводность подложки, опор; внешний источник тепла.

Нелинейное нестационарное уравнение теплопроводности имеет следующий вид [6]:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{grad} T) + q, \quad (1)$$

где  $c(T)$  — теплоемкость материала;  $\lambda(T)$  — коэффициент теплопроводности материала;  $\rho(T)$  — плотность материала;  $T$  — температура;  $t$  — время;  $q$  — плотность теплового источника.

Дополним уравнение (1) необходимыми граничными и начальными условиями.

Запишем граничные условия модели. При расчете теплообмена излучением необходимо учитывать потоки тепла в областях, попадающих на экраны в вакуумной камере установки.

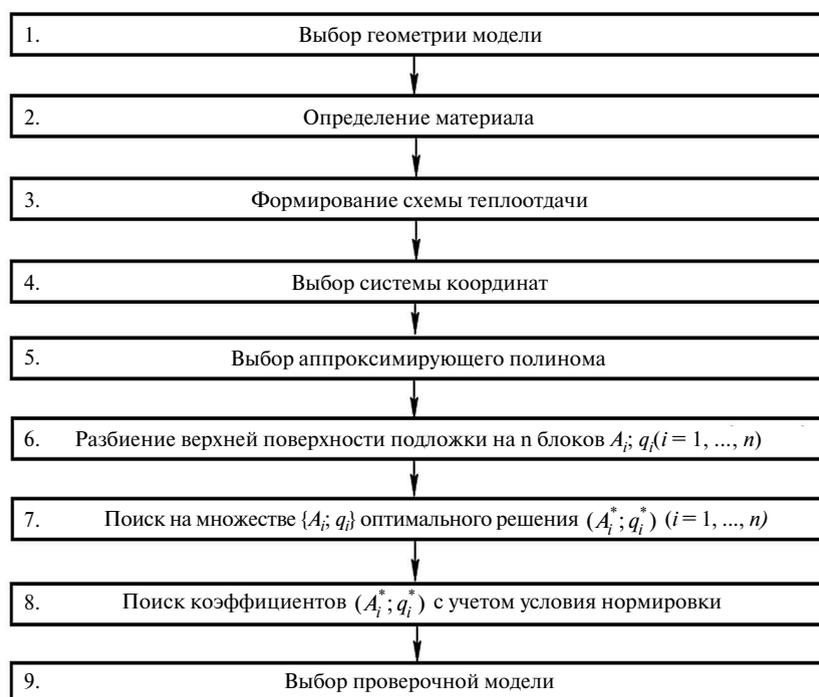


Рис. 1. Алгоритм разработки математического аппарата управляемого нагрева

С поверхности подложки тепло теряется излучением по закону Стефана—Больцмана, т. е. имеем краевую задачу с нелинейным граничным условием

$$q = \varepsilon_s \sigma_s (T_1^4 - T_0^4), \quad (2),$$

где  $T_0$  — температура на экране;  $T_1$  — температура на поверхности подложки;  $\sigma_s$  — постоянная Стефана—Больцмана;  $\varepsilon_s$  — приведенная степень черноты.

Приведенная степень черноты между двумя пластинами определяется следующим образом:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = 1 / (1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1), \quad (3)$$

где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  — степень черноты соответственно первой и второй пластины.

Граничные условия математической модели показаны на рис. 2:

область  $E$  (верхняя, боковые и нижняя части подложки) — радиационное тепловое излучение на экран вакуумной камеры;

область  $G$  (нижняя часть опоры) — конвективный теплообмен через стенки рабочей камеры с окружающей средой;

область  $F$  — стенки рабочей камеры.

В верхней области подложки задаем граничные условия второго рода (условия Неймана), соответствующие заданию на границе распределенного теплового потока. Для уравнения теплопроводности в изотропной среде оно записывается в виде

$$\lambda \partial T / \partial n = q(x, y, t). \quad (4)$$

В начальный момент времени температура в точках модели равна 20 °С.

Для определения формулы расчета плотности теплового потока на поверхности подложки прямоугольной формы целесообразно использовать свойство симметрии и принять в качестве аппроксимирующей функции полиномы четных степеней от  $x$  и  $y$ :

$$q(x, y) = \sum_{i,j \in \{0,2,4\}} C_{ij} x^i y^j, \quad (5)$$

где  $q(x, y)$  — плотность теплового потока в декартовой системе координат;  $C_{ij}$  — коэффициенты полинома;  $x, y$  — координаты в декартовой системе рассматриваемой области подложки.

К искомым параметрам относятся геометрические, которые задают размеры блоков, и технологические, определяющие плотность

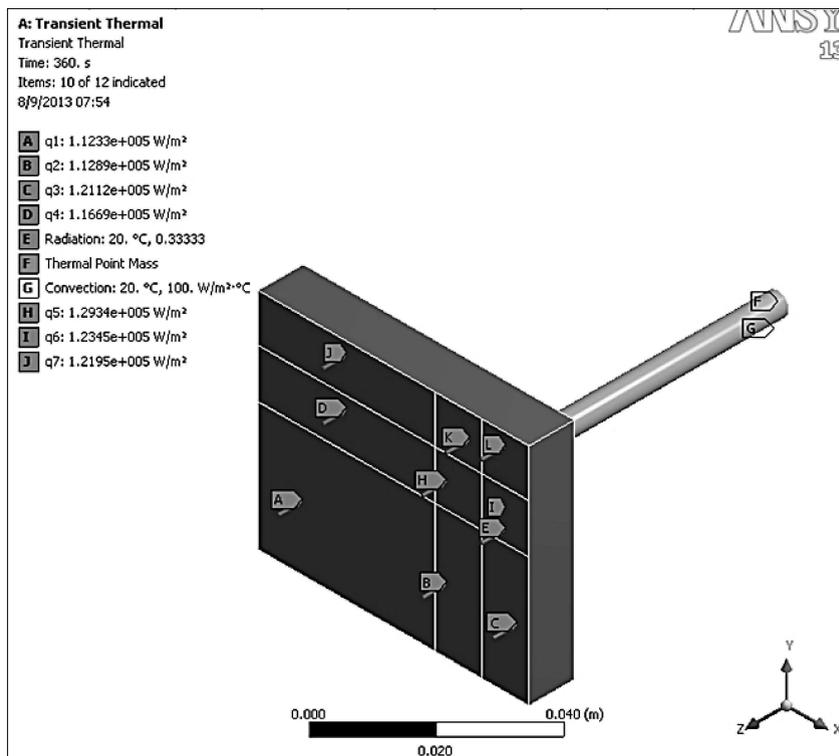


Рис. 2. Граничные условия модели

теплового потока в каждом блоке. Таким образом, необходимо решить многопараметрическую задачу оптимизации.

В основу функционирования алгоритма положен аппарат ЛП-поиска (модификация метода случайного поиска), пригодный для решения задач нелинейного программирования [7]. В  $m$ -мерном пространстве параметров получаем множество точек  $P_1, P_2, \dots, P_k$  (или множество формул расчета теплового потока с различными значениями коэффициентов  $C_{ij}$ ). В каждой точке пространства модель рассчитывает критерий  $DT = T_{\max} - T_{\min}$ .

Построение аппроксимирующего многочлена выполняется с учетом условия нормировки

$$Q = \int_0^{Y_{\max}} \int_0^{X_{\max}} q(x, y) dx dy, \quad (6)$$

где  $Q$  — мощность;  $X_{\max}, Y_{\max}$  — верхние пределы интегрирования по осям  $X$  и  $Y$ .

Расчет значений коэффициентов полинома осуществляется по формуле

$$C = A^{-1} B, \quad (7)$$

где  $C$  — вектор коэффициентов  $C_{ij}$ ;  $B$  — вектор найденных тепловых плотностей блоков  $q_i$ ;  $A$  — матрица степеней координат блоков и нормирующих коэффициентов.

После решения системы уравнений (7) получаем значения искомых коэффициентов  $C_{ij}$  и переходим к проверке полученного полинома: разбиваем исследуемую область подложки на произвольное количество блоков, в каждом из которых рассчитываем координаты его центра тяжести, и по известным значениям коэффициентов  $C_{ij}$  находим плотности теплового потока. Прикладываем получившуюся тепловую нагрузку к поверхности подложки и рассчитываем температурное поле.

В качестве модели материала как для подложки, так и для опор была принята сталь Х18Н9Т. Все задачи, решенные в данной работе, рассматривали нестационарный режим. Предполагалось, что за 5 минут поверхность подложки должна прогреться до температуры 800 °С.

Основным программным инструментом при исследовании и построении моделей был Ansys Workbench — мощный программный комплекс на основе использования метода конечных элементов. При решении системы уравнений использовался Microsoft Office Excel 2003.

Для определения формулы расчета плотности теплового потока на поверхности прямоугольного сечения использовали свойство симметрии и приняли в качестве аппроксимирующей функции полиномы четных степеней от  $x$  и  $y$ .

Для формализации плотности теплового потока выбрали функцию вида

$$q(x, y) = C_{44}x^4y^4 + C_{42}x^4y^2 + C_{24}x^2y^4 + C_{40}x^4 + C_{04}y^4 + C_{22}x^2y^2 + C_{20}x^2 + C_{02}y^2 + C_{00}. \quad (8)$$

Поскольку полином имеет 9 неизвестных коэффициентов  $C_{ij}$ , то первый квадрант необходимо разбить как минимум на девять непересекающихся областей, сумма площадок которых равна площади квадранта. Это можно сделать с помощью четырех безразмерных параметров —  $d1X, d2X, d1Y, d2Y$ , которые позволяют разделить исследуемую область на 9 прямоугольных блоков (с 1-го по 9-й). Параметры  $d1X, d2X, d1Y, d2Y$ , представленные на рис. 3, связаны с безразмерными следующими зависимостями:

$$\begin{aligned} d1X &= d1X A/2, d2X = d2X A/2, d1Y = \\ &= d1Y B/2, d2Y = d2Y B/2. \end{aligned} \quad (9)$$

Принцип оптимальности при подготовке формулы можно сформулировать следующим образом: определить такие значения искомых параметров ( $d1X, d2X, d1Y, d2Y$  и  $q_1 - q_9$ ), которые обеспечили бы заданное распределение температуры по всей площади. В частном случае для получения равномерно распределенного температурного поля необходимо подобрать такие значения коэффициентов, которые обеспечили бы минимизацию критерия  $DT = T_{\max} - T_{\min}$  ( $T_{\min}$  и  $T_{\max}$  — соответственно минимальная и максимальная температура на прямоугольной поверхности подложки).

При поиске решения использовались оптимизаторы, встроенные в Ansys Workbench. Оптимизатор Ansys Workbench заполняет пространство возможных решений пробными точками, 13 координат которых изменяются в следующих диапазонах:

$$\begin{aligned} d1X_{\min} &< d1X < d1X_{\max}; d2X_{\min} < d2X < d2X_{\max}; \\ d1Y_{\min} &< d1Y < d1Y_{\max}; d2Y_{\min} < d2Y < d2Y_{\max}; \\ q_{1\min} &< q_1 < q_{1\max}; q_{2\min} < q_2 < q_{2\max}; \\ q_{3\min} &< q_3 < q_{3\max}; \\ q_{4\min} &< q_4 < q_{4\max}; q_{5\min} < q_5 < q_{5\max}; \\ q_{6\min} &< q_6 < q_{6\max}; \\ q_{7\min} &< q_7 < q_{7\max}; q_{8\min} < q_8 < q_{8\max}; \\ q_{9\min} &< q_9 < q_{9\max}. \end{aligned}$$

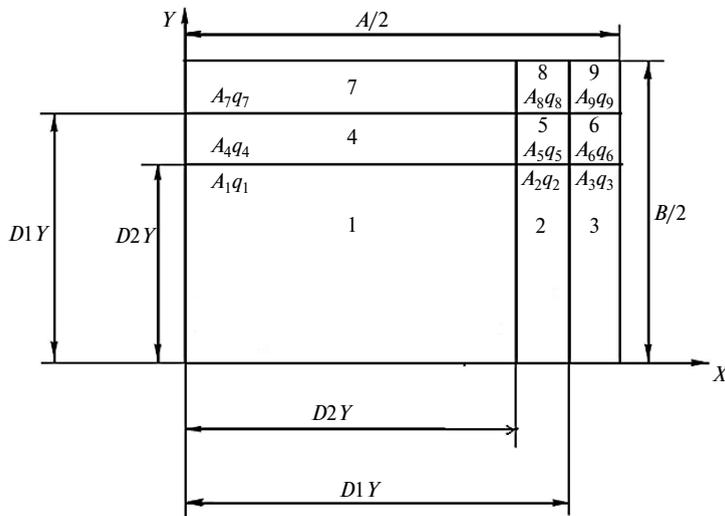


Рис. 3. Четырехпараметрическое разбиение поверхности подложки на девять частей

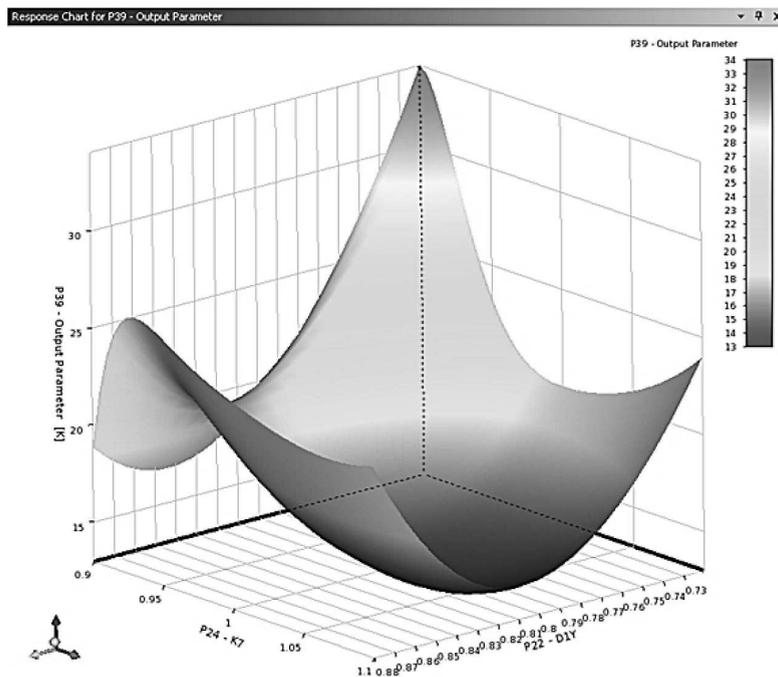


Рис. 4. Поверхности отклика параметра  $DT$  на изменение некоторых независимых параметров

Критерий  $DT$  сложным образом зависит от входных параметров, что нашло отражение на поверхностях отклика (рис. 4).

#### Анализ результатов

После того как оптимизатор Ansys Workbench завершит процедуру заполнения пробными точками всего исследуемого пространства возможных решений, переходим к процедуре оконча-

тельного выбора. Определена оптимальная точка, для которой рассогласование по температуре на всей прямоугольной поверхности составляет  $10,4^\circ\text{C}$ .

Распределение блоков, соответствующих им плотностей тепловых потоков, найденных оптимизаторами Ansys Workbench, и температурное поле площади прямоугольной формы при минимизации критерия  $DT$  приведены на рис. 5.

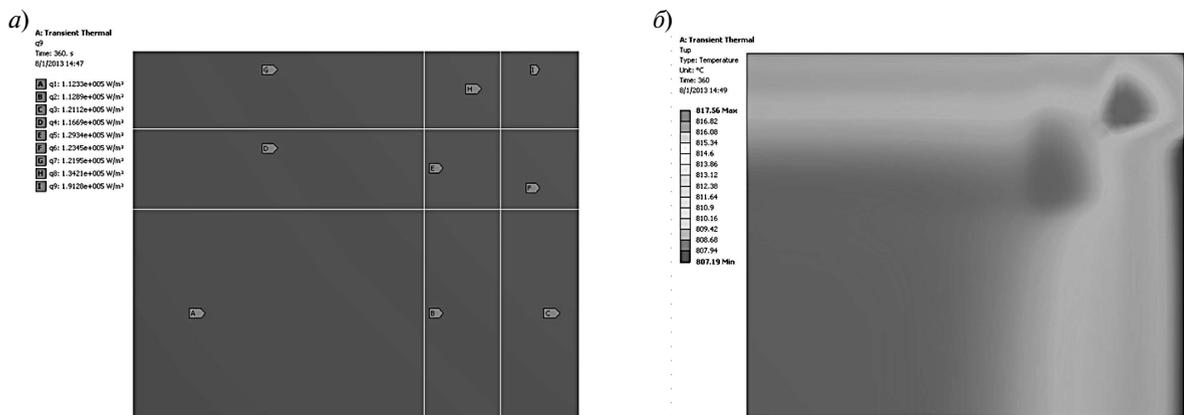


Рис. 5. Распределение плотностей тепловых потоков (а) и температурное поле (б), полученное при минимизации критерия DT

Систему уравнений (7) решали с помощью программы Excel. В результате расчета получили следующие значения искомым коэффициентов:  $C_{00} = 1,17 \cdot 10^5$ ;  $C_{02} = -1,48 \cdot 10^7$ ;  $C_{20} = -1,66 \cdot 10^7$ ;  $C_{22} = 5,64 \cdot 10^{10}$ ;  $C_{04} = 1,14 \cdot 10^{10}$ ;  $C_{40} = 7,1 \cdot 10^9$ ;  $C_{24} = -3,28 \cdot 10^{13}$ ;  $C_{42} = -2,35 \cdot 10^{13}$ ;  $C_{44} = 1,45 \cdot 10^{16}$ .

Для проверки математической модели весь прямоугольник был разбит на квадраты со стороной 10 мм. В сумме получилось 30 областей, для каждой из которых на базе полинома (8) были вычислены значения  $q(x, y)$ .

Визуализация распределения плотности теплового потока для проверочной задачи приведена на рис. 6, а. В трехмерном пространстве показана графическая зависимость теплового потока от координат  $x$  и  $y$ . График построен на площади, составляющей четвертую часть от общей поверхности нагрева. В результате при воз-

действии найденной тепловой плотности  $q(x, y)$  было получено температурное поле (рис. 6, б).

Контроль нагрева верхнего слоя подложки в реальном масштабе времени можно вести по нескольким схемам адаптивного управления с использованием в качестве датчиков обратной связи тепловизора (для измерения температурного поля поверхности подложки) и термопары (для измерения температуры нижней части подложки) или защитного экрана (предварительно определяется функциональная зависимость между температурой подложки и измеряемой точки).

Регулирование температурного поля подложки можно реализовать на базе математической модели, которая подбирает функцию плотности теплового потока от переменных  $x$  и  $y$ .

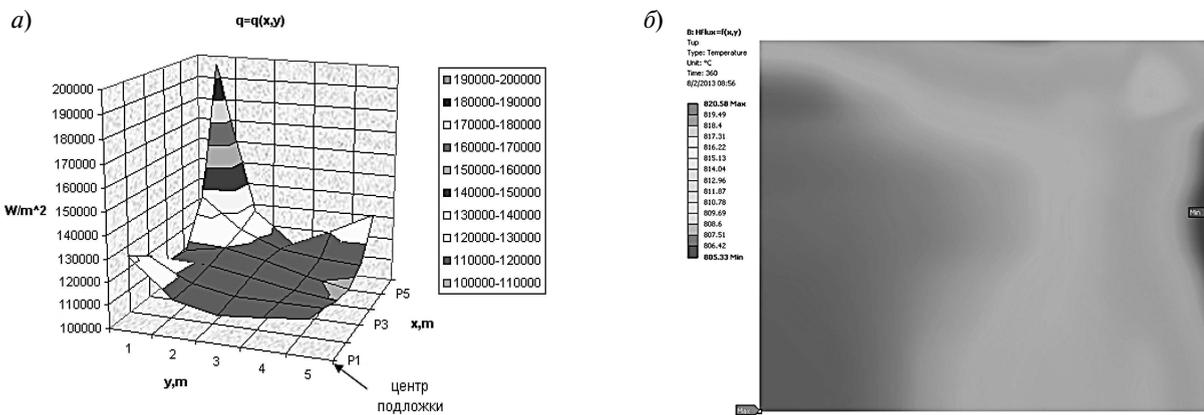


Рис. 6. Проверочная задача: график  $q(x, y)$  (а) и температурное поле (б) при приложении найденной функции  $q(x, y)$



Найденный полином для подложек прямоугольной геометрической формы с достаточно высокой точностью позволяет рассчитать необходимую тепловую плотность  $q(x, y)$  для формирования равномерного температурного поля.

Расчет плотности теплового потока на поверхности подложки прямоугольной формы по-

зволяет существенно упростить и удешевить аппаратную и программную часть системы управления, а также повысить надежность системы управления.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. № 3 (178). С. 148–155.

2. 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.

3. 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.

4. Kondrat'ev S.Y., Gorynin V.I., Popov V.O. Optimization of the parameters of the surface-hardened layer in laser quenching of components // *Welding International*. August 2012. Vol. 26, № 8. P. 629–632.

5. 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.

6. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. М.: Едиториал УРСС, 2003. 784 с.

7. Соболев И.М. Точки, равномерно заполняющие многомерный куб. М.: Знание, 1985. 32 с.

### REFERENCES

1. Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Kokorin V.N., Sizov N.A. Issledovaniye protsessa uplotneniya pri ultrazvukovom vozdeystvii na uvlazhnennuyu poroshkovuyu sredyu. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2013. № 3 (178). S. 148–155. (rus.)

2. Rudskoy A.I., Kokorin V.N., Kondratyev S.Yu., Filimonov V.I., Kokorin A.V. Pressovaniye heterofaznykh uvlazhnennykh zheleznykh poroshkov pri ispolzovanii metoda intensivnogo uplotneniya. *Naukoymkiye tekhnologii v mashinostroyenii*. 2013. № 5 (23). S. 13–20. (rus.)

3. Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Kokorin V.N. Pressovaniye heterofaznykh uvlazhnennykh poroshkovykh metallicheskiykh smesey dlya povysheniya kachestva vysokoplotnykh zagotovok s ispolzovaniyem metoda inten-

sivnogo uplotneniya. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal s prilozheniyem*. 2011. № 6. S. 12–16. (rus.)

4. Kondrat'ev S.Y., Gorynin V.I., Popov V.O. Optimization of the parameters of the surface-hardened layer in laser quenching of components. *Welding International*. August 2012. Vol. 26. № 8. P. 629–632.

5. Kondratyev S.Yu., Gorynin V.I., Popov V.O. Optimizatsiya parametrov poverkhnostno-uprochnennogo sloya pri lazernoy zakalke detaley. *Svarochnoye proizvodstvo*. 2011. № 3. S. 11–15. (rus.)

6. Samarskiy A.A., Vabishchevich P.N. Vychislitel'naya teploperedacha. M.: Yeditorial URSS, 2003. 784 s. (rus.)

7. Sobol I.M. Tochki, ravnomerno zapolnyayushchiye mnogomernyy kub. M.: Znaniye, 1985. 32 s. (rus.)

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**РУДСКОЙ Андрей Иванович** — доктор технических наук ректор Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, член-корреспондент РАН. 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: rector@spbstu.ru

**СОКОЛОВ Юрий Алексеевич** — кандидат технических наук главный конструктор ООО «НТК Электромеханика»; 172386, ул. Заводское шоссе, 2, г. Ржев, Россия. E-mail: s5577@inbox.ru

**КОПАЕВ Владимир Николаевич** — ведущий инженер ООО «НТК Электромеханика». 172386, ул. Заводское шоссе, 2, г. Ржев, Россия. E-mail: vkopaev\_ela@mail.ru

### **AUTHORS**

**RUDSKOI Andrey I.** — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: rector@spbstu.ru

**SOKOLOV Yuriy A.** — «Electromechanica». 2, Zavodskoe shosse, Rzhev city Tver region, Russia, 172386. E-mail: s5577@inbox.ru

**KOPAEV Vladimir N.** — «Electromechanica». 2, Zavodskoe shosse, Rzhev city Tver region, Russia, 172386. E-mail: vkopaev\_ela@mail.ru



УДК 669.715.017:621.785.3:620.18:622.24.05:620.193.4

*С.Ю. Кондратьев, О.В. Швецов, А.А. Альхименко*

## **ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ Д16Т И 1953Т1 В КОРРОЗИОННО-АКТИВНОЙ СРЕДЕ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН**

*S.Yu. Kondrat'ev, O.V. Shvecov, A.A. Alhimenko*

## **THE CHANGING OF MECHANICAL PROPERTIES OF ALUMINIUM ALLOYS D16T AND 1953T1 IN THE CORROSION ENVIRONMENT OF OIL WELLS**

Изучено влияние коррозионной среды на механические свойства алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1 в условиях эксплуатации бурильных труб для нефтяных скважин. Установлено, что сплав Д16Т по сравнению с 1953Т1 значительно более устойчив к коррозионному воздействию при температурах эксплуатации.

ДЕФОРМИРУЕМЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ; МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА; КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ; БУРИЛЬНЫЕ ТРУБЫ.

Influence of the corrosion environment under operating conditions of drilling pipes for oil wells on mechanical properties of aluminum alloys D16T and 1953T1 is studied. It is established that the alloy D16T is much steadier against corrosive attack at operation temperatures in comparison with 1953T1.

WROUGHT ALUMINUM ALLOYS; MECHANICAL PROPERTIES; CORROSION RESISTANCE; DRILL PIPES.

Анализ применения высокопрочных алюминиевых деформируемых сплавов Д16 и 1953 для изготовления бурильных труб, используемых в нефтяной и газовой промышленности, показывает значительные их преимущества по сравнению со сталями [1–4]. Однако существует и ряд недостатков, связанных с повышенной коррозионной чувствительностью алюминиевой трубы в условиях разработки нефтяной скважины. При этом основным конструктивным участком, подверженным коррозии, является часть, контактирующая со стальным замком [5, 6]. Влияние нагрева трубы при горячей посадке стального замка, а также в процессе эксплуатации на механические свойства алюминиевых сплавов изучено в [7–9]. Результаты исследований действия коррозионной среды на алюминиевые сплавы Д16 и 1953 в процессе эксплуатации бурильных труб весьма ограничены. Между тем известно [10], что при эксплуатации бурильных труб из алюминиевых сплавов материал подвергается нескольким видам коррозии:

общей коррозии (под действием бурового раствора с  $pH > 9$ ),

коррозионному растрескиванию (в условиях бурения в среде с повышенным содержанием сероводорода);

контактной коррозии (при контакте алюминиевой трубы со стальным замком).

Целью работы было исследование коррозионной стойкости алюминиевых сплавов Д16 и 1953 в условиях изготовления и эксплуатации бурильных труб для разработки нефтяных месторождений.

### **Материал и методика эксперимента**

Образцы для исследований вырезали в продольном направлении из деформированных заготовок бурильных труб  $\varnothing 147$  мм и толщиной стенки 13 мм из алюминиевых сплавов марок Д16 и 1953. В состоянии поставки трубы были термообработаны по стандартным режимам: для сплава Д16Т — закалка от 500 °С в воде + естественное старение в течение 4 суток; для 1953Т1 —

закалка от 480 °С в воде + искусственное старение при 125 °С длительностью 24 ч.

Для оценки однородности материала по химическому составу микрорентгеноспектральным анализом на установке «Самебах» определяли содержание химических компонентов в различных участках трубы. По результатам исследования признаков ликвации легирующих элементов не выявлено. Содержание примесей в сплавах составляло меньше 0,1 масс. %. Содержание основных химических компонентов в сплавах соответствовало стандартным значениям (табл. 1).

Для испытаний на растяжение изготавливали стандартные пятикратные цилиндрические образцы  $d_0 = 6$  мм. Механические свойства определяли при статических испытаниях на одноосное растяжение при комнатной температуре по ГОСТ 1497–84. Испытания проводили на разрывной машине «Schenck» с максимальным усилием нагружения 200 кН при скорости нагружения 1 мм/мин.

Образцы подвергали кратковременной однократной выдержке длительностью 3–10 мин при температурах 200 или 250 °С, что моделировало технологический нагрев бурильных труб при

горячей посадке замкового соединения, а затем — длительной (эксплуатационной) выдержке 500 или 1000 ч при температуре 150 °С в коррозионной среде или на воздухе. Нагрев образцов проводили в камерных печах «СНОЛ-1.6.2.5. 1/11-И2». Контроль температуры осуществляли по термопаре, впаянной в центр контрольного образца. Точность регулировки температуры составляла  $\pm 2,5$  °С. Образцы загружали в печь, предварительно нагретую до заданной температуры, выдерживали на воздухе или в коррозионной среде заданное время и охлаждали на воздухе. Механические испытания проводили на образцах после термического воздействия.

В качестве коррозионной среды, моделирующей условия разработки нефтяной скважины, использовали раствор NaCl + NaOH ( $pH = 11$ ).

#### Результаты экспериментальных исследований

Результаты определения механических свойств металла труб в исходном состоянии приведены в табл. 2. Видно, что свойства исследованных сплавов соответствуют стандартным значениям. При этом исходная прочность сплава 1953Т1 выше, а пластичность — ниже по сравнению со сплавом Д16Т.

Таблица 1

**Фактический и стандартный химический состав исследованных сплавов**

Марка сплава	Материал	Содержание основных химических элементов, масс. %									
		Al	Mg	Zn	Mn	Cu	Zr	Cr	Ti	Fe	Si
Д16Т	фактический	осн.	1,62	0,30	0,53	4,54	—	—	0,08	0,45	0,48
	ГОСТ 4784–97	осн.	1,2–1,8	0,30	0,3–0,9	3,8–4,9	—	—	0,1	0,5	0,5
1953Т1	фактический	осн.	2,6	5,7	0,17	0,45	0,02	0,19	0,05	0,1	0,05
	ТУ1–2–592–2003	осн.	2,0–3,0	5,6–6,2	0,1–0,3	0,40–0,80	$\leq 0,10$	0,15–0,25	0,02–0,1	$\leq 0,25$	$\leq 0,2$

Таблица 2

**Фактические и стандартные механические свойства исследованных сплавов**

Марка сплава	Механические свойства				
	Материал	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
Д16Т	фактический	520	340	15	14
	стандартный	$\geq 300$	$\geq 470$	$\leq 19$	—
1953Т1	фактический	570	520	12	21
	стандартный	$\geq 520$	$\geq 470$	$\leq 6,5$	—

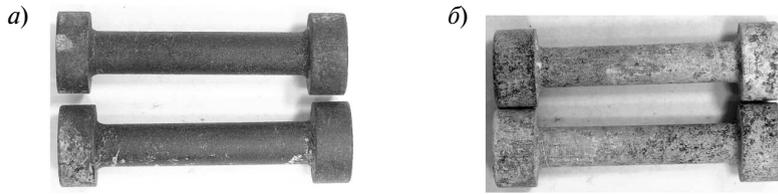


Рис. 1. Внешний вид образцов сплава Д16Т (а) и 1953Т1 (б) после технологического нагрева (200 °С, 6 мин) и последующей эксплуатационной выдержки (150 °С, 500 ч) в растворе NaCl + NaOH (pH=11)

На рис. 1 показан характерный внешний вид образцов сплавов после технологического нагрева и последующей эксплуатационной выдержки в коррозионной среде — растворе NaCl + NaOH (pH = 11). Видно, что поверхность образцов прореагировала с коррозионной средой, однако значительного воздействия на сплав (язвы, каверны, рытвины) не обнаружено. Следует отметить, что по результатам испытаний выявлено большее воздействие среды на сплав 1953Т1 по сравнению со сплавом Д16Т.

На поверхности образца из сплава 1953Т1 существенно больше продуктов коррозии, причем по всей площади.

Механические свойства сплавов Д16Т и 1953Т1 после предварительного кратковременного нагрева и последующего длительного нагрева по разным режимам в коррозионной среде иллюстрирует рис. 2. Для сравнения на этих же графиках показаны прочностные и пластические характеристики сплавов в состоянии поставки (исходные значения).

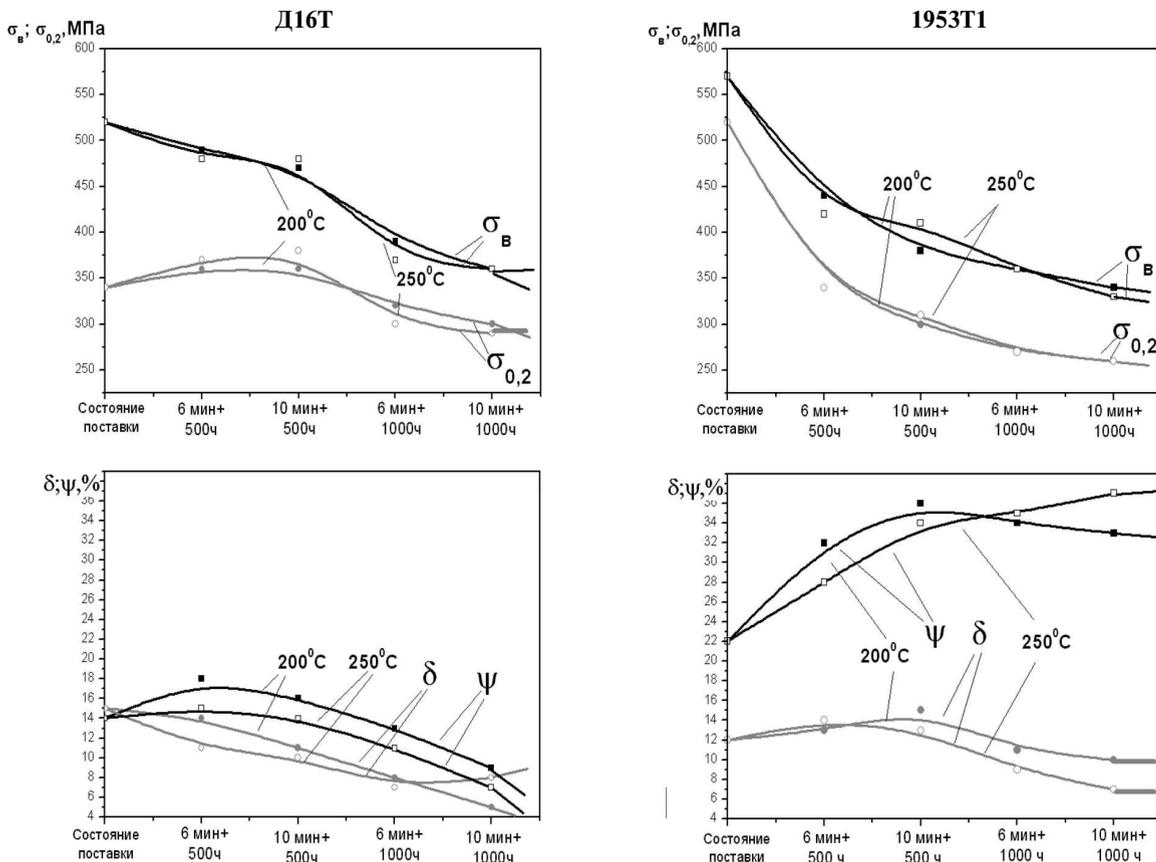


Рис. 2. Влияние выдержки длительностью 500 или 1000 ч при 150 °С в растворе NaCl + NaOH (pH = 11) на механические свойства сплавов Д16Т и 1953Т1 после предварительного нагрева (200 или 250 °С; 6 или 10 мин)

Из полученных зависимостей (рис. 2) следует, что практически все механические характеристики исследованных сплавов снижаются по сравнению с исходным состоянием после технологического и эксплуатационного (в коррозионной среде) нагревов. Наибольшее снижение механических свойств сплавов наблюдается после более длительных выдержек: 10 мин — при предварительном технологическом; 1000 ч — при последующем эксплуатационном нагревах. Так, в сплаве Д16Т в этом случае предел текучести снижается на 15 %, а предел прочности — на 30 % относительно состояния поставки. В сплаве 1953Т1 при тех же условиях происходит значительно большее снижение механических свойств по сравнению с состоянием поставки:  $\sigma_{0,2}$  — на 50 %;  $\sigma_B$  — на 40 %. При этом относительные удлинение и сужение в сплаве Д16Т также несколько уменьшаются, а в сплаве 1953Т1  $\delta$  — снижается, а  $\psi$  — возрастает.

Важно отметить, что выдержка длительно-стью 500 ч при 150 °С в коррозионной среде практически не изменяет механические характеристики сплава Д16Т, но значительно снижает

пределы текучести и прочности сплава 1953Т1 — соответственно на 40 и 30 % по сравнению с состоянием поставки.

Полученные результаты экспериментов показывают, что кратковременный технологический нагрев в сочетании с последующим длительным эксплуатационным нагревом в коррозионно-активной среде снижает механические свойства исследованных сплавов, причем сплава 1953Т1 — в значительно большей степени. После испытаний прочностные характеристики сплава Д16Т выше, чем у сплава 1953Т1, который в исходном состоянии имел преимущество по механическим свойствам.

Зависимости изменения механических свойств исследованных сплавов, представленные на рис. 2, учитывают влияние трех факторов: кратковременного технологического нагрева при сборке бурильной трубы, длительного нагрева при ее эксплуатации и коррозионного воздействия среды. Для выявления роли именно коррозионной среды необходимо сопоставить механические свойства сплавов после испытаний образцов, подвергнутых технологическому

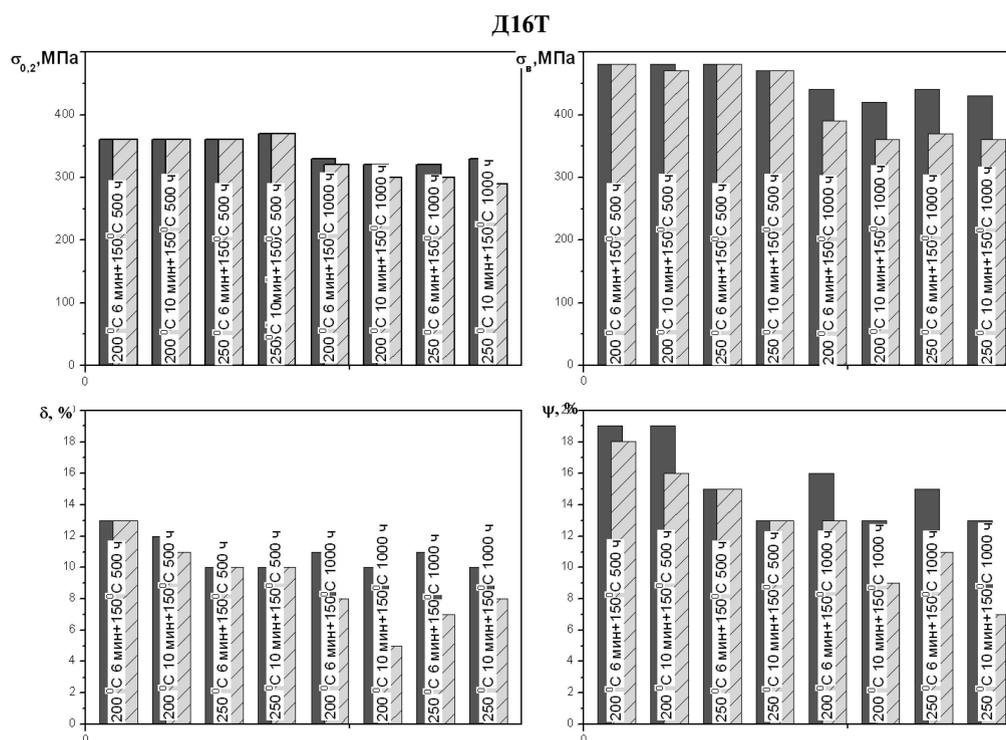


Рис. 3. Механические свойства алюминиевого сплава Д16Т после технологического нагрева (200 или 250 °С; 6 или 10 мин) с последующим эксплуатационным (150 °С; 500 или 1000 ч) на воздухе или в коррозионной среде (раствор NaCl + NaOH, pH = 11):  — без коррозионной среды;  — в коррозионной среде

нагреву в сочетании с последующим эксплуатационным в коррозионной среде, и образцов, подвергнутых нагревам по тем же режимам, но на воздухе. Результаты такого исследования приведены на рис. 3, 4.

Полученные результаты показывают, что по сравнению с воздушной средой наличие коррозионной среды практически не влияет на характер изменения механических свойств сплава Д16Т после технологического и эксплуатационного нагревов. Отрицательное влияние ее проявляется лишь при максимальной длительности выдержек: 10 мин — при технологическом; 1000 ч — при эксплуатационном нагревах. Однако это влияние незначительно. Сплав 1953Т1 значительно более чувствителен к воздействию коррозионной среды. Так, уже после 500 ч выдержки при 150 °С в 5 %-м растворе NaCl наблюдается снижение механических свойств сплава 1953Т1, особенно пластических характеристик, по сравнению с нагревом на воздухе.

Анализ экспериментальных данных свидетельствует, что коррозионная среда оказывает

отрицательное влияние на механические свойства сплавов Д16Т и 1953Т1 при эксплуатации в условиях бурения нефтяных месторождений. Однако чувствительность этих материалов к коррозионному воздействию среды различная: сплав Д16Т существенно более устойчив по сравнению с 1953Т1.

Кратковременный технологический нагрев (200–250 °С, 6–10 мин) при изготовлении буровой колонны с ее последующим длительным эксплуатационным нагревом (150 °С, 500–1000 ч) в коррозионно-активной среде (раствор NaCl + NaOH, pH = 11) снижает механические свойства алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1 по сравнению с состоянием поставки трубных заготовок. При этом наблюдаемая деградация свойств сплава 1953Т1, который в исходном состоянии имел преимущество по прочности и пластичности, значительно больше по сравнению с Д16Т.

Увеличение длительности температурного воздействия при технологическом и эксплуата-

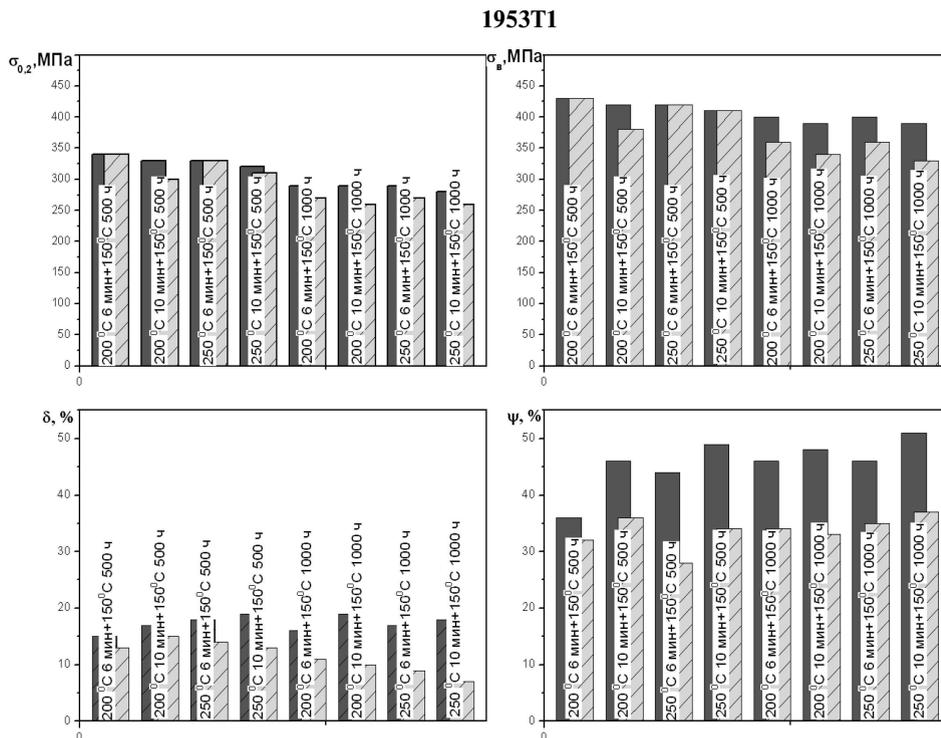


Рис. 4. Механические характеристики алюминиевого сплава 1953Т1 после технологического нагрева (200 или 250 °С; 6 или 10 мин) в сочетании с последующим эксплуатационным (150 °С; 500 или 1000 ч) на воздухе или в коррозионной среде (раствор NaCl + NaOH, pH = 11):

■ — без коррозионной среды; ▨ — в коррозионной среде

ционном нагревах усиливает отрицательное влияние коррозионной среды на механические свойства сплавов Д16Т и 1953Т1, причем сплав 1953Т1 существенно более чувствителен к этим факторам.

Несмотря на установленное отрицательное влияние коррозионной среды нефтяных скважин, алюминиевые сплавы 1953Т1 и, особенно, Д16Т достаточно устойчивы при эксплуатации в условиях добычи углеводородов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Boice E.G., Dalrymple R.S.** The Design and Performance Characteristics of Aluminum Drill Pipe // *Journal of Petroleum Technology*. 1963. Vol. XV, № 12. P. 1285–1291.
2. **Штамбург В.Ф., Фаин Г.М., Данелянц С.М., Шеина А.А.** Бурильные трубы из алюминиевых сплавов. М.: Недра, 1980. 240 с.
3. **Fain G.M.** [et al.]. Aluminum alloys for offshore drilling systems // *Proceedings of the 14-th International Conference on OMAE 1995 // Offshore Technology*. 1995. Vol. I-B. P. 299–306.
4. **Фаин Г.М., Головин А.А., Воронков Г.А., Данелянц М.С., Рябихина С.М.** Длительная прочность бурильных труб из алюминиевых сплавов при повышенных температурах эксплуатации // *Нефтяная промышленность. Сер. «Машины и нефтяное оборудование»*. 1980. № 8. С. 10–12.
5. **Колесов С.С., Кондратьев С.Ю., Чижиков В.В., Швецов О.В.** Исследование структуры и свойств бурильных труб из сплава Д16Т после эксплуатации в условиях нефтедобычи // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2011. № 11. С. 39–43.
6. **Швецов О.В., Кондратьев С.Ю.** Влияние горячей посадки замкового соединения на структуру

и свойства металла бурильных труб из алюминиевых сплавов Д16Т и 1953Т1 // *Технология машиностроения*. 2012. № 5. С. 31–36.

7. **Швецов О.В., Кондратьев С.Ю.** Влияние технологических нагревов на эксплуатационные свойства сплавов Д16Т и 1953Т1, применяемых для изготовления труб // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2012. № 5. С. 36–42.

8. **Кондратьев С.Ю., Швецов О.В.** Влияние высокотемпературных нагревов на структуру и свойства алюминиевых сплавов при изготовлении бурильных труб // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2013. № 4 (694). С. 24–30.

9. **Кондратьев С.Ю., Зотов О.Г., Швецов О.В.** Структурная стабильность и изменение свойств алюминиевых сплавов Д16 и 1953 в процессе изготовления и эксплуатации бурильных труб // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2013. № 10 (700). С. 15–21.

10. **Карлашов А.В., Яров А.Н., Гильман К.Н., Жидовцев Н.А.** Коррозионно-усталостная прочность бурильных труб из алюминиевых сплавов. М.: Недра, 1977. 183 с.

#### REFERENCES

1. **Boice E.G., Dalrymple R.S.** The Design and Performance Characteristics of Aluminum Drill Pipe. *Journal of Petroleum Technology*. 1963. Vol. XV, № 12. P. 1285–1291.
2. **Shtamburg V.F., Fain G.M., Danelyants S.M., Sheina A.A.** Buriilnyye truby iz alyuminiyevykh splavov. M.: Nedra, 1980. 240 s. (rus.)
3. **Fain G.M.** [et al.]. Aluminum alloys for offshore drilling systems. *Proceedings of the 14-th International Conference on OMAE 1995 // Offshore Technology*. 1995. Vol. I-B. P. 299–306. (rus.)
4. **Fayn G.M., Golovin A.A., Voronkov G.A., Danelyants M.S., Ryabikhina S.M.** Dlitelnaya prochnost burilnykh trub iz alyuminiyevykh splavov pri povyshennykh temperaturakh ekspluatatsii. *Neftyanaya promyshlennost. Ser. «Mashiny i neftyanoye oborudovaniye»*. 1980. № 8. S. 10–12. (rus.)
5. **Kolesov S.S., Kondratyev S.Yu., Chizhikov V.V., Shvetsov O.V.** Issledovaniye struktury i svoystv burilnykh trub iz splava D16T posle ekspluatatsii v usloviyakh nefte-dobychi. *Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyenii*. 2011. № 11. S. 39–43. (rus.)
6. **Shvetsov O.V., Kondratyev S.Yu.** Vliyaniye gory-

achey posadki zamkovogo soyedineniya na strukturu i svoystva metalla burilnykh trub iz alyuminiyevykh splavov D16T i 1953T1. *Tekhnologiya mashinostroyeniya*. 2012. № 5. S. 31–36. (rus.)

7. **Shvetsov O.V., Kondratyev S.Yu.** Vliyaniye tekhnologicheskikh nagrevov na ekspluatatsionnyye svoystva splavov D16T i 1953T1, primenyayemykh dlya izgotovleniya trub. *Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyenii*. 2012. № 5. S. 36–42. (rus.)

8. **Kondratyev S.Yu., Shvetsov O.V.** Vliyaniye vysokotemperaturnykh nagrevov na strukturu i svoystva alyuminiyevykh splavov pri izgotovlenii burilnykh trub. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*. 2013. № 4 (694). S. 24–30. (rus.)

9. **Kondratyev S.Yu., Zotov O.G., Shvetsov O.V.** Strukturnaya stabilnost i izmeneniye svoystv alyuminiyevykh splavov D16 i 1953 v protsesse izgotovleniya i ekspluatatsii burilnykh trub. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*. 2013. № 10 (700). S. 15–21. (rus.)

10. **Karlashov A.V., Yarov A.N., Gilman K.N., Zhidovtsev N.A.** Korrozionno-ustalostnaya prochnost burilnykh trub iz alyuminiyevykh splavov. M.: Nedra, 1977. 183 s. (rus.)

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**КОНДРАТЬЕВ Сергей Юрьевич** — доктор технических наук профессор кафедры технологии и исследований материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: petroprom2013@yandex.ru.

**ШВЕЦОВ Олег Викторович** — инженер ООО «Везерфорд»; 125047, 4-й Лесной пер., 4, Москва, Россия; e-mail: shvec\_off@mail.ru.

**АЛЬХИМЕНКО Алексей Александрович** — директор НИОЦ «Везерфорд-Политехник» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия ; e-mail: wft-polytechnic@cef.spbstu.ru.

**AUTHORS**

**KONDRAT'EV Sergey Yu.** — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: petroprom2013@yandex.ru.

**SHVECOV Oleg V.** — Weatherford; 125047, 4 Lesnoy Per. 4, Moscow, Russia; e-mail: shvec\_off@mail.ru.

**ALHIMENKO Aleksey A.** — Research and Educational Center «Weatherford-Polytechnic» of St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: wft-polytechnic@cef.spbstu.ru.

УДК 661.655

*Л.С. Ширяева, А.К. Гарбузова, Г.В. Галевский*

## **ПРОИЗВОДСТВО И ПРИМЕНЕНИЕ КАРБИДА ТИТАНА (ОЦЕНКА, ТЕНДЕНЦИИ, ПРОГНОЗЫ)**

*L.S. Shiryayeva, A.K. Garbuzova, G.V. Galevsky*

## **PRODUCTION AND USE OF TITANIUM CARBIDE (ASSESSMENT, TRENDS, FORECASTS)**

Карбид титана TiC — износо- и коррозионностойкий, твердый, химически инертный материал, востребован в различных областях для изготовления твердых сплавов, металлокерамического инструмента, жаропрочных изделий, защитных покрытий металлов. Новые перспективы применения карбида титана открываются при использовании его в наносостоянии (модифицирование сплавов различного состава и назначения). Оценка экономической эффективности плазменного производства карбида титана показала, что при производительности 26 т карбида титана в год (в расчете на один реактор) и себестоимости 5,64 млн руб./т полученная отпускная цена 400 \$/кг является оптимальной для плазменного производства карбида титана и отражает его конкурентоспособность на мировом рынке наноматериалов.

КАРБИД ТИТАНА; НАНОПОРОШКИ; ПЛАЗМЕННЫЙ СИНТЕЗ.

Titanium carbide TiC — wear — and corrosion-resistant, hard, chemically inert material, has been used in various fields for the manufacture of hard metal, cermet tools, refractory products, protective coatings of metals. New perspectives for the use of titanium carbide are opened when used in nanostate: modification of alloys of different composition and appointment. Economic evaluation of plasma production of titanium carbide showed that the productivity of 26 tonnes per year of titanium carbide (per one reactor) and cost 5.64 million rubles / T obtained selling price 400 \$ / kg is optimal for plasma production of titanium carbide and reflects its competitiveness on the world market of nanomaterials.

TITANIUM CARBIDE; NANOPOWDERS; PLASMA SYNTHESIS.

Карбид титана относится к группе синтетических, сверхтвердых, тугоплавких, жаропрочных материалов и достаточно востребован для производства металлообрабатывающего инструмента, защитных покрытий и карбидосталей. Производство карбида титана в наносостоянии открывает новые перспективы его применения, одним из которых является модифицирование сплавов различного состава и назначения. В работе [1] исследовали введение в алюминиевые деформируемые и литейные сплавы нанопорошка карбида титана. Было установлено измельчение структуры литых изделий, улучшение характеристик механических свойств, пластичности и износостойкости. При полунепрерывном литье слитков прутки вводили в непрерывном режиме при помощи специально разработанного

устройства, которое позволяло регулировать непрерывную подачу прутка из бухты в лунку кристаллизатора со скоростью, обеспечивающей требуемое содержание нанопорошка в слитках. Количество нанопорошка при последующем их введении в различные сплавы не превышало 0,05 %, а расход прутка составлял 20–25 кг на 1 т металла. Сопоставление шлифов поперечного сечения проб показывает, что эффект модифицирования усиливается от прутка из лигатуры Al–Ti до прутка из крупки с нанопорошками (рис. 1). Модифицирующий пруток отпрессован из гранул сплава Д16, алюминиевой крупки АКП, лигатуры Al — 2,0 %Ti. Модифицирующий пруток отпрессован из нанопорошка: TaN; BN; VC; SiC; B<sub>4</sub>C; Cr<sub>3</sub>(C<sub>0.8</sub>N<sub>0.2</sub>)<sub>2</sub>; LaB<sub>6</sub> и TiC. Можно видеть (рис. 2), что из всех исследован-

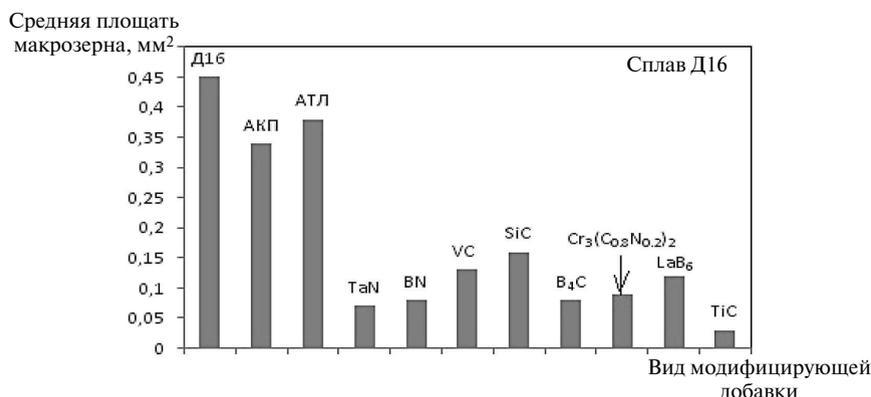


Рис. 1. Влияние вида нанопорошка на величину макрозерна на поперечном сечении проб диаметром 35 мм, отлитых в кокиль из сплава

ных модифицирующих добавок карбид титана занимает лидирующую позицию. Проведенные исследования позволили сформулировать требования к карбиду титана как компонента модифицирующих комплексов [2] (представлены на рис. 2). Основными из них являются уровень дисперсности и тугоплавкость.

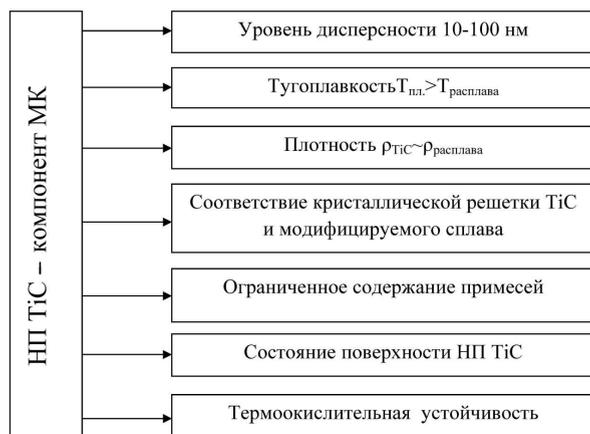


Рис. 2. Требования к карбиду титана TiC как компоненту модифицирующих комплексов

Именно для карбида титана характерно сочетание данных требований.

В настоящее время в России карбид титана такого назначения не производят. Для исследовательских целей его поставляет латышская фирма Neomat Compani [3]. Прогнозируемая Западно-Сибирским металлургическим комбинатом потребность в нанопорошке карбида титана составляет 400 т в год. Все это свидетельствует, что разработка и освоение технологии

производства карбида титана — актуальная научно-технологическая задача.

Цель настоящей работы — научное, технологическое и экономическое обоснование плазменного синтеза карбида титана как компонента модифицирующих комплексов.

#### Методика проведения исследований и расчетов

Для проведения экспериментальных исследований использовался промышленный плазмотехнологический комплекс, созданный СибГИУ и предприятием «Полимет». В основе комплекса — трехструйный прямоточный вертикальный плазменный реактор мощностью 150 кВт [4].

Реактор включает: камеру смешения с тремя плазмотронами ЭДП-104А, установленные под углом 30°, реактор и осадительную камеру. Наряду с реактором в комплекс входят системы шихтоподачи, электро-, газо-, водоснабжения, улавливания продуктов синтеза и вентиляции. Порошкообразное и газообразное сырье подается с помощью водоохлаждаемой фурмы в зону соударения плазменных струй. При этом формируется реакционная смесь заданного состава, осуществляется синтез и формирование нанодисперсных продуктов.

По уровню характеристик реактор может быть отнесен к современному электротермическому оборудованию [5]. Основные из них — следующие:

Характеристики	Значения
Мощность, кВт .....	150
Тип реактора .....	трехструйный прямоточный вертикальный

Тип плазмотрона, мощность, кВт..... ЭДП-104А, 50	
Плазмообразующий газ..... азот	
Масса нагреваемого газа, кг/ч..... 32,5	
Внутренний диаметр, м..... 0,054	
Объем реактора, м <sup>3</sup> ..... 0,001	
Футеровка канала реактора..... Диоксид циркония	
Температура плазменного потока, К..... 5400 (L = 0) — 2200 (L = 12)	
Температура футеровки, К..... 1549 (L = 0) — 770 (L = 12)	
Удельная электрическая мощность, МВт/м <sup>3</sup> ..... 2142	
Ресурс работы:	
анода..... 3125	
катода..... 112	
Загрязнение карбида титана продуктами эрозии, % масс	
анода..... Cu-0,0000954 %	
катода..... W-0,0000002 %	

Экспериментальное исследование проводилось в реакторе, теплоизолированном футеровкой из диоксида циркония с толщиной стенок 0,005 м и наружным диаметром 0,066 м, уменьшающим его диаметр до 0,056 м.

При выборе сырьевых материалов предпочтение было отдано порошкам титана и его диоксида, а в качестве карбидизатора-восстановителя использовался природный газ, содержащий до 96 % метана. Характеристики сырьевых материалов и плазмообразующего газа для синтеза карбида титана приведены в табл. 1 [6, 7]. С учетом характеристик сырья, плазмообразующего газа и параметров работы реактора были сформированы необходимые данные для термодинамического и кинетического моделирования процессов. Необходимые для анализа равновесные составы газообразных и конденсированных продуктов рассчитывались «константным» методом [8].

При термодинамическом моделировании выбран аналогичный подход, описанный в работе [9]. Расчеты выполнялись с использованием программы компьютерного моделирования высокотемпературных сложных химических равновесий «PLASMA» (ИХТТМ СО РАН), имеющей встроенную базу данных продуктов взаимодействия для оксидо-, боридо-, карбидо- и нитридообразующих систем. При расчетах рассматривалась область температур 1000–6000 К при общем давлении в системе 0,1 МПа.

Моделирование сырьевого и плазменного потока осуществлялось с помощью программы компьютерного моделирования взаимодействия сырьевого и плазменного потоков в условиях трехструйного реактора «PLASMA– BIS 80/MSW» (ИТМО АН Республики Беларусь — СибГИУ Минобрнауки России).

Экспериментальные исследования проводились с привлечением метода планируемого эксперимента, обработка результатов — по схеме с равномерным дублированием опытов [10].

Продукты плазменного синтеза исследовались методами рентгеновского, химического, электронно-микроскопического анализом, а также методом БЭТ определялась их удельная поверхность.

#### Термодинамическое моделирование высокотемпературных взаимодействий в карбидообразующих системах

Термодинамическое моделирование процессов синтеза проведено с целью прогнозирования оптимальных параметров получения карбида титана (соотношение компонентов и температуры), определения равновесных показателей процесса (степень превращения сырья в карбид, составы газообразных и конденсированных продуктов), оценки вклада в процессы карбидо-

Таблица 1

Сырьевые материалы и плазмообразующий газ

Сырьевой материал	Содержание основного вещества, % не менее	Дисперсность, мкм
Тонкодисперсный порошок титана ПТМк	99,9	0,5–5
Диоксид титана пигментный Р-1(ГОСТ 9808–84, изм.)	99,0	–1
Метан (природный газ)	93,6 (этан-3,0; пропан-2,18; бутан-1,18)	–
Технический азот (ГОСТ 9293–74, изм.)	99,5 (содержание кислорода не более 0,5)	–

образования газофазных реакций, обеспечивающих в условиях плазмохимической технологии эффективную переработку дисперсного сырья.

В связи с использованием метана и плазмообразующего газа — азота — в процессах синтеза в качестве титаносодержащего сырья — титана, оксида  $TiO_2$ , углеводородного сырья — объектами исследования были системы С–Н–N, Ti–O–C–H–N, Ti–C–H–N.

В исследуемых системах получение карбида титана при всех учитываемых в расчетах компонентов возможно при температуре ниже 3500 К [7]. При этом термодинамически возможны следующие газофазные реакции образования карбида:



Из них термодинамически более вероятной является реакция (1).

Образование карбида титана термодинамически возможно по газофазной реакции с участием паров титана и циановодорода (т. е. по схеме «пар — кристалл»), что позволяет прогнозировать возможность достижения его высокого выхода в реальных условиях синтеза.

### Моделирование взаимодействия плазменного и сырьевого потоков

Для прогнозирования характеристик сырья и оценки гидродинамических и энергетических режимов его эффективной переработки про-

ведено модельно-математическое исследование влияния на степень испарения начальной температуры плазменного потока, крупности сырья и массовой расходной концентрации ( $\mu_p = G_p / (G_g + G_t)$ ). Результаты исследования приведены на рис. 3, 4. Можно видеть, что степень испарения зависит от крупности, массовой расходной концентрации и начальной температуры плазменного потока [11, 12].

В зависимости от крупности время испарения частиц составляет 0,1–1 мс. При этом рабочие параметры реактора обеспечивают полное испарение порошков диоксида титана крупностью не более 5 мкм, а Ti — не более 10 мкм. По результатам моделирования осуществлен выбор титаносодержащего сырья.

Из оксидного сырья этим требованиям отвечает  $TiO_2$  марки Р-1, поставляемый в виде порошка крупностью 1 мкм [7]. Однако производимые в России порошки Ti марок ПТС, ПТМ, ПТОМ — грубозернистые и этим требованиям не удовлетворяют. Поэтому выбор сделан в пользу поставляемого зарубежными производителями микропорошка Ti марки ПТМк крупностью менее 5 мкм, в целом доступного, но дорогостоящего [6].

### Экспериментальное исследование плазменного синтеза карбида титана методом планируемого эксперимента

При экспериментальном исследовании в обоих случаях реализована полуреплика полного факторного эксперимента  $2^{5-1}$ . Оптимизировалось содержание продуктов синтеза карбида титана и свободного углерода. Для исследуемых

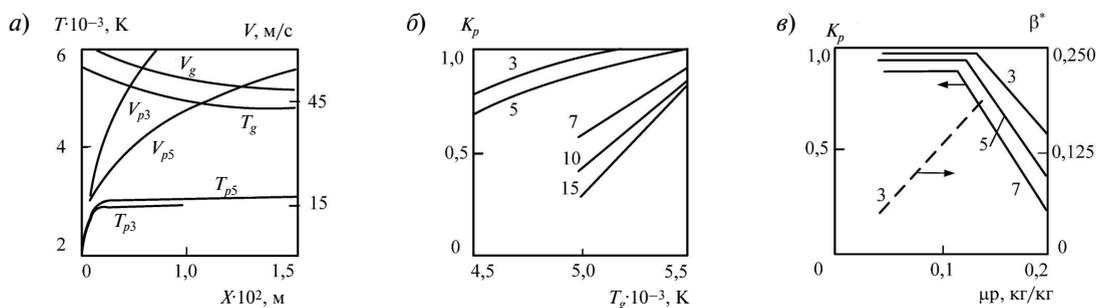


Рис. 3. Гидродинамические и энергетические режимы переработки оксида титана (IV) в трехструйном прямоточном реакторе:

a — изменение среднемассовой температуры и скорости плазменного потока и частиц по длине реактора ( $N = 75$  кВт,  $G_g = 9 \cdot 10^{-3}$  кг/с); б — влияние начальной температуры плазменного потока на степень испарения частиц; в — влияние массовой расходной концентрации на степень испарения частиц и долю энергии, переданной частицам ( $N = 75$  кВт,  $G_g = 9 \cdot 10^{-3}$  кг/с); 3, 5, 10, 15 — размер частиц, мкм

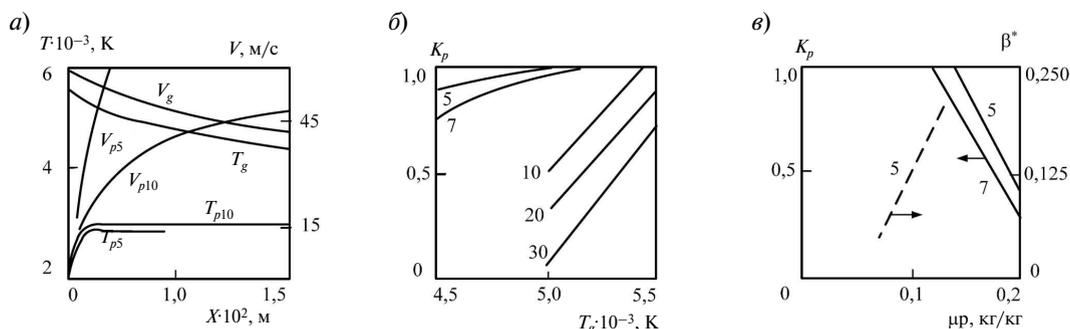


Рис. 4. Гидродинамические и энергетические режимы переработки титана в трехструйном прямоточном реакторе:

*a* — изменение среднemasовой температуры и скорости плазменного потока и частиц по длине реактора ( $N = 75$  кВт,  $G_g = 9 \cdot 10^{-3}$  кг/с); *b* — влияние начальной температуры плазменного потока на степень испарения частиц; *c* — влияние массовой расходной концентрации на степень испарения частиц и долю энергии, переданной частицам ( $N = 75$  кВт,  $G_g = 9 \cdot 10^{-3}$  кг/с)

технологических вариантов получены следующие уравнения, описывающие зависимости содержания карбида титана и свободного углерода от основных факторов, которые позволяют количественно оценить влияние отдельных факторов на параметры синтеза, оптимизировать и управлять процессами [13]:

$$\begin{aligned}
 [\text{TiC}(1)] = & 17,3211 + 0,0105 T_0 - 0,0156 T_3 + \\
 & + 0,1859[\text{CH}_4] - 3,432\{\text{H}_2\} - 0,4078\{\text{N}\} + \\
 & + 0,000004562 T_0 T_3 + 0,000782 T_0\{\text{H}_2\} - \\
 & - 0,0000567 T_3[\text{CH}_4] - 0,000435 T_3\{\text{H}_2\} + \\
 & + 0,0001353 T_3[\text{N}]; \quad (5)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 [\text{TiC}(1) - C_{\text{своб}}(1)] = & -53,95 + 0,01152 T_0 + \\
 & + 0,0476[\text{CH}_4] + 0,1325\{\text{H}_2\} + 0,09257[\text{N}] - \\
 & - 0,00000576 T_0 T_3 - 0,002938 T_3 - \\
 & - 0,00000876 T_0[\text{CH}_4] - 0,00000588 T_0\{\text{H}_2\} + \\
 & + 0,00000728 T_3[\text{CH}_4] - 0,000053 T_3[\text{N}] + \\
 & + 0,000417\{\text{H}_2\}[\text{N}]; \quad (6)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 [\text{TiC}(2)] = & -182,277 + 0,05187 T_0 + 0,000927 T_3 + \\
 & + 0,9428[\text{CH}_4] - 0,4464\{\text{H}_2\} - 0,1208[\text{N}] - \\
 & - 0,0001878 T_0[\text{CH}_4]; \quad (7)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 [\text{TiC}(2) - C_{\text{своб}}(2)] = & -13,162 + 0,01157 T_3 + \\
 & + 0,01588[\text{CH}_4] - 0,1244\{\text{H}_2\} + 0,00013[\text{N}] - \\
 & - 0,000001162 T_0 T_3 + 0,00279 T_0 + \\
 & + 0,000057 T_3\{\text{H}_2\} + 0,005707\{\text{H}_2\}[\text{N}], \quad (8)
 \end{aligned}$$

где  $T_0$  — начальная температура плазменного потока, К;  $T_3$  — температура закалки продуктов синтеза, К;  $[\text{CH}_4]$  — количество углеводорода от стехиометрически необходимого для получения карбида титана, %;  $\{\text{H}_2\}$  — концентрации водо-

рода в плазмообразующем газе, % об;  $[\text{N}]$  — количество атомарного азота в плазмообразующем газе от стехиометрически необходимого для образования циановодорода, %.

Содержание карбида титана в обоих вариантах зависит главным образом от концентрации карбидизатора-восстановителя, начальной температуры плазменного потока и температуры закалки.

#### Физико-химическая аттестация карбида титана

В продуктах синтеза присутствует монокарбид титана с кубической гранцентрированной кристаллической решеткой с параметром  $a = 0,4323$  нм, что на  $0,0004$  нм меньше, чем у массивных кристаллов. Это может быть обусловлено неравновесным состоянием в частицах размером менее  $100$  нм из приповерхностных слоев, которое приводит к деформации (сжатию) кристаллических решеток, смещению атомов из идеальных положений, возникновению микронапряжений. В первом варианте карбиду титана сопутствует диоксид с кристаллической структурой рутила и анатаза. Сопутствующий карбид свободный пиролитический углерод образуется, по-видимому, при разложении метана в аморфном состоянии и на дифрактограммах не проявляется. Продукты синтеза в I и II вариантах содержат, % масс.: TiC —  $91,88$  и  $93,15$ ;  $C_{\text{своб}}$  —  $1,44$  и  $1,33$ ; N —  $0,90$  и  $1,00$ ; они имеют удельную поверхность  $30000$  и  $34000$  м<sup>2</sup>/кг.

Нанопорошок карбида титана представлен агрегатами шаровидной формы размером от  $150$  до  $600$  нм, образованными сообществом

частиц кубической формы достаточно широкого размерного диапазона — от 10 до 60 нм. Ограниченная форма частиц карбида титана свидетельствует об образовании их по механизму «пар — кристалл» предположительно при взаимодействии паров титана и циановодорода. Присутствие в продуктах синтеза агрегатов различного объема указывает на высокую вероятность дальнейшего укрупнения наночастиц путем их коагуляции при понижении температуры.

Отличительная особенность нанопорошка пиролитического углерода — это его способность образовывать микроагрегаты размером до 100–150 нм, включающие до 6–10 частиц размером до 30–40 нм. Естественно, что полученный кар-

бид титана по наноуровню и морфологии существенно отличается от его микропорошка, полученного механическим диспергированием карбида карботермического печного синтеза.

### Обсуждение результатов

Результаты модельно-математического и экспериментального исследований позволили прогнозировать технологические показатели плазменного производства карбида титана для титансодержащего сырья различного вида и выбрать оптимальный технологический вариант.

Основные параметры синтеза и характеристики карбида титана представлены в табл. 2.

Таблица 2

Основные параметры синтеза и характеристики карбида титана для двух технологических вариантов

Параметры синтеза и характеристики карбида титана, ед. измер.	Значения параметров	
	Вариант I (TiO <sub>2</sub> + природный газ)	Вариант II (Ti + природный газ)
Состав газа-теплоносителя (азот), % об.	99,5	99,5
Состав карбидизатора, % об.:		
метан	93,6	93,6
этан	3,0	3,0
пропан	2,2	2,2
бутан	1,2	1,2
Крупность титансодержащего сырья, мкм	1–3	5
Количество карбидизатора, % от стехиометрического	120–140	120–140
Начальная температура плазменного потока, К	5400	5400
Температура закалки, К	2600–2800	2600± –2800
Химический состав, % масс		
TiC	91,62–92,13	92,88–93,42
диоксид титана	6,56–6,82	–
титан свободный (Ti+O)	–	5,37–5,68
углерод свободный	1,31–1,56	1,21–1,44
летучие	0,82–0,97	0,97–1,11
Выход карбида титана, % масс.	92	92
Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /кг	29000–32000	33000–35000
Размер*частиц, нм	38–42	34–36
Форма частиц	ограниченная, кубическая	ограниченная, кубическая
Окисленность нанопорошка карбида титана**, 10 <sup>7</sup> кг O <sub>2</sub> /м <sup>2</sup>	12,5	8,6
Производительность, кг/ч	2,8	3,7

Примечание: \*рассчитывался по величине удельной поверхности;

\*\*определялась после выдержки на воздухе в течении 24 ч.

Сопоставление двух вариантов позволяет выбрать в качестве оптимального вариант карбидизации титанового порошка метаном. По комплексу свойств синтезированный карбид титана в целом удовлетворяет требованиям, предъявляемым к нанодисперсным модификаторам.

Для оценки экономической эффективности выбранного технологического варианта, который заключается в карбидизации титана метаном, были определены основные экономические показатели. Предполагалось, что работа организована на одном реакторе, продолжительность рабочего времени в рабочие дни — 8 ч, в 3 смены, график 5/2. Показатели экономической эффективности производства карбида титана (в расчете на один реактор): инвестиции — 28,8 млн руб.; объем производства — 26 т/год; производственная себестоимость — 5,64 млн руб.; рентабельность продукции — 80 %; срок окупаемости капитальных вложений — 1,0; отпускная цена — 12,0 тыс. руб./кг.

Расчет экономических показателей выявил, что при объеме производства 26 т карбида титана в год отпускная цена составляет 400 \$/кг, что свидетельствует о конкурентоспособности его на мировом рынке наноматериалов.

На основе анализа современного состояния производства и применения карбида титана установлено, что карбид титана — это износостойкий и коррозионностойкий, твердый, химически инертный материал, который находит широкое применение в технике (изготовление защитных покрытий металлов, в качестве компонентов и легирующих добавок твердых сплавов). При использовании в наносостоянии открываются новые перспективы применения карбида титана — модифицирование сплавов различного состава и назначения.

Исследованы теплотехнические, ресурсные и технологические характеристики трехструйного прямоточного плазменного реактора промышленного уровня мощности (150 кВт). Установлено, что на длине реактора с футеровкой из диоксида циркония 12 калибров среднемаховая температура плазменного потока и температура стенки изменяется в пределах 5400–2200 К (1549–770 К). Удельная электрическая мощность в камере смешения достигает 2142 МВт/м<sup>3</sup>. Расчетные ресурсы работы электродов

для медного анода и вольфрамового катода составляют соответственно 3125 и 112 часов. Прогнозируемое загрязнение карбида титана продуктами эрозии электродов — 0,0000954 % меди и 0,000002 % вольфрама. Подтверждено, что по совокупности характеристик трехструйный плазменный реактор мощностью 150 кВт может быть отнесен к высокоэффективному, надежно работающему современному электротермическому оборудованию.

Разработаны научные основы плазменного производства карбида титана, включающие термодинамические условия карбидообразования и кинетические закономерности испарения титаносодержащего сырья в этих условиях. Степень плазменного испарения порошкообразного титаносодержащего сырья определяется его крупностью и массовой расходной концентрацией. Установлено, что при подводимой к реактору мощности 75 кВт достигается 100 %-я степень испарения частиц титана крупностью не более 10 мкм, а оксида титана (IV) — не более 5 мкм. На основании полученных результатов выбраны сырьевые материалы для синтеза карбида титана.

На основе результатов моделирования спрогнозированы технологические показатели плазменного производства карбида титана для двух технологических вариантов: восстановления оксида титана TiO<sub>2</sub> метаном и карбидизации титана метаном. Установлено, что оптимальным технологическим вариантом плазменного производства карбида титана является карбидизация титана. Для реализации данной технологии может применяться титан металлический марки ПТМк, в качестве плазмообразующего газа — технический азот (ГОСТ 9293–74, изм.), карбидизатора — метан (природный газ).

На основании выбранного технологического варианта реализовано получение карбида титана карбидизацией в условиях НПФ «Полимет» на базе промышленного плазмотехнологического комплекса мощностью 150 кВт. Продуктом плазменного синтеза является соединение TiC. Определены оптимальные значения технологических факторов и допустимые пределы их изменения, а также основные характеристики карбида титана: крупность титаносодержащего сырья — 5 мкм; количество карбидизатора от стехиометрически необходимого — 120–140 %; начальная температура

тура плазменного потока — 5400 К; температура закалки — 2600–2800 К; выход карбида титана — 92,0 % масс.; производительность — 3,7 кг/ч; удельная поверхность — 33000–35000 м<sup>2</sup>/кг; размер частиц — 34–36 мкм; форма частиц — ограниченная кубическая.

Проведена оценка экономической эффективности плазменного производства карбида титана. Установлено, что при производительности 26 т карбида титана в год (в расчете на один

реактор) и себестоимости 5,64 млн руб./т полученная отпускная цена 400 \$/кг оптимальной для плазменного производства карбида титана и отражает его конкурентоспособность на мировом рынке наноматериалов. Срок окупаемости капиталовложений в плазмометаллургическое производство составляет 1 год, что позволяет судить о его прибыльности и о технологической целесообразности освоения плазменного производства карбида титана.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Решетникова С.Н.** Применение нанопорошков химических соединений для повышения качества металлоизделий: автореф. дис. на соиск. учен. степ. кандидата технических наук / Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева. Красноярск, 2008. 17 с.

2. **Галевский Г.В., Руднева В.В.** Некоторые вопросы применения наночастиц порошков тугоплавких соединений в качестве модифицирующих комплексов различного назначения // Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии: сб. науч. трудов // СибГИУ. Новокузнецк, 1999. Вып. 8. С. 46–53.

3. NEOMAT NANO POWDERS [Электронный ресурс] / Products. — Электронные данные. — Сала-спилс: Neomat Co., 2008. Режим доступа: <http://www.neomat.lv>, свободный. — Загл. с экрана. — яз. англ.

4. **Сабуров В.П.** [и др.]. Плазмохимический синтез ультрадисперсных порошков и их применение для модифицирования металлов и сплавов / Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1995. 344 с.

5. **Ноздрин И.В., Ширяева Л.С., Галевский Г.В., Руднева В.В.** Исследование характеристик реактора для плазмометаллургического производства тугоплавких боридов и карбидов // Изв. вузов. Черная металлургия. 2011. № 8. С. 27–32.

6. Электронный каталог ГПНТБ России [Электронный ресурс]: база данных содержит сведения

о всех видах лит., поступающей в фонд ГПНТБ России. Режим доступа: [<http://tokem.narod.ru>, 12.02.2013] — Загл. с экрана.

7. **Боровинская И.П.** Применение титана в процессах СВС / И.П. Боровинская, В.К. Прокудина, В.И. Ратников // Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2010. №4. С. 26–33.

8. **Сурис А.Л.** Термодинамика высокотемпературных процессов: справочник. М.: Металлургия, 1985. 568 с.

9. **Ноздрин И.В., Ширяева Л.С.** Термодинамический анализ процессов плазменного синтеза карбида хрома // Изв. вузов. Черная металлургия. 2011. № 10. С. 3–7.

10. **Галевский Г.В., Киселева Т.В., Руднева В.В.** Исследование плазмохимического синтеза тугоплавких соединений методом планируемого эксперимента: методические указания. СибГИУ. Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2010. 31 с.

11. **Моссэ А.Л., Бузов И.С.** Обработка дисперсных материалов в плазменных реакторах. Минск: Наука и техника, 1980. 208 с.

12. **Руднева В.В., Галевский Г.В., Юркова Е.К.** Модельно-математическое исследование режимов эффективной переработки дисперсного сырья в плазменном реакторе. Изв. вузов. Черная металлургия. 2007. № 5. С. 52–55.

13. **Костин В.Н., Тишина Н.А.** Статистические методы и модели: учеб. пособие. Оренбург: Изд-во ГОУ ОГУ, 2004. 138 с.

### REFERENCES

1. **Reshetnikova S.N.** Primeneniye nanoporoshkov khimicheskikh soyedineniy dlya povysheniya kachestva metalloizdeliy: avtoref. dis. na soisk. uchen. step. kandidata tekhnicheskikh nauk / Sibirskiy gosudarstvennyy aerokosmicheskiy universitet imeni akademika M.F. Reshetneva. Krasnoyarsk, 2008. 17 s. (rus.)

2. **Galevskiy G.V., Rudneva V.V.** Nekotoryye voprosy primeneniya nanofaznykh poroshkov tugoplavkikh soyedineniy v kachestve modifitsiruyushchikh kompleksov

razlichnogo naznacheniya. *Vestnik gorno-metallurgicheskoy sekcii RAEN. Otdeleniye metallurgii: sb. nauch. trudov.* SibGIU. Novokuznetsk, 1999. Vyp. 8. S.46–53. (rus.)

3. NEOMAT NANO POWDERS [Elektronnyy resurs] / Products. — Elektronnyye dannyye. — Salaspils: Neomat Co., [2008]. Rezhim dostupa: <http://www.neomat.lv>, svobodnyy. Zagl. s ekrana. (angl.)

4. **Saburov V.P.** [i dr.]. Plazmokhimicheskiy sintez ultradispersnykh poroshkov i ikh primeneniye dlya modi-

fitsirovaniya metallov i splavov. Novosibirsk: Nauka.Sibirskaya izdatelskaya firma RAN, 1995. 344 s. (rus.)

5. **Nozdrin I.V., Shirayeva L.S., Galevskiy G.V., Rudneva V.V.** Issledovaniye kharakteristik reaktora dlya plazmometallurgicheskogo proizvodstva tugoplavkikh boridov i karbidov. *Izv. Vuzov. Chernaya metallurgiya*. 2011. № 8. S. 27–32. (rus.)

6. Elektronnyy katalog GPNTB Rossii [Elektronnyy resurs]: baza dannykh sodержit svedeniya o vseh vidakh lit., postupayushchey v fond GPNTB Rossii. Rezhim dostupa: [http://tokem.narod.ru, 12.02.2013] — Zagl. s ekrana.

7. **Borovinskaya I.P., Prokudina V.K., Ratnikov V.I.** Primeneniye titana v protsessakh SVS. *Poroshkovaya metallurgiya i funktsionalnyye pokrytiya*. 2010. №4. S. 26–33.

8. **Suris A.L.** Termodinamika vysokotemperaturnykh protsessov: spravochnik. M.: Metallurgiya, 1985. 568 s. (rus.)

9. **Nozdrin I.V., Shirayeva L.S.** Termodinamicheskiy analiz protsessov plazmennogo sinteza karbida khro-

ma. *Izv. vuzov. Chernaya metallurgiya*. 2011. № 10. S. 3–7. (rus.)

10. **Galevskiy G.V., Kiseleva T.V., Rudneva V.V.** Issledovaniye plazmokhimicheskogo sinteza tugoplavkikh soyedineniy metodom planiruyemogo eksperimenta: metodicheskiye ukazaniya / SibGIU. Novokuznetsk: SibGIU, 2010. 31 s. (rus.)

11. **Mosse A.L., Burov I.S.** Obrabotka dispersnykh materialov v plazmennykh reaktorakh. Minsk: Nauka i tekhnika, 1980. 208 s. (rus.)

12. **Rudneva V.V., Galevskiy G.V., Yurkova Ye.K.** Modelno-matematicheskoye issledovaniye rezhimov effektivnoy pererabotki dispersnogo syr'ya v plazmennom reaktore. *Izv. vuzov. Chernaya metallurgiya*. 2007. № 5. S. 52–55. (rus.)

13. **Kostin V.N., Tishina N.A.** Statisticheskiye metody i modeli: ucheb. posobiye. Orenburg: Izd-vo GOU OGU, 2004. 138 s. (rus.)

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ШИРЯЕВА Людмила Сергеевна** — ведущий инженер кафедры металлургии цветных металлов и химических технологий Сибирского государственного индустриального университета. 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42. E-mail: ilusiag@mail.ru

**ГАРБУЗОВА Алина Константиновна** — аспирант кафедры металлургии цветных металлов и химических технологий Сибирского государственного индустриального университета. 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42. E-mail: kafcmet@sibsiu.ru

**ГАЛЕВСКИЙ Геннадий Владиславович** — доктор технических наук директор института металлургии и материаловедения Сибирского государственного индустриального университета. 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42. E-mail: kafcmet@mail.ru

#### AUTHORS

**SHIRYAEVA Ludmila S.** — Siberian State Industrial University. 42, Kirov St, Novokuznetsk, Russia, 654007. E-mail: ilusiag@mail.ru

**GARBUSOVA Alina K.** — Siberian State Industrial University. 42, Kirov St, Novokuznetsk, Russia, 654007. E-mail: kafcmet@sibsiu.ru

**GALEVSKY Gennadiy V.** — Siberian State Industrial University. 42, Kirov St, Novokuznetsk, Russia, 654007. E-mail: kafcmet@mail.ru



УДК 621.791.722:621.762.04

*А.И. Рудской, Ю.А. Соколов, В.Н. Копаев*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ СКАНИРОВАНИИ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫМ ЛУЧОМ В ТЕХНОЛОГИИ СИНТЕЗА ПОРОШКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ**

*A.I. Rudskoi, Yu.A. Sokolov, V.N. Kopaev*

## **DETERMINATION OF TEMPERATURE FIELD AT SURFACE SCANNING BY ELECTRONIC BEAM SYNTHESIS TECHNOLOGIES OF POWDER PRODUCTS**

На базе математической модели, описывающей процесс термической обработки, решена задача определения температурного поля при сканировании поверхности подложки электронным лучом. Моделирование выполнено на основе метода конечных элементов.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ; СКАНИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ; ЭЛЕКТРОННЫЙ ЛУЧ; НАГРЕВ ПОДЛОЖКИ; ТЕПЛОПЕРЕНОС; ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ.

In present article on the basis of the mathematical model describing process of thermal treatment, the problem of definition of a temperature field is solved per scanning of surface's substrate by an electronic beam. Modelling is executed on the basis of finite element method.

MATHEMATICAL MODELING; SURFACE SCANNING; ELECTRONIC BEAM; SUBSTRATE HEAT; CONDUCTION; TEMPERATURE FIELD.

В порошковой металлургии интенсивно разрабатываются новые технологии, позволяющие шире использовать ее возможности по созданию материалов с повышенными эксплуатационными свойствами [1–3]. В то же время в промышленности широко применяются технологии, позволяющие формировать на поверхности различных материалов слои с заданной структурой и свойствами [4, 5]. Одна из наиболее перспективных технологий — это синтез изделий с помощью электронного луча (СИЭЛ), где в основу положена операция последовательного наплавления слоев из порошка различных сплавов, успешно зарекомендовавшая себя при изготовлении изделий авиационной и медицинской промышленности [6, 7]. Технологический процесс происходит в вакууме, что позволяет проводить синтез изделий из порошка химически активных металлов, таких, как титан, молибден, вольфрам и др.

В процессе электронно-лучевого синтеза изделия нагрев поверхности осуществляют две

операции: предварительный прогрев подложки; предварительный нагрев поверхности формируемого изделия перед плавлением.

Предварительный прогрев подложки, создающий необходимые начальные тепловые условия для проведения процесса синтеза, осуществляется сканированием электронного луча по поверхности. Для реализации данной операции необходимо выбрать способ сканирования и рассчитать параметры нагрева подложки электронным лучом до заданной температуры  $T_{\text{зад}}$ : ток луча, скорость сканирования луча, диаметр луча, шаг смещения луча, размеры сканируемой площади  $x_i$  и  $y_i$  (угол отклонения луча). Основная задача на данном этапе — достичь равномерного температурного поля по всей поверхности подложки. Одним из инструментов решения этой задачи служит выбор оптимального способа сканирования поверхности обработки.

Целью работы, о которой идет речь в статье, расчет температурного поля подложки и изделия в процессе СИЭЛ, базирующийся на нелиней-

ной математической модели, учитывающей зависимость теплофизических параметров от температуры.

**Описание задачи.** Нагрев подложки толщиной  $S_{\text{под}}$ , по поверхности которой перемещается электронный луч со скоростью  $V_{\text{ск}}$ , будем рассматривать в движущейся прямоугольной системе координат ( $OXYZ$ ), помещенной в центр пятна нагрева (рис. 1).

Процесс распространения тепла вследствие действия сканирующего луча от кругового источника с мощностью  $q$ , перемещающегося по поверхности со скоростью  $V_{\text{ск}}$ , описывается следующим дифференциальным уравнением теплопроводности [8]:

$$c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right] - c(T) V_X \frac{\partial T}{\partial x} - c(T) V_y \frac{\partial T}{\partial y} - c(T) V_z \frac{\partial T}{\partial z} + q (V_x t, V_y t, V_z t), \quad (1)$$

где  $T$  — температура;  $V_x, V_y, V_z$  — проекции вектора скорости быстродвижущегося источника тепла по осям  $X, Y$  и  $Z$ ;  $c(T)$  и  $\lambda(T)$  — теплоемкость и коэффициент теплопроводности материала;  $q(V_x t, V_y t, V_z t)$  — удельная мощность движущегося источника тепла.

При решении уравнения (1) методом конечных элементов используется следующее граничное условие: заданный поток тепла  $q$  имеет вид

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = A(T) q (V_x t, V_y t, V_z t), \quad (2)$$

где  $A(T)$  — доля поглощенной мощности от мощности пучка поступающей на поверхность мишени, или эффективный КПД нагрева;  $n$  — нормаль к поверхности.

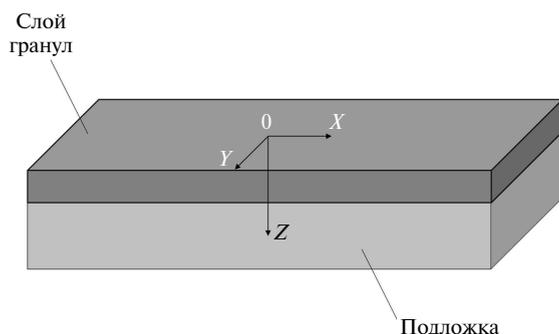


Рис. 1. Система координат при синтезе изделия

Важно отметить, что эффективный КПД нагрева — нелинейная функция, зависящая от температуры и материала. В ряде работ [9, 10] большое значение уделено расчету данного параметра. С увеличением температуры коэффициент поглощения чистой металлической поверхностью растет, а также существенно изменяется теплоемкость и теплопроводность металлов и сплавов, что необходимо учитывать в расчетах.

В работе [10] приведена следующая линейная зависимость от температуры для расчета поглощательной способности и определения доли поглощенной мощности:

$$A(T) = a + bT, \quad (3)$$

где  $a, b$  — коэффициенты.

К сожалению, зачастую аналитическое исследование ограничено рамками «линейности» задачи. Поставленная задача — нелинейная, требующая применения численных методов. Нелинейность обусловлена не только зависимостью теплофизических параметров материала от температуры, что само по себе значительно усложняет задачу, но и зависимостью источника тепла от времени (периодическое воздействие луча на формируемое изделие).

Поэтому для ее решения в работе используется метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в среде программного комплекса ANSYS APDL. Расчет температурного поля формируемого изделия проводился в трехмерной постановке с применением системы конечно-элементного анализа ANSYS.

**Построение модели расчета.** Процедура проведения нестационарного теплового анализа состоит из четырех основных этапов: создания модели; задания граничных условий и тепловых нагрузок; решения задачи на основе уравнения теплопроводности; анализа результатов.

Процедура создания модели включает задание типа элементов, свойств материала и геометрии модели. Далее выполняется наложение сетки на модель (создание конечно-элементной модели) и задаются граничные и начальные условия. Поскольку в начальный момент времени температура модели совпадает с температурой окружающей среды, то последнюю и принимаем в качестве начальной температуры для всех узлов модели.

Нелинейные зависимости теплопроводности, плотности и теплоемкости титана приведены на рис. 2–4. Для температур до 1100 °С характерен

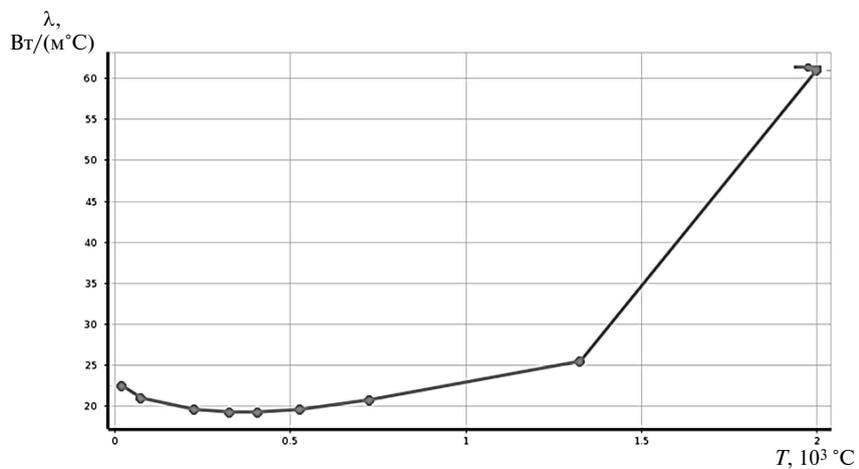


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплопроводности титана от температуры

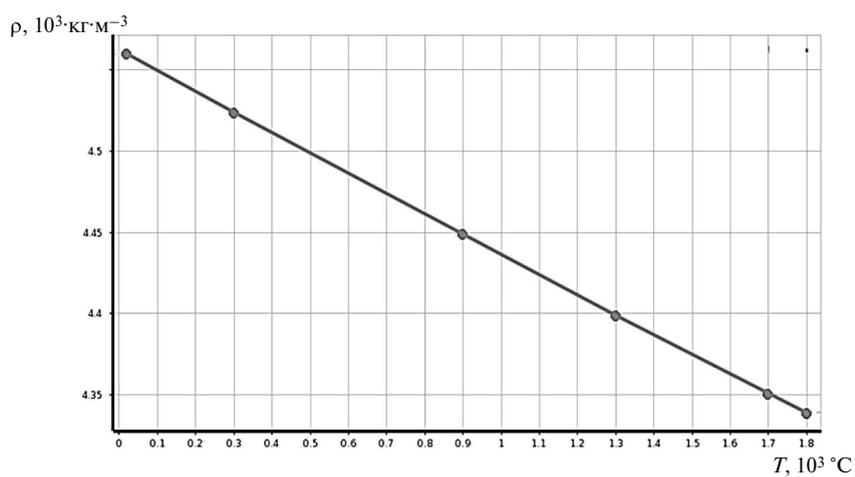


Рис. 3. Зависимость плотности титана от температуры

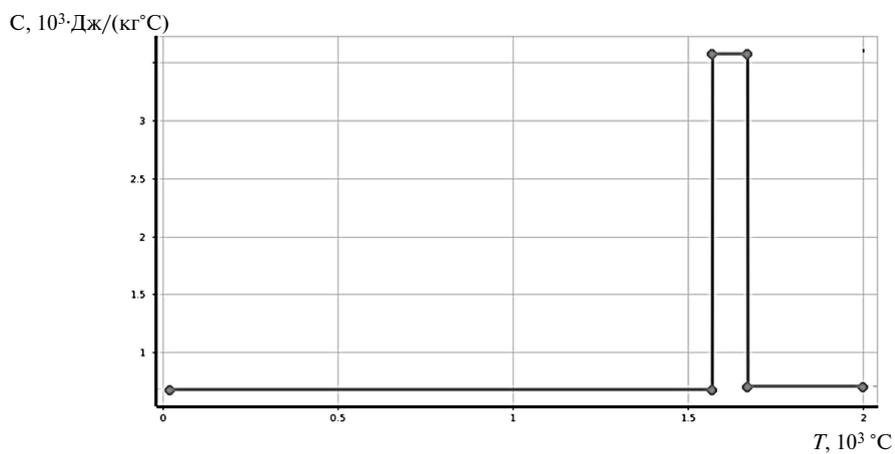


Рис. 4. Зависимость теплоемкости титана от температуры

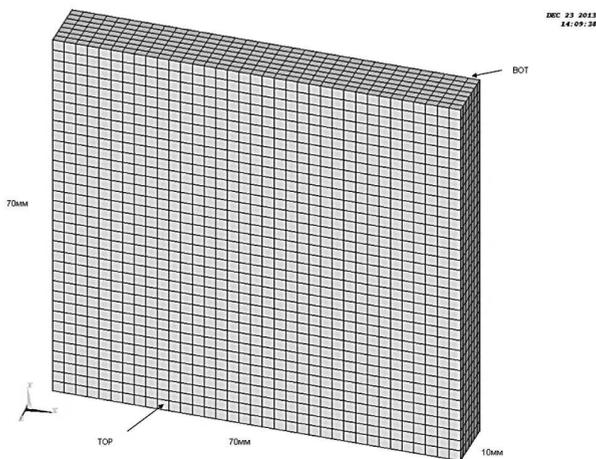


Рис. 5. Конечно-элементная модель

участок с малыми значениями коэффициента теплопроводности, что соответствует большей скорости нагрева. При более высоких температурах наступает резкое нелинейное увеличение коэффициента теплопроводности.

Значительные изменения теплопроводности  $\lambda(T)$ , плотности  $\rho(T)$ , теплоемкости  $c(T)$  показывают, что система уравнений описывающая процесс электронно-лучевого синтеза, существенно нелинейная.

Конечно-элементная модель с нижней (BOT) и верхней (TOP) поверхностями представлена на рис. 5. Электронный луч взаимодействует с верхней поверхностью TOP.

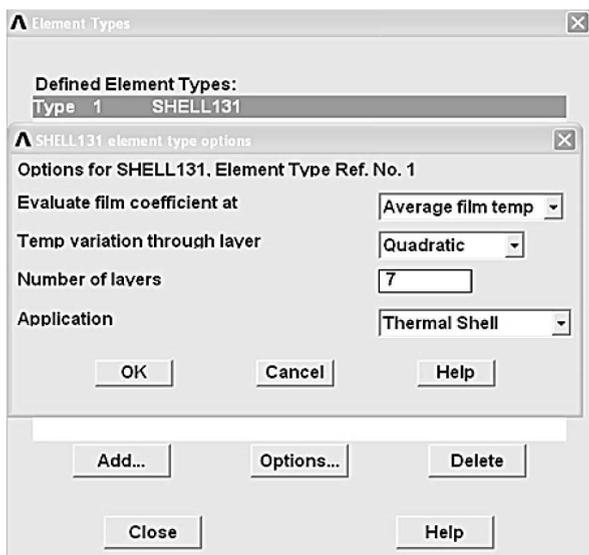


Рис. 6. Описание свойств элемента SHELL131

Расчетная модель для определения температурного поля формируемого изделия создавалась с использованием многослойных оболочечных конечных элементов SHELL131 с 15 степенью свободы (TEMPBOT, TEMP2, ... TEMP14, TEMPTOP).

В качестве базового принимаем элемента SHELL131 — четырехугольный оболочечный элемент, который используется в трехмерных моделях. Описание свойств элемента SHELL131 приведено на рис. 6: изменение температуры в слое — по квадратичной зависимости, количество слоев равно 7.

Каждый из слоев включает три точки, причем одна точка одновременно общая для двух соседних слоев. Нумерация точек начинается от нижней поверхности BOT (первая точка) к верхней поверхности TOP (15 точка).

Принимаем, что с верхней и нижней поверхностей подложки (изделия) осуществляется радиационный теплоотвод. Плотность электронного излучения задавалась равномерным распределением по пятну нагрева радиусом  $r_0$  ( $r_0 = d_0/2$ ). Поскольку с поверхности подложки тепло теряется радиационным излучением, то имеем задачу с нелинейным граничным условием.

**Исходные данные модели.** Режим обработки поверхности подложки электронным лучом определяется током луча, скоростью сканирования луча, диаметром пятна, геометрическими размерами изделия.

К исходным параметрам модели относятся: сторона подложки  $a = 70$  мм; диаметр луча  $d_0 = 1$  мм; скорость сканирования  $V_{ск} = 9060$  мм/с; время операции  $t_{опер} = 35$  с; ток луча  $I_{л} = 30$  мА; ускоряющее напряжение  $U_y = 60$  кВ; смещение луча  $S_{см} = 1$  мм; время сканирования участка  $1 \times 1$  мм при прямоугольном характере воздействия, с; площадь перекрытия лучом в секунду  $A_{п} = V_{ск}d_0 = 9060$  мм<sup>2</sup>/с; период  $t_{пер} = a^2/(V_{ск}d_0k_{см}) = 1,081678$  с ( $k_{см}$  — коэффициент перекрытия); частота  $f = 0,92449$  Гц; число проходов  $N = 32$ ; подведенное тепло  $Q_j = I_{л}U_y t_{опер} = 63000$  Дж; плотность подведенного тепла к подложке или изделию за время процесса  $J_{опер} = Q_j/a^2 = 12,85$  Дж/мм<sup>2</sup>.

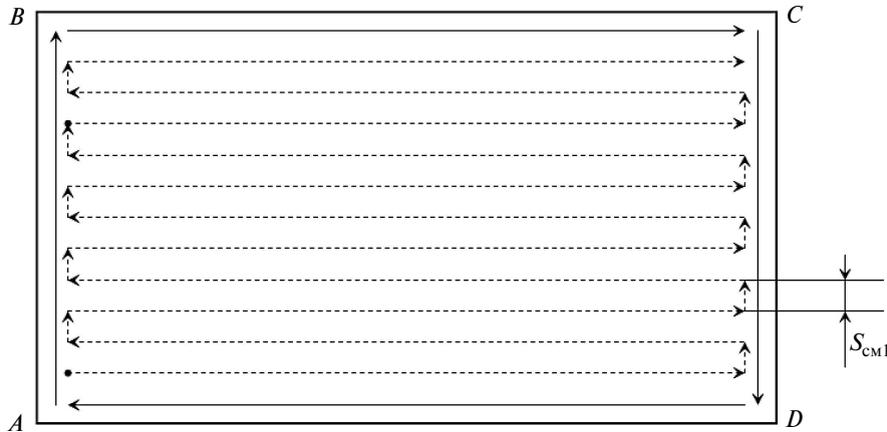


Рис. 7. Способ сканирования электронного луча по поверхности

Источник тепла перемещается по подложке со скоростью  $V_{ск}$ . Способ сканирования электронного луча по поверхности показан на рис. 7.

Это эквивалентно приложению периодической тепловой нагрузки с длительностью импульса  $d_{пятна}/V_{ск}$  (при скорости сканирования луча равной 9060 мм/с и диаметре пятна  $d_{пятна} = 1$  мм длительность импульса составляет  $1,1 \cdot 10^{-4}$  с).

Плотность теплового потока также является поверхностным граничным условием. Модель использует данную тепловую нагрузку, так как известна величина тепла, проходящего через поверхность (тепловой поток, приходящийся на единичную площадку):

$$HFLU = Q/A_{эя} = I_{л} U_{эя} / a_{эя}^2 = 1800 / 0,002^2 = 0,45 \cdot 10^9 \text{ Вт/м}^2, \quad (4)$$

где  $A_{эя}$  — площадь элементарной ячейки;  $a_{эя}$  — сторона квадратной элементарной ячейки.

Положительная величина плотности теплового потока означает, что тепло поглощается элементом. Стартовая позиция электронного луча показана темным цветом на рис. 8.

Электронный луч стартует с элемента № 1 и далее перемещается слева направо по узлам (нумерация элементов пропорционально увеличивается). В крайнем правом узле строки следует переход луча вверх на один элемент (по столбцу) и перемещение луча по элементам справа налево по второй строке. Далее переход вверх на один элемент и повторение приведенных операций.

Таким образом, сканируется вся поверхность до последнего элемента.

**Результаты расчета.** Температурное поле на верхней поверхности во время второго прохода электронного луча над элементом, содержащим узел 668, который находится в центре исследуемой поверхности, показано на рис. 9.

Рассмотрим динамику изменения температуры в восьми верхних степенях свободы в узле 668 (точки узла №8, ... №15), которые наиболее сильно реагируют на воздействие электронного луча (рис. 10).

Из рис. 10 видно, что температура в узле на верхней поверхности (ТТОР\_668) имеет зависимость от предистории (прохождения электронного луча рядом «до»), от настоящего (прохождение электронного луча «над») и практически не зависит от будущего (прохождение электронного луча «после»).

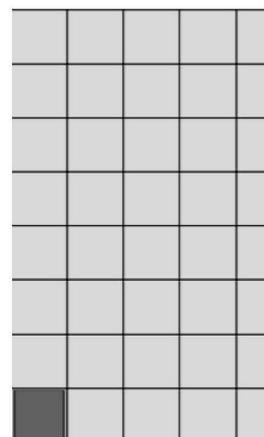


Рис. 8. Стартовая позиция электронного луча

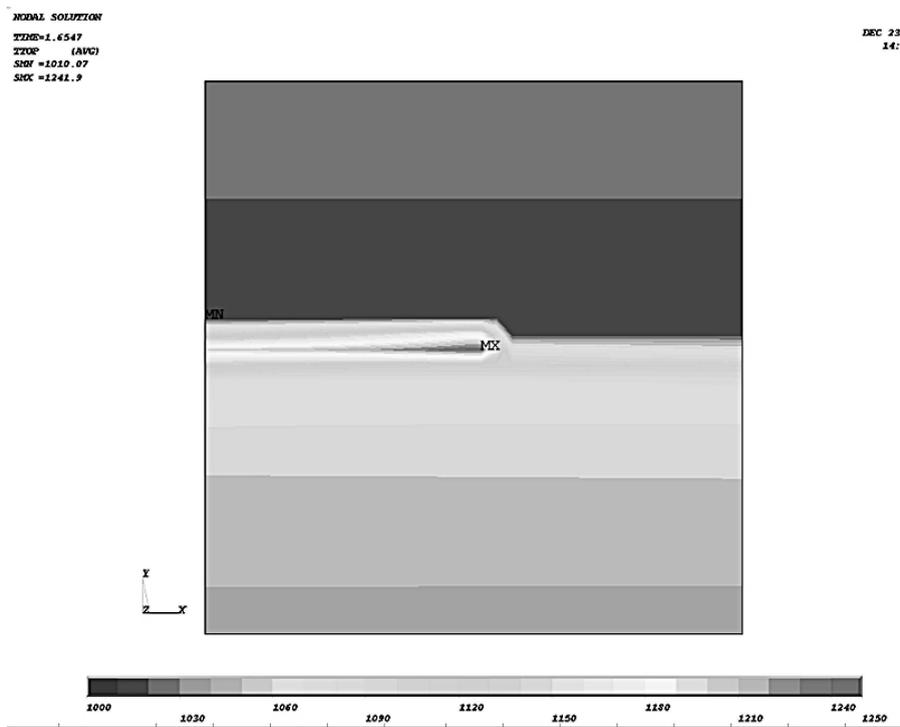


Рис. 9. Температурное поле на верхней поверхности во время второго прохода электронного луча над узлом 668

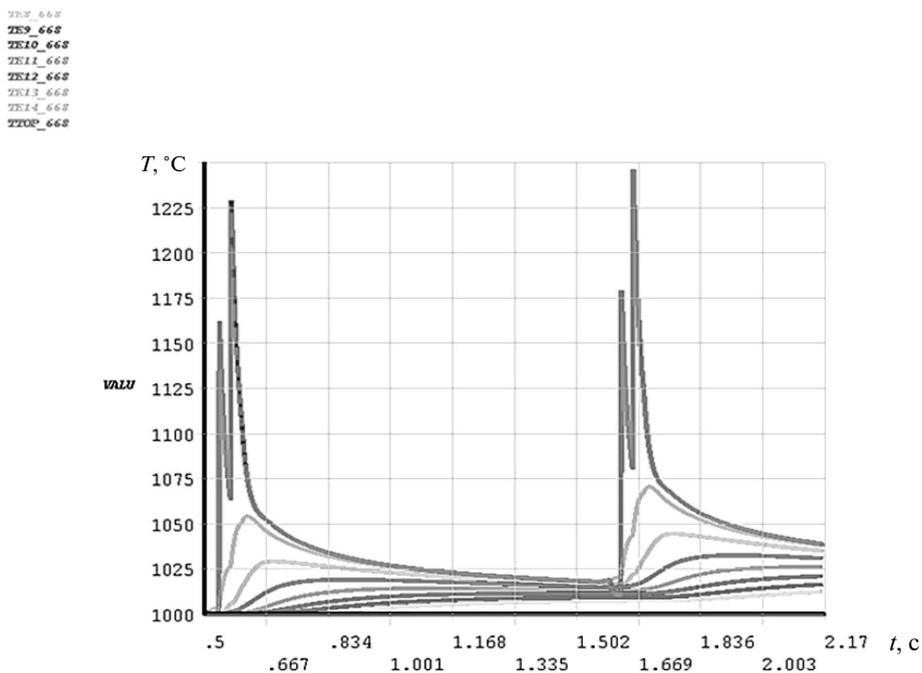


Рис. 10. Динамика изменения температуры в 8-ми верхних степенях свободы (температуры) в узле 668 исследуемой модели

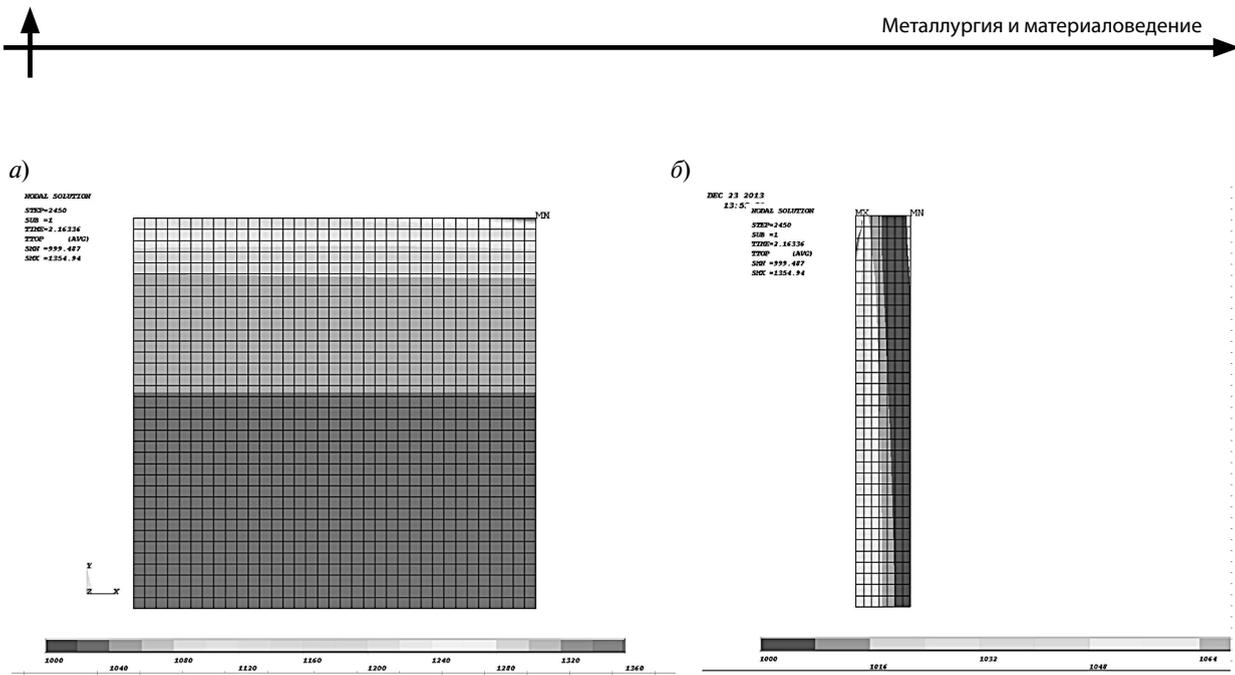


Рис. 11. Температурное поле верхней (а) и боковой (б) поверхности формируемого изделия после двух циклов сканирования

Приращение температуры за один цикл сканирования электронным лучом поверхности размером  $70 \times 70$  мм составляет примерно  $20^\circ\text{C}$ , что соответствует экспериментальным данным.

Температурное поле верхней и боковой поверхности после двух циклов сканирования электронным лучом показано на рис. 11.

Подведем итоги.

Показана важность операции нагрева подложки для технологии послойного синтеза изделий из порошка различных сплавов, включая тугоплавкие.

Режим термической обработки поверхности электронным лучом должен обеспечивать условия для удержания гранул на поверхности подложки и формируемого изделия.

Для решения нелинейной модели, описывающей нагрев подложки электронным лучом, используется метод конечных элементов, который позволяет учитывать, во-первых, геометри-

ческую форму изделия, во-вторых, зависимость теплофизических параметров от температуры.

Проведенный расчет температурного поля позволяет качественно описывать процесс электронно-лучевого нагрева в вакуумной среде с учетом передачи тепла посредством излучения.

Модель адекватно отражает связь между действием электронного луча и распределением температурного поля.

Анализ результатов показывает, что для качественной оценки температурного поля можно использовать многослойные элементы SHELL131, что позволяет оперативно рассчитать температурное поле для многослойных конструкций.

Модель учитывает историю предыдущих периодических тепловых воздействий электронного луча. Нестационарный тепловой расчет позволяет определить температурное поле, изменяющееся во времени.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. № 3 (178). С. 148–155.

2. Рудской А.И., Кокорин В.Н., Кондратьев С.Ю., Филимонов В.И., Кокорин А.В. Прессование гетерофазных увлажненных железных порошков при ис-

пользовании метода интенсивного уплотнения // Научные технологии в машиностроении. 2013. № 5 (23). С. 13–20.

3. 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. Инженер-

ный журнал с приложением. 2011. № 6. С. 12–16.

4. **Kondrat'ev S.Y., Gorynin V.I., Popov V.O.** Optimization of the parameters of the surface-hardened layer in laser quenching of components // *Welding International*. August 2012. Vol. 26. № 8. P. 629–632.

5. **Кондратьев С.Ю., Горьнин В.И., Попов В.О.** Оптимизация параметров поверхностно-упрочненного слоя при лазерной закалке деталей // *Сварочное производство*. 2011. № 3. С. 11–15.

6. **Murr L.E., Gaytan S.M., Ceylan A., Martinez E., Martinez J.L., Hernandez D.H., Machado B.I., Ramirez D.A., Medina F., Collins S., Wicker R.B.** Characterization of titanium aluminide alloy components fabricated by additive manufacturing using electron beam melting // *Acta Materialia*. 2010. № 58. P. 1887–1894.

7. **Biamino S., Penna A., Ackelid U., Sabbadini S., Tassa O., Fino P., Pavese M., Gennaro P., Badini C.** Electron beam melting of Ti48Al2Cr2Nb alloy: Microstructure and mechanical properties investigation // *Intermetallics*. 2011. № 19. P. 776–781.

8. **Самарский А.А., Вабишевич П.Н.** Вычислительная теплопередача. М.: Едиториал УРСС, 2003. 784 с.

9. **Веденов А.А., Гладуш Г.Г.** Физические процессы при ЛО материалов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 208 с.

10. **Углов А.А., Смунов И.Ю., Лашин А.М., Гуськов А.Г.** Моделирование теплофизических процессов импульсного лазерного воздействия на металлы. М.: Наука, 1991. 288 с.

## REFERENCES

1. **Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Kokorin V.N., Sizov N.A.** Issledovaniye protsessa uplotneniya pri ultrazvukovom vozdeystvii na uvlazhnennuyu poroshkovuyu sredu. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2013. № 3 (178). S. 148–155. (rus.)

2. **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. *Naukoymkiye tekhnologii v mashinostroyenii*. 2013. № 5 (23). S. 13–20. (rus.)

3. **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. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal s prilozheniyem*. 2011. № 6. S. 12–16.

4. **Kondrat'ev S.Y., Gorynin V.I., Popov V.O.** Optimization of the parameters of the surface-hardened layer in laser quenching of components. *Welding International*. August 2012. Vol. 26. № 8. P. 629–632.

5. **Kondratyev S.Yu., Gorynin V.I., Popov V.O.** Optimizatsiya parametrov poverkhnostno-uprochnennogo

sloya pri lazernoy zakalke detaley. *Svarochnoye proizvodstvo*. 2011. № 3. S. 11–15. (rus.)

6. **Murr L.E., Gaytan S.M., Ceylan A., Martinez E., Martinez J.L., Hernandez D.H., Machado B.I., Ramirez D.A., Medina F., Collins S., Wicker R.B.** Characterization of titanium aluminide alloy components fabricated by additive manufacturing using electron beam melting // *Acta Materialia*. 2010. № 58. S. 1887–1894. (rus.)

7. **Biamino S., Penna A., Ackelid U., Sabbadini S., Tassa O., Fino P., Pavese M., Gennaro P., Badini C.** Electron beam melting of Ti48Al2Cr2Nb alloy: Microstructure and mechanical properties investigation. *Intermetallics*. 2011. № 19. P. 776–781. (rus.)

8. **Samarskiy A.A., Vabishchevich P.N.** Vychislitel'naya teploperedacha. М.: Yeditorial URSS, 2003. 784 s. (rus.)

9. **Vedenov A.A., Gladush G.G.** Fizicheskiye protsessy pri LO materialov. М.: Energoatomizdat, 1985. 208 s. (rus.)

10. **Uglov A.A., Smurov I.Yu., Lashin A.M., Guskov A.G.** Modelirovaniye teplofizicheskiykh protsessov impul'snogo lazernogo vozdeystviya na metally. М.: Nauka, 1991. 288 s. (rus.)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**РУДСКОЙ Андрей Иванович** — доктор технических наук ректор Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, член-корреспондент РАН; 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: rector@spbstu.ru

**СОКОЛОВ Юрий Алексеевич** — кандидат технических наук главный конструктор ООО «НТК Электромеханика»; 172386, ул. Заводское шоссе, 2, г. Ржев, Россия. E-mail: s5577@inbox.ru

**КОПАЕВ Владимир Николаевич** — ведущий инженер, ООО «НТК Электромеханика». 172386, ул. Заводское шоссе, 2, г. Ржев, Россия. E-mail: vkopaev\_ela@mail.ru

## AUTHORS

**RUDSKOI Andrey I.** — 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: rector@spbstu.ru

**SOKOLOV Yuriy A.** — 2, Zavodskoe shosse, Rzhev city Tver region, Russia, 172386. E-mail: s5577@inbox.ru

**KOPAIEV Vladimir N.** — 2, Zavodskoe shosse, Rzhev city Tver region, Russia, 172386. E-mail: vkopaev\_ela@mail.ru



УДК 621.77.04

*П.В. Кононов*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УГЛОВОЙ РАСКАТКИ КОНУСА НА ТОРЦЕ ТРУБЧАТОЙ ЗАГОТОВКИ

*P.V. Kononov*

### MODELLING PROCESS ANGLE ROLLING CONE AT THE END OF THE TUBULAR BLANK

В статье рассматриваются аспекты исследования с применением метода конечных элементов деформированного состояния трубчатой заготовки в процессе раскатки на ее торце конуса. Цель исследований — разработка рекомендаций по формированию деталей без поверхностных и внутренних трещин.

ТЕХНОЛОГИЯ; ДЕТАЛЬ С КОНУСОМ; ХОЛОДНАЯ КУЗНЕЧНАЯ ОБРАБОТКА; ДЕФОРМАЦИЯ.

In this article aspects of the study was discussed using finite element method strained state of the tubular workpiece in the process rolling on her end of the cone to develop recommendations for the creation of parts without surface and internal fotce.

TECHNOLOGY; DETAIL WITH THE CONE; COLD FORGE PROCESSING; DEFORMATION.

Детали с конусом на торце трубчатой заготовки находят широкое применение в машиностроении. Существующие способы объемного формообразования деталей данного класса (клиновья раскатка, выдавливание, торцовая раскатка и др.) имеют ограниченные технологические возможности. Разработанная технология угловой раскатки конического участка на трубчатой заготовке, о которой пойдет речь, расширяет технологические возможности объемного формообразования, повышает производительность труда и коэффициент использования материала [1–4]. Широкое внедрение этой технологии затруднено из-за недостаточной ее изученности и, в частности, отсутствия теоретических исследований деформированного состояния заготовок в процессе их формообразования.

#### Постановка задачи исследования

Цель — разработка математической модели раскатки конического участка на трубчатой заготовке, что необходимо для проектирования технологического процесса, обеспечивающего получение деталей без поверхностных и внутренних трещин.

Разработанная схема раскатки показана на рис. 1, *a* [1]. Трубчатую заготовку 3 размещают на оправке 4, устанавливают в матрицу 2, которую приводят во вращение. Деформирующий ролик 1 устанавливают под углом  $\alpha$  к оси приводной матрицы 2 и подводят к заготовке 3. Приводную матрицу 2 с заготовкой 3 приводят во вращение. В процессе раскатывания деформируемая часть заготовки приобретает форму усеченного конуса.

Одним из основных факторов, лимитирующих применение процесса холодной раскатки, является разрушение металла в процессе пластического деформирования. В качестве примера на рис. 2 представлена деталь, раскатанная по схеме рис. 1, *a*. Трещины в области 1 на основании конуса образовывались в результате исчерпания ресурса пластичности в процессе раскатки материала заготовки из латуни Л63.

#### Математическая модель процесса раскатки конуса

Прогнозирование допустимых размеров деталей, изготавливаемых раскаткой, осуществляли с использованием программного комплекса DEFORM 3D [5]. Схема задания граничных

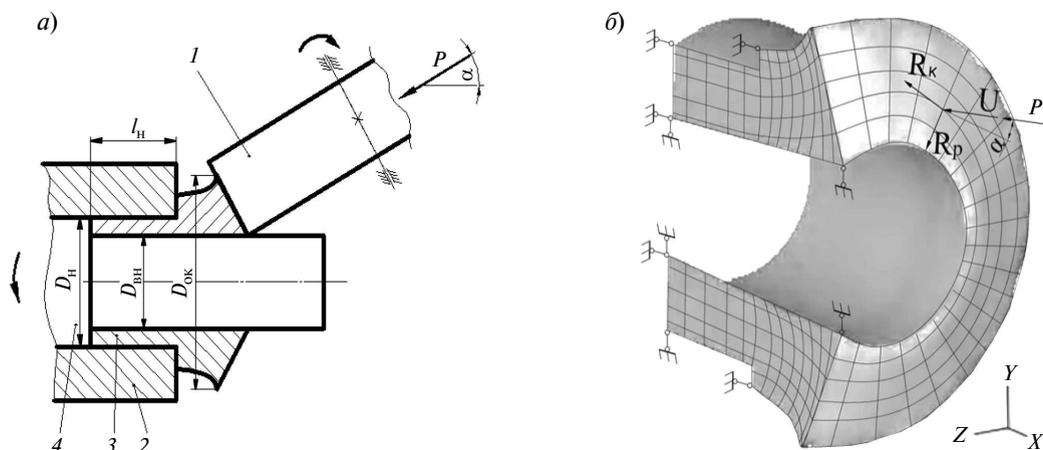


Рис. 1. Кинематическая схема процесса раскатки конуса (а) и схема задания граничных условий (б)

условий и геометрия заготовки представлены на рис. 1, где внутренний диаметр равен  $D_{вн} = 25$  мм, диаметр и длина посадочного участка соответственно равны  $D_n = 35$  мм и  $l_n = 25$  мм. Диаметр основания конуса —  $D_{ок} = 64$  мм. Заготовка имела на раскатываемом участке наружный диаметр  $D_{заг} = 45$  мм и высоту  $l_{заг} = 20$  мм (на рис. 1 не показаны).

Задача пластического течения — физически нелинейная, реализуется с помощью итерационного процесса. При этом неопределенный множитель Лагранжа, имеющий физический смысл коэффициента вязкости, подбирается так, чтобы удовлетворять условиям пластичности. Разрешающая система уравнений представляет собой систему линейных алгебраических

уравнений, три из которых имеют смысл уравнений равновесия в узловой точке, а четвертое является условием постоянства объема [6, 7].

Критерий разрушения в программном комплексе DEFORM 3D — критерий Cockcroft, рассчитываемый по формуле [5]

$$D = \int_0^{\bar{\epsilon}} \frac{\sigma^*}{\sigma_i} d\bar{\epsilon}, \quad (1)$$

где  $\bar{\epsilon}$  — накопленная пластическая деформация;  $d\bar{\epsilon}$  — приращения накопленной деформации;  $\sigma^*$  — максимальное главное растягивающее напряжение.

Данный критерий не учитывает, что предельные степени деформации сдвига зависят от показателя напряженного состояния  $K$ , где  $K = \frac{\sigma_0}{T_i}$ ,  $\sigma_0$  — гидростатическое напряжение,  $\sigma_0 = (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})/3$ ;  $T_i$  — интенсивность касательных напряжений,  $T_i = \frac{\sigma_i}{\sqrt{3}}$ .

Возрастание пластичности материала при увеличении в схеме напряженного состояния сжимающих напряжений установлено в работах В.Л. Колмогорова [8], А.А. Богатова [9], В.А. Огородникова [10], Г.Д. Деля [11] и др.

Экспериментальное построение кривой предельного состояния (кривая 4 на рис. 3), соответствующей различным схемам нагружения, выполняли с использованием стандартного испытательного оборудования. Реализованы следующие схемы нагружения: одноосное растяжение; сдвиг; одноосное сжатие; сжатие в закрытой

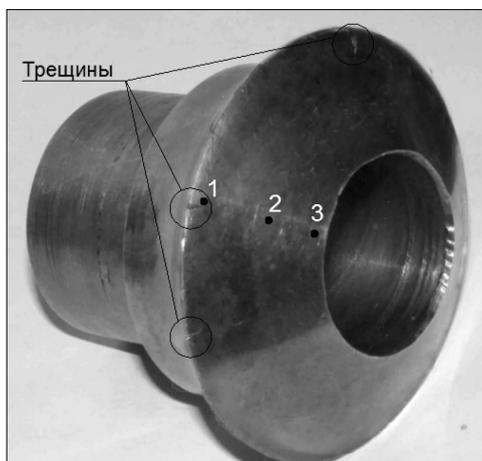


Рис. 2. Раскатанная деталь с трещинами на основании конуса

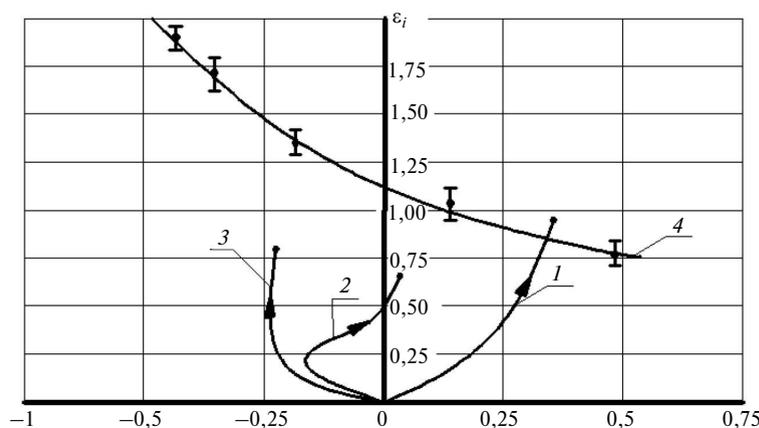


Рис. 3. Диаграмма пластичности латуни Л63 и пути деформирования частиц материала в исследуемых областях при формировании раскатанного конуса

матрице; гидростатическое сжатие. Для реализации эффекта гидростатического сжатия образец помещали в сосуд с жидкостью, который сжимался поршнем через систему усилителей давления. Диаграмма пластичности в координатах  $(K - \epsilon_i)$  для исследуемого материала из латуни Л63 представлена на рис. 3.

#### Конечно-элементная реализация расчета процесса ротационного формообразования деталей с конусом

Пути деформирования характерных областей раскатанной детали вычислены с использованием программного комплекса DEFORM 3D [5]. На рис. 4. показан пример расчета деформированного состояния заготовки из латуни Л63 с размерами, соответствующими детали на рис. 2, на конечной стадии формообразования конуса.

Пути деформирования характерных областей раскатанной детали обозначены на рис. 3 номерами 1, 2, 3. Области 1 и 3 деформируются монотонно, а область 2 — немонотонно. Область 1 с интенсивностью логарифмической деформации  $\epsilon_i = 0,92$  при  $K = 0,32$  превысила допустимый предел  $\epsilon_i = 0,86$ , что привело к образованию трещин. Допустимый предел  $\epsilon_i = 0,86$  определен по кривой 4 предельного состояния. Интенсивность деформации  $\epsilon_i = 0,86$  соответствует диаметру основания конуса равного  $D_{oc} = 59$  мм.

Таким образом, анализ графиков рис. 3 показал, что для получения бездефектных деталей

рассматриваемого класса диаметр основания раскатываемого конуса не должен превышать  $D_{oc} = 59$  мм.

Расчеты с использованием программного комплекса DEFORM 3D позволили определить деформированные состояния заготовки в процессе холодной раскатки конуса и установить пути деформирования наиболее характерных участков.

С применением стандартного испытательного оборудования построена экспериментальная кривая предельного состояния латуни Л63, соответствующая различным схемам нагружения.

Представлен пример расчета диаметра основания конуса из латуни Л63, предельно допусти-

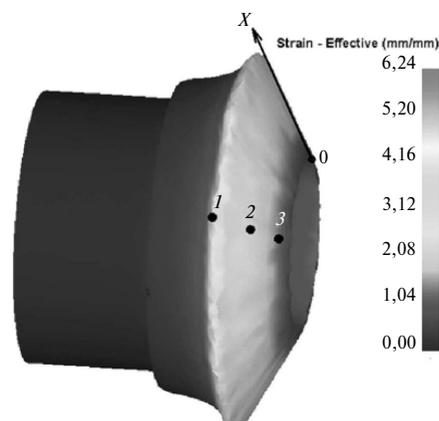


Рис. 4. Распределение интенсивности накопленной деформации по поверхности раскатанной детали

мого по условию получения бездефектных деталей. Установлено: для исследуемого класса деталей из латуни Л63 трещины в основании раскатанного конуса образуются при интенсивности деформации  $\epsilon_i$  более 0,86, что соответ-

ствует диаметру основания формообразованного конуса  $D_{oc} = 59$  мм.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14–08–31655 мол\_а.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент на способ **RUS 2 499 648. 25.06.2012.** Способ раскатки фланцев трубчатых заготовок / Востров В.Н., Кононов П.В. Зарег. в госреестре 25.05.2012.
2. Патент на полезную модель **RUS 116079. 07.12.2011.** Устройство для раскатки буртов на трубчатых заготовках / Востров В.Н., Кононов П.В. Зарег. в госреестре 27.11.2013.
3. **Востров В.Н., Яблокова Н.А., Кононов П.В.** Исследование остаточных напряжений в раскатанных деталях методом дифракции рентгеновских лучей // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 1(166). С. 223–230.
4. **Востров В.Н., Яблокова Н.А., Кононов П.В.** Исследование методом дифракции рентгеновских лучей остаточных напряжений в деталях с раскатанным фланцем из сплава Л63 // Научно-производственный журнал «Металлообработка». 2012. № 4(70). СПб.: Изд-во «Политехника». С. 38–42.
5. **DEFORM 3D. Version 6.1. User's, Manual.** 2007. 1328 p.
6. **Рыбин Ю.И., Рудской А.И., Золотов А.М.** Математическое моделирование и проектирование технологических процессов обработки металлов давлением. СПб: Наука, 2004. 644 с.
7. **Кононов П.В., Востров В.Н.** Конечно-элементное моделирование процесса раскатки фланца на трубчатой заготовке // Молодой ученый. 2013. № 9. С. 46–49.
8. **Колмогоров В.Л.** Механика обработки металлов давлением / Екатеринбург: Изд-во Уральского ГТУ, 2001. — 816 с.
9. Богатов А.А., Мижирицкий О.И., Смирнов С.В. [и др.]. Ресурс пластичности при обработке давлением М.: Металлургия, 1984. 144 с.
10. **Огородников В.А.** Ресурс пластичности при обработке давлением. Киев: Вища школа, 1983. 174 с.
11. **Дель Г.Д.** Пластичность деформированного металла // Физика и техника высоких давлений. 1983. № 11. С. 28–32.

#### REFERENCES

1. **Utility patent RUS 2 499 648. 25.06.2012.** Way rolling flanges tubular blanks / Vostrov V.N., Kononov P.V. Zaregistrovano v gosreestre 25.05.2012. (rus.)
2. **Utility patent RUS 116079. 07.12.2011.** Way rolling flanges tubular blanks / Vostrov V.N., Kononov P.V. Zaregistrovano v gosreestre 27.11.2013. (rus.)
3. **Vostrov V.N., Yablokova N.A., Kononov P.V.** Study of residual stresses in the roll out details of the X-ray diffraction. *Scientific and technical sheets SPbPU*. 2013. № 1(166). P. 223–230. (rus.)
4. **Vostrov V.N., Yablokova N.A., Kononov P.V.** Study of residual stresses X-ray diffraction method in detail with the roll out of an alloy flange L63. *Scientific and Production magazine «Metallobrabotka»*. 2012. № 4 (70). P. 38–42. «Publishing «Politehnica»». (rus.)
5. **DEFORM 3D Version 6.1. User's, Manual.** 2007. 1328 p.
6. **Rybin Y.I., Rudskoy A.I., Zolotov A.M.** [Mathematical modeling and design technology of metal forming processes]. St. Petersburg: Nauka, 2004. 644 p. (rus.)
7. **Kononov P.V., Vostrov V.N.** [Finite element modeling of the process rolling flange on the tubular billet]. *Young scientist*. 2013. № 9. P. 46–49. (rus.)
8. **Kolmogorov V.L.** Mechanics Metal Forming. Yekaterinburg: Publishing Ural GTU, 2001. 816 p. (rus.)
9. **Bogatov A.A., Mizhiritsky O.I., Smirnov S.V.** [and others]. Plasticity resource pressure treatment Moscow: Metallurgy, 1984. — 144 p. (rus.)
10. **Ogorodnikov V.A.** Plasticity resource pressure treatment. Kiev: High school, 1983. 174 p. (rus.)
11. **Del G.D.** Plasticity deformed metal. *Physics and technology of high pressure*. 1983. № 11. С. 28–32. (rus.)

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**КОНОНОВ Павел Васильевич** — аспирант кафедры машин и технологий обработки металлов давлением Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29; e-mail: kpv710@Rambler.ru

**KONONOV Pavel V.** — St. Petersburg State Polytechnical University, 29 Politekhnikeskaya S., St. Petersburg, 195251, Russia; e-mail: kpv710@Rambler.ru



УДК 669.1.017:669.018.44:669.018.891:539.25

*С.Ю. Кондратьев, А.В. Пташник,  
Г.П. Анастасиади, С.Н. Петров***КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ ФАЗ  
В ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВАХ Х25Н35***S.Yu. Kondrat'ev, A.V. Ptashnik,  
G.P. Anastasiadi, S.N. Petrov***QUANTITATIVE ASSESSMENT OF THE CONTENT OF PHASES  
IN HEAT RESISTING ALLOYS Cr25Ni35**

Рассмотрен метод определения количественного содержания дисперсных включений упрочняющих фаз в жаропрочных сплавах системы 25Cr–35Ni–C–Si–Nb с использованием электронной микроскопии. Метод успешно опробован для сплава 0,45C–26Cr–33Ni–2Si–2Nb. Представлены экспериментальные кривые содержания карбидов хрома и ниобия в структуре сплава после высокотемпературной выдержки при 1150 °С различной длительности.

ЛИТЫЕ ЖАРОПРОЧНЫЕ СПЛАВЫ; МИКРОСТРУКТУРА; ФАЗОВЫЙ СОСТАВ; ЭЛЕКТРОННАЯ МИКРОСКОПИЯ.

The method of calculation of the quantitative content of disperse inclusions of strengthening phases with use electron microscopy in heat resisting alloys of 25Cr–35Ni–C–Si–Nb system is considered. The method with advantage is tested for an alloy 0.45C–26Cr–33Ni–2Si–2Nb. Experimental curve contents of chromium and niobium carbides in alloy structure after high-temperature endurance of various duration at 1150 °C are submitted.

CAST HEAT RESISTANT ALLOYS; MICROSTRUCTURE; PHASE COMPOSITION; ELECTRON MICROSCOPY.

Для изготовления оборудования нефтехимических и нефтеперерабатывающих предприятий широко применяют жаропрочные жаростойкие сплавы систем Х25Н35 (НР type) [1–3]. Рабочие температуры таких установок достигают 1100–1200 °С. Известно, что эксплуатационные свойства жаропрочных сплавов при этих температурах определяются наличием упрочняющей сетки дисперсных выделений карбидного или интерметаллидного типа [4–5]. Исследования последних лет показали, что характер распределения и количественное соотношение упрочняющих фаз в сплавах рассматриваемой группы существенно изменяются в процессе высокотемпературной выдержки [6–12]. Таким образом, для надежного прогнозирования работоспособности рассматриваемых сплавов на основе системы Fe–Cr–Ni необходимы достоверные количественные методики исследования

изменения объемной доли и элементного состава дисперсных выделений определенного типа в зависимости от длительности температурного воздействия.

Цель нашей работы — разработка и апробация методики количественной оценки объемного содержания, морфологии и состава дисперсных фаз в жаростойких жаропрочных сплавах Х25Н35.

**Материал и методика эксперимента**

Для количественного фазового анализа жаропрочных сплавов с дисперсным упрочнением в качестве базового выбран известный метод количественной оценки размера, объемной доли, состава и морфологических особенностей строения неметаллических включений в металлических материалах. Метод основан на совместном использовании данных рентгеноспек-

трального микроанализа и цифровой обработки электронно-микроскопических изображений структуры сплавов. В данной работе метод модифицирован для исследования дисперсных фаз в жаропрочных жаростойких сплавах на Fe-Cr-Ni-основе.

Для количественного металлографического анализа применяли программу Clemex Vision PE. Программа обеспечивает полный цикл работы с металлографическими изображениями, а именно:

ввод и обработку изображений; калибровку по размеру;

количественные оценки и анализ изображений структур по ГОСТ-ам с формированием протоколов и отчетов; количественные оценки и анализ структур по любым требуемым нормам;

надежность работы, точность результатов, эффективность и удобство, благодаря эргономичному, простому и понятному интерфейсу;

автоматизацию рутинных операций обработки и анализа изображений;

наглядный количественный анализ;

возможность создания отчетов с оригинальными изображениями и таблицами результатов измерений.

Для выявления структуры сплава применяли электролитическое травление в десятипроцентной щавелевой кислоте. Изготовление и подготовку шлифов выполняли на оборудовании фирмы «Buehler» согласно стандарту ASTM E 3–95. Структуру сплава исследовали с использованием растрового электронного микроскопа Quanta 200 3D FEG. Для морфологических исследований дисперсных включений фаз в модельном сплаве использовали изображения структур, полученные при проведении микрорентгеноспектральных исследований на растровом электронном микроскопе Tescan VEGA 5136 LM.

Для проверки разработанного метода количественного фазового анализа в качестве модельного выбран жаростойкий жаропрочный сплав 0,45C–26Cr–33Ni–2Si–2Nb, используемый для изготовления радиантных змеевиков высокотемпературных установок пиролиза [4]. Сплав выплавляли в индукционной печи емкостью 100 кг на чистых шихтовых материалах и разливали в песчаные формы — стандартные клиновидные литейные пробы (ГОСТ 977–88).

Фактический химический состав, % масс., исследованного сплава 0,45C–26Cr–33Ni–2Si–2Nb следующий:

C.....	0,46
Si.....	1,73
Mn.....	1,31
Cr.....	25,5
Ni.....	35,6
Nb.....	1,60
W.....	0,59
Mo.....	0,31
Ti.....	0,21
N.....	0,05
Fe.....	Ост.

При исследовании сплава разработанным методом оценивали количественное изменение объемной доли, состава и морфологии дисперсных выделений в структуре.

#### Результаты экспериментальных исследований

Принцип разработанного метода количественного определения фазового состава жаропрочных сплавов X25H35 заключается в следующем. Растровый электронный микроскоп сканирует поле образца, на котором приготовлен микрошлиф и травлением выявлена микроструктура. При этом происходит накопление электронного изображения. В случае использования методики получения изображения от плоской поверхности шлифа в режиме обратно отраженных электронов контраст изображения определяется исключительно средним атомным номером облучаемого участка образца. Формируется так называемый Z-контраст. Изображение, полученное с помощью этого контраста, позволяет анализировать структуру, содержащую дисперсные выделения, и несет информацию о локальном элементном составе. Это дает возможность выбирать участки для количественного элементного анализа с помощью рентгеновского спектрометра. По заданному контрасту на изображении микроструктуры происходит выделение частиц предустановленной яркости (рис. 1).

На следующем этапе количественного анализа фазового состава сплава электронный зонд сканирует участок поверхности в рамках контура каждой обнаруженной и выделенной соответствующим контрастом частицы в структуре. При этом определение элементного состава происходит только в области выделенной частицы (рис. 2).

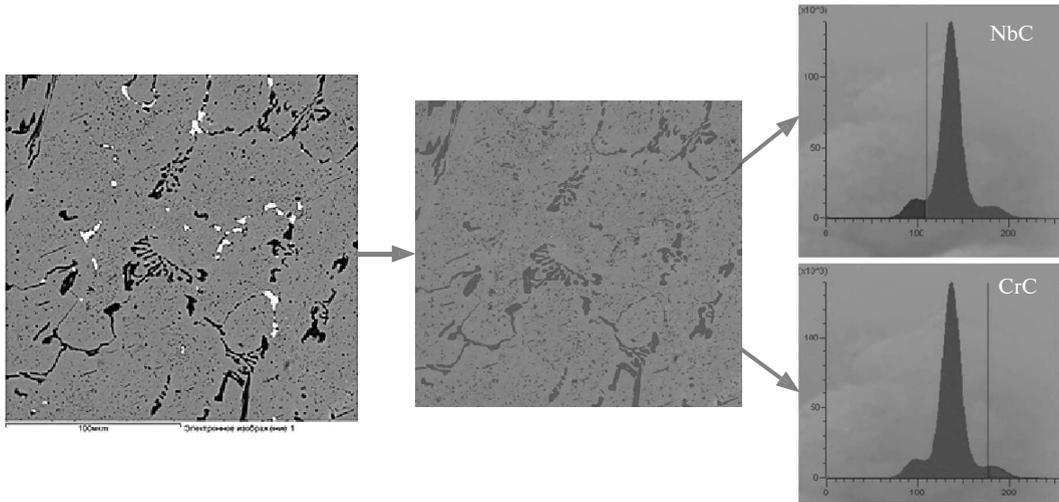


Рис. 1. Схематическое изображение последовательности получения контрастного изображения различных фаз в структуре многофазного сплава

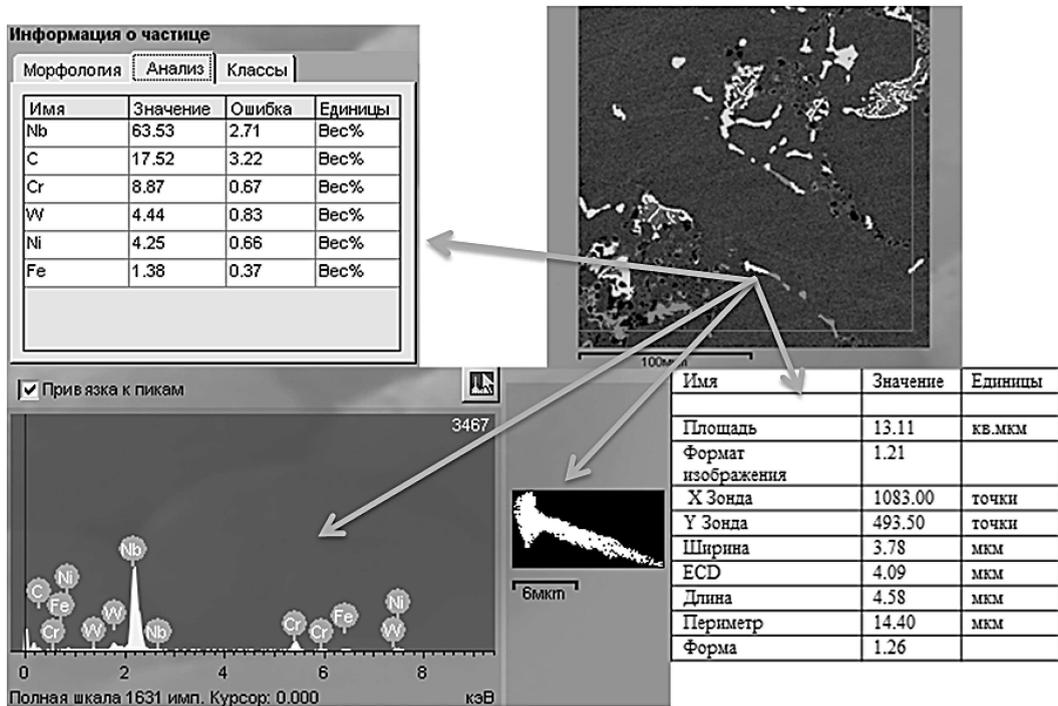


Рис. 2. Схема выполнения количественного анализа морфологии и химического состава частицы фазы в структуре сплава

Результаты сканирования заносятся в базу данных, где для каждой частицы фиксируются морфологические параметры (длина, ширина, площадь и т. д.), химический состав и характеристический рентгеновский спектр. Полученные количественные базы экспериментальных

данных позволяют проводить сортировку частиц по составу и морфологическим признакам, строить графические изображения распределения частиц по размерам и другим признакам, определять объемную долю частиц каждой фазы. Благодаря автоматизированному управлению

зондом и столиком перемещения образца при сканировании структуры сплава с использованием электронного микроскопа можно проанализировать большое количество полей при достаточно большом увеличении (от сотен до нескольких тысяч крат) и обеспечить получение представительных результатов исследования.

На основе определения элементного состава дисперсных частиц в структуре сплава выявляют, каким фазам соответствует каждый контраст. При этом, дисперсные частицы в структуре сплава выделяют различным цветом с помощью функции тональной коррекции с использованием шкалы распределения яркости в программе Clemex Vision PE (см. рис. 2). Для каждого изображения структуры автоматически выводится распределение яркости и на нем выделяются интервалы, соответствующие яркости каждой фазы. В результате получается многоцветное изображение структуры сплава, содержащего дисперсные фазы различного химического состава.

Металлографический анализ сплава 0,45C–26Cr–33Ni–2Si–2Nb показал, что его микроструктура в литом состоянии представляет собой  $\gamma$ -твердый раствор (аустенит) и значительное количество избыточных фаз (рис. 3, а). Микрорентгеноспектральным анализом выявлено, что избыточные фазы представляют собой карбиды хрома  $Cr_mC_n$  (эвтектические и изолированные) и карбиды ниобия NbC (внутри которых могут присутствовать нитриды титана, являвшиеся за-

родышами твердой фазы при кристаллизации сплава).

Таким образом, упрочняющими фазами, в основном определяющими высокотемпературную работоспособность исследуемого сплава, являются карбиды хрома и ниобия. В то же время известно [7, 8, 10–12], что в процессе эксплуатации сплава при температурах 1100–1200 °С эти фазы непрерывно претерпевают фазовые превращения, в результате которых их объемная доля в структуре изменяется. Поэтому важно количественное определение содержания карбидов хрома и ниобия в структуре сплава после высокотемпературной выдержки для оценки степени его разупрочнения при длительной эксплуатации. Такое исследование было выполнено с использованием разработанного метода количественной оценки фазового состава сплавов, содержащих в структуре дисперсные включения различных фаз.

При обработке изображения структуры сплава 0,45C–26Cr–33Ni–2Si–2Nb синий цвет был присвоен карбидам хрома, красный — карбидам ниобия (рис. 3, б). Следующим этапом было удаление шумов на изображениях с помощью программных фильтров. После такой обработки изображения программа определяет отдельную частицу фазы как замкнутый контур, образованный пикселями одного цвета, и с помощью математических методов для каждой выявленной частицы рассчитывает морфологические параметры: объемную долю, площадь, приведенный

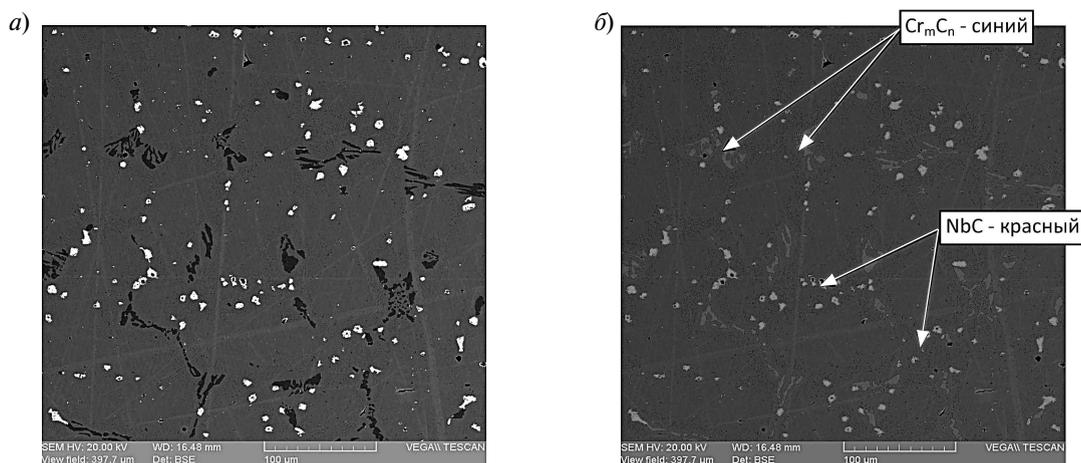


Рис. 3. Микроструктура сплава 0,45C–26Cr–33Ni–2Si–2Nb после выдержки при 1150 °С, 100 ч (РЭМ). Вид изображения: а — исходный, б — после контрастирования и цветного окрашивания

диаметр, коэффициент формы и т. д. Полученные результаты для каждой частицы каждой фазы заносятся в базу данных.

Для сплава 0,45С–26Сr–33Ni–2Si–2Nb с помощью программ Clemex Vision PE и Microsoft Office Excel разработанным методом были выполнены расчеты объемной доли дисперсных частиц карбидов хрома и ниобия и построены зависимости содержания фаз в структуре от длительности выдержки при 1150 °С — температуре эксплуатации установок пиролиза (рис. 4). Из полученных данных следует, что в процессе высокотемпературной эксплуатации длительно-стью до 100 ч в структуре сплава увеличивается объемная доля карбидов хрома и уменьшается доля карбидов ниобия. При этом зависимость количества фазы  $Cr_mC_n$  в структуре сплава имеет линейный характер, а фазы NbC — представляет собой кривую с максимумом.

Характер установленной зависимости фазового состава сплава от длительности выдержки при 1150 °С (рис. 4) согласуется с предложенным в [10–13] механизмом трансформации структуры сплавов X25H35 при длительной высокотемпературной эксплуатации. Структура литых жаропрочных жаростойких сплавов, близких по составу сплаву 0,45С–26Сr–33Ni–2Si–2Nb, характеризуется высокой термодинамической нестабильностью и в процессе их эксплуатации при температурах 1100–1200 °С непрерывно претерпевает фазовые превращения. При этом химический состав матричного твердого раствора на Fe–Cr–Ni основе практически не изменяется. Диффузионное перераспределение химических элементов в структуре таких сплавов приводит к образованию новых фаз и растворению исходных и новых фаз в адаптирующемся режиме, который характеризуется установлением условного динамического структурного «равновесия». Вследствие этого в сплаве 0,45С–26Сr–33Ni–2Si–2Nb в процессе выдержки при 1150 °С длительно-стью 100 ч происходит увеличение доли карбидов от неравновесного количества в литом состоянии до близкого к расчетному значению — в соответствии с балансом химических компонентов, составляющих сплав. Так, содержание карбидов хрома в структуре сплава увеличивается от 3,1 % объем. в литом состоянии до 4,3 % после 100 часов высокотемпературной выдержки. Содержание карбидов нио-

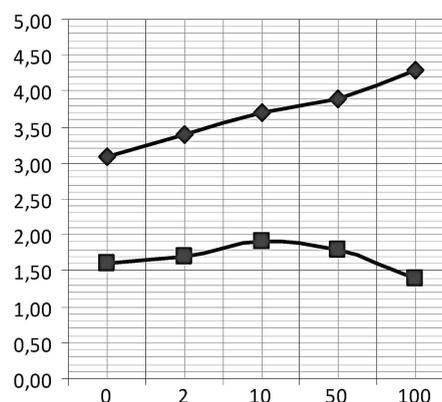


Рис. 4. Зависимости количества карбидов хрома и ниобия в структуре сплава 0,45С–26Сr–33Ni–2Si–2Nb от длительности выдержки при 1150 °С

(—◆— — карбид хрома; —■— — карбид ниобия)

бия в структуре литого сплава составляет 1,6 % объем., а после выдержки длительно-стью 10 ч возрастает до 1,9 %. При увеличении длительно-сти высокотемпературной выдержки более 10 ч в отличие от карбидов хрома количество карбидов ниобия в структуре сплава уменьшается и после 100 ч составляет 1,4 %. Наблюдаемое уменьшение доли карбидов ниобия в структуре сплава при увеличении длительно-сти выдержки объясняется частичным растворением этой фазы с образованием промежуточных интерметаллидных фаз и дисперсных карбидов хрома [6–9].

Разработан метод количественного определения содержания фаз в структуре жаропрочных жаростойких сплавов на Fe–Cr–Ni-основе, характеризующихся наличием в структуре дисперсных включений фаз различного химического состава. Метод основан на совместном использовании данных рентгеноспектрального микроанализа и цифровой обработки электронно-микроскопических изображений структуры сплавов. Опробование разработанного метода применительно к сплаву серии X25H35 показало его высокую точность. По уровню представительности метод не уступает оптической металлографии, обеспечивая при этом получение количественной оценки размеров, химического состава и морфологических признаков дисперсных включений фаз в структуре сплавов.

Построены количественные зависимости изменения содержания карбидных фаз в структуре сплава 0,45С–26Сr–33Ni–2Si–2Nb в процессе длительной выдержки при температуре 1150 °С. Установлено, что при высокотемпературной выдержке неравновесное содержание карбидов хрома и ниобия в структуре литого сплава увеличивается до расчетных значений по балансу химических компонентов сплава: для  $Cr_m C_n$  — примерно до 4 % объем. при 100 ч и для NbC — до

2 % объем. при 10 ч. Увеличение длительности выдержки более 10 ч приводит к уменьшению количества карбидов ниобия в структуре сплава вследствие частичного их растворения и образования промежуточных фаз различного состава.

Работа выполнена в Центре коллективного пользования ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» «Состав, структура и свойства функциональных и конструкционных материалов» при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Garbiak M., Jasinski W., Piekarski B. Materials for Reformer Furnace Tubes. History of Evolution // Archives Of Foundry Engineering. 2011. Vol. 11. Special Issue 2. P. 47–52.
2. De Almeida L.H., Ribeiro A.F., May I.L. Microstructural characterization of modified 25Cr-35Ni centrifugally cast steel furnace tubes // Materials Characterization. 2003. Vol. 49, № 3. P. 219–229.
3. Dewar M.P., Gerlich A.P. Correlation between experimental and calculated phase fractions in aged 20Cr32Ni1Nb austenitic stainless steels containing nitrogen // Metallurgical and Materials Transactions A. 2012. Vol. 13, № 4, April. Preprint submitted. 19 p.
4. Орыщенко А.С. Жаростойкие жаропрочные сплавы. СПб.: Наука, 2011. 191 с.
5. Рудской А.И., Орыщенко А.С., Кондратьев С.Ю., Анастасиади Г.П., Фукс М.Д., Петров С.Н. Особенности структуры и длительная прочность литого жаропрочного сплава 45X26H33C2B2 // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. 2013. № 4 (694). С. 42–47.
6. Орыщенко А.С., Кондратьев С.Ю., Анастасиади Г.П., Фукс М.Д., Петров С.Н. Особенности структурных изменений в жаропрочном сплаве 45X26H33C2B2 при температурах эксплуатации. Сообщение 1: Литое состояние // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия «Наука и образование». 2012. № 1 (142). С. 155–163.
7. Орыщенко А.С., Кондратьев С.Ю., Анастасиади Г.П., Фукс М.Д., Петров С.Н. Особенности структурных изменений в жаропрочном сплаве 45X26H33C2B2 при температурах эксплуатации. Сообщение 2: Влияние высокотемпературной выдержки // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия «Наука и образование». 2012. № 2(147), Т. 1. С. 217–228.
8. Рудской А.И., Анастасиади Г.П., Орыщенко А.С., Кондратьев С.Ю., Фукс М.Д. Особенности структурных изменений в жаропрочном сплаве 45X26H33C2B2 при температурах эксплуатации. Сообщение 3: Механизм и кинетика фазовых превращений // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия «Наука и образование». 2012. № 3(154), Т. 2. С. 143–150.
9. Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Анастасиади Г.П., Орыщенко А.С., Фукс М.Д., Петров С.Н. Трансформация структуры жаропрочного сплава 0,45С 26Сr 33Ni 2Si 2Nb при длительной высокотемпературной выдержке // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. 2013. № 10 (700). С. 7–14.
10. Рудской А.И., Орыщенко А.С., Кондратьев С.Ю., Анастасиади Г.П., Фукс М.Д. Механизм и кинетика фазовых превращений в жаропрочном сплаве 45X26H33C2B2 при длительных высокотемпературных выдержках. Часть 1 // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. 2014. № 1 (703). С. 3–8.
11. Рудской А.И., Анастасиади Г.П., Кондратьев С.Ю., Орыщенко А.С., Фукс М.Д. Влияние фактора числа электронных вакансий на кинетику образования, роста и растворения фаз при длительных высокотемпературных выдержках жаропрочного сплава 0.45С-26Сr-33Ni-2Si-2Nb // Физика металлов и металловедение. 2014. Т. 115, № 1. С. 3–13.
12. Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Анастасиади Г.П., Орыщенко А.С., Фукс М.Д. Механизм и кинетика фазовых превращений в жаропрочном сплаве 45X26H33C2B2 при длительных высокотемпературных выдержках. Часть 2 // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov. 2014. № 3 (705). С. 12–19.

### REFERENCES

1. Garbiak M., Jasinski W., Piekarski B. Materials for Reformer Furnace Tubes. History of Evolution. *Archives Of Foundry Engineering*. 2011. Vol. 11. Special Issue 2. P. 47–52.
2. De Almeida L.H., Ribeiro A.F., May I.L. Microstructural characterization of modified 25Cr-35Ni centrifugally cast steel furnace tubes. *Materials Characterization*. 2003. Vol. 49, № 3. P. 219–229.

3. Dewar M.P., Gerlich A.P. Correlation between experimental and calculated phase fractions in aged 20Cr32Ni1Nb austenitic stainless steels containing nitrogen. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2012. Vol. 13. № 4. Preprint submitted. 19 p. (rus.)

4. Oryshchenko A.S. Zharostoykiye zharoprochnyye splavy. SPb.: Nauka, 2011. 191 s. (rus.)

5. Rudskoy A.I., Oryshchenko A.S., Kondratyev S.Yu., Anastasiadi G.P., Fuks M.D., Petrov S.N. Osobennosti struktury i dlitelnaya prochnost litogo zharoprochnogo splava 45Kh26N33S2B2. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*. 2013. № 4 (694). S. 42–47. (rus.)

6. Oryshchenko A.S., Kondratyev S.Yu., Anastasiadi G.P., Fuks M.D., Petrov S.N. Osobennosti strukturykh izmeneniy v zharoprochnom splave 45Kh26N33S2B2 pri temperaturakh ekspluatatsii. Soobshcheniye 1: Litoye sostoyaniye. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU. Seriya «Nauka i obrazovaniye»*. 2012. № 1 (142). S. 155–163. (rus.)

7. Oryshchenko A.S., Kondratyev S.Yu., Anastasiadi G.P., Fuks M.D., Petrov S.N. Osobennosti strukturykh izmeneniy v zharoprochnom splave 45Kh26N33S2B2 pri temperaturakh ekspluatatsii. Soobshcheniye 2: Vliyaniye vysokotemperaturnoy vyderzhki. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU. Seriya «Nauka i obrazovaniye»*. 2012. № 2 (147). Vol. 1. S. 217–228. (rus.)

8. Rudskoy A.I., Anastasiadi G.P., Oryshchenko A.S., Kondratyev S.Yu., Fuks M.D. Osobennosti strukturykh izmeneniy v zharoprochnom splave 45Kh26N33S2B2 pri

temperaturakh ekspluatatsii. Soobshcheniye 3: Mekhanizm i kinetika fazovykh prevrashcheniy. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU. Seriya «Nauka i obrazovaniye»*. 2012. № 3. (154). Vol. 2. S. 143–150. (rus.)

9. Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Anastasiadi G.P., Oryshchenko A.S., Fuks M.D., Petrov S.N. Transformatsiya struktury zharoprochnogo splava 0,45C 26Cr 33Ni 2Si 2Nb pri dlitelnoy vysokotemperaturnoy vyderzhke. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*. 2013. № 10 (700). S. 7–14. (rus.)

10. Rudskoy A.I., Oryshchenko A.S., Kondratyev S.Yu., Anastasiadi G.P., Fuks M.D. Mekhanizm i kinetika fazovykh prevrashcheniy v zharoprochnom splave 45Kh26N33S2B2 pri dlitelnykh vysokotemperaturnykh vyderzhkakh. Chast 1. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*. 2014. № 1 (703). S. 3–8. (rus.)

11. Rudskoy A.I., Anastasiadi G.P., Kondratyev S.Yu., Oryshchenko A.S., Fuks M.D. Vliyaniye faktora chisla elektronnykh vakansiy na kinetiku obrazovaniya, rosta i rastvoreniya faz pri dlitelnykh vysokotemperaturnykh vyderzhkakh zharoprochnogo splava 0.45C-26Cr-33Ni-2Si-2Nb. *Fizika metallov i metallovedeniye*. 2014. T. 115. № 1. S. 3–13. (rus.)

12. Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Anastasiadi G.P., Oryshchenko A.S., Fuks M.D. Mekhanizm i kinetika fazovykh prevrashcheniy v zharoprochnom splave 45Kh26N33S2B2 pri dlitelnykh vysokotemperaturnykh vyderzhkakh. Chast 2. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*. 2014. № 3 (705). S. 12–19. (rus.)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**КОНДРАТЬЕВ Сергей Юрьевич** — доктор технических наук профессор кафедры технологии и исследований материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: petroprom2013@yandex.ru

**ПТАШНИК Алина Вадимовна** — инженер сектора электронной микроскопии ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей»; 191015, ул. Шпалерная, 49, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: alina\_pv@mail.ru

**АНАСТАСИАДИ Григорий Панеодович** — доктор технических наук профессор кафедры технологии и исследований материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: anastas45@yandex.ru

**ПЕТРОВ Сергей Николаевич** — кандидат химических наук начальник сектора электронной микроскопии ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей»; 191015, ул. Шпалерная, 49, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: crism325@gmail.com

## AUTHORS

**KONDRAT'EV Sergey Yu.** — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: petroprom2013@yandex.ru

**PTASHNIK Alina V.** — FSUE Central Research Institute of Structural Materials «Prometey»; 191015, Shpaler-naya Str. 49, St. Petersburg, Russia; e-mail: alina\_pv@mail.ru

**ANASTASIADI Grigoriy P.** — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: anastas45@yandex.ru

**PETROV Sergey N.** — FSUE Central Research Institute of Structural Materials «Prometey»; 191015, Shpaler-naya Str. 49, St. Petersburg, Russia; e-mail: crism325@gmail.com

УДК 621.771.23

*А.А. Кононов*

## **ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ НА РАЗМЕР ЗЕРНА АНИЗОТРОПНОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ**

*А.А. Кононов*

### **INFLUENCE OF HOT ROLLING MODES ON GRAIN-ORIENTED SILICON STEEL GRAIN SIZE**

Исследовано изменение микроструктуры полосы анизотропной электротехнической стали в зависимости от режимов горячей прокатки. В процессе лабораторной горячей прокатки варьировали степени обжатия и температуру начала прокатки. Изучена микроструктура, определено количество аустенита в деформированных образцах. Результаты лабораторной прокатки сравнены с горячекатаной полосой промышленного производства.

АНИЗОТРОПНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ СТАЛЬ; ГОРЯЧАЯ ПРОКАТКА; ОБЪЕМНАЯ ДОЛЯ АУСТЕНИТА.

Hot rolled grain-oriented silicon steel sheets microstructure behavior was investigated depending on rolling modes. During laboratory hot rolling reduction rate and initial rolling temperature were varied. Grain size and austenite volume fraction in deformed specimens was observed. Results of laboratory hot rolling were compared with real production hot rolling sheets.

GRAIN-ORIENTED SILICON STEEL; HOT ROLLING; AUSTENITE VOLUME FRACTION.

Анизотропная электротехническая сталь применяется в качестве магнитного материала, поэтому для нее наиболее важны магнитные свойства, основными из которых являются максимальная магнитная индукция и магнитные потери на перемагничивание.

Из анизотропной электротехнической стали изготавливаются изделия, которые используют в неподвижных магнитных полях и намагничивают только в одном направлении. Так как кристаллическая решетка обладает анизотропными магнитными свойствами, то для получения наиболее высоких магнитных свойств в каком-либо направлении необходимо получить кристаллографическую текстуру в листе. Высокие магнитные свойства в анизотропной электротехнической стали в направлении прокатки обеспечиваются наличием текстуры  $\{110\}\langle 001 \rangle$  — текстуры Госса (ребровая текстура) [1].

Непосредственное формирование текстуры в листе происходит на этапе заключительного высокотемпературного отжига в ходе вторичной рекристаллизации за счет избирательного роста

зерен с ребровой ориентировкой. Это возможно благодаря механизму текстурной наследственности и эволюции частиц второй фазы (ингибиторная фаза), которая играет важную роль в избирательном росте зерен [2, 3]. Оба этих процесса начинаются на стадии горячей прокатки. Так, на стадии горячей прокатки в поверхностных слоях полосы образуются зерна с ребровой текстурой, которые играют важную роль в образовании острой текстуры готового листа [4, 5].

Таким образом, меняя режимы горячей прокатки, можно влиять на структуру горячекатаной полосы и в итоге воздействовать на магнитные свойства готового листа [6]. Один из важных факторов, влияющих на структуру полосы после горячей прокатки, — это соотношение количества аустенита и феррита во время прокатки [7].

Целью данной работы было проведение количественного анализа микроструктуры анизотропной электротехнической стали и определение количества аустенита в зависимости от температуры образцов и степени их деформации.

Несмотря на то, что подобные работы уже проводились [8], предмет исследований остается актуальным.

### Материал и методики

В работе исследовали литую анизотропную электротехническую сталь нитридно-медного варианта производства, химический состав которой, масс. %, следующий:

C	0,037
Si	3,260
Mn	0,168
Ni	0,012
Al	0,013
Cr	0,014
Cu	0,555

Образцы прокатывали на лабораторном стане Дуо 210. Контроль температуры образцов во время прокатки осуществляли пирометром Optis CT 3МНЗ. Погрешность измерения составила  $\pm 5^\circ\text{C}$ . Прокатку проводили по трем режимам: при обжатиях 50, 35 и 25 % и температурах начала прокатки 1000, 950 и 900  $^\circ\text{C}$  (табл. 1). Для фиксации структуры сразу после окончания горячей прокатки образцы охлаждали в воде.

Исследование структуры проводили на оптическом микроскопе Leica DMI 5000M в плоскости прокатки и в продольном сечении. При количественном анализе микроструктуры использовали анализатор изображений Thixomet PRO.

### Обсуждение результатов

На рис. 1 представлена структура горячекатаной полосы промышленного производства в плоскости прокатки и в поперечном сечении.

По сечению проката наблюдается типичная для сталей этой марки неравномерность: в центральных слоях — вытянутые деформированные зерна; в поверхностных — рекристаллизованные равноосные. Средний диаметр зерна в плоскости прокатки составляет 80–110 мкм.

Неравномерность структуры после промышленной прокатки появляется в результате одновременного воздействия нескольких факторов: распределения обжатий по проходам, изменения температуры в течение прокатки и неравномерности температуры по толщине полосы. Лабораторные образцы значительно тоньше слябов и были прокатаны за один проход. По этой причине такую сильную неравномерность структуры по толщине получить было невозможно. В результате в центральных слоях образцов отсутствуют деформированные вытянутые зерна, и структура по всей толщине состоит из равноосных зерен (рис. 2). Это свидетельствует о полном протекании процессов рекристаллизации по всей толщине образцов.

В табл. 2 представлен средний размер зерна в образцах после лабораторной прокатки. Для возможности сравнения полученных экспериментальных данных с промышленными измерения проводили в плоскости прокатки в поверхностных слоях (в которых в промышленной полосе находятся рекристаллизованные зерна). Наиболее крупное зерно получено в образцах с наименьшими обжатиями, причем размер зерна в этом случае не зависит от температуры прокатки. Причиной этого была недостаточность степени деформации для измельчения зерна.

Таблица 1

Режимы лабораторной горячей прокатки

Температура начала прокатки, $^\circ\text{C}$	Температура конца прокатки, $^\circ\text{C}$	Исходная толщина, мм	Конечная толщина, мм	Степень обжатия, %
1170	1000	6,7	3,15	52,99
1044	890	6,5	3,20	50,77
950	870	6,9	3,30	52,17
1150	1020	6,8	4,15	38,97
1050	950	6,4	4,15	35,16
950	870	6,9	4,30	37,68
1140	1010	6,7	4,90	26,87
1050	960	6,4	4,95	22,66
950	870	6,6	5,00	24,24

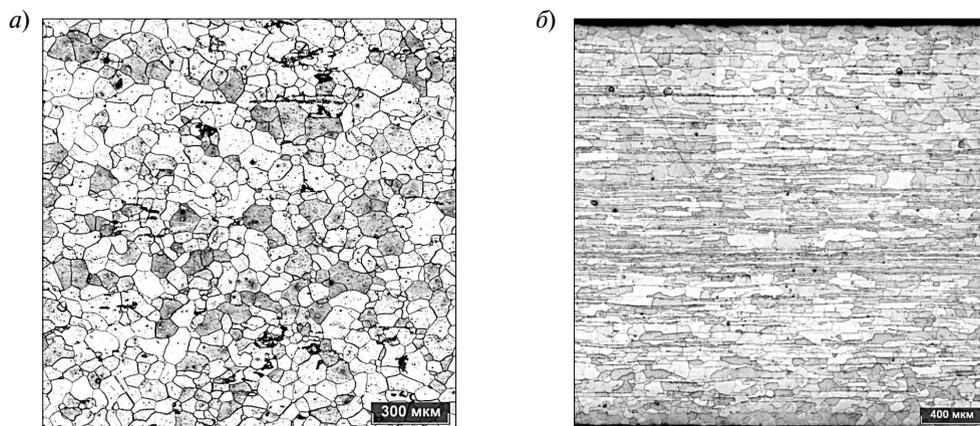


Рис. 1. Структура горячекатаной полосы промышленного производства: *a* — в плоскости прокатки, *б* — в продольном сечении

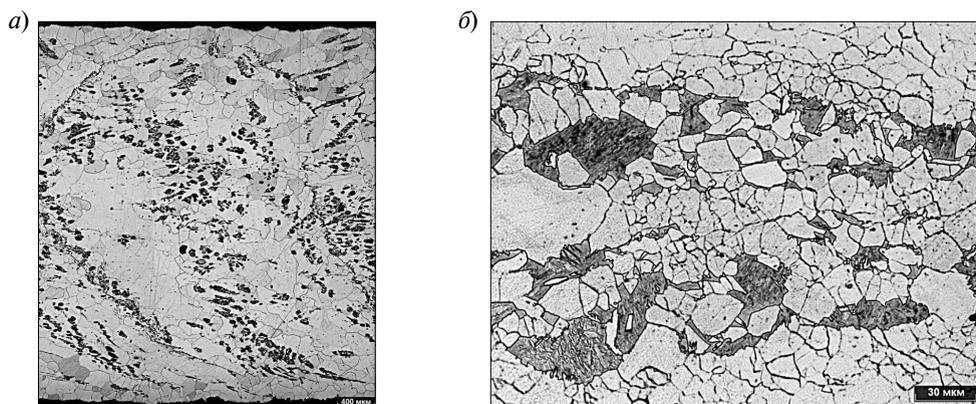


Рис. 2. Структура лабораторных образцов после прокатки: *a* — общий план по сечению образца; *б* — центральные слои

Таблица 2

Средний диаметр зерна в образцах после лабораторной горячей прокатки

Температура начала прокатки, °С	Температура конца прокатки, °С	Степень обжатия, %	Средний диаметр зерна, мкм
1170	1000	52,99	100–160
1044	890	50,77	90–170
950	870	52,17	60–110
1150	1020	38,97	210–240
1050	950	35,16	100–140
950	870	37,68	100–200
1140	1010	26,87	160–250
1050	960	22,66	100–250
950	870	24,24	200–250

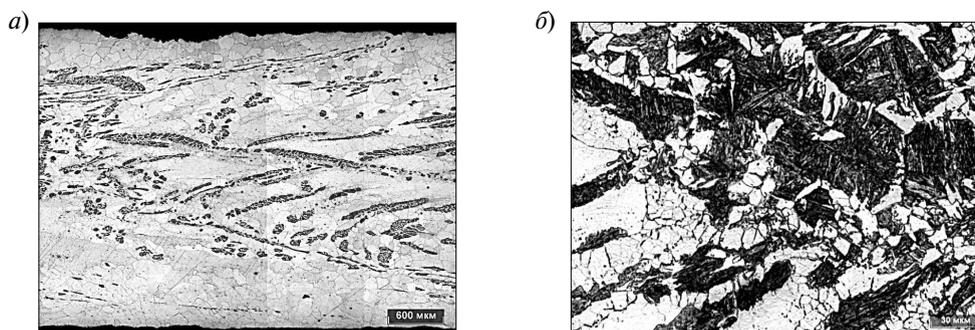


Рис. 3. Участки перлита в образцах после лабораторной горячей прокатки

Поэтому под действием высоких температур зерно сильно выросло. Повышение обжатий до 35 % сопровождается более интенсивным измельчением зерна, чем при 25 %. Важно отметить, что при таких степенях деформации появляется зависимость размера зерна от температуры прокатки. Наибольшим размером зерна обладает образец, прокатанный при 1150 °С. При этой температуре недостаточно измельченное зерно успевает сильно вырасти, а более низких температур не хватает для столь интенсивного роста. При деформации 50 % получено наименьшее зерно, при этом с увеличением температуры прокатки размер зерна увеличивался.

Схожие с данными для промышленного металла значения среднего диаметра зерна были получены на лабораторном образце, прокатанном при температуре 950 °С с обжатиями 52 %. Дело в том, что данный режим наиболее близок

режиму последних проходов промышленной горячей прокатки.

Поскольку после лабораторной горячей прокатки образцы охлаждались с повышенными скоростями, то помимо феррита в их структуре присутствуют продукты распада аустенита (перлит), которых нет в металле после промышленной горячей прокатки (рис. 3).

Включения перлита сконцентрированы в основном в центральных слоях прокатанных образцов, что связано с захлаживанием поверхностных слоев из-за контакта металла с валками. Частично превращение «аустенит → феррит» успело пройти, поэтому в областях концентрации перлита присутствует большое количество мелких зерен феррита.

Определив количество перлита и мелких зерен феррита, можно оценить количество аустенита в образцах сразу после горячей прокатки. В табл. 3 приведены данные о количестве продуктов рас-

Таблица 3

Количество перлита в образцах после лабораторной горячей прокатки

Температура начала прокатки, °С	Температура конца прокатки, °С	Степень обжатия, %	Количество перлита, объемный %	
			Поперечное сечение	Плоскость прокатки
1170	1000	52,99	10,70	4,78
1044	890	50,77	7,66	4,16
950	870	52,17	8,36	3,73
1150	1020	38,97	14,30	4,33
1050	950	35,16	9,32	3,62
950	870	37,68	13,90	4,79
1140	1010	26,87	12,80	7,03
1050	960	22,66	13,30	5,78
950	870	24,24	10,30	7,93

пада аустенита в исследуемых образцах. Как уже отмечалось выше, в поверхностных слоях продуктов распада аустенита значительно меньше, чем в центральных. Наибольшее количество перлита в плоскости прокатки было получено на образцах с наименьшей степенью деформации, для остальных образцов значения примерно одинаковы.

Количество перлита по сечению образца также больше при низких деформациях. Возможно, это связано с большим количеством продуктов распада аустенита в поверхностных слоях образцов.

Из табл. 3 видно, что наибольшее количество аустенита в металле образовалось при более высоких температурах, однако полученные значения не являются максимальными для исследуемой марки стали. Следует отметить, что по результатам выполненных экспериментов не выявлено однозначных тенденций влияния деформации на ферритное превращение.

Исследование влияния режимов горячей прокатки на микроструктуру анизотропной

электротехнической стали позволило установить, что варьирование степени деформации от 25 до 50 % и температуры начала прокатки от 900 до 1000 °С дает возможность изменять размер зерна в широких пределах от 60 до 250 мкм. При обжатиях 25 % рекристаллизованное зерно вырастает до 200 мкм, причем зависимости от температуры прокатки практически нет. При обжатиях 50 % влияние температуры прокатки становится значительным, размер зерна увеличивается в три раза при 1150 °С по сравнению с 950 °С. При обжатиях 35 % влияние температуры менее выражено.

Полученные экспериментальные данные позволяют вносить коррективы в температурно-деформационные схемы горячей прокатки с целью управления микроструктурой горячекатаных полос анизотропной электротехнической стали. Варьируя степень деформации и температуру прокатки, можно изменять соотношение рекристаллизованных и нерекристаллизованных зерен в прокатке и размер зерна.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Казаджан Л.Б.** Магнитные свойства электротехнических сталей и сплавов. М.: ООО «Наука и технологии», 2000. 224 с.

2. **Cui F., Yang P., Mao W.** Behaviors of different inhibitors during secondary recrystallization of a grain-orientated silicon steel // *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2011. Vol. 18, № 3, P. 314.

3. **Колбасников Н.Г., Кондратьев С.Ю.** Структура. Энтропия. Фазовые превращения и свойства металлов. СПб.: Наука, 2006. 364 с.

4. **Suzuki, S., Ushigami Y., Homma H., Takebayashi S., Kubota T.** Influence of Metallurgical Factors on Secondary Recrystallization of Silicon Steel // *Materials Transactions*. 2001. Vol. 42, №6. P. 994–1006.

5. **Yang, P., Shao Y-Y., Mao W-M., Jiang Q-W., Jin W-X.** Orientation Evolutions During Hot Rolling of Electrical Steel Containing Initial Columnar Grains // *Materials Science Forum*. 2012. Vols. 702–703, P. 754–757.

6. **Hong, B.D., Kim J.K., Cho K-M.** Effects of Hot Rolling on Microstructures and Magnetic Properties in 3 % Si Grain Oriented Electrical Steels // *Journal of Magnetism*. 2006. Vol. 11, № 3. P. 111–114.

7. **Akta, S., Richardson G.J., Sellars C.M.** Hot Deformation and Recrystallization of 3 % Silicon Steel Part 1: Microstructure, Flow Stress and Recrystallization Characteristics // *ISIJ International*. 2005. Vol. 45, № 11. P. 1666–1675.

8. **Tsai, M-C.** The quenching effects of hot band annealing on grain-oriented electrical steel / M-C. Tsai, Y-S. Hwang // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2010. № 322, P. 2690–2695.

9. **Tsai, M-C., Hwang Y-S.** The quenching effects of hot band annealing on grain-oriented electrical steel // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2010. № 322, P. 2690–2695.

#### REFERENCES

1. **Kazadzhyan L.B.** Magnitnyye svoystva elektrotekhnicheskikh staley i splavov. M.: ООО «Nauka i tekhnologii», 2000. 224 s. (rus.)

2. **Cui, F., Yang, P. Mao W.** Behaviors of different inhibitors during secondary recrystallization of a grain-orientated silicon steel. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2011. Vol. 18, № 3, P. 314.

3. **Kolbasnikov N.G., Kondratyev S.Yu.** Структура. Энтропия. Фазовые превращения и свойства металлов. СПб.: Наука, 2006. 364s. (rus.)

4. **Suzuki, S., Ushigami Y., Homma H., Takebayashi S., Kubota T.** Influence of Metallurgical Factors on Secondary Recrystallization of Silicon Steel. *Materials Transactions*. 2001. Vol. 42, №6. P. 994–1006.



5. Yang, P., Shao Y.-Y., Mao W.-M., Jiang Q.-W., Jin W.-X. Orientation Evolutions During Hot Rolling of Electrical Steel Containing Initial Columnar Grains. *Materials Science Forum*. 2012. Vols. 702–703, P. 754–757.

6. Hong, B.D., Kim J.K., Cho K.-M. Effects of Hot Rolling on Microstructures and Magnetic Properties in 3 % Si Grain Oriented Electrical Steels. *Journal of Magnetism*. 2006. Vol. 11, № 3. P. 111–114.

7. Akta, S., Richardson G.J., Sellars C.M. Hot Deformation and Recrystallization of 3 % Silicon Steel Part 1: Mi-

crostructure, Flow Stress and Recrystallization Characteristics. *ISIJ International*. 2005. Vol. 45, № 11, P. 1666–1675.

8. Tsai, M.-C., Hwang Y.-S. The quenching effects of hot band annealing on grain-oriented electrical steel. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2010. № 322, P. 2690–2695.

9. Tsai, M.-C., Hwang Y.-S. The quenching effects of hot band annealing on grain-oriented electrical steel. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2010. № 322, P. 2690–2695.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**КОНОНОВ Александр Александрович** — аспирант кафедры технологии и исследования материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: a.a.kononov@russia.ru

#### AUTHORS

**KONONOV Aleksandr A.** — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: a.a.kononov@russia.ru

УДК 669.2.02/.09

*О.П. Шаболдо, Я.М. Виторский,  
А.И. Шамшури, А.А. Кононов*

## **ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ $\beta$ -ТИТАНОВОГО СПЛАВА В ПРОЦЕССЕ ХОЛОДНОЙ ДЕФОРМАЦИИ И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

*O.P. Shaboldo, Ya.M. Vitorsky,  
A.I. Shamshurin, A.A. Kononov*

### **$\beta$ -TI ALLOY STRUCTURE FORMATION DURING COLD DEFORMATION PROCESSING AND CONSEQUENT HEAT TREATMENT**

Проведены исследования формирования структуры в процессе холодного волочения и последующей термической обработки титанового сплава ТС6. Методом EBSD-анализа установлено, что в результате холодной деформации в сплаве формируется ячеистая субструктура с углами разориентации  $0,5-0,7^\circ$ , при последующем нагреве до температуры  $700^\circ\text{C}$  создается полигонизованная структура с углами разориентации  $0,45-0,55^\circ$  и размерами субзерен  $0,15-0,25$  мкм. При нагреве до  $800^\circ\text{C}$  формируется мелкозернистая рекристаллизованная структура.

ВОЛОЧЕНИЕ; ХОЛОДНАЯ ДЕФОРМАЦИЯ; РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ; ПОЛИГОНИЗАЦИЯ; СУБСТРУКТУРА.

$\beta$ -Ti (ТС6) structure formation during cold drawing and heat treatment is studied. With help of EBSD-analysis technique it was considered that cell subgrain structure with grain boundary angle  $0,5-0,7^\circ$  was formed after cold deformation. After heat treatment at temperature of  $700^\circ\text{C}$  received structure was transformed to polygonized structure with grain boundary angle  $0,45-0,55^\circ$  and subgrain size  $0,15-0,25$   $\mu\text{m}$ . Heat treatment at temperature of  $800^\circ\text{C}$  leads to fine grain recrystallized structure formation.

DRAWING; COLD DEFORMATION; RECRYSTALLIZATION; POLYGONIZATION; SUBSTRUCTURE.

Титановые сплавы с термически нестабильной  $\beta$ -фазой, благодаря высокой пластичности в закаленном состоянии и исключительной способности упрочняться при термической и термомеханической обработках (ТМО), находят широкое применение в различных областях машиностроения, в том числе при изготовлении энергоемких коррозионностойких пружин [1–3]. Одним из условий получения благоприятного сочетания прочностных и пластических характеристик в упрочненном состоянии  $\beta$ -титановых сплавов является формирование перед упрочняющей термообработкой мелкозернистой рекристаллизованной или полигонизованной структур [4, 5]. Известно, что при прочих равных условиях характер процессов, протекающих при термообработке, опреде-

ляется структурой, сформированной в процессе предшествующей деформации [4,6].

Цель данной работы — исследовать влияние процессов холодного волочения и последующей термической обработки на формирование структуры проволоки из  $\beta$ -титанового сплава ТС6, чтобы выявить режимы обработки, обеспечивающие получение мелкозернистой структуры.

#### **Материал и методика исследования**

В качестве исследуемого материала использовали проволоку из титанового сплава ТС6 (основа Ti — 10,5 % Cr — 7 % V — 4 % Mo — 3 % Al — 1 % Zr) диаметром 4,6 мм, полученную из серийного горячекатаного прутка диаметром 8,0 мм холодным волочением с промежуточной

закалкой. Промежуточную закалку проводили на установке скоростного электроконтактного нагрева начиная с температуры 780–800 °С. Температуру термической обработки назначали с целью получения минимального зерна  $\beta$ -фазы [7]. Суммарная деформация после промежуточной закалки составила 45 %. Проволоку диаметром 4,6 мм подвергали закалке скоростным нагревом без выдержки начиная с температуры 800 °С и холодному волочению до диаметра 3,3 мм с суммарной степенью деформации 48,5 %, а затем закачивали по трем различным режимам: с температуры 700 °С печным нагревом и с температуры 800 °С печным и скоростным нагревами. Скорость нагрева проволоки диаметром 3,3 мм на установке электроконтактного нагрева составляла 35 °С/с, обработку проводили без выдержки. При термической обработке в печи выдержка составляла 20 минут. Волочение материала проводили на цепном волочильном стане. Механические свойства сплава определяли испытаниями на растяжение (по 3–6 образцам на точку) на испытательной машине УТС110М на проволочных образцах с длиной рабочей части 100 мм.

Исследование субструктуры проводили на электронном сканирующем микроскопе Tescan Mira 3 методом обратной дифракции электронов (EBSD). Строили карты кристаллографических ориентировок в пространстве Эйлера (карты EBSD), которые обрабатывались с помощью функции измерения локальной разориентации (Local Misorientation Component). Суть данной обработки заключается в отображении областей с малыми изменениями ориентировок и обла-

стей с относительно большими перепадами по углам. Функция суммирует среднюю разориентировку между каждым пикселем и окружающими его, данное значение присваивается исходному пикселю и отображается в цветовой гамме. Критерием обработки карты EBSD был задан угол в 1 градус. При значении в 1 градус присваивается белый цвет; при уменьшении до 0 градусов цвет меняется на серый. Исследования микроструктуры проводили на микроскопе Neophot 21 с системой анализа изображений «Thixomet Pro».

### Результаты экспериментов и их обсуждение

После закалки исходных заготовок диаметром 4,6 мм начиная с температуры 800 °С с использованием скоростного нагрева без выдержки в сплаве ТС6, деформированном в холодную на 45 %, формируется частично рекристаллизованная структура. На рис. 1 представлены карты локальной разориентации кристаллической решетки сплава ТС6, из которых видно, что, наряду с равноосными рекристаллизованными зернами, в структуре наблюдаются остатки деформированных зерен (рис. 1, а); это указывает на неполное протекание рекристаллизации. Механические свойства сплава ТС6 в данном состоянии следующие:  $\sigma_B = 1030$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 1018$  МПа,  $\sigma_{\text{пл}} = 865$  МПа,  $\delta = 14,8$  %,  $\psi = 62$  %. Такая особенность титановых  $\beta$ -сплавов, обусловленная, по-видимому, наследственным влиянием крупнозернистой структуры горячекатаных исходных заготовок, неравномерностью распределения деформации в крупных зернах,

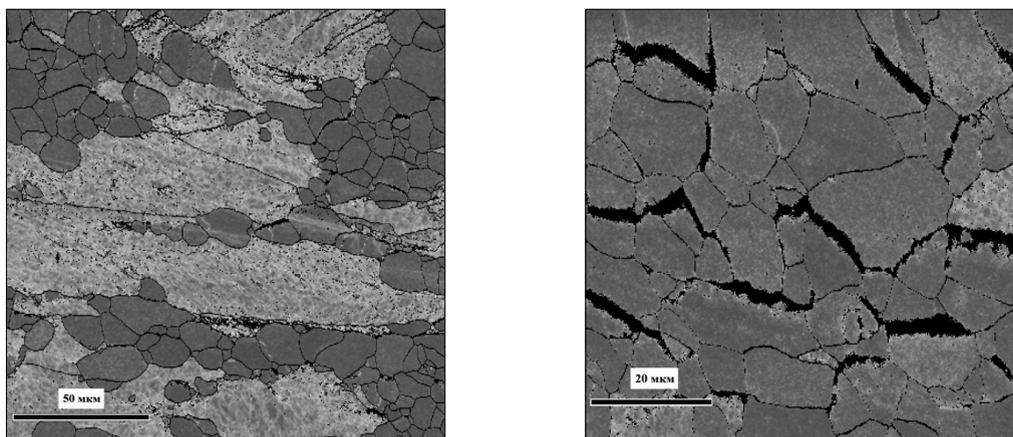


Рис. 1. Карты локальной разориентации кристаллической решетки сплава ТС6 после закалки начиная с температуры 800 °С.

которая вызвана изначально неоднородностью растворения легирующих элементов в высоколегированных сплавах, хорошо и давно известна [8–10]. В более поздних работах [11, 12] данный эффект, называемый текстурным торможением рекристаллизации, авторы связывали с тем, что в определенных кристаллографических ориентировках не происходит накопления внутренней энергии и дефектность структуры не достигает уровня, необходимого для протекания рекристаллизации. В работе [10] отмечалось протекание полигонизации в нерекристаллизованных областях после термической обработки сплава ТС6 при температуре 800 °С. Как видно из рис. 1, а, в деформированных зернах наблюдается неоднородность распределения цвета в виде белых «прожилок», что указывает на неравномерность углов внутри зерна, т. е. в деформированных зернах имеется субструктура, предположительно полигонизованная.

Для более полного исследования рекристаллизованной структуры была построена дополнительная карта EBSD с меньшим шагом в 0,1933 мкм в области рекристаллизованных зерен, представленная на рис. 1, б. Черным цветом на карте показаны нераспознанные точки, находящиеся, как правило, на границах зерен. Как видно из рисунка, рекристаллизованные зерна имеют практически однотонную серую окраску, что свидетельствует о равномерном рас-

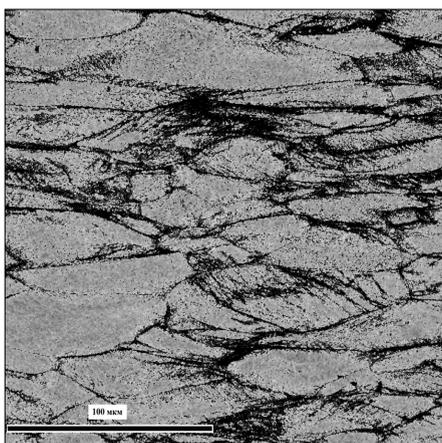


Рис. 2. Карта локальной разориентировки кристаллической решетки образца проволоки диаметром 3,3 мм после холодного волочения со степенью деформации  $\epsilon = 48,5\%$

пределении углов внутри зерна и, следовательно, о минимальном количестве дефектов кристаллического строения. Однако наличие незначительной белой пятнистости в отдельных зернах говорит о наследовании дефектов кристаллической решетки деформированной структуры.

Холодное волочение с суммарной степенью деформации  $\epsilon = 48,5\%$  приводит к формированию типичной деформированной структуры, вытянутой в направлении волочения. Все зерна имеют бело-серую окраску, что свидетельствует о неравномерном распределении углов разориентации и наличии субструктуры внутри зерен (рис. 2).

После пластической деформации в зерне увеличивается количество дефектов. На графике распределения углов разориентации кристаллической решетки (рис. 3) пластическая деформация отражается в виде сильного смещения пика распределения углов вправо по сравнению с рекристаллизованным состоянием (кривые 2 и 1). Пик в интервале углов 0,55–0,65 градуса становится заметно шире и ниже. Появляется второй максимум в области маленьких углов. Такой характер распределения свидетельствует о наличии субструктуры. Максимум в правой части распределения появился вследствие формирования ячеек с более высокими углами разориентации между ними. Максимум в левой части распределения соответствует углам внутри этих ячеек. Такой характер распределения свидетельствует о наличии субструктуры. В серии работ [9, 13] отмечается формирование ячеистой структуры с размером ячеек 0,5–0,7 мкм при холодной прокатке рекристаллизованных листов из сплава ТС6. Таким образом, из полученных экспериментальных данных можно сделать предположение о появлении субструктуры (ячеистая структура) после холодной деформации.

При нагреве деформированных образцов с описанной выше структурой до температуры 700 °С (выдержка в печи в течение 20 минут, охлаждение на воздухе) деформированные зерна сохраняют свою форму. Из этого следует, что температура отжига недостаточна для протекания рекристаллизации (рис. 4).

Так же, как и в деформированном образце, внутри зерен наблюдается неравномерное распределение углов разориентации (рис. 4). После отжига максимум распределения углов смещает-

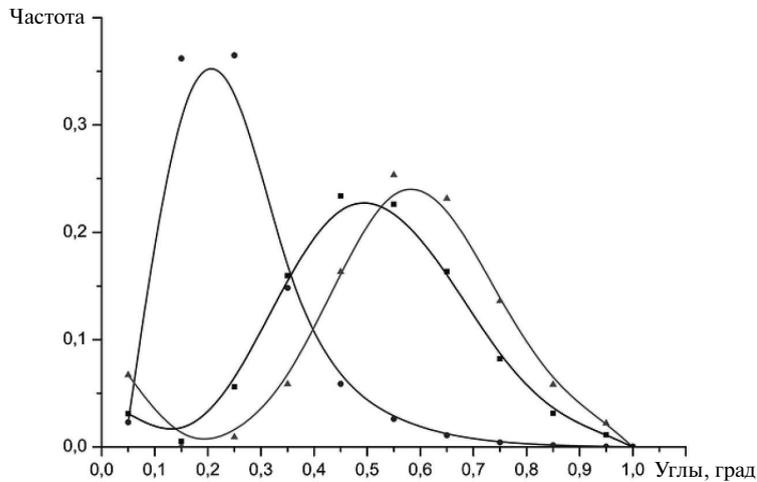


Рис. 3. Распределение углов разориентации кристаллической решетки в исследуемых образцах сплава ТС6  
 (—•— — рекристаллизация; —▲— — деформация;  
 —■— — полигонизация)

ся в сторону меньших углов (0,45–0,55 градуса), что является следствием аннигиляции и перестройки части дефектов решетки. В результате этого зерно разбивается на области размером 0,15–0,25 мкм. Однако характер распределения не изменяется: ширина и высота пика практически такие же, как в случае деформированного материала. Таким образом, процессы снижения дефектности структуры, а следовательно, и разупрочнение сплава произошли, но не в такой степени как при рекристаллизации. Так, если механические свойства при степени деформации  $\varepsilon = 48,5\%$  составили  $\sigma_b = 1380$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 1315$  МПа,  $\delta = 2,7\%$  и  $\psi = 46\%$ , то после термической обработки при температуре  $700^\circ\text{C}$  произошло разупрочнение материала до значений  $\sigma_b = 1060$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 1048$  МПа,  $\delta = 12,0\%$  и  $\psi = 50\%$ . Полученные нами результаты свидетельствуют о протекании полигонизации в проволоке из сплава ТС6 при температуре  $700^\circ\text{C}$ , если под полигонизацией в общем случае понимать перестройку дислокационной структуры внутри зерна.

При повышении температуры нагрева до  $800^\circ\text{C}$  в деформированном со степенью деформации  $\varepsilon = 48,5\%$  сплаве ТС6 протекает рекристаллизация. Хотя и при печном, и при скоростном нагревах формируется мелкозернистая рекристаллизованная структура, скорость нагрева оказывает влияние на параметры структу-

ры: средний размер зерна, распределение зерен по размерам (рис. 5), анизотропию зерен. Так, если после закалки с печного нагрева средний размер зерна составил 19,2 мкм, то при нагреве со скоростью  $35^\circ\text{C}/\text{с}$  — практически в два раза мельче — 10,8 мкм. Способ нагрева под закалку влияет также и на параметры равноосности зерен. После печного нагрева коэффициент анизотропии формы зерна составляет 1,3, а после нагрева со скоростью  $35^\circ\text{C}/\text{с}$  значение данного коэффициента уменьшается до 1,15.

Анализ гистограмм распределения размеров зерен показывает, что при печном нагреве количество зерен размером 15 мкм и менее составляет 64,1% (рис. 5, а), а при нагреве со скоростью  $35^\circ\text{C}/\text{с}$  появляются зерна диаметром 3,9 мкм

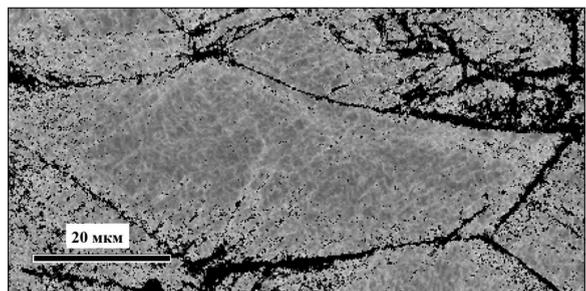


Рис. 4. Карта локальной разориентировки кристаллической решетки образца сплава ТС6 после холодного волочения и последующей печной термообработки при температуре  $700^\circ\text{C}$  (шаг 0,1933 мкм)

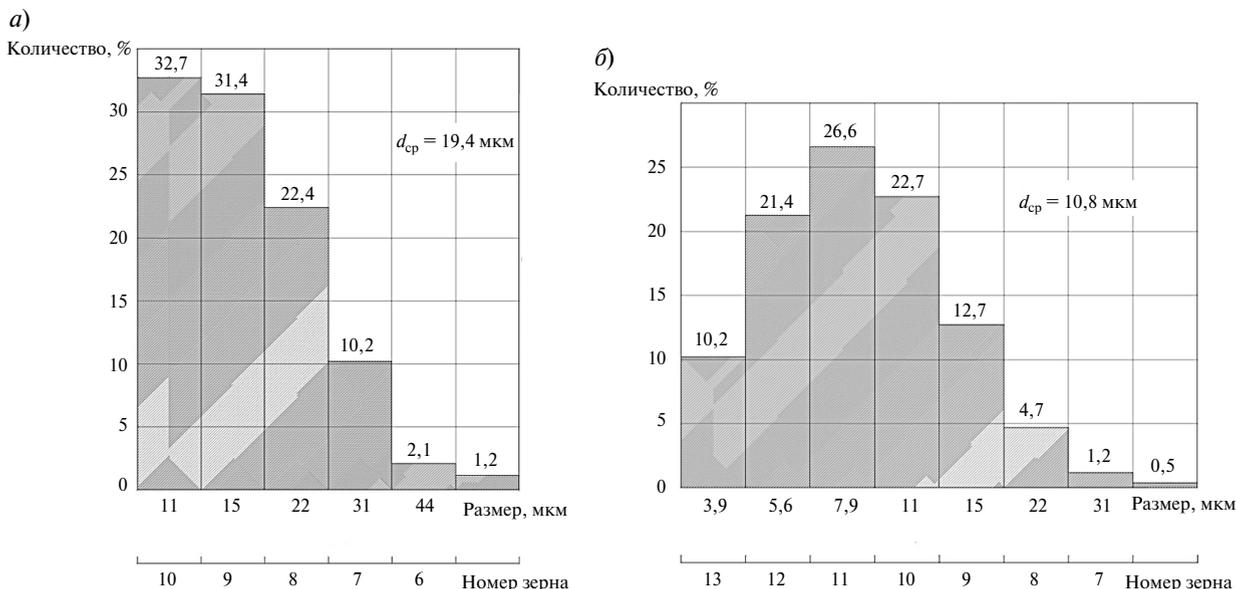


Рис. 5. Гистограммы распределения размера зерна после закалки сплава ТС6 с температуры 800 °С: а — печной нагрев; б — нагрев со скоростью 35 °С/с

в количестве 10,2 %, а общее количество зерен размером 15 мкм и менее составляет 93,8 % (рис. 5, б). Формирование мелкозернистой структуры для режимов закалки с температуры 800 °С обусловлено особенностями холодной деформации β-сплавов титана. Быстрому и полному протеканию первичной рекристаллизации путем формирования многочисленных центров способствует формирование ячеистой структуры в процессе холодной деформации.

Таким образом, в ходе проведенных исследований установлено следующее:

1. Выявлены особенности формирования структуры и субструктуры проволоки из β-титанового сплава ТС6 при холодном волочении и последующей термической обработке. Изучено влияние технологических факторов (степень деформации, температура закалки) на степень проявления процессов рекристаллизации и полигонизации в структуре сплава.

2. После закалки с температуры 780–800 °С в сплаве ТС6, деформированном в холодную на 45 %, формируется частично рекристаллизованная структура. Наряду с рекристаллизованными зернами имеются нерекристаллизованные зерна или области с полигонизованной структурой.

Рекристаллизованные зерна обладают минимальной дефектностью кристаллической решетки, однако при этом сохраняют часть дефектов деформированной структуры.

3. Повышение степени холодной деформации при волочении до  $\epsilon = 48,5 \%$  приводит к формированию типичной деформированной структуры, вытянутой в направлении волочения. Внутри зерен формируется ячеистая субструктура с углами разориентации 0,5–0,7 градуса.

4. При нагреве деформированного со степенью деформации  $\epsilon = 48,5 \%$  сплава ТС6 до температуры 700 °С формируется полигонизованная структура с углами разориентации 0,45–0,55 градуса и размерами субзерен 0,15–0,25 мкм.

5. При повышении температуры нагрева до 800 °С в сплаве ТС6 создается мелкозернистая более равномерная рекристаллизованная структура, формированию которой способствует ячеистая деформированная структура. Ячейки становятся центрами рекристаллизации. Скорость нагрева оказывает влияние на параметры структуры: средний размер зерна, распределение зерен по размерам, анизотропию зерен. Повышение скорости нагрева сопровождается существенным измельчением зерна.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шаболдо О.П., Виторский Я.М., Караштин Е.А., Васильев Е.В., Сорокин М.В.** Пружинные материалы со специальными свойствами из труднодеформируемых высокопрочных высоколегированных термомеханически упрочняемых сплавов на основе титана, никеля и ниобия // *Металлообработка*. 2011. №2 (62). С. 28–35.
2. **Крылов Б.С., Зеленов Б.А., Петров В.А.** Высокопрочный титановый бета-сплав марки ТС-6. Технология, свойства, области применения // *ЦНИИ материалов — 90 лет в материаловедении: науч.-техн. сб. Вып. 2. / ФГУП «ЦНИИМ»*. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. С. 125–139.
3. **Шаболдо, О.П., Строганов А.А.** Влияние термомеханических режимов производства проволоки на механические свойства пружинного  $\beta$ -титанового сплава ТС6 // *Металлообработка*. 2010. № 1 (55). С. 50–56.
4. **Гордиенко А.И., Шипко А.А.** Структурные и фазовые превращения в титановых сплавах при быстром нагреве. Минск: Наука и техника, 1983. 335 с.
5. **Нисимура Т., Нисигаки М., Кусамити Х.** Характеристики старения  $\beta$ -титановых сплавов // *Титан. Metallovedeniye i tekhnologiya: trudy 3-ey Mezhduнародной конференции по титану*. М.: Изд-во ВИЛС. 1978. Т. 2. С. 665–677.
6. **Колбасников Н.Г., Кондратьев С.Ю.** Структура. Энтропия. Фазовые превращения и свойства металлов. СПб.: Наука, 2006. 364с.
7. **Рудской А.И., Лунев В.А., Шаболдо О.П.** Во-  
лечение: учебное пособие СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. 126 с.
8. **Петров В.А.** Исследование влияния режима закалки на механические свойства и структуру титанового  $\beta$  сплава ТС6 // *Технология легких сплавов*. 1980. №3. С. 38–41.
9. **Леринман Р.М., Мурзаева Г.В.** Структурные изменения, происходящие при термической и механико-термической обработке высокопрочных  $\beta$ -титановых сплавов // *Структура и механические свойства металлов и сплавов: сб. научн. тр. / УНЦАН СССР*. Свердловск, 1975. С. 90–107.
10. **Попов А.А., Пумпянский Д.А., Белоглазов В.А.** Исследование фазовых и структурных превращений в титановом сплаве ТС6 с исходной полигонизованной структурой // *Физика металлов и материаловедение*. 1991. №2. С. 150–156.
11. **Nakamichi H., Humphreys F.J., Brougs I.** Recrystallization phenomenon in an IF steel observed by in situ EBSD experiments // *J. of microscopy*. 2008. Vol. 230 (Pt.3). P. 464–471.
12. **Демаков, С.П., Водолазский Ф.В., Водолазский В.Ф., Попов А.А.** Текстурирование в титановом сплаве ТС6 // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2010. №10 (664). С. 32–38.
13. **Леринман Р.М., Мурзаева Г.В.** Электронно-микроскопическое исследование пластической деформации закаленных титановых сплавов с термически нестабильной  $\beta$ -фазой // *Физика металлов и материаловедение*. 1968. Vol. 25. № 5. С. 924–933.

## REFERENCES

1. **Shaboldo O.P., Vitorskiy Ya.M., Karashtin Ye.A., Vasilyev Ye.V., Sorokin M.V.** Pruzhinnyye materialy so spetsialnymi svoystvami iz trudnodeformiruyemykh vysokoprochnykh vysokolegirovannykh termomekhanicheski uprochnyayemykh splavov na osnove titana, nikelya i niobiya . *Metalloobrabotka*. 2011. №2 (62). S. 28–35. (rus.)
2. **Krylov B.S., Zelenov B.A., Petrov V.A.** Vysokoprochnyy titanovyy beta-splav marki TS-6. Tekhnologiya, svoystva, oblasti primeneniya. *TsNII materialov — 90 let v materialovedenii: nauch.-tekhn.sb. Вып. 2. / FGUP «TsNIIM»*. SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2004. S. 125–139. (rus.)
3. **Shaboldo O.P., Stroganov A.A.** Vliyaniye termomekhanicheskikh rezhimov proizvodstva provoloki na mekhanicheskkiye svoystva pruzhinного  $\beta$ -titanovogo splava TS6. *Metalloobrabotka*. 2010. № 1 (55). S. 50–56. (rus.)
4. **Gordiyenko A.I., Shipko A.A.** Strukturnyye i fazovyye prevrashcheniya v titanovykh splavakh pri bystrome nagreve . Minsk: Nauka i tekhnika, 1983. 335 s. (rus.)
5. **Nisimura T., Nisigaki M., Kusamiti Kh.** Kharakteristiki stareniya  $\beta$ -titanovykh splavov . *Titan. Metallovedeniye i tekhnologiya: trudy 3-ey Mezhduнародной конференции по титану*. Moskva, Izd-vo VILS, 1978. Т. 2. S. 665–677. (rus.)
6. **Kolbasnikov N.G., Kondratyev S.Yu.** **Struktura.** Entropiya. Fazovyye prevrashcheniya i svoystva metallov. SPb.: Nauka, 2006. 364 s. (rus.)
7. **Rudskoy A.I., Lunev V.A., Shaboldo O.P.** Volocheniye: uchebnoye posobiye. SPb.: Izd-vo Politekh. un-ta, 2011. 126 s. (rus.)
8. **Petrov V.A.** Issledovaniye vliyaniya rezhima zakalki na mekhanicheskkiye svoystva i strukturu titanovogo  $\beta$  splava TS6. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 1980. №3. S. 38–41. (rus.)
9. **Lerinman R.M., Murzayeva G.V.** Strukturnyye izmeneniya, proiskhodyashchiye pri termicheskoy i mekhaniko-termicheskoy obrabotke vysokoprochnykh  $\beta$ -titanovykh splavov. *Struktura i mekhanicheskkiye svoystva metallov i splavov: sb. nauchn. tr. / UNTs AN SSSR*. Sverdlovsk, 1975. S. 90–107. (rus.)
10. **Popov A.A., Pumpyanskiy D.A., Beloglazov V.A.** Issledovaniye fazovykh i strukturnykh prevrashcheniy v

titanovom splave TS6 s iskhodnoy poligonizovannoy strukturoy. *Fizika metallov i metallovedeniye*. 1991. №2. S. 150–156. (rus.)

11. **Nakamichi H., Humphreys F.J., Brougs I.** Recrystallization phenomenon in an IF steel observed by in situ EBSD experiments. *J. of microscopy*. 2008. Vol. 230. Pt. 3. P. 464–471. )

12. **Demakov S.P., Vodolazskiy F.V., Vodolazskiy V.F.,**

**Popov A.A.** Teksturnoye tormozheniye v titanovom splave TS6. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*. 2010. №10 (664). S. 32–38. (rus.)

13. **Lerinman R.M., Murzayeva G.V.** Elektronnomi-kroskopicheskoye issledovaniye plasticheskoy deformatsii zakalennykh titanovykh splavov s termicheski nestabilnoy  $\beta$ -fazoy. *Fizika metallov i metallovedeniye*. 1968. 25. № 5. S. 924–933. (rus.)

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ШАБОЛДО Олег Павлович** — кандидат технических наук начальник лаборатории ОАО «Центральный научно-исследовательский институт материалов». 191014, Санкт-Петербург, Парадная ул., дом 8. E-mail: shaboldo@yandex.ru

**ВИТОРСКИЙ Ярослав Михайлович** — доктор технических наук начальник отдела ОАО «Центральный научно-исследовательский институт материалов». 191014, Санкт-Петербург, Парадная ул., дом 8. E-mail: mail@cniim.ru

**ШАМШУРИН Алексей Игоревич** — младший научный сотрудник НОЦ конструкционных и функциональных материалов ОНТИ Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: sham\_a@mail.ru

**КОНОНОВ Александр Александрович** — аспирант кафедры технологии и исследования материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: a.a.kononov@russia.ru

#### AUTHORS

**SHABOLDO Oleg P.** — Central Research Institute of Materials. 8, Paradnaya st., St. Petersburg, Russian Federation, 191014. E-mail: shaboldo@yandex.ru

**VITORSKY Yaroslav M.** — Central Research Institute of Materials. 8, Paradnaya st., St. Petersburg, Russian Federation, 191014. E-mail: mail@cniim.ru

**SHAMSHURIN Aleksey I.** — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: sham\_a@mail.ru

**KONONOV Aleksander A.** — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: a.a.kononov@russia.ru



УДК 541.136

*А.А. Попович, М.Ю. Максимов,  
О.В. Никифорова, А.Д. Хайдоров*

## **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АТОМНО-СЛОЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ ОКСИДА ОЛОВА IV**

*A.A. Popovich, M.Yu. Maximov,  
O.V. Nikiphorova, A.D. Khaydorov*

### **ATOMIC LAYER DEPOSITION APPLICATION FOR DEVELOPING THIN FILM LI-ION BATTERIES BASED ON TIN OXIDE IV**

Рассмотрены основные принципы метода атомно-слоевого осаждения (АСО), а также его преимущества при синтезе тонких пленок для электродов тонкопленочных литий-ионных аккумуляторов. Показана возможность получения широкого спектра соединений, в том числе и материалов на основе оксида олова IV с использованием различных исходных веществ. Приведены некоторые параметры процесса осаждения, влияющие на скорость роста и структуру тонких пленок, а также электрохимические характеристики тонкопленочных электродов на основе SnO<sub>2</sub>, полученных методом АСО.

МЕТОД АТОМНО-СЛОЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ; ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ ЛИТИЙ-ИОННЫЕ АККУМУЛЯТОРЫ; ТОНКИЕ ПЛЕНКИ ОКСИДА ОЛОВА IV; МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК; ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОКСИДА ОЛОВА IV.

Basic principles of the atomic layer deposition (ALD) and its advantages for thin film Li-ion batteries production are discussed in this article. Possibility of synthesis for wide range materials, including tin oxide IV is shown. Influence synthesis parameters on deposition rate and a thin films structure are presented. Electrochemical characteristics of SnO<sub>2</sub> thin film electrodes produced by ALD process are shown.

ATOMIC LAYER DEPOSITION; THIN FILMS LI-ION BATTERIES; THIN FILM OF TIN OXIDE IV; THIN FILMS SYNTHESIS; ELECTROCHEMICAL PERFORMANCE OF TIN OXIDE IV.

Большинство современных литий-ионных аккумуляторов выпускается в виде призматических, цилиндрических и дисковых элементов [1]. Основное назначение таких аккумуляторов — обеспечение энергией портативной техники (ноутбуки, сотовые телефоны, цифровые фото- и видеокамеры, беспроводной инструмент). В последние годы появился интерес к созданию тонкопленочных литий-ионных аккумуляторов [2–4]. Это связано как с общемировой тенденцией миниатюризации электронной аппаратуры, так и со специфическими требованиями определенной категории техники (смарт-карты, различные имплантируемые медицинские приборы, микроэлектромеханические системы, блоки памяти, различные сенсоры, преобразователи и др.).

Цель нашей работы — оценка возможностей метода атомно-слоевого осаждения для получения перспективных анодных материалов на основе оксида олова IV в тонкопленочных литий-ионных аккумуляторах.

#### **Современное состояние исследований**

В тонкопленочных литий-ионных аккумуляторах практически не применяются традиционные материалы на основе углерода, в частности графит. Очень редко применяется технология нанесения активной массы электрода, состоящей из смеси активного вещества, электропроводной добавки и связующего, методом «намазывания». Для создания такого типа аккумуляторов широко используют физи-

ческие и химические методы получения тонких пленок.

В работе [5] описан процесс получения тонких пленок кобальтата лития, используемого в тонкопленочных литий-ионных аккумуляторах в качестве катодного материала. Этот процесс включает в себя экстракцию лития и кобальта из водных растворов разветвленных монокарбоновых кислот, смешение экстрактов Li и Co в мольном соотношении металлов 1:1. Пленки кобальтата лития получают на токопроводящих подложках из медной или алюминиевой фольги путем многократного смачивания при погружении в раствор смеси карбоксилатов лития и кобальта с последующим отжигом в течение 2–3 минут. Необходимую толщину пленки получают посредством нескольких циклов смачивания и отжига, а также путем регулирования концентраций лития и кобальта в смеси при строгом мольном соотношении этих металлов 1:1, причем синтез кобальтата лития и формирование пленок протекают одновременно. Авторы утверждают, что данным методом могут быть получены пленки толщиной от 50 нм до 1 мкм. В работе [6] с использованием экстракционно-пиролитического метода получены тонкие пленки катодного материала различного химического состава —  $\text{LiCoO}_2$ ,  $\text{LiCoBi}_x\text{O}_2$ ,  $\text{LiCoNi}_x\text{O}_2$ ,  $\text{LiCoFe}_x\text{O}_2$ , а также анодного материала  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ . Толщину полученных пленок варьировали от 300 до 800 нм.

Кроме получения тонких пленок из растворов, для получения материалов электродов тонкопленочных литий-ионных аккумуляторов применяют физические методы. В частности, метод лазерной абляции [7] использовали для получения тонких пленок  $\text{LiCoO}_2$ , электрохимические свойства которых были изучены в дальнейшем. Авторы работы [8], используя данный метод, получали тонкие пленки композиционного материала  $\text{LiFePO}_4\text{—Ag}$  на различных подложках.

Для получения тонких пленок  $\text{SnO}_x$  [9],  $\text{LiCoPO}_4$  [10] и других материалов электродов тонкопленочных литий-ионных аккумуляторов также используется метод магнетронного распыления.

Химическое и плазмохимическое осаждение из газовой фазы тоже используют для получения различного рода материалов электродов. В ра-

боте [11] речь идет о получении тонких пленок  $\text{LiV}_2\text{O}_5$  и  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ , которые использовали в качестве материалов катода в тонкопленочных литиевых источниках тока (ЛИТ). Аналогичным методом были синтезированы тонкие пленки кремния на графеновых слоях [12]; полученные мультиструктуры исследовали в качестве электродов ЛИТ.

Активно развивается метод атомно-слоевого осаждения в связи с тем, что он по сравнению с другими методами получения тонких пленок обладает рядом преимуществ: однородным распределением толщины пленки по поверхности; возможностью роста пленок при низких температурах 100–150 °С, что делает этот метод практически незаменимым при использовании органических и стеклянных подложек при одновременном сохранении всех преимуществ вакуумной технологии; низкой дефектностью осаждаемых слоев, которая связана со степенью чистоты реагентов (не менее 99,999 %), что, в свою очередь, сказывается на стоимости конечного продукта. Метод АСО позволяет получать очень широкий класс материалов — нитридные, оксидные, металлические, полупроводниковые пленки, наноламинаты, которые имеют аморфную или кристаллическую структуру в зависимости от температуры осаждения. Возможность проведения процесса при низких температурах позволяет проводить осаждение на стекло, пластики, полимерные материалы. Кроме того, одно из основных преимуществ метода атомно-слоевого осаждения — равномерное по толщине нанесение пленки на сложную поверхность (3D объекты), чего невозможно достигнуть другими распространенными технологическими методами, такими, как золь-гель метод, физическое распыление мишени (импульсное лазерное напыление, магнетронное распыление), плазмохимические методы осаждения тонких пленок [13].

Основной принцип атомно-слоевого осаждения (молекулярное наслаивание) был предложен В.Б. Алесковским, который с соавторами экспериментально доказал возможность его реализации. Суть процесса заключается в попеременной хемосорбции, т. е. необратимой многократной химической реакции на поверхности твердого тела с теми или иными газообразными или жидкими реагентами. Поверхность обрабатывается потоком газа, несущим

молекулы исходного вещества; одни атомы достраивают остов данного твердого тела, а другие, образуя новую поверхность, играют на ней роль функциональных групп, способных присоединять к себе атомы и молекулы, достраивающие остов [14].

Отличительной (от других методов синтеза тонких пленок) чертой АСО является последовательная подача реагентов в реакционную камеру с продувкой инертным газом между импульсами прекурсоров. За счет самоорганизации активированных молекул на поверхности твердого тела происходит хемосорбция реагента (взаимодействие с остовом). Продувка между подачей исходных веществ предназначена для удаления избыточных молекул (атомов) реагента, а именно тех, которые не образовали связей с поверхностью подложки. Это и служит ключевым фактором, который позволяет получать один молекулярный (атомарный) слой за цикл. В данном случае один цикл — это последовательное осуществление следующих действий: «подача реагента — продувка», либо «подача реагента 1 — продувка — подача реагента 2 — продувка» (для синтеза бинарных соединений, оксидов, нитридов, халькогенидов и др.). Соответственно, в идеализированном представлении число циклов — это число осажденных монослоев (молекулярных или атомарных слоев).

Метод АСО с недавних пор используют и для создания электродов тонкопленочных литий-ионных аккумуляторов. В работе [15] приведены достижения в этой области с использованием метода АСО. В частности, авторами были получены тонкие пленки  $\text{LiCoO}_2$  с термической и плазменной активацией процесса синтеза. Пленки наносили на кремниевые подложки, покрытые оксидом титана IV и Pt.

Оксид олова IV является перспективным материалом для использования в качестве анода ЛИТ, он обладает теоретической удельной емкостью, равной 781 мАч/г: для металлического олова эта величина составляет 991 мАч/г [16]. Исходя из этого можно предположить, что при получении анодного материала на основе системы «олово — оксид олова IV» ( $\text{Sn}/\text{SnO}_2$ ) максимальная удельная емкость будет изменяться в вышеуказанных пределах. Это дает возможность использования подобных композитов в тонкопленочных литий-ионных аккумулято-

рах. В обзоре [17] приведены электрохимические характеристики различного рода материалов (нанопрошки, нанотрубки, нанослои, интерметаллиды и композиты) на основе олова и оксида олова IV с повышенной емкостью.

С целью определения наиболее значимых параметров процесса синтеза и подходящих исходных веществ для получения тонких пленок  $\text{SnO}_2$  методом АСО был проведен анализ научных трудов. В работе [18] были получены тонкие пленки оксида олова IV методом атомно-слоевого осаждения с использованием термической активации процесса синтеза. Температурный диапазон, в котором достигалась максимальная скорость роста (0,175 нм/цикл), находился в промежутке от 50 до 150 °С. В качестве источника олова и кислорода использовали ди-трет-бутилбутан-2,3-диамино-олово II и 50 масс. %-й раствор перекиси водорода ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) соответственно. При анализе тонких слоев авторами было выявлено отсутствие углерода и азота в составе пленок; отношение O/Sn изменялось от 1,62 до 2,23 в зависимости от толщины пленки и параметров процесса синтеза. Покрывтия имели нанокристаллическую структуру со средним размером зерна 5–10 нм. По мнению авторов, ключевую роль в получении стехиометрического оксида олова IV играет время выдержки в смеси « $\text{H}_2\text{O}_2$  — газ носитель».

В статье [19] для получения пленок  $\text{SnO}_x$  на кремниевых подложках использовали метод АСО с плазменной активацией процесса синтеза, а также дибутилдацетат олова и кислорода в качестве исходных веществ. Температуру подложки варьировали от 200 до 400 °С. Авторы сообщают, что с увеличением температуры синтеза толщина пленки увеличивается при одинаковом количестве циклов.

В работе [20] были получены тонкие пленки оксида олова IV методом атомно-слоевого осаждения с использованием «кислородной плазмы» и тетраакис(этилметиламино) олова (ТЭМАО) в качестве исходных веществ, температуру синтеза варьировали в пределах 50–200 °С. По данным исследователей скорость роста пленок максимальна при температурах 50–150 °С. При использовании ТЭМАО в качестве источника олова максимальная скорость роста составила 0,14 нм/цикл, для тетраоксида олова — 0,07 нм/цикл. Авторы работы [21],

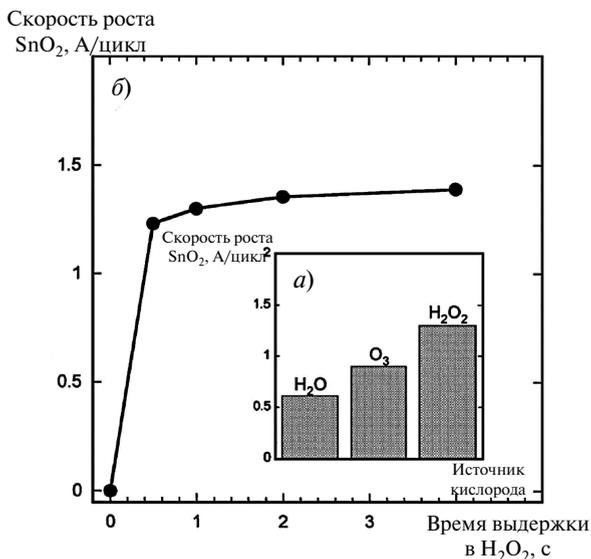


Рис. 1. Зависимость скорости роста пленки SnO<sub>2</sub> от источника кислорода (а) и времени выдержки (б) [21]

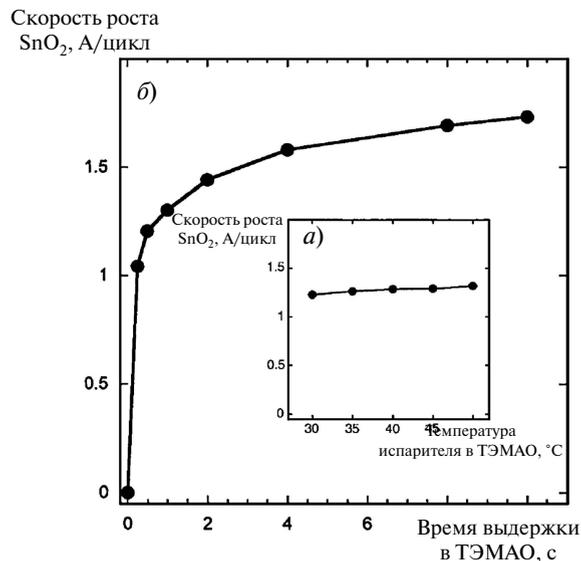


Рис. 2. Зависимость скорости роста пленки SnO<sub>2</sub> от температуры испарителя (а) и времени выдержки (б) [21]

как и авторы работы [20], использовали метод АСО и тетракис(этилметиламино) олова для синтеза тонких пленок SnO<sub>x</sub>, но в качестве источника кислорода применяли перекись водорода. Согласно проведенному ими анализу экспериментальных данных применение H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> вместо H<sub>2</sub>O и O<sub>3</sub> позволяет увеличить скорость роста пленки (рис. 1). Использование ТЭМАО вместо SnCl<sub>4</sub> позволяет избежать проблем коррозии и агломерации, связанных с галогенопроизводными. В работе [21] была достигнута средняя скорость роста пленки оксида олова 0,12 нм/цикл при температурах синтеза от 50 до 300 °С. При увеличении температуры выше 150 °С скорость роста падает. Также было выявлено влияние температуры испарения металлоорганического реагента, содержащего олово, и времени выдержки на скорость осаждения оксида олова IV (рис. 2).

Стоит отметить, что при интеркаляции/деинтеркаляции ионов лития в материал анода на основе олова происходит значительное увеличение/уменьшение объема материала электрода. Это может вызывать ухудшение электрического контакта, а также разрушение структуры анода [17]. Для повышения стабильности работы тонкопленочных литиевых источников тока (литий-ионные и литий-полимерные аккумуляторы) с материалом анода на основе SnO<sub>2</sub> авто-

ры работы [22] методом АСО осаждали тонкие пленки оксида олова IV на графеновые слои. Тонкие пленки были получены при температурах синтеза 200–400 °С с использованием тетрахлорида олова IV и деионизованной воды в качестве исходных реагентов. Композиционные материалы смешивали с поливинилиденфторидом и растворителем, полученную массу наносили на медную фольгу методом «намазывания» и сушили. При исследовании электрохимических свойств полученных композиционных материалов было выявлено, что после 150 циклов заряд/разряд удельная емкость аккумулятора составила 499 мАч/г.

Для увеличения реверсивной емкости электродов на основе SnO<sub>2</sub> и стабилизации структуры были опробованы материалы на основе смешанных оксидов SnO<sub>2</sub>–TiO<sub>2</sub>. В такой композиции диоксид титана не участвует в электрохимическом процессе, но его присутствие позволяет стабилизировать структуру [16, 23].

В работе [24] авторы получили тонкопленочные электроды на основе оксида олова методом АСО и исследовали их электрохимические свойства (электродом сравнения был металлический литий). Ими была получена емкость 646 мАч/г на протяжении 250 циклов заряд/разряд при минимальном/максимальном потенциале разряда/заряда 5/800 мВ и плотности тока 5 мА/см<sup>2</sup> (рис. 3).

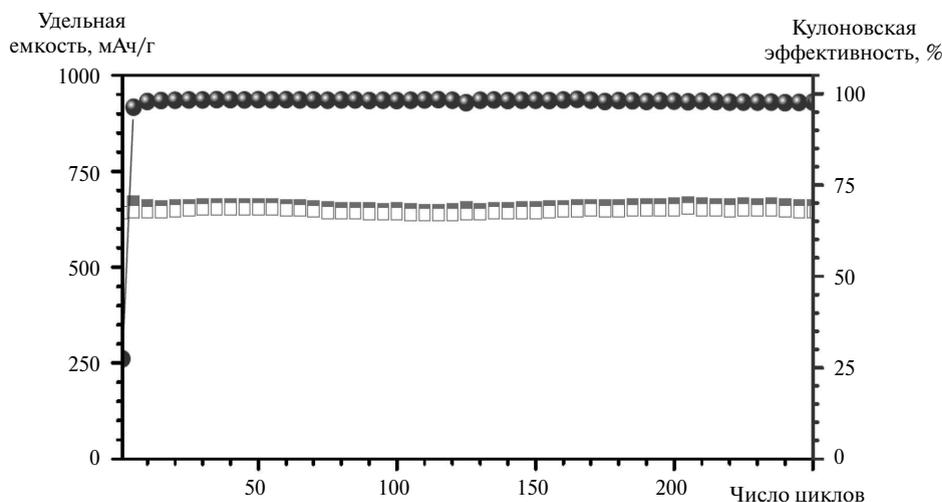


Рис. 3. Зависимости удельной емкости и кулоновской эффективности от числа циклов заряд/разряд для тонкопленочных аккумуляторов на основе оксида олова IV [24]:

■ — разряд; □ — заряд; ● — кулоновская эффективность

В России производят такие прекурсоры олова, как тетрамитилолово (ТМО) и тетраэтилолово (ТЭО). Процесс нанесения тонких пленок оксида олова IV методом АСО с использованием этих исходных реагентов подробно изучен в работе [25]. Авторы статьи утверждают, что температурные диапазоны, в которых происходит осаждение  $\text{SnO}_2$  для ТМО и ТЭО, составляют соответственно 250–290 °С и 400–450 °С. В качестве источника кислорода применяли  $\text{N}_2\text{O}_4$ . Пленки, полученные с использованием ТМО, обладают меньшим удельным сопротивлением.

В научно-исследовательской лаборатории «Функциональные материалы» СПбГПУ проводятся исследования на установке атомно-слоевого осаждения «Picosun R-150». Оборудование позволяет использовать в процессе синтеза 6 реагентов (в твердом и жидком агрегатном состоянии) с высоким давлением насыщенных паров, что позволяет осаждать различные мультиструктуры и многослойные покрытия на различных поверхностях. На установке используются: газы-носители — аргон и азот; реакционный газ — кислород. Для понижения температуры синтеза тонких пленок установлены следующие блоки: генератор озона, блок получения оксидных систем и плазмогенератор. На установке «Picosun R-150» зона возбуждения плазмы отделена от зоны синтеза, где распола-

гается подложка. Такое расположение блоков обладает рядом преимуществ: поверхность подложки и растущая пленка в процессе осаждения не подвергаются бомбардировке высокоэнергетичными частицами плазмы, а молекулы реагента при взаимодействии с возбужденными атомами газа-носителя не испытывают глубокой деструкции, что позволяет сохранить фрагменты исходной молекулы, служащие структурными единицами синтезируемой пленки [26].

В лаборатории на базе реактора АСО ведутся работы по получению тонких пленок оксида олова для тонкопленочных литиевых источников тока. Имеется опыт нанесения пассивационных покрытий оксида алюминия на различные поверхности. Предварительные результаты показали, что метод атомно-слоевого осаждения перспективен как для получения новых анодных (катодных) материалов тонкопленочных ЛИТ, так и для обработки традиционных с целью повышения их эффективности.

Подводя итоги обзора, можно заключить следующее: методом атомно-слоевого осаждения могут быть получены тонкие пленки широкого спектра материалов, в том числе и оксида олова IV, толщиной от нескольких ангстрем до микрометров. Покрытия могут быть нанесены как на полированную поверхность (кремниевые

подложки), так и на порошковые материалы, в частности графеновые слои. В зависимости от параметров синтеза и дальнейшей термической обработки могут быть получены аморфные, нанокристаллические и эпитаксиальные тонкопленочные образцы. Согласно результатам проведенного анализа для понижения температуры синтеза необходимо использовать более активные реагенты, например перекись водорода и озон для оксидных систем.

Sn/SnO<sub>2</sub> является перспективным анодным материалом для тонкопленочных литий-ионных аккумуляторов, хотя и имеет ряд недостатков. Показано, что существуют различные методы, способствующие улучшению электрохимических характеристик данного материала, а именно увеличению реверсивной емкости электрода.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, ГК 14.516.11.0101.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Tarascon J.M.; Armand M.** Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries // *Nature*. 2001. № 414. P. 359–367.
2. **Cao G.Z.** Nanostructures and Nanomaterials, Synthesis, Properties and Applications. Imperial College Press: London, UK, 2004.
3. **Кулова Т.Л., Скундин А.М.** Тонкопленочные литий-ионные аккумуляторы // *Электрохимическая энергетика*. 2009. Т. 9, № 2. С. 57–66.
4. **Dudney N.J.** Thin film micro-batteries // *Electrochem. Soc. Interface*. 2008. Vol. 17, № 3. P. 44.
5. **Пат. 2241281 РФ.** МПК<sup>7</sup> Н 01 М 4/40, Н 01 М 4/52, Н 01 М 4/08. Способ получения тонких пленок кобальтата лития / Патрушева Т.Н., Сухова Г.И., Чудинов Е.А., Патрушев В.В. Заявитель и патентообладатель — Институт химии и химической технологии СО РАН, Сибирский государственный технологический университет. № 2241281<sup>(13)</sup> С2; опубл. 11.02.2006.
6. **Сухова Г.И., Патрушева Т.Н., Чудинов Е.А., Патрушев В.В.** Разработка функциональных материалов, полученных экстракционно-пиролитическим методом, для электродов литий-ионных аккумуляторов // *Электрохимическая энергетика*. 2005. Т.5. № 1. С. 51–56.
7. **Hui Xia, Tang S.B., Li Lu.** Thin Film Microbatteries Prepared by Pulsed Laser Deposition // *Journal of the Korean Physical Society*. Vol. 51, № 3, 2007. P. 1055–1062.
8. **Wan Yu Fung.** Lithium-ion thin film battery: Diss. Master degree. Hong Kong, China, 2008. 37 p.
9. **Kohler R., Besser H., Hagen M., Ye J., Ziebert C., Ulrich S., Proell J., Pfleging W.** Laser micro-structuring of magnetron-sputtered SnO<sub>x</sub> thin films as anode material for lithium ion batteries // *Microsystem Technologies*. 2011. Vol. 17. Issue 2. P. 225–232.
10. **West W.C., Whitacre J.F., Ratnakuma B.V.** RF Magnetron Sputtered LiCoPO<sub>4</sub> Cathodes for 4.8V Thin Film Batteries // *National Aeronautics and Space Administration*. 2012. Issue 1307. 33 p.
11. **Liu P., Zhang J-G., Turner J.A., Tracy C.E., Benson D.K.** Preparation and Electrochemical Properties of Lithium Vanadium Oxide and Lithium Manganese / *National Renewable Energy Laboratory Golden*. CO80401
12. **Liwen Ji, Honghe Zheng, Ariel Ismach, Zhongkui Tan, Shidi Xun, Eric Lin, Vincent Battaglia, Venkat Srinivasan, Yuegang Zhang.** Graphene/Si multilayer structure anodes for advanced half and full lithium-ion cells // *Nano Energy*. Vol. 1, Issue 1. January 2012. P. 164–171.
13. **Семикина Т.В.** Атомное послойное осаждение как нанотехнологический метод для получения функциональных материалов // *Ученые записки Таврического национального университета имени В.И. Вернадского, Серия «Физика»*. 2009. Т. 22. (61). № 1. С. 116–126.
14. **Алесковский В.Б.** Химия надмолекулярных соединений. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1996 г. 256 с.
15. **Donders M.E., Arnoldbik W.M., Knoops H.C., Kessels W.M., Notten P.H.L.** Atomic Layer Deposition of LiCoO<sub>2</sub> Thin-Film Electrodes for All-Solid-State Li-Ion Micro-Batteries // *J. Electrochem. Soc.* 2013. Vol. 160, Issue 5. P. 3066–3071
16. **Скундин А.М., Брылев О.А.** Наноматериалы в современных химических источниках тока [Электронный ресурс] [http://www.nanometer.ru/2009/10/27/12565955237306/PROP\\_FILE\\_files\\_1/CF\\_1.4\\_%EF%F0%EE%E3%F0%E0%EC%EC%E0+4-%F5%E8%EC%E8%F7%E5%F1%EA%E8%E5+%E8%F1%F2%EE%F7%ED%E8%EA%E8+%F2%EE%EA%E0.pdf](http://www.nanometer.ru/2009/10/27/12565955237306/PROP_FILE_files_1/CF_1.4_%EF%F0%EE%E3%F0%E0%EC%EC%E0+4-%F5%E8%EC%E8%F7%E5%F1%EA%E8%E5+%E8%F1%F2%EE%F7%ED%E8%EA%E8+%F2%EE%EA%E0.pdf)
17. **Jiajun Chen.** Recent Progress in Advanced Materials for Lithium Ion Batteries // *Materials*. 2013. Vol. 6, Issue 1. P. 156–183.
18. **Heo J., Hock A.S., Gordon R.G.** Low Temperature Atomic Layer Deposition of Tin Oxide // *Chem. Mater.* 2010. Vol. 22 (17). P. 4964–4973.
19. **Lee W., Choi Y., Hong K., Kim N.-H., Park Y., Park J.** Characteristics of Plasma-Enhanced Atomic-Layer Deposited (PEALD) SnO<sub>2</sub> Thin Films // *Journal of the Korean Physical Society*. 2005. Vol. 46, № 4. P. 756–759.
20. **Choi W.-S.** Effects of Seed Layer and Thermal Treatment on Atomic Layer Deposition-Grown Tin Oxide

// Transactions on electrical and electronic materials. 2010. Vol. 11, № 5. P. 222–225.

21. **Elam J.W., Baker D.A., Hryn A.J., Martinson A.B.F., Pellin M.J., Hupp J.T.** Atomic layer deposition of tin oxide films using tetrakis (dimethylamino) tin // *J. Vac. Sci. Technol.*, A 2008. Vol. 26. P. 244–252.

22. **Li X., Meng X., Liu J., Geng D., Zhang Y., Banis M.N., Li Y., Yang J., Li R., Sun X., Cai M., Verbrugge M.W.** Tin Oxide with Controlled Morphology and Crystallinity by Atomic Layer Deposition onto Graphene Nanosheets for Enhanced Lithium Storage // *Advanced Functional Materials*. 2012. Vol. 22, Issue 8. P. 1647–1654.

23. **Meng X., Yang X.Q., Sun X.** Emerging Applications of Atomic Layer Deposition for Lithium-Ion Bat-

tery Studies // *Adv Mater*. 2012. Vol. 24(27), P. 3589–3615.

24. **Aravindana V., Jinesh K.B., Prabhakar R.R., Kale V.S., Madhavi S.** Atomic layer deposited (ALD) SnO<sub>2</sub> anodes with exceptional cycleability for Li-ion batteries // *Nano Energy*. 2013. Vol. 2, Issue 5. P. 720–725.

25. **Drozd E.V., Aleskovski V.B.** Synthesis of conducting oxides by ML-ALE, *Applied Surface Science*. 1994. Vol. 82–83. 2. P. 591–594.

26. **Смирнова Т. П., Бадалян А.М., Борисов В.О., Яковкина Л.В.** Применение удаленной плазмы для синтеза пленок из летучих элементоорганических соединений // *Материалы IV Международного симпозиума по теоретической и прикладной плазмохимии*. Иваново, 2011. С. 309–312.

## REFERENCES

1. **Tarascon J.M., Armand M.** Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. *Nature*. 2001, № 414. P. 359–367.

2. **Cao G.Z.** Nanostructures and Nanomaterials, Synthesis, Properties and Applications. Imperial College Press. London. UK, 2004.

3. **Kulova T.L., Skundin A.M.** Tonkoplenochnye litiiionnye akkumuliatory. *Elektrokhimicheskaja energetika*. 2009. T. 9. № 2. S. 57–66. (rus.)

4. **Dudney N.J.** Thin film micro-batteries. *Electrochem. Soc. Interface*. 2008. Vol. 17, № 3. P. 44.

5. **Pat. 2241281 RF. MPK7 H 01 M 4/40, H 01 M 4/52, H 01 M 4/08.** Sposob polucheniia tonkikh plenok kobal'tata litiia / Patrusheva T.N., Sukhova G.I., Chudinov E.A., Patrushev V.V. Zaiavitel' i patentooblada- tel' – Institut khimii i khimicheskoi tekhnologii SO RAN, Sibirskii gosudarstvennyi tekhnologicheskii universitet. № 2241281(13) S2; opubl.11.02.2006. (rus.)

6. **Sukhova G.I., Patrusheva T.N., Chudinov E.A., Patrushev V.V.** Razrabotka funktsional'nykh materialov, poluchennykh ekstraktsionno-piroliticheskim metodom, dlia elektrodov litii-ionnykh akkumuliatorov. *Elektrokhimicheskaja energetika*. 2005. T. 5. № 1. S. 51–56. (rus.)

7. **Hui Xia, Tang S.B., Li Lu.** Thin Film Microbatteries Prepared by Pulsed Laser Deposition. *Journal of the Korean Physical Society*. 2007. Vol. 51, № 3, P. 1055–1062.

8. **Wan Yu Fung.** Lithium-ion thin film battery: Diss. Master degree. Hong Kong, China. 2008. 37 p.

9. **Kohler R., Besser H., Hagen M., Ye J., Ziebert C., Ulrich S., Proell J., Pflöging W.** Laser micro-structuring of magnetron-sputtered SnO<sub>x</sub> thin films as anode material for lithium ion batteries. *Microsystem Technologies*. 2011. Vol. 17, Issue 2. P. 225–232.

10. **West W.C., Whitacre J.F., Ratnakuma B.V.** RF Magnetron Sputtered LiCoPO<sub>4</sub> Cathodes for 4.8V Thin Film Batteries. *National Aeronautics and Space Administration*. 2012. Issue 1307. 33 p.

11. **Liu P., Zhang J-G., Turner J.A., Tracy C.E., Benson D.K.** Preparation and Electrochemical Properties of Lithium Vanadium Oxide and Lithium Manganese. *National Renewable Energy Laboratory Golden*. CO80401

12. **Liwen Ji, Honghe Zheng, Ariel Ismach, Zhongkui Tan, Shidi Xun, Eric Lin, Vincent Battaglia, Venkat Srinivasan, Yuegang Zhang.** Graphene/Si multilayer structure anodes for advanced half and full lithium-ion cells. *Nano Energy*. 2012. Vol. 1, Issue 1. P. 164–171.

13. **Semikina T.V.** Atomnoe posloinoe osazhdenie kak nanotekhnologicheskii metod dlia polucheniia funktsional'nykh materialov. *Uchenye zapiski Tavricheskogo natsional'nogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo, Seriya «Fizika»*. 2009. T. 22. (61), № 1. S. 116–126. (rus.)

14. **Aleskovskii V.B.** Khimii nadmolekuliarnykh soedinenii. SPb.: Izd-vo SPbGU, 1996. 256 s. (rus.)

15. **Donders M.E., Arnoldbik W.M., Knoops H.C.M., Kessels W.M.M., Notten P.H.L.** Atomic Layer Deposition of LiCoO<sub>2</sub> Thin-Film Electrodes for All-Solid-State Li-Ion Micro-Batteries. *J. Electrochem. Soc.* 2013. Vol. 160, Issue 5. P. 3066–3071.

16. **Skundin A.M., Brylev O.A.** Nanomaterialy v sovremennykh khimicheskikh istochnikakh toka. [http://www.nanometer.ru/2009/10/27/12565955237306/PROP\\_FILE\\_files\\_1/%CF\\_1.4\\_%EF%F0%EE%E3%F0%E0%EC%EC%E0+4-%F5%E8%EC%E8%F7%E5%F1%EA%E8%E5+%E8%F1%F2%EE%F7%ED%E8%EA%E8+%F2%EE%EA%E0.pdf](http://www.nanometer.ru/2009/10/27/12565955237306/PROP_FILE_files_1/%CF_1.4_%EF%F0%EE%E3%F0%E0%EC%EC%E0+4-%F5%E8%EC%E8%F7%E5%F1%EA%E8%E5+%E8%F1%F2%EE%F7%ED%E8%EA%E8+%F2%EE%EA%E0.pdf)

17. **Jiajun Chen.** Recent Progress in Advanced Materials for Lithium Ion Batteries. *Materials*. 2013. Vol. 6, Issue 1. P. 156–183.

18. **Heo J., Hock A.S., Gordon R.G.** Low Temperature Atomic Layer Deposition of Tin Oxide. *Chem. Mater*. 2010. Vol. 22 (17). P. 4964–4973.

19. **Lee W., Choi Y., Hong K., Kim N.-H., Park Y., Park J.** Characteristics of Plasma-Enhanced Atomic-Layer Deposited (PEALD) SnO<sub>2</sub> Thin Films. *Journal*

of the Korean Physical Society. 2005. Vol. 46, № 4. P. 756–759.

20. **Choi W.-S.** Effects of Seed Layer and Thermal Treatment on Atomic Layer Deposition-Grown Tin Oxide. *Transactions on electrical and electronic materials*. 2010. Vol. 11, № 5. P. 222–225.

21. **Elam J.W., Baker D.A., Hryn A.J., Martinson A.B.F., Pellin M.J., Hupp J.T.** Atomic layer deposition of tin oxide films using tetrakis (dimethylamino) tin. *J. Vac. Sci. Technol., A* 2008. Vol. 26. P. 244–252.

22. **Li X., Meng X., Liu J., Geng D., Zhang Y., Banis M.N., Li Y., Yang J., Li R., Sun X., Cai M., Verbrugge M.W.** Tin Oxide with Controlled Morphology and Crystallinity by Atomic Layer Deposition onto Graphene Nanosheets for Enhanced Lithium Storage. *Advanced Functional Materials*. 2012. Vol. 22, Issue 8. P. 1647–1654.

23. **Meng X., Yang X.Q., Sun X.** Emerging Applications of Atomic Layer Deposition for Lithium-Ion Battery Studies. *Adv Mater*. 2012. Vol. 24(27), P. 3589–3615.

24. **Aravindana V., Jinesh K.B., Prabhakar R.R., Kale V.S., Madhavi S.** Atomic layer deposited (ALD) SnO<sub>2</sub> anodes with exceptional cycleability for Li-ion batteries. *Nano Energy*. 2013. Vol. 2, Issue 5. P. 720–725.

25. **Drozd E.V., Aleskovski V.B.** Synthesis of conducting oxides by ML-ALE. *Applied Surface Science*. 1994. Vol. 82–83. 2. P. 591–594.

26. **Smirnova T.P., Badalian A.M., Borisov V.O., Iakovkina L.V.** Primenenie udalennoi plazmy dlia sinteza plenok iz letuchikh elementoorganicheskikh soedinenii. *Materialy IV Mezhdunarodnogo simpoziuma po teoreticheskoi i prikladnoi plazmokhimii*. Ivanovo, 201. S. 309–312. (rus.)

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ПОПОВИЧ Анатолий Анатольевич** — доктор технических наук профессор директор института металлургии, машиностроения и транспорта Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: ispdir.onti@spbstu.ru

**МАКСИМОВ Максим Юрьевич** — кандидат технических наук инженер 2-й категории кафедры технологии и исследования материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: maximspbstu@mail.ru

**НИКИФОРОВА Оксана Владимовна** — кандидат технических наук директор отделения ЕТ и МТ ОНТИ Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: oksana-nikiphorova@yandex.ru

**ХАЙДОРОВ Александр Дмитриевич** — кандидат технических наук доцент кафедры технологий и исследования материалов Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: haidorow@yandex.ru

#### AUTORS

**POPOVICH Anatoly A.** — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: ispdir.onti@spbstu.ru

**MAXIMOV Maxim Yu.** — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: maximspbstu@mail.ru

**NIKIPHOVA Oksana V.** — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: oksana-nikiphorova@yandex.ru

**KHAYDOROV Aleksandr D.** — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: haidorow@yandex.ru



УДК 538.915+975:544.22.022.343:544.225.22+25

*О.С. Лебедева, Н.Г. Лебедев*

**ПЬЕЗОРЕЗИСТИВНЫЙ ЭФФЕКТ  
В ПРИМЕСНЫХ ОДНОСЛОЙНЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБКАХ  
В ПРИБЛИЖЕНИИ «ХАББАРД-I»**

*O.S. Lebedeva, N.G. Lebedev*

**THE PIEZORESISTIVE EFFECT  
IN DOPED SINGLE-WALLED CARBON NANOTUBES  
IN THE «HUBBARD-I» APPROACH**

В работе представлены результаты теоретического исследования пьезорезистивных свойств примесных однослойных углеродных нанотрубок (ОУНТ) двух структурных модификаций: типов «arm-chair» и «zig-zag». Электронная структура нанотрубок, допированных точечными дефектами замещения, рассчитывалась в рамках моделей Хаббарда и Андерсона с учетом кулоновской корреляции электронов в приближении «Хаббард-I». В качестве акцепторной и донорной примесей были выбраны соответственно азот и бор. Компоненты тензора эластопроводимости — основной характеристики пьезорезистивного эффекта — были рассчитаны аналитически, прослежена их зависимость от концентрации дефектов, а также от величины относительной деформации растяжения и сжатия.

ПЬЕЗОРЕЗИСТИВНОСТЬ; ДЕФЕКТЫ ЗАМЕЩЕНИЯ; МОДЕЛЬ АНДЕРСОНА; МЕТОД ФУНКЦИЙ ГРИНА; ТЕНЗОР ЭЛАСТОПРОВОДИМОСТИ.

This article presents the results of theoretical research of the piezoresistive properties of doped single-walled carbon nanotubes (SWNT) of two structural modifications: «arm-chair» and «zig-zag» types. The electronic structure of nanotubes doped by the substitution point defects is calculated within the Hubbard and Anderson models taking into account the Coulomb electron correlation in the «Hubbard-I» approximation. Nitrogen and boron were chosen as the acceptor and donor impurities, respectively. The elastic conductivity tensor — main characteristics of the piezoresistive effect was analytically calculated, their dependence on the concentration of defects and the magnitude of the strain of tension and compression was analyzed.

PIEZORESISTANCE; SUBSTITUTIONAL DEFECTS; ANDERSON MODEL; GREEN'S FUNCTIONS METHOD; ELASTIC CONDUCTIVITY TENSOR.

Пьезорезистивный эффект — явление изменения электропроводности полупроводников, обусловленное приложением анизотропной деформации, [1] — традиционно исследовался как теоретически, так и экспериментально [2, 3] в ряде классических полупроводников (например, в кремнии и германии). Он лежит в основе процесса управления преобразованием механической энергии в электрическую в таких устройствах и приборах, как сенсоры и пьезорезистивные тензодатчики давления [4, 5].

С открытием новых форм углерода (углеродные нанотрубки, графен, графеновые ленты) [6]

появилась возможность их активного использования в качестве элементной базы современных наноэлектромеханических устройств [7–10]. Высокопроводящие свойства этих наноматериалов, а также их чувствительность к внешним механическим нагрузкам [11] открывают возможности эффективного применения однослойных углеродных нанотрубок (ОУНТ) в наносенсорике, что подтверждается многочисленными теоретическими и экспериментальными исследованиями [12].

В упомянутых работах пьезорезистивность углеродных наночастиц исследуется в идеальных

наноматериалах в условиях отсутствия примесей и других неоднородностей структуры. Использование примесных наночастиц в современной наноэлектронике значительно удешевит процесс производства и позволит эффективно управлять их пьезорезистивными свойствами путем варьирования концентрации дефектов.

В свете вышесказанного представляется актуальным выбор углеродных нанотрубок и графеновых лент в качестве объекта исследования, а также изучение пьезорезистивных свойств углеродных наночастиц и возможностей их модуляции вследствие изменения концентрации донорных и акцепторных примесей.

Углеродные наночастицы можно отнести к сильно коррелированным электронным системам из-за сильного кулоновского взаимодействия электронов на одном узле, поэтому феноменологический подход в рамках модели Хаббарда [13] оправдан [14]. Диагональность того или иного слагаемого в модельном гамильтониане Хаббарда позволяет рассматривать многоэлектронные системы в двух предельных случаях:  $U \ll E_g$  и  $U \gg E_g$ , где  $E_g$  — запрещенная зона у полупроводниковых наночастиц. Первый предельный случай в применении к расчету тензора эластопроводимости ОУНТ и графена без учета кулоновской корреляции электронов был рассмотрен в работе [15], результаты которой согласовывались с пьезорезистивными константами, полученными в экспериментальном исследовании материалов на основе кремния [3]. Промежуточный вариант, когда  $U \sim E_g$ , более интересен с физической точки зрения, потому что именно в этой области можно наблюдать наиболее сильные корреляционные эффекты, приводящие в некоторых случаях даже к фазовому переходу. Последний случай и рассматривается в настоящей работе, при этом кулоновская корреляция электронов учитывается в модельном гамильтониане при расчете зонной структуры примесных ОУНТ.

В предлагаемой статье проведено теоретическое исследование пьезорезистивного эффекта в идеальных и примесных УНТ. В рамках феноменологических моделей Хаббарда и Андерсона [13] осуществлен теоретический расчет зонной структуры и продольной компоненты тензора эластопроводимости углеродных нанотрубок различной геометрической модификации, изу-

чено влияние на него кулоновской корреляции электронов в приближении «Хаббард-I» [13], а также типа и концентрации донорных и акцепторных примесей.

### Выбор модели и основные уравнения

Как упоминалось выше, для моделирования электронного строения углеродных нанотрубок оказалось оправданным применение стандартной модели Хаббарда, которая учитывает только энергию  $\pi$ -электронов (приближение Хюккеля), их кулоновское взаимодействие на одном узле, и не учитывает энергию  $\sigma$ -электронов и электрон-фононное взаимодействие. В общепринятых обозначениях гамильтониан стандартной модели Хаббарда в терминах вторичного квантования в представлении Гейзенберга имеет следующий вид [13]:

$$H = \sum_{j\Delta\sigma} \gamma_{\Delta} a_{j\sigma}^+ a_{j+\Delta\sigma} - \mu \sum_{j\sigma} a_{j\sigma}^+ a_{j\sigma} + U \sum_j a_{j\sigma}^+ a_{j\sigma} a_{j-\sigma}^+ a_{j-\sigma}, \quad (1)$$

где  $\gamma_{\Delta}$  — интеграл перескока (матричный элемент перехода) электрона с одного узла на другой;  $\mu$  — химический потенциал, учитывающий постоянство числа электронов в системе;  $U$  — энергия кулоновского взаимодействия электронов на одном узле;  $a_{j\sigma}^+$  и  $a_{j\sigma}$  — ферми-операторы рождения и уничтожения электрона с координатами  $\mathbf{r}_j$  и спином  $\sigma$  на  $j$ -м узле решетки;  $\Delta$  — индекс соседних узлов.

Для нахождения зонной структуры идеальных углеродных наночастиц с учетом кулоновского взаимодействия электронов воспользуемся методом функций Грина [16]. Формализм функций Грина (ФГ) в приближении «Хаббард-I» приводит к ФГ вида [13]

$$G_0^{\sigma}(\mathbf{k}, \omega) = \frac{P_{\sigma}^{(1)}(\mathbf{k})}{E - E_{0\sigma}^{(1)}(\mathbf{k}) + \mu} + \frac{P_{\sigma}^{(2)}(\mathbf{k})}{E - E_{0\sigma}^{(2)}(\mathbf{k}) + \mu}, \quad (2)$$

где

$$P_{\sigma}^{(1,2)}(\mathbf{k}) = \frac{1}{2} \left[ 1 \pm \frac{\epsilon_0(\mathbf{k}) - U(1 - 2n_{-\sigma})}{\sqrt{\epsilon_0(\mathbf{k})^2 - 2\epsilon_0(\mathbf{k})U(1 - 2n_{-\sigma}) + U^2}} \right],$$

а полюс ФГ описывает зонную структуру идеальных ОУНТ с учетом кулоновской корреляции электронов:



$$E_{0\sigma}^{(1,2)}(\mathbf{k}) = \frac{1}{2} \left[ \varepsilon_0(\mathbf{k}) + U \pm \sqrt{\varepsilon_0(\mathbf{k})^2 - 2\varepsilon_0(\mathbf{k})U(1 - 2n_{-\sigma}) + U^2} \right]. \quad (3)$$

Здесь  $\mathbf{k}$  — волновой вектор, принадлежащий зоне Бриллюэна ОУНТ;  $n_{-\sigma}$  — число уже имеющихся в зоне электронов с противоположным спином;  $\varepsilon_0(\mathbf{k})$  — электронный спектр идеальных ОУНТ, описываемый с помощью известного двумерного дисперсионного соотношения, которое в  $\pi$ -электронном приближении Хюккеля [17] имеет вид [6]

$$\varepsilon_0(\mathbf{k}) = \pm \gamma_0 \left\{ 1 \pm 4 \cos\left(\frac{3k_x R_0}{2}\right) \cos\left(\frac{\sqrt{3}k_y R_0}{2}\right) + 4 \cos^2\left(\frac{\sqrt{3}k_y R_0}{2}\right) \right\}^{1/2}, \quad (4)$$

где  $\gamma_0 \approx 1,4$  эВ — интеграл перескока, оцененный как двухатомный резонансный параметр метода MNDO;  $k_x$  и  $k_y$  — волновые числа, одно из которых квантуется вдоль периметра нанотрубки в зависимости от ее типа, а второе — непрерывно вдоль оси трубки;  $R_0 \approx 1,44$  Å — межатомное расстояние. Параметр кулоновского взаимодействия электронов  $U = 10$  эВ выбран в соответствии с квантово-химическим полуэмпирическим методом MNDO [17].

Полюса ФГ  $E_0(\mathbf{k})$  (3) представляют собой спектр собственных значений электронов рассматриваемой системы и показывают, что кулоновская корреляция электронов ведет к расщеплению спектра на две хаббардовские подзоны. Использованное приближение аналогично описанию движения электрона при некотором среднем распределении других электронов (типа среднего поля или одноэлектронного приближения Хартри) и известно в литературе как приближение «Хаббард-I» [13].

Для моделирования электронного строения деформированных сжатием (растяжением) ОУНТ в соответствии с работой [15] ввиду малости смещения атомов из положения равновесия выражение (4) можно разложить в ряд, ограничиваясь первыми двумя слагаемыми:

$$\varepsilon(\mathbf{k}) \approx \varepsilon_0(\mathbf{k}) + R \frac{\partial \varepsilon}{\partial R} \delta, \quad (5)$$

где  $\delta = (R - R_0)/R_0$  — относительное изменение длины С-С связи;  $\varepsilon_0(\mathbf{k})$  — дисперсионные соотношения недеформированных УНТ типов «arm-chair» и «zig-zag», которые выражаются формулой (4).

Тогда электронный спектр ОУНТ можно представить в соответствии с формулами (3) и (5) в общем виде как

$$E_\alpha(\mathbf{k}) = \frac{1}{2} \left[ \varepsilon_\alpha(\mathbf{k}) + U \pm \sqrt{\varepsilon_\alpha(\mathbf{k})^2 - 2\varepsilon_\alpha(\mathbf{k})U(1 - 2n_{-\sigma}) + U^2} \right], \quad (6)$$

где  $\alpha$  — индекс зоны, равный 0 или «пусто» соответственно для недеформированной и деформированной нанотрубок.

Зонная структура ОУНТ, допированных точечными дефектами замещения, рассматривалась в рамках периодической модели Андерсона, которую традиционно применяют для описания электронных состояний кристалла с предельно малыми концентрациями дефектов [13]. Она заключается в отдельном рассмотрении коллективизированных и локализованных электронов. Гамильтониан модели с учетом общепринятых обозначений в терминах вторичного квантования описывается с помощью следующего выражения [13]:

$$H = \sum_{k\sigma} E_k a_{k\sigma}^+ a_{k\sigma} + \sum_{i\sigma} E_i d_{i\sigma}^+ d_{i\sigma} + \sum_{ik\sigma} V_{ki} (a_{k\sigma}^+ d_{i\sigma} + d_{i\sigma}^+ a_{k\sigma}), \quad (7)$$

где  $a_{k\sigma}^+$  и  $a_{k\sigma}$  — фурье-образы операторов Ферми рождения и уничтожения электронов кристаллита в состоянии с волновым вектором  $\mathbf{k}$  и спином  $\sigma$ ;  $d_{k\sigma}^+$  и  $d_{k\sigma}$  — операторы Ферми рождения и уничтожения электронов на узле соответствующего дефекта;  $E_k \equiv E(\mathbf{k})$  — зонная структура нанотрубок в приближении «Хаббард-I»;  $E_i$  — энергия электронов на дефекте;  $V_{ki}$  — фурье-образ энергии  $V_{CD}$  гибридизации электронов ОУНТ и электронов точечного дефекта, которую также можно оценить как двухатомных резонансный параметр полуэмпирического метода MNDO:

$$V_{ik} = \frac{1}{\sqrt{N}} V_{CD} \sum_j \exp(ikr_j);$$

$$V_{CD} = \frac{1}{2} (\beta_C + \beta_D) S_{pp}; \quad \mathbf{r}_j = \mathbf{r}_i + \Delta, \quad (8)$$

где  $S_{pp}$  — интеграл перекрытия  $2p_z$ -орбиталей, принадлежащих атому углерода и атому дефекта;  $\beta_C$  и  $\beta_D$  — одноатомные резонансные параметры метода MNDO;  $\beta_C = -7,93$  эВ;  $\beta_B = -8,25$  эВ;  $\beta_N = -20,4$  эВ соответственно для углерода, бора и азота;  $\Delta$  — вектор между соседними атомами углерода.

Зонная структура примесных ОУНТ рассчитывалась с помощью метода функций Грина [16] с модельным гамильтонианом Андерсона (7). В итоге согласно общей теории модели Андерсона [13] полюс ФГ дает выражение для электронного строения ОУНТ, которое с учетом однородного распределения невзаимодействующих примесей и соотношения (8) в приближении ближайших соседей можно представить следующей формулой:

$$E_{imp}^{\alpha}(\mathbf{k}) = \frac{1}{2} \left[ E_i + E_{\alpha}(\mathbf{k}) \pm \sqrt{(E_i - E_{\alpha}(\mathbf{k}))^2 + 36|V_{CD}|^2 \frac{N_d}{N}} \right], \quad (9)$$

где  $N$  — число элементарных ячеек;  $N_d$  — количество точечных дефектов;  $E_{\alpha}(\mathbf{k})$  — зонная структура идеальных нанотрубок с учетом кулоновской корреляции электронов;  $\alpha, i$  — индексы зоны соответственно недеформированной и деформированной ОУНТ.

В качестве примера акцепторных и донорных примесей выбраны атомы бора и азота. Оценки модельных параметров гамильтониана проводились в рамках квантово-химических полупирических методов MNDO [17]; энергии  $E_i$   $p$ -электрона на атоме бора и азота составляют соответственно величины 0,0 и  $-3,28$  эВ. Потенциалы  $V_{CD}$  электронов на примесных атомах:  $V_{CB} = -1,70$  эВ и  $V_{CN} = -1,80$  эВ соответственно для бора и азота.

Модельный учет деформации растяжения (сжатия) примесных ОУНТ проводится в соответствии с разложением (5). Кроме того, потенциал гибридизации  $V_{CD}$  при деформации также изменяет свою величину вследствие зависимости от длины связи  $R$ . Поэтому целесообразно разложить его в ряд аналогично прыжковому интегралу (5):

$$V_{CD} \approx V_{CD}^{(0)} + R \frac{\partial V_{CD}}{\partial R} \delta, \quad \frac{\partial V_{CD}}{\partial R} = \frac{(\beta_C + \beta_D)}{2} \frac{\partial}{\partial R} S_{pp}. \quad (10)$$

$dV_{CB}/dR \approx 3,09$  эВ/Å — для атома бора и  $dV_{CN}/dR \approx 2,82$  эВ/Å — для атома азота.

### Тензор эластопроводимости

Расчет продольной компоненты тензора эластопроводимости осуществлялся в соответствии с его определением [1]:

$$\frac{\Delta\sigma_{\mu\nu}}{\langle\sigma\rangle} = \sum_{nl} m_{\mu\nu,nl} \varepsilon_{nl}, \quad (11)$$

где  $m_{\mu\nu,nl}$  — компоненты тензора эластопроводимости;  $\varepsilon_{nl}$  — компоненты тензора деформации;  $\Delta\sigma_{\mu\nu}$  — изменение компоненты тензора удельной проводимости вследствие деформаций; индексы  $\mu, \nu, n, l = x, y, z$ . В случае одномерных ОУНТ можно рассчитать продольную компоненту тензора вдоль оси нанотрубки:  $m_{xxxx} = M$  и  $\varepsilon_{xx} = \delta$  для «zig-zag»;  $m_{yyyy} = M$  и  $\varepsilon_{yy} = \delta$  для «arm-chair» ОУНТ.

Удельная проводимость деформированной и недеформированной ОУНТ вычислялась с использованием формулы Кубо — Гринвуда [18] методом функций Грина [16]. Подробный аналитический вывод расчетной формулы для продольной проводимости ОУНТ описан в работе [15]. Окончательная формула для расчета проводимости углеродных наночастиц в однозонном приближении может быть представлена в виде

$$\sigma_{\mu\nu} = 2 \frac{i\pi e^2}{k_B T \Omega} \sum_{k,\sigma,q,\lambda} v_{\mu}(\mathbf{k}) v_{\nu}(\mathbf{q}) \langle n_{k\sigma} \rangle > > \left[ \langle n_{q\lambda} \rangle + \delta_{kq} \delta_{\lambda\sigma} (1 - \langle n_{k\sigma} \rangle) \right], \quad (12)$$

где  $\mathbf{k}, \mathbf{q}$  — волновые векторы, лежащие в пределах зоны Бриллюэна;  $\sigma, \lambda$  — спиновые индексы;  $e$  — элементарный заряд;  $k_B$  — константа Больцмана;  $T$  — абсолютная температура;  $\Omega$  — объем кристалла;  $v_{\mu}(\mathbf{k}) = \nabla_{\mu} E_{\alpha}(\mathbf{k})/\hbar$  — компоненты скорости электрона в зоне Бриллюэна;  $\langle n_{k\sigma} \rangle$  — распределение Ферми — Дирака,

$$\langle n_{k\sigma} \rangle = \left[ e^{\frac{E_{\alpha}(\mathbf{k})}{k_B T}} + 1 \right]^{-1}, \quad (13)$$

где  $E_{\alpha}(\mathbf{k})$  — электронные спектры недеформированных или деформированных идеальных или примесных ОУНТ типов «zig-zag» и «arm-chair», которые выражаются соответственно формулами (6) и (9).

С учетом (12) расчет продольной компоненты тензора эластопроводимости  $M$  для ряда ОУНТ в случае половинного заполнения зоны ( $n_{-\sigma} = 1$ ) проводился в соответствии с формулой

$$M = \left( \frac{\sum_{k,\sigma,q,\lambda} \frac{\partial E(\mathbf{k})}{\partial \mathbf{k}} \frac{\partial E(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} n_{k\sigma} [n_{q\lambda} + \delta_{kq} \delta_{\lambda\sigma} (1 - n_{k\sigma})]}{\sum_{k,\sigma,q,\lambda} \frac{\partial E_0(\mathbf{k})}{\partial \mathbf{k}} \frac{\partial E_0(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} n_{k\sigma} [n_{q\lambda} + \delta_{kq} \delta_{\lambda\sigma} (1 - n_{k\sigma})]} \right) - 1 \frac{1}{\delta}. \quad (14)$$

### Пьезорезистивность идеальных УНТ с учетом кулоновской корреляции

Модифицированная деформацией зонная структура идеальных ОУНТ описана и проанализирована в работе [15]. Сравнительный анализ зонной структуры, представленной в [15] и рассчитанной по формуле (6), не выявил качественных различий. Количественные характеристики зависимости пьезорезистивных констант с учетом кулоновской корреляции электронов от диаметра ОУНТ представлены на рис. 1 и 2.

На основе формулы (14) проведен теоретический расчет продольной компоненты тензора эластопроводимости  $M$  ряда ОУНТ разных типов для относительной деформации растяжения (сжатия)  $\delta$ , равной 0,035; 0,069; 0,104 и 0,25, что

соответствует изменению длины  $R$  межатомных связей до значений 1,49; 1,539; 1,59; 1,8 Å при растяжении и 1,39; 1,341; 1,29; 1,08 Å при сжатии (табл. 1). Численные результаты получены при конечной температуре  $T = 300$  К.

Расчеты показали, что для всех проводящих ОУНТ продольная компонента тензора эластопроводимости принимает одно и то же значение, которое увеличивается с ростом деформации растяжения и уменьшается при сжатии УНТ. Для полупроводниковых ОУНТ значение  $M$  увеличивается с ростом их диаметра (см. рис. 1). Наибольшее значение деформации соответствует экспериментальным данным и упругой деформации при сжатии (растяжении) менее 25 %, как показано в работе [15].

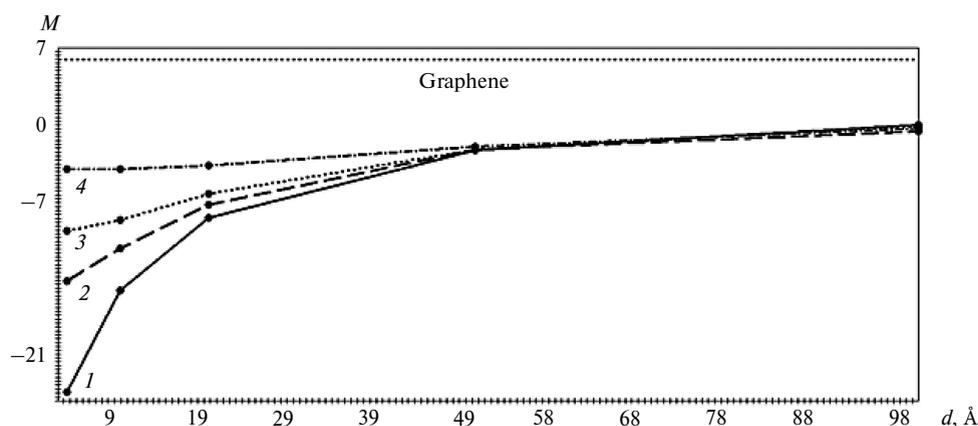


Рис. 1. Зависимость продольной компоненты тензора эластопроводимости  $M$  от диаметра  $d$  полупроводящих растянутых нанотрубок при значениях модуля относительной деформации  $\delta$ , равных 0,035 (1), 0,069 (2), 0,104 (3) и 0,25 (4)

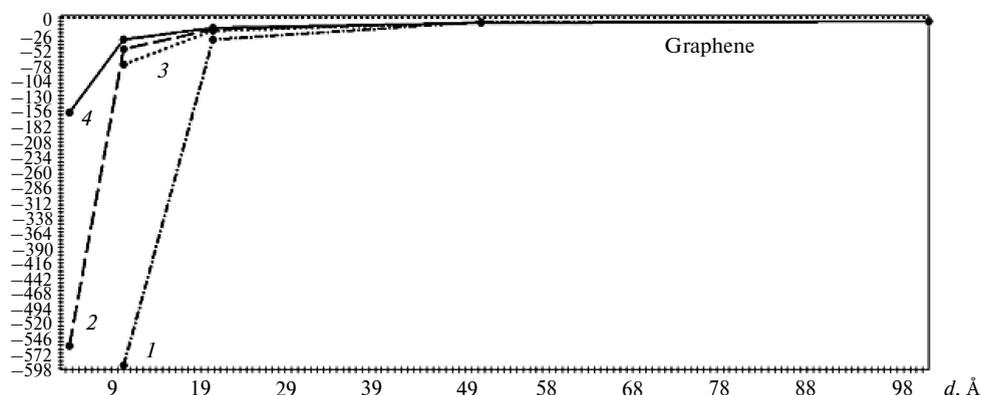


Рис. 2. Зависимость продольной компоненты тензора эластопроводимости  $M$  от диаметра  $d$  сжатых полупроводящих нанотрубок. Кривые 1, 2, 3, 4 при значениях модуля относительной деформации  $\delta$ , равных 0,035 (1), 0,069 (2), 0,104 (3) и 0,25 (4)

Таблица 1

**Продольная компонента  $M$  тензора эластопроводимости ОУНТ  
в зависимости от концентрации акцепторных дефектов  $N_d$   
и относительной деформации  $\delta$  растяжения ( $\delta > 0$ )**

Тип ОУНТ ( $n, m$ )	$N_d$	Продольная компонента $M$ тензора эластопроводимости			
		$\delta_1 = 0,035$	$\delta_2 = 0,069$	$\delta_3 = 0,104$	$\delta_{\text{end}} = 0,25$
(5, 5)	0	3,58	3,66	3,75	4,11
	1	5,77	6,22	6,73	9,56
	10	8,05	9,15	10,53	21,24
	100	6,14	7,07	8,72	30,65
(10, 10)	0	3,58	3,66	3,75	4,11
	1	5,77	6,22	6,73	9,56
	10	7,88	8,99	10,37	21,01
	100	3,25	2,89	3,08	14,26
(9, 0)	0	3,58	3,66	3,75	4,11
	1	5,77	6,22	6,73	9,56
	10	8,04	9,14	10,52	21,22
	100	4,75	5,94	7,76	29,34
(10, 0)	0	-22,66	-13,85	-9,53	-4,0
	1	-11,48	-9,38	-7,73	-3,97
	10	-10,49	-8,88	-7,48	-3,97
	100	0,99	0,03	-1,13	-3,67
(50, 0)	0	-6,46	-5,79	-5,19	-3,42
	1	-5,72	-5,27	-4,83	-3,34
	10	-4,24	-4,56	-4,73	-3,77
	100	1,87	1,48	1,11	-1,56
(100,0)	0	-2,15	-2,14	-2,12	-1,94
	1	-0,46	-0,52	-0,6	-0,97
	10	-1,86	-2,14	-2,41	-2,5
	100	1,87	1,49	1,49	-0,81

Уменьшение компоненты тензора эластопроводимости с ростом диаметра ОУНТ можно объяснить тем, что в зоне проводимости с ростом диаметра увеличивается число дисперсионных кривых, повышающих плотность электронных состояний. Поэтому малые деформации приводят в целом к незначительному изменению плотности состояний по сравнению с недеформированной УНТ.

Для сравнения на рис. 1 и 2 показано значение одной из компонент тензора эластопроводимости бесконечного слоя графена, которое является асимптотикой для полученной зависимости.

Численные значения компонент тензора эластопроводимости углеродных нанотрубок, предсказанные в теоретическом расчете, находятся в согласии с характеристиками эффекта

пьезосопротивления для пленок поликристаллического кремния *p*-типа [3].

Аналитический расчет тензора эластопроводимости ОУНТ по формуле (14) воспроизвел количественные оценки, сделанные без учета кулоновской корреляции электронов, что демонстрирует несущественность вклада кулоновского взаимодействия в проводимость трубок, а следовательно, и в тензор эластопроводимости в приближении «Хаббард-I». Вопрос о влиянии других приближений кулоновской корреляции на пьезорезистивные константы остается открытым.

### Пьезорезистивные константы примесных ОУНТ

Добавление донорных и акцепторных примесей различных концентраций в систему недеформированных ОУНТ приводит к изменению зонной структуры последних, что для наглядности продемонстрировано на рис. 3, 4 на примере нанотрубок (10, 10) типа «arm-chair» и (50, 0) типа «zig-zag», в которых число  $N_d$  акцепторных дефектов замещения (атомами бора) в кристаллической решетке, содержащей  $N = 10000$  элемен-

тарных ячеек, равно соответственно 10 и 100. Как следует из расчетов, происходит увеличение плотности состояний вблизи уровня локализации примеси (–3,28 эВ и 0 эВ для атомов азота и бора), как это видно на рис. 3–5. Акцепторные примеси в значительных концентрациях существенным образом изменяют зонную структуру металлических ОУНТ (см. рис. 3), приводя к образованию энергетической щели в спектре и тем самым способствуя возможному фазовому переходу «металл — диэлектрик». Донорные дефекты не оказывают качественного влияния на зонную структуру нанотрубок, создавая локализованный примесный уровень в валентной зоне.

Ширина энергетической щели в примесной зоне может достигать значения 1 эВ при концентрации дефектов  $N_d = 100$ , что приводит к фазовому переходу «металл — диэлектрик» и появлению полупроводящих свойств у ОУНТ, ранее обладавших металлическим типом проводимости. Это можно объяснить увеличением числа локализованных электронов, захваченных акцепторными примесями, что уменьшает число носителей заряда.

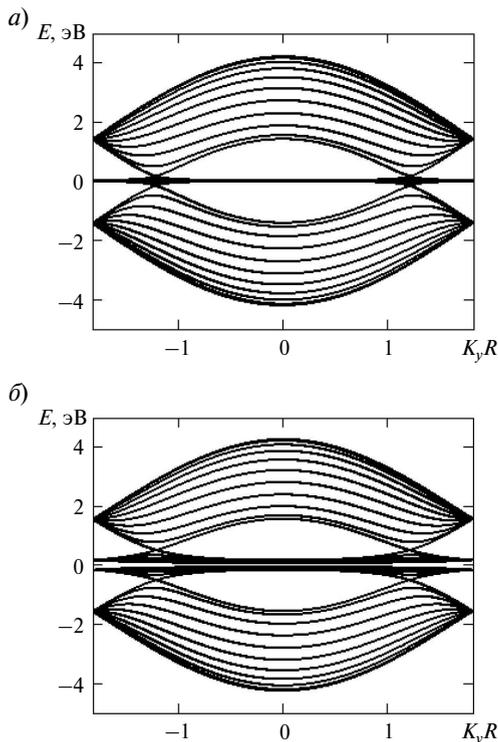


Рис. 3. Зонная структура ОУНТ (10, 10), допированной 10 (а) 100 (б) атомами бора

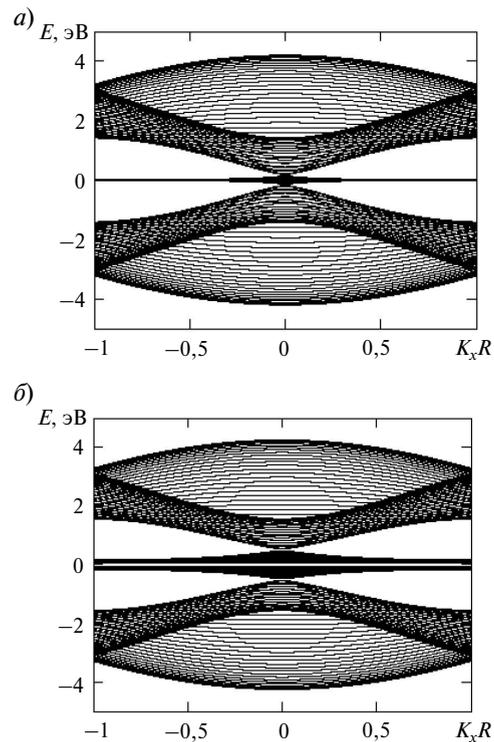


Рис. 4. Зонная структура ОУНТ (50, 0), допированной 10 (а) и 100 (б) атомами бора

Описанные особенности электронного спектра недеформированных УНТ с примесями подтверждаются общей теорией модели Андерсона [13] и согласуются с результатами многочисленных теоретических, в том числе квантово-химических, расчетов, описанных в [6].

Примеси различных концентраций могут выступать внешним параметром, оказывающим влияние как на проводимость, так и на пьезоре-

зистивность углеродных наночастиц. Для количественной оценки пьезорезистивности и проводящих свойств таких нанотрубок осуществлен численный расчет тензора эластопроводимости по формуле (14), результаты которого отражены в табл. 1–4. Для всех проводящих ОУНТ продольная компонента тензора  $M$  в отсутствие примесей ( $N_d = 0$ ) одинакова для каждого значения относительной деформации  $\delta$  (см. табл. 1–4).

Таблица 2  
**Продольная компонента  $M$  тензора эластопроводимости ОУНТ в зависимости от концентрации акцепторных дефектов  $N_d$  и относительной деформации  $\delta$  сжатия ( $\delta < 0$ )**

Тип ОУНТ ( $n, m$ )	$N_d$	Продольная компонента $M$ тензора эластопроводимости			
		$\delta_1 = 0,035$	$\delta_2 = 0,069$	$\delta_3 = 0,104$	$\delta_{\text{end}} = 0,25$
(5, 5)	0	3,4/	3,32	3,23	2,87
	1	4,97	4,64	4,32	3,27
	10	6,33	5,68	5,12	3,63
	100	5,7	5,68	5,43	3,84
(10, 10)	0	3,4	3,32	3,23	2,87
	1	4,97	4,63	4,32	3,26
	10	6,13	5,46	4,87	3,44
	100	4,73	5,2	5,21	3,83
(9, 0)	0	3,4	3,32	3,23	2,87
	1	4,97	4,63	4,32	3,26
	10	6,31	5,65	5,08	3,37
	100	3,8	3,89	4,14	3,89
(10, 0)	0	-108,82	-303,84	-991,08	-
	1	-18,17	-23,24	-30,52	-131,95
	10	-14,5	-16,57	-18,46	-16,19
	100	2,57	3,22	3,8	3,89
(50, 0)	0	-8,1	-9,03	-10,08	-14,46
	1	-6,65	-7,07	-7,45	-7,58
	10	-3,27	-2,76	-2,26	-0,45
	100	2,84	3,37	3,87	3,89
(100, 0)	0	-2,14	-2,11	-2,05	-1,5
	1	-0,34	-0,28	-0,21	0,14
	10	-1,32	5,65	-0,86	0,17
	100	2,84	3,37	3,87	3,89

Таблица 3

**Продольная компонента  $M$  тензора эластопроводимости ОУНТ  
в зависимости от концентрации донорных дефектов  $N_d$   
и относительной деформации  $\delta$  растяжения ( $\delta > 0$ )**

Тип ОУНТ ( $n, m$ )	$N_d$	Продольная компонента $M$ тензора эластопроводимости			
		$\delta_1 = 0,035$	$\delta_2 = 0,069$	$\delta_3 = 0,104$	$\delta_{\text{end}} = 0,25$
(5, 5), (10, 10), (9, 0)	0	3,58	3,66	3,75	4,11
	1	3,58	3,66	3,75	4,11
	10	3,58	3,66	3,75	4,11
	100	3,59	3,67	3,76	4,13
(10, 0)	0	-22,66	-13,85	-9,53	-4,0
	1	-22,66	-13,85	-9,53	-4,0
	10	-22,67	-13,85	-9,53	-4,0
	100	-22,97	-13,91	-9,54	-4,0
(50, 0)	0	-6,46	-5,79	-5,19	-3,42
	1	-6,46	-5,79	-5,19	-3,42
	10	-6,47	-5,8	-5,2	-3,42
	100	-7,47	-6,5	-5,68	-3,52
(100,0)	0	-2,15	-2,14	-2,12	-1,94
	1	-2,15	-2,14	-2,12	-1,94
	10	-2,16	-2,15	-2,12	-1,94
	100	-3,01	-2,87	-2,72	-2,2

Как показывают данные табл. 1 и 2, тензор эластопроводимости возрастает при растяжении и убывает при сжатии. Увеличение компоненты тензора происходит линейно для малых значений деформаций  $\delta$  и может быть аппроксимировано следующей простой формулой:

$$M = a\delta + b, \quad (15)$$

где  $a$  и  $b$  — аппроксимационные константы, зависящие от структуры ОУНТ, вида деформации и концентрации примесей (например, численные значения коэффициентов (15) —  $a = 35,96$  и  $b = 6,75$  ( $N_d = 10$ ) для растянутой УНТ (5, 5)).

Добавление акцепторных примесей в УНТ отражается на описанной монотонной зависимости тензора эластопроводимости от концентрации дефектов  $N_d$  для слабдеформированных наночастиц (см. табл. 1 и 2). Тензор возрастает монотонно при малых концентрациях дефектов ( $N_d = 0, 1, 10$ ), но при  $N_d = 100$  наблюдается

уменьшение величины этой пьезорезистивной константы.

Тензор эластопроводимости  $M$  увеличивается или уменьшается монотонно во всем диапазоне концентрации дефектов, за исключением случаев максимальных значений деформаций, когда  $\delta = 0,25$ . На наш взгляд, это связано с двумя конкурирующими процессами: во-первых, с уменьшением запрещенной зоны вследствие деформации растяжения и, во-вторых, с ее увеличением за счет роста концентрации дефектов.

Энергетическая щель полупроводниковых ОУНТ растет или уменьшается под действием соответственно растяжения и сжатия. Величина тензора эластопроводимости — отрицательная и демонстрирует монотонный рост с увеличением концентрации дефектов для каждого значения относительной деформации  $\delta$  и в случае растяжения, и при сжатии (см. табл. 1 и 2).

Таблица 4

**Продольная компонента  $M$  тензора эластопроводимости ОУНТ  
в зависимости от концентрации донорных дефектов  $N_d$   
и относительной деформации  $\delta$  сжатия ( $\delta < 0$ )**

Тип ОУНТ* ( $n, m$ )	$N_d$	Продольная компонента $M$ тензора эластопроводимости			
		$\delta_1 = 0,035$	$\delta_2 = 0,069$	$\delta_3 = 0,104$	$\delta_{\text{end}} = 0,25$
(5, 5), (10, 10), (9, 0)	0	3,4	3,32	3,23	2,87
	1	3,4	3,32	3,23	2,87
	10	3,4	3,32	3,23	2,87
	100	3,41	3,33	3,24	2,87
(10, 0)	0	-108,82	-303,84	-991,08	—
	1	-108,82	-303,86	-991,15	—
	10	-108,95	-304,48	-994,25	—
	100	-117,98	-350,86	-1240,0	—
(50, 0)	0	-8,1	-9,03	-10,08	-14,46
	1	-8,1	-9,03	-10,08	-14,46
	10	-8,12	-9,07	-10,13	-14,57
	100	-10,17	-11,88	-13,93	-22,64
(100,0)	0	-2,14	-2,11	-2,05	-1,5
	1	-2,14	-2,11	-2,05	-1,5
	10	-2,15	-2,12	-2,06	-1,52
	100	-3,28	-3,38	-3,45	-3,07

\* Все типы ОУНТ ( $n, 0$ ) — «zig-zag», а ( $n, n$ ) — «arm-chair»

Кроме того, при малых концентрациях дефектов ( $N_d = 0; 1; 10$ ) тензор уменьшается и увеличивается соответственно при растяжении и сжатии. Напротив, при концентрации  $N_d = 100$  величина  $M$  монотонно уменьшается с растяжением УНТ и увеличивается при сжатии. Причиной такой зависимости является рост энергетической щели в примесной зоне до 1 эВ и фазовый переход «металл — полупроводник» (как в рассмотренном случае металлических нанотрубок). Величина тензора эластопроводимости также увеличивается с ростом диаметра УНТ, что связано с ростом плотности электронных состояний в зоне проводимости и на уровне Ферми для примесных нанотрубок.

ОУНТ (100, 0) заслуживает отдельного рассмотрения. В этом случае рост тензора эластопроводимости  $M$  с растяжением справедлив лишь для идеальных (бездефектных) ОУНТ. Наличие

примесей в структуре меняет характер зависимости, в частности, при некоторых концентрациях дефектов тензор уменьшается с увеличением модуля деформации растяжения. Кроме того, зависимость тензора от концентрации становится немонотонной при фиксированной величине деформации. Под действием деформации сжатия продольная компонента тензора эластопроводимости увеличивается, в то время как сохраняется осциллирующий характер его зависимости от количества дефектов. Такой эффект, на наш взгляд, обусловлен малым значением ширины запрещенной зоны (0,01 эВ) и высокой плотностью электронных состояний в зоне проводимости, которую создают примесные энергетические уровни, что способствует изменению проводимости материала при конечных температурах.

Результаты расчета компоненты тензора эластопроводимости металлических и полупрово-



дниковых ОУНТ с различными концентрациями донорных дефектов в кристаллической решетке представлены в табл. 3 и 4.

Таким образом, включения донорных примесей в структуру ОУНТ не изменяет физические свойства наночастиц, а способствует лишь некоторым качественным изменениям в зонной структуре, а именно небольшому сдвигу валентной зоны без изменений величины запрещенной щели в спектре. Поэтому тензор эластопроводимости металлических ОУНТ не зависит от их диаметра, а, как и было замечено ранее, увеличивается с растяжением и уменьшается со сжатием. Такой характер поведения пьезорезистивной константы наблюдается для любой концентрации атомов азота.

У полупроводниковых ОУНТ тензор эластопроводимости зависит от их геометрических характеристик и увеличивается с ростом диаметра нанотрубок, в то время как его зависимость от вида и величины деформации и концентрации дефектов остается такой же, как и для ОУНТ с металлической проводимостью. ОУНТ (100, 0) также остается исключением при расчете пьезорезистивной константы. Компонента тензора  $M$  возрастает при сжатии ОУНТ и разных фиксированных значений концентраций дефектов.

Теоретически вычисленная величина тензора эластопроводимости для однослойных углеродных нанотрубок и ее зависимость от относительной деформации, полученная в работе, хорошо согласуется с экспериментальными данными для углеродных нанопленок [19], для многослойных углеродных нанотрубок [20] и для других материалов с аналогичным УНТ типом

проводимости, например для пленок поликристаллического кремния  $p$ -типа [3].

В заключение сформулируем основные результаты и выводы проведенного исследования.

В работе проведено теоретическое исследование пьезорезистивных характеристик ОУНТ двух структурных модификаций: «arm-chair» и «zig-zag» типов, допированных точечными донорными и акцепторными дефектами замещения.

В рамках модели Хаббарда в приближении «Хаббард-I» произведен расчет зонной структуры, проанализированы изменение пьезорезистивных констант в зависимости от величины внешней деформации сжатия и растяжения, а также влияние кулоновской корреляции.

В рамках модели Андерсона получен энергетический спектр примесных ОУНТ разного структурного типа и диаметра, изучено его качественное изменение в зависимости от концентрации донорных и акцепторных дефектов.

Осуществлен аналитический расчет тензора эластопроводимости примесных ОУНТ, исследована его зависимость от числа точечных дефектов, типа примеси, величины и вида внешней деформации. Дано теоретическое физическое обоснование полученным зависимостям и эффектам, проведено сравнение с литературными данными.

Полученные в работе результаты могут быть использованы для практической идентификации ОУНТ и при количественной калибровке наноэлектромеханических устройств на базе ОУНТ, таких, как пьезорезистивные сенсоры и датчики давления.

Работа выполнена в соответствии с грантом РФФИ № 13–03–97108 и 14–02–31801.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бир Г.Л., Пикус Г.Е. Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках. М.: Наука, 1972. 584 с.
2. Wang S., Chung D.D.L. Piezoresistivity in Silicon Carbide Fibers // Journal of Electroceramics. 2003. Vol. 10. № 3. P. 147–152.
3. Гридчин В.А., Любимский В.М. Пьезосопротивление в пленках поликристаллического кремния  $p$ -типа // Физика и техника полупроводников. 2004. Т. 38. № 8. С. 1013–1017.
4. Дина М. Полупроводниковые тензодатчики. М.: Энергия, 1968. 215 с.
5. Ильинска, Л.С., Подмарков А.Н. Полупроводниковые тензодатчики М.: Энергия. 1966. 118 с.
6. Дьячков П.Н. Электронные свойства и применение нанотрубок. М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2010. 488 с.
7. Roman C., Helbling Th., Hierold Ch. Single walled carbon nanotubes sensor concepts. In book: Springer Handbook of Nanotechnology. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010. P. 403–425.
8. Yang L., Han J. Electronic structure of deformed carbon nanotubes // Phys. Rev. Lett. 2000. Vol. 85. №1. С. 154–157.

9. **Hu N.A., Karube Y., Fukunaga H.** Strain Sensor from a Polymer/Carbon Nanotube Nanocomposite // Proc. of the the IUTAM Sympos. on Multi-Functional Material Structures and Systems. 2008. P. 77–86.

10. **Bai, H.L., Li W.J., Chow W.** A carbon nanotube sensor for wall shear stress measurement. // Experiments in Fluids. 2010. Vol. 48. № 4. P. 679.

11. **Елецкий А.В.** Механические свойства углеродных наноструктур и материалов на их основе // Успехи физических наук. 2007. Т. 177. № 3. С. 233–274.

12. **Cullinan M.A., Michael M.A., Culpepper M.L.** Carbon nanotubes as piezoresistive microelectromechanical sensors: Theory and experiment // Physical Review B. 2010. Vol. 82, №11. P. 115428 (1 6).

13. **Изюмов Ю.А., Чашин Н.И., Алексеев Д.С.** Теория сильно коррелированных систем. Метод производящего функционала. М.: Изд-во «Регулярная и хаотическая динамика», 2006. 384 с.

14. **Мурзашев А.И.** Исследование углеродных наносистем в модели Хаббарда // Письма в ЖЭТФ. 2009.

Т. 135. Вып. 1. С. 122–133.

15. **Ляпкосова О.С., Лебедев Н.Г.** Пьезорезистивный эффект в однослойных углеродных нанотрубках // Физика твердого тела. 2012. Vol. 54, № 7. С. 1412–1416.

16. **Тябликов С.В.** Методы квантовой теории магнетизма. М.: Наука, 1975. 528 с.

17. **Степанов Н.Ф.** Квантовая механика и квантовая химия. М.: Мир, 2001. 519 с.

18. **Лебедева О.С., Лебедев Н.Г.** Влияние деформаций растяжения и сжатия на пьезорезистивность углеродных нанотрубок и графеновых нанолент // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2014. № 1. С. 26–34.

19. **Yong Li., Wanlu Wang, Kejun Liano, Chenguo Hu.** Piezoresistive effect in carbon nanotube films // Chinese Science Bulletin. 2003. Vol. 48, № 2. P. 125–127.

20. **Mohamed N.M., Kou L.M.** Piezoresistive effect of aligned multiwalled carbon nanotubes array // J. Appl. Sci. 2011. Vol. 11. P. 1386–1390.

## REFERENCES

1. **Bir G.L., Pikus G.Ye.** Simmetriya i deforma *T*Slonnue efekty v poluprovodnikakh. М.: Nauka, 1972. 584 s. (rus.)

2. **Wang S., Chung D.D.L.** Piezoresistivity in Silicon Carbide Fibers. *Journal of Electroceramics*. 2003. Vol. 10. № 3. P. 147–152.

3. **Gridchin, V.A., Lyubimskiy V.M.** Pyezosoprotivlenie v plenkah polikristallicheskogo kremniya r-tipa. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov*. 2004. Т. 38, № 8. S. 1013–1017. (rus.)

4. **Dina M.** Poluprovodnikovyye tenzodatchiki. М.: Energiya, 1968. 215 s. (rus.)

5. **Ilinskaya L.S., Podmarkov A.N.** Poluprovodnikovyye tenzodatchiki. М.: Energiya. 1966. 118 s. (rus.)

6. **Dyachkov P.N.** Elektronnye svoystva i primeneniye nanotrubok. М.: BINOM, Laboratoriya znaniy, 2010. 488 s. (rus.)

7. **Roman C., Helbling Th., Hierold Ch.** Single walled carbon nanotubes sensor concepts. In book «*Springer Handbook of Nanotechnology*». Berlin, Heidelberg: Springer, 2010. P. 403 425.

8. **Yang L., Han J.** Electronic structure of deformed carbon nanotubes. *Phys. Rev. Lett.* 2000. Vol. 85, №1. P. 154–157.

9. **Hu N., Karube Y., Fukunaga H.** Strain Sensor from a Polymer/Carbon Nanotube Nanocomposite. *Proc. of the the IUTAM Sympos. on Multi-Functional Material Structures and Systems*. 2008. P. 77–86.

10. **Bai H.L., Li W.J., Chow W.** A carbon nanotube sensor for wall shear stress measurement. *Experiments in Fluids*. 2010. Vol. 48. № 4. P. 679.

11. **Yeletskiy A.V.** Mekhanicheskiye svoystva uglerodnykh nanostruktur i materialov na ih osnove.

*Uspekhi fizicheskikh nauk*. 2007. Т. 177, № 3. S. 233–274. (rus.)

12. **Cullinan M.A., Michael M.A., Culpepper M.L.** Carbon nanotubes as piezoresistive microelectromechanical sensors: Theory and experiment. *Physical Review B*. 2010. Vol. 82, №11. P. 115428 (1 6).

13. **Izyumov Yu.A., Chashchin N.I., Alekseev D.S.** Teoriya silno korrelirovannykh sistem. Metod proizvodnyashchego funk *T*Slonala. М.: Izd-vo «Regulyarnaya i khatoticheskaya dinamika», 2006. 384 s. (rus.)

14. **Murzashhev A.I.** Issledovanie uglerodnykh nanosistem v modeli Habbarda. Pisma v ZhETF. 2009. Т. 135. Vyp. 1. S. 122–133. (rus.)

15. **Lyapkosova O.S., Lebedev N.G.** Pyezorezistivnyy effekt v odnosloynnykh uglerodnykh nanotrubkakh. *Fizika tverdogo tela*. 2012. Vol. 54, № 7. P. 1412–1416. (rus.)

16. **Tyablikov S.V.** Metody kvantovoy teorii magnetizma. М.: Nauka, 1975. 528 s. (rus.)

17. **Stepanov N.F.** Kvantovaya mekhanika i kvantovaya khimiya. М.: Mir, 2001. 519 s.

18. **Lebedeva O.S., Lebedev N.G.** Vliyanie rastyazheniya i szhatiya na pyezorezistivnost uglerodnykh nanotrubok i grafenovuykh nanolent. *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti Sankt Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*. 2014. № 1. S. 26–34. (rus.)

19. **Yong Li, Wanlu Wang, Kejun Liano, Chenguo Hu.** Piezoresistive effect in carbon nanotube films. *Chinese Science Bulletin*. 2003. Vol. 48. № 2. P. 125–127.

20. **Mohamed N.M., Kou L.M.** Piezoresistive effect of aligned multiwalled carbon nanotubes array. *J. Appl. Sci*. 2011. Vol. 11. P. 1386–1390.

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**ЛЕБЕДЕВА Ольга Сергеевна** — младший научный сотрудник Волгоградского государственного университета; 400062, Россия, г. Волгоград, Университетский проспект, д.100. E-mail: lyarkosovaolga@mail.ru

**ЛЕБЕДЕВ Николай Геннадьевич** — доктор физико-математических наук профессор Волгоградского государственного университета; 400062, Россия, г. Волгоград, Университетский проспект, д. 100. E-mail: lebedev.ng@mail.ru

**AUTHORS**

**LEBEDEVA Olga S.** — Volgograd State University. University avenue 100, Volgograd, 400062, Russia. E-mail: lyarkosovaolga@mail.ru

**LEBEDEV Nikolay G.** — Volgograd State University. University avenue 100, Volgograd, 400062, Russia. E-mail: lebedev.ng@mail.ru

УДК 539.3

*А.Ю. Кузькин, Д.В. Латышев,  
М.Ю. Петров, В.А. Попов*

**МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ  
ПРИ СТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ ТРУБЧАТЫХ ОБРАЗЦОВ  
В УСЛОВИЯХ ПЛОСКОГО И ОБЪЕМНОГО НАПРЯЖЕННЫХ СОСТОЯНИЙ**

*A.Yu. Kuzkin, D.V. Latyshev,  
M.Yu. Petrov, V.A. Popov*

**THE MECHANICAL PROPERTIES OF MATERIALS  
WITH THE STATIC LOAD OF TUBULAR MODELS  
UNDER THE CONDITIONS  
OF THE FLAT AND VOLUMETRIC STRESSED STATES**

Приведено описание установки для испытаний тонкостенных трубчатых образцов в условиях плоского и объемного напряженных состояний при двух- или трехпараметрическом нагружении давлениями жидкости до 1000 МПа. Экспериментальной проверке подвергалась гипотеза существования универсальной зависимости между интенсивностями деформаций и напряжений. Сообщается об экспериментах по изучению устойчивости пластического деформирования изотропных и начально анизотропных металлов. Подчеркнута актуальность экспериментальных исследований вязкоупруго-пластических процессов на современном этапе развития механики деформируемого твердого тела.

МОДЕЛЬ НЕУПРУГОГО ПОВЕДЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ; ПУТИ НАГРУЖЕНИЯ; УСТАНОВКА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ; ГИПОТЕЗА ЕДИНОЙ КРИВОЙ; ВЯЗКОУПРУГО-ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС.

The description of installation for the tests of thin-walled tubular models under the conditions of the flat and volumetric stressed states with two- or three-parameter load is given by the pressures of liquid to 1000 MPa. The hypothesis of existence of universal dependence between the intensities of deformations and stresses underwent the experimental check. It communicates about the experiments on the study of the stability of the plastic deformation of isotropic and initially anisotropic metals. Is emphasized the urgency of experimental studies of viscoelastically plastic processes in present development stage of the mechanics solid of body being deformed.

MODEL OF THE INELASTIC BEHAVIOR OF MATERIALS; INSTALLATION FOR THE TESTS; IT IS VISCOELASTIC DUCTILE PLASTIC PROCESS.

В последнее время наблюдаются попытки создания все более сложных моделей неупругого поведения материалов [1–6], в частности построение определяющих соотношений вязкоупруго-вязкопластических тел при разнообразных путях нагружения, которые учитывают зависимость скорости деформирования от температуры и времени, а также анизотропию вследствие предварительной пластической деформации.

Для обоснования этих моделей требуются весьма сложные многоплановые эксперименты. Например, для описания определяющих соотношений реологических процессов в [4] использованы одна материальная функция и девять материальных параметров (ползучесть, релаксация, длительная прочность, деформирование с постоянной скоростью и др.), устанавливаемых по результатам различных испытаний.

Для осуществления названных экспериментов создаются высокопроизводительные автоматизированные испытательные комплексы. Назовем некоторые из них.

Испытательная машина СН [7] позволяет в двумерном пространстве автоматически воспроизводить программную траекторию деформирования трубчатого образца, подвергаемого растяжению и кручению. По сути, эта машина стала прототипом других комплексов, обеспечивающих программные пути в трехмерном пространстве деформаций.

В экспериментальном комплексе О.Л. Толоконникова [8] трубчатый образец деформируется в условиях нагружения по схеме  $p_v + p_n + P$ , где  $p_v$ ,  $p_n$  — внутреннее и наружное давления,  $P$  — независимая осевая сила. Комплекс содержит блоки управления, автоматической регистрации параметров нагрузки и коррекции программы в ходе опыта с помощью ЭВМ. Максимальное рабочее давление, достигаемое в комплексе, составляет 2500 МПа.

Автоматизированный стенд, разработанный в АН УССР [9], предназначен для испытаний тонкостенных трубчатых образцов нагружением осевой силой и внутренним давлением ( $P + p_v$ ), осевой силой и крутящим моментом ( $P + M_k$ ) в условиях статического и циклического действий нагрузки при различных видах напряженного состояния и широком диапазоне температур. Комплекс оснащен системами автоматической регистрации и измерений усилий и деформаций, а также регулирования температуры. Стенд дает возможность также изучать вязкопластические характеристики материалов по специальной методике испытаний на ползучесть при различных уровнях необратимой деформации и скорости деформирования.

Приведенный краткий обзор позволяет заключить: разработка, создание и обслуживание подобных высокопроизводительных испытательных комплексов требуют привлечения специалистов из самых различных отраслей инженерных знаний, а материальные и финансовые затраты могут оказаться неприемлемыми.

Многие страны производят оборудование для изучения механических свойств материалов. Например, фирмы «Инстрон» в Англии, «Шоппер» в Германии, «MTS» в США, «Шимадзу-Сейсакушо» в Японии и другие выпускают ма-

шины для двух- или трехпараметрического нагружения трубчатых образцов в условиях сложного деформирования при различных уровнях автоматизации процесса. Заметим, что эти машины преимущественно предназначены для проведения унифицированных испытаний в рамках государственных стандартов и согласованных международных рекомендаций. Кроме того, их стоимость высока.

В свете изложенного понятно, что создание и эксплуатация более простых, не чрезмерно затратных установок, ориентированных на виды испытаний, которые затруднительны на выпускаемых промышленностью машинах, вполне уместными. Следует упомянуть, что многие оригинальные, опубликованные в печати результаты были получены благодаря испытаниям материалов на такого рода сравнительно простых установках.

#### **Установка для экспериментов над трубчатыми образцами в условиях плоского и объемного напряженных состояний**

В течение многих лет мы проводили экспериментальные исследования пластических и реологических свойств металлов при нормальной температуре. Опыты проводились в установках [10, 11], обеспечивающих мягкое трехпараметрическое нагружение (по схеме  $p_v + p_n + P$ ) тонкостенных трубчатых образцов. Эти установки подвергались непрерывной модернизации с целью повышения производительности, точности и видов эксперимента. Приведем краткое описание последней конструкции, отмечая усовершенствования, выполненные в последние годы.

Установка состоит из испытательной камеры, источников давления, трубопроводов, приборов для измерения давлений, соединительной и запорной арматуры.

На рис. 1 представлена принципиальная схема соединения источников давления (насосы) с полостями рабочей испытательной камеры 1. Видно, что при закрытых вентилях 2 нагрузки — внутреннее давление  $p_v$ , наружное  $p_n$  и давление  $p_0$  под плунжером, передающим на образец осевую силу, — создаются насосами 3 независимо друг от друга по режиму, предписанному программой нагружения.

В общем случае образец деформируется путем последовательного ступенчатого изменения

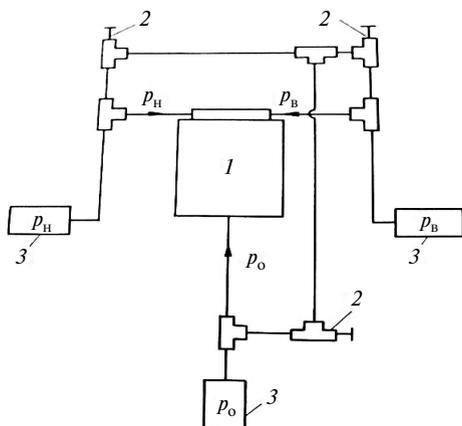


Рис. 1. Принципиальная схема установки

давлений. При некоторых сочетаниях параметров открытых и закрытых вентилях осуществляется бесступенчатое нагружение при различных уровнях шаровой части тензора напряжений.

**Испытательная камера.** Испытательная камера (рис. 2), рассчитанная на максимальное рабочее давление в 1000 МПа, состоит из двух частей.

Верхняя часть — двухслойный сосуд, у которого внутренний корпус 1 выполнен из термообработанной до твердости HRC<sub>3</sub> 44–48 стали

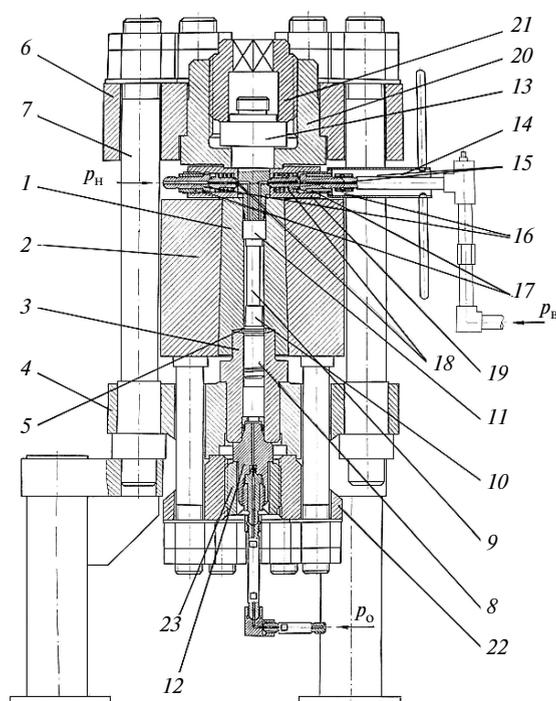


Рис. 2. Испытательная камера

38ХНЗМА. Диаметр рабочей полости корпуса составляет 36 мм. Для изготовления обоймы 2 названного сосуда была использована поковка из низколегированной стали. В ходе создания обоймы была автофретирована внедрением закаленного мастер-пуансона, имитирующего внутренний корпус, с усилием около десяти тысяч килоньютон. Внутренний корпус и обойма тщательно притерты друг к другу по конической поверхности с углом конуса 3°.

Нижняя часть камеры состоит из массивной плиты 4, в которую запрессована втулка 3, изготовленная из стали Х12М, термообработанной до твердости HRC<sub>3</sub> 56–60. Требуемый натяг был рассчитан из условия прочности втулки при самых высоких рабочих давлениях. Перед соединением плита нагревалась до 300 °С, а втулка охлаждалась жидким азотом; тем самым гарантировано обеспечивалось нужное соединение.

Верхняя и нижняя части камеры посредством коллектора 19, опирающегося на торец внутреннего корпуса, втулки 20, массивной плиты 6 и шести колонок 7 были стянуты во время сборки с усилием около тысячи килоньютон. Вследствие пластической деформации двусторонней конической линзы 5 обеспечивается плотность соединения частей камеры. Камера герметизируется сверху при помощи пуансона 13, прижимаемого гайкой 21, снизу — пуансоном 12 и гайкой 23, которая ввинчивается в плиту 22. Усилия, создаваемые давлением жидкости на торцы запорных пуансонов, реверсируются в сжимающие силы, которые обеспечивают дополнительную радиальную поддержку внутреннего сосуда. Таким образом, в отличие от двухслойных установок подобного рода, в которых осевое усилие осуществляется за счет внешнего источника (пресс), здесь это усилие создается автоматически в ходе эксперимента.

В верхнем запорном пуансоне высверлены отверстия, завершающиеся сферическими углублениями по противоположным концам диаметра его цилиндрической поверхности. Эти каналы служат для подвода рабочей жидкости в наружную и внутреннюю полости образца. Соединение с трубопроводом высокого давления происходит следующим образом. В полостях коллектора 19 размещаются штуцеры 15 с пружинами 18 на них и патрубки 16 с гайками 17 (рис. 3). На шестигранные поверхности гаек надеваются стационарные приспособления 14.

При рабочем положении пуансона гайки ввинчиваются в резьбовые отверстия коллектора, смещая патрубки и штуцеры. При этом преодолеваются усилия пружин, и штуцеры своими сферическими оголовками со значительным усилием прижимаются к соответствующим поверхностям пуансона. При обратном действии, т. е. при вывинчивании гаек 17 приспособлениями 14, пружины, освобождаясь, отжимают штуцеры из сферических углублений пуансона. Теперь после извлечения гайки 21 (см. рис. 2) пуансон с помощью съемного приспособления извлекается из полости камеры. Патрубки 16 противоположными концами соединяются с трубопроводами и далее с источниками давления. Штуцеры и патрубки изготовлены из высокопрочной закаленной стали и имеют полированные поверхности контакта.

Рассмотренная схема подвода внутреннего и наружного давлений в полости образца потребовала строго определенного положения пуансона как в осевом, так и в окружном направлениях. Окружная фиксация была достигнута посредством направляющей шпонки, по которой пуансон вводится в полость камеры, а осевая — набором медных прокладок, размещенных между опорными поверхностями пуансона и коллектора.

Уплотнительными элементами служили кольца из фторопласта. Для самых высоких давлений оказалось достаточным применение дополнительных прокладок из отожженной меди. В качестве рабочей среды применялась жидкость АМГ-10.

**Источники давления.** В качестве источников давления используются ручные плунжерные насосы (рис. 4). В корпусе 1 размещаются плунжер 2 высокого давления диаметром 4 мм, цилиндр 3, всасывающий (5) и нагнетательный (6) клапаны. В корпус встроены также вентиль 7 точного снижения давления и два манганиновых датчика сопротивления 8. Назначение остальных деталей и узлов ясно из рисунка и не требует специальных пояснений.

Остановимся лишь вкратце на работе вентиля 7 и уплотнении плунжера. Известно, что при испытании трубчатых образцов давлениями жидкости серьезной проблемой является плавное снижение параметра нагрузки. Применение обычных вентилях приводит к резкому сбрасыванию давления и нарушению предписанной программы нагружения. Для преодоления этой

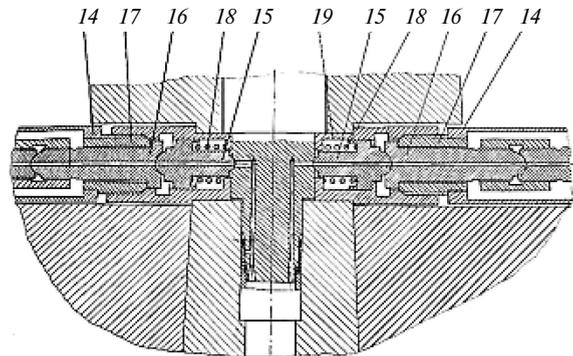


Рис. 3. Подвод рабочей жидкости во внутреннюю и наружную полости образца

трудности применяют вентили плавного снижения давления. Принцип действия последнего известен из [12]. За один оборот шпинделя 15 запорная игла 16 перемещается на расстояние, равное разности шагов резьбы шпинделя и хвостовика иглы. В нашем случае это перемещение составляет 0,1 мм. В уплотнении плунжера, известном в литературе как уплотнение Моррисона [13] (см. рис. 4, выноска Б), используется принцип некомпенсированной площади. Здесь таковой является поперечное сечение горловины 10. Давление в мягкой прокладке 11, превышающее давление под плунжером 2, обжимает горловину вокруг плунжера, предотвращая тем самым утечку жидкости. Стальные кольца 12 треугольного поперечного сечения препятствуют вытеканию прокладки в зазоры. С помощью втулки 13 обеспечивается начальное сжатие прокладки.

Из конструкции уплотнения понятно, что сила трения между плунжером и горловиной будет тем меньше, чем тоньше стенка горловины. Опытным путем была установлена оптимальная толщина стенки — 0,5 мм. Плунжер и горловина изготовлены из высокопрочных инструментальных сталей, подвергнутых термообработке до твердости HRC<sub>3</sub> 54–58, и тщательно притерты друг к другу. Недопустимы продольные риски на поверхности контакта названных деталей, поскольку через них возможна утечка жидкости высокого давления.

**Трубопроводы и арматура.** Насосы соединены с рабочей камерой трубопроводами высокого давления, которые собраны из одинаковых элементов — штуцеров 1 и соединительных муфт 2 (рис. 5).

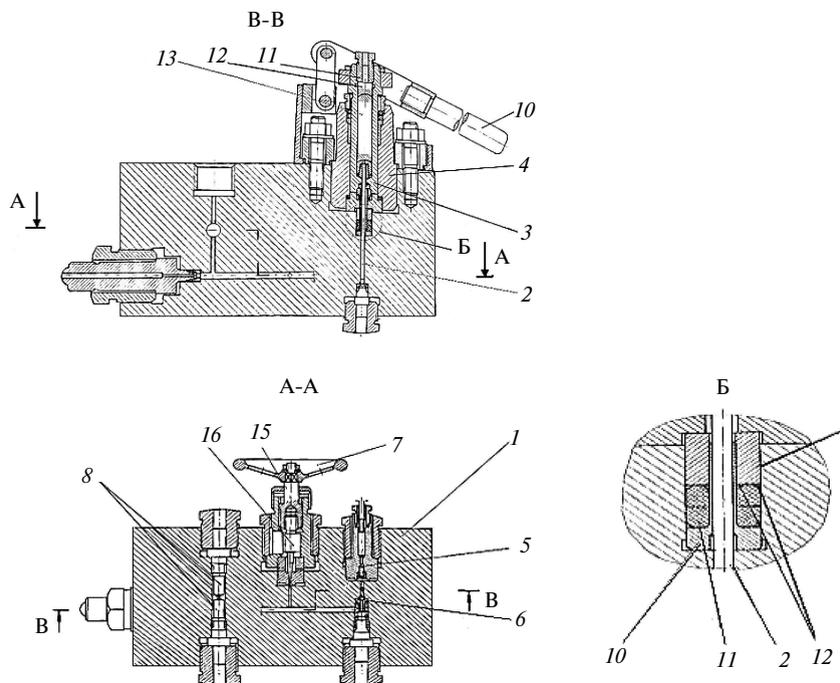


Рис. 4. Ручной плунжерный насос

Штуцеры изготовлены из стали X12M и подвержены термообработке до твердости HRC<sub>3</sub> 44–48. Они имеют на одном конце сферический оголовок и правую резьбу, на другом — сферическое углубление и левую резьбу. На противоположных сторонах муфты также выполнены правая и левая нарезки. Соединение двух штуцеров осуществляют вращением муфты, при этом соединяемые детали совершают лишь поступательные движения навстречу друг другу. Размеры штуцеров: наружный диаметр — 27 мм, диаметр отверстия — 4 мм, по длине они были изготовлены двух видов — 120 мм и 200 мм. Сферические поверхности штуцеров тщательно отполированы. Изменение направления трубопроводов достигается посредством угольников.

Для сообщения и разобщения полостей — наружной и внутренней образца, а также рас-

положенной под торцом плунжера, передающего на образец осевую силу, — использовался игольчатый запорный клапан, известный по экспериментам Бриджмена.

**Захваты для крепления образцов.** При экспериментальном изучении таких явлений, как, например, влияние вида напряженного состояния или шаровой части тензора напряжений на предельную деформируемость, кривые деформирования металлов и т. п., большое значение имеет повторяемость результатов опыта. Добиться последней при испытании образцов, выточенных из прутка, практически невозможно. Поэтому в опытах использовались образцы\*, нарезанные из тонкостенных цельнотянутых труб. Для закрепления этих образцов были сконструированы специальные захваты нескольких видов.

**Измерения давлений и перемещений.** Давления измерялись пружинными манометрами. Использовались образцовые манометры с диапазонами измерений 0–100, 0–400, 0–600 и 0–1000 кг/см<sup>2</sup>.

\* Первоначальные размеры образцов составили: наружный диаметр —  $d_n = 26,4$  мм, толщина стенки —  $t = 0,3$  мм. Разностенность не превышала 0,01 мм. Механические свойства материала образцов согласно сертификату таковы:  $\sigma_{0,2} = 325$  МПа,  $\sigma_5 = 45\%$ ,  $\sigma = 60\%$ .

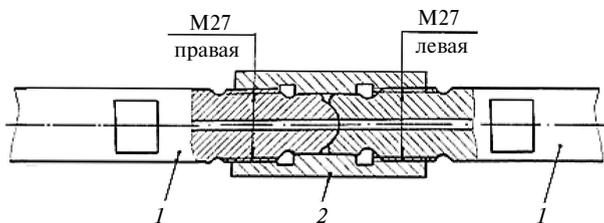


Рис. 5. Соединение деталей трубопровода

Все манометры подвергались тщательной проверке посредством грузопоршневого манометра МП-2500 с последующей регулировкой.

Измерения наружного диаметра и базовых длин на рабочей части образца производились с равной точностью соответственно при помощи микрометра и разметочного штангенциркуля\*. Осевую и окружную логарифмические деформации подсчитывали по известным формулам

$$\varepsilon_z = \ln \frac{L}{L_0}, \quad \varepsilon_\theta = \ln \frac{d_{cp}}{d_{cp0}}. \quad (1)$$

Радиальная деформация

$$\varepsilon_r = \ln \left( \frac{t}{t_0} \right) \quad (2)$$

находилась из условия постоянства объема:

$$\varepsilon_z + \varepsilon_\theta + \varepsilon_r = 0. \quad (3)$$

Здесь  $L$ ,  $d_{cp}$ ,  $t$  и  $L_0$ ,  $d_{cp0}$ ,  $t_0$  — соответственно текущие и начальные базовая длина, средний диаметр и толщина стенки образца.

#### Векторное представление тензоров. Двумерное пространство напряжений и деформаций Прагера — Ильюшина

**Напряжения, возникающие в образце.** В рассмотренной установке направления главных осей тензора напряжений остаются неизменными во всех опытах. Предполагается, что распределение напряжений остается однородным вплоть до локализации деформаций. При этом напряжения — осевое  $\sigma_z$ , окружное  $\sigma_\theta$ , радиальное  $\sigma_r$  — вычисляются по формулам [14, 15]

$$\begin{aligned} \sigma_z &= (p_B - p_H) \frac{d_{cp}}{4t} - \frac{1}{2} (p_B + p_H) + (p_H - p_0) \frac{d_0^2}{4d_{cp}t}; \\ \sigma_\theta &= (p_B - p_H) \frac{d_{cp}}{2t} - \frac{1}{2} (p_B + p_H); \\ \sigma_r &= -\frac{1}{2} (p_B + p_H), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $d_0$  — диаметр плунжера, передающего на образец осевую силу.

Таким образом, в установке могут быть реализованы напряженные состояния в диапазоне от осевого до кольцевого растяжений при различных уровнях шаровой части тензора напряжений.

#### Пути нагружения и деформирования в девиаторных плоскостях напряжений и деформаций.

\* Цена деления микрометра — 0,01 мм, штангенциркуля — 0,05 мм, но при этом базовый размер по образующей в 4–5 раз превышал диаметр образца.

При составлении программы опытов, выборе путей и методики нагружения, обработке результатов эксперимента использовали векторное представление тензоров, введенное Прандтлем [16] и Прагером [17] и развитое впоследствии А.А. Ильюшиным [18]. Это представление сводится к следующему: поскольку умеренное гидростатическое давление оказывает слабое влияние на пластические свойства металлов [19] и, кроме того, пластически деформируемый металл практически несжимаем, то напряженное состояние можно характеризовать девиатором напряжений, а соответствующее деформированное — девиатором деформаций. Таким образом, в общем случае названные девиаторы — напряжений и деформаций — могут быть представлены векторами в соответствующих пятимерных пространствах. При нагружении тонкостенной трубы наружным, внутренним давлениями и осевой силой напряженное и деформированное состояния задаются векторами в соответствующих двумерных пространствах. При этом компоненты векторов напряжений и деформаций соответственно определяются выражениями

$$\Sigma_1 = \sigma_z - \frac{\sigma_\theta}{2} - \frac{\sigma_r}{2}; \quad \Sigma_2 = \frac{\sqrt{3}}{2} (\sigma_\theta - \sigma_r); \quad (5)$$

$$E_1 = \varepsilon_z; \quad E_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} (\varepsilon_z + 2\varepsilon_\theta). \quad (6)$$

Компоненты названных векторов связывают с обобщенными (инвариантными относительно вида напряженного состояния) мерами напряженного и деформированного состояний формулами

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\Sigma_1^2 + \Sigma_2^2}; \quad (7)$$

$$\bar{\varepsilon} = \int \sqrt{dE_1^2 + dE_2^2}. \quad (8)$$

Здесь  $\bar{\sigma}$  и  $\bar{\varepsilon}$  — интенсивности напряжений и деформаций.

Таким образом, траектория нагружения материала со свойствами, не зависящими от среднего нормального напряжения  $\sigma_{cp}$ , (шаровая часть тензора напряжений) определяется некоторой кривой, расположенной в девиаторной плоскости.

Пропорциональный путь нагружения в плоскости  $\Sigma_1$ ,  $\Sigma_2$  можно задать углом вида напряженного состояния

$$\operatorname{tg} \psi = \Sigma_2 / \Sigma_1, \quad (9)$$

где  $\psi$  отсчитывается от оси  $\Sigma_1$ .

Лучи  $\psi = 0^\circ$ ,  $\psi = 120^\circ$  в названной плоскости представляют осевое и кольцевое растяжения. Для характеристики плоского напряженного состояния ( $\sigma_r \approx 0$ ) используют параметр  $\alpha = \sigma_\theta / \sigma_z$ . С учетом (5) легко устанавливается зависимость

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\sqrt{3}\alpha}{2-\alpha}. \quad (10)$$

Введенные в рассмотрение и использованные в дальнейшем пространства напряжений и деформаций получили в литературе названия пространств Прагера — Ильюшина.

### Результаты некоторых экспериментальных исследований

Ниже приведены результаты некоторых исследований, осуществленных на описанной выше установке [15, 20].

**Гипотеза единой кривой.** В теории малых упругопластических деформаций А.А. Ильюшина названная гипотеза формулируется как закон упругопластического упрочнения, согласно которому при любом сложнапряженном состоянии и простом (пропорциональном) нагружении существует универсальная (то есть инвариантная относительно вида напряженного состояния) зависимость между интенсивностью деформаций  $\bar{\epsilon}$  и интенсивностью напряжений  $\bar{\sigma}$ :

$$\bar{\sigma} = \Phi(\bar{\epsilon}). \quad (11)$$

Здесь  $\bar{\sigma} = \sqrt{3I_2(D_\sigma)} = \sqrt{\frac{3}{2}\sigma'_{ij}\sigma'_{ij}}$ ;

$$\bar{\epsilon} = \sqrt{\frac{4}{3}I_2(D_\epsilon)} = \sqrt{\frac{2}{3}\epsilon_{ij}\epsilon_{ij}}, \quad (12)$$

где  $I_2(D_\sigma)$ ,  $I_2(D_\epsilon)$  — вторые инварианты соответственно девиаторов напряжений и деформаций;  $\sigma'_{ij}$  — компоненты девиатора напряжений;  $\epsilon_{ij}$  — компоненты тензора деформаций ( $\epsilon'_{ij} = \epsilon_{ij}$  вследствие условия постоянства объема).

Результаты экспериментов, как подтверждающие рассматриваемый закон, так и противоречащие ему, проанализированы А.М. Жуковым [21]. Здесь сообщим результаты наших опытов.

Из одной цельнотянутой трубы стали Х18Н10Т нарезались две партии образцов. Образцы первой партии без какой-либо механической или термической обработки испытывались по лучам  $\psi = 0, 30, 60, 90$  и  $120^\circ$  до разрушения. Образцы, принадлежащие второй партии, предварительно деформировались по лучу  $\psi = 30^\circ$  до уровня остаточной деформации  $\bar{\epsilon} = 0,149$  (таким образом создавалась начальная анизотропия). Затем эти образцы подвергались нагружению по тем же пропорциональным путям вплоть до локализации деформаций и (или) разрушения [20]. По результатам испытаний образцов обеих партий были построены кривые  $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon})$  (рис. 6).

У исходных образцов наибольшее расхождение кривых по напряжениям составляло 7%. Максимальное расхождение графиков у предварительно деформированных образцов не

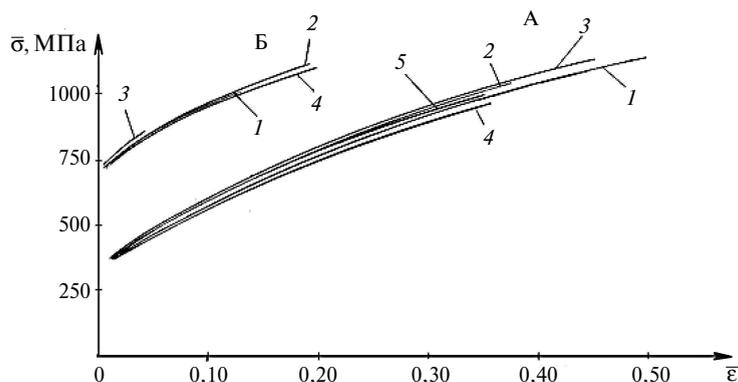


Рис. 6. Кривые  $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon})$ , построенные по результатам испытаний исходных и предварительно деформированных образцов:

- А — исходный материал; 1 —  $\psi = 0$ ; 2 —  $\psi = 30$ ; 3 —  $\psi = 60$ ;  
4 —  $\psi = 90$ ; 5 —  $\psi = 120$
- Б — начально анизотропный материал; 1 —  $\psi = 0$ ; 2 —  $\psi = 60$ ;  
3 —  $\psi = 90$ ; 4 —  $\psi = 120$

превышало 1,8 %. Имело место резкое увеличение сопротивления при существенном уменьшении предельных равномерных деформаций. Расположение кривых на рисунке позволяет заключить: как для исходного, так и для предварительно деформированного (начально анизотропного) материала вполне приемлема гипотеза единой кривой.

**Линейность путей деформирования.** Расхождение результатов эксперимента с предсказаниями теории некоторые исследователи объясняют влиянием приобретенной в ходе испытаний деформационной анизотропии, подтверждением которой может служить нарушение линейности траекторий деформирования, отвечающих путям пропорционального нагружения. Нами была произведена проверка линейности для простых (пропорциональных) путей нагружения. На рис. 7 представлены результаты, из которых следует, что на всех рассмотренных путях деформирования в промежутке однородных пластических деформаций (0,002–0,400) не наблюдается систематических отклонений экспериментальных точек от прямых линий.

**Экспериментальная проверка возможности применения теории Р. Хилла для исследования деформирования металлов с ортотропной анизотропией.** Теория пластичности анизотропных металлов, предложенная Р. Хиллом [19], широко используется в инженерной практике. В то же время мало работ, посвященных ее экспериментальной проверке [22–24]. Поскольку результаты названных работ весьма разноречивы, тщательная и разносторонняя проверка рассматриваемой теории вполне оправданна. Приведем ее основные положения.

Эта теория не учитывает деформационную анизотропию и справедлива только для ортотропных металлов. Упрочнение предполагают изотропным. Вводят понятия эквивалентного напряжения  $\bar{\sigma}$  и приращения эквивалентной деформации  $d\bar{\epsilon}$ , аналогичные таковым в теории пластичности изотропных металлов. Допускается функциональная зависимость  $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(w_p)$  между эквивалентным напряжением и пластической работой  $w_p$ , отнесенной к единице объема. Функция нагружения (условие пластичности) имеет вид

$$2f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_\theta - \sigma_r)^2 + G(\sigma_r - \sigma_z)^2 +$$

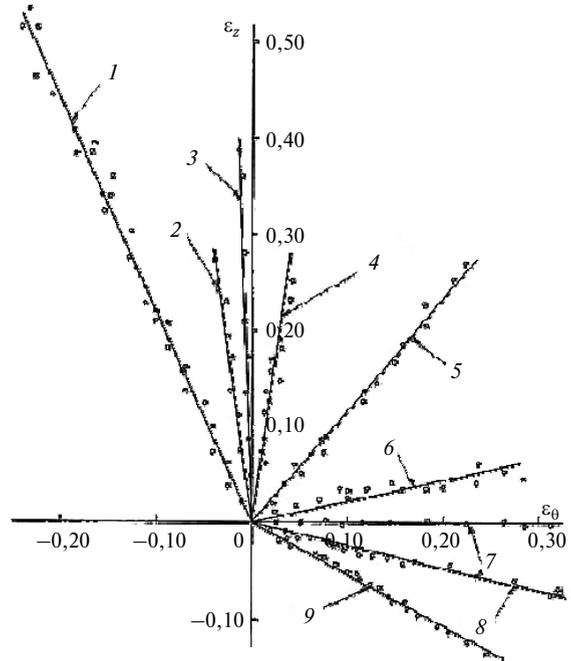


Рис.7. Проверка линейности путей деформирования, отвечающих путям пропорционального нагружения при углах, равных  $\psi = 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120^\circ$

1 —  $\psi = 0^\circ$  ( $\alpha = \sigma_\theta/\sigma_z = 0$ ); 2 —  $\psi = 15^\circ$  ( $\alpha = \sigma_\theta/\sigma_z = 0,27$ );  
3 —  $\psi = 30^\circ$  ( $\alpha = \sigma_\theta/\sigma_z = 0,5$ ); 4 —  $\psi = 45^\circ$  ( $\alpha = \sigma_\theta/\sigma_z = 0,73$ );  
5 —  $\psi = 60^\circ$  ( $\alpha = \sigma_\theta/\sigma_z = 1,0$ ); 6 —  $\psi = 75^\circ$  ( $\alpha = \sigma_\theta/\sigma_z = 1,37$ );  
 $\psi = 90^\circ$  ( $\alpha = \sigma_\theta/\sigma_z = 2,0$ ); 8 —  $\psi = 105^\circ$  ( $\alpha = \sigma_\theta/\sigma_z = 3,73$ );  
9 —  $\psi = 120^\circ$  ( $\alpha = \sigma_\theta/\sigma_z = \infty$ )

$$+ H(\sigma_z - \sigma_\theta)^2 + 2L\tau_{\theta r}^2 + 2M\tau_{rz}^2 + 2N\tau_{z\theta}^2 = 1, \quad (13)$$

где  $\sigma_z, \sigma_\theta, \sigma_r, \tau_{z\theta}, \tau_{\theta r}, \tau_{rz}$  — компоненты тензора напряжений;  $F, G, H, L, M, N$  — текущие параметры анизотропии.

Закон течения, ассоциированный с условием пластичности, определяется выражением

$$d\epsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}, \quad (14)$$

где  $d\lambda$  — множитель Лагранжа.

Поскольку  $f$  — пластический потенциал — совпадает с функцией нагружения, то согласно теореме Эйлера об однородных функциях получаются соотношения

$$dw_p = \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}^p = \sigma_{ij} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\lambda = 2fd\lambda = d\lambda, \quad (15)$$

где  $dw_p$  — приращение пластической работы, отнесенное к единице объема.

Кроме того, согласно [19] имеет место равенство

$$dw_p = \bar{\sigma} d\bar{\epsilon}. \quad (16)$$

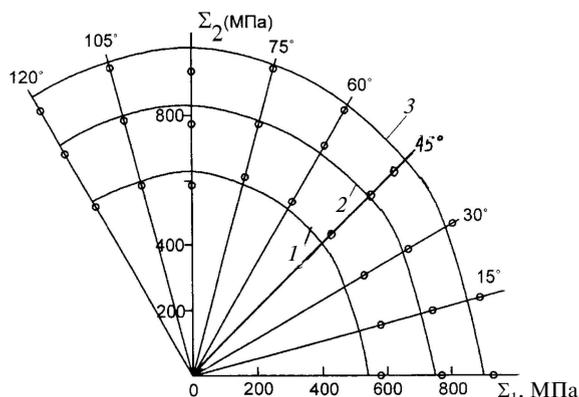


Рис. 8. Теоретические кривые нагружения при различных уровнях пластической работы.

○ — экспериментальные значения эквивалентного напряжения при трех значения  $W_p$ : 1 —  $W_p = 29,00$  Мдж/м<sup>3</sup>; 2 —  $W_p = 102,58$  Мдж/м<sup>3</sup>; 3 —  $W_p = 194,56$  Мдж/м<sup>3</sup>

Все подробности исследования, связанного с экспериментальной проверкой теории Хилла, приведены в нашей работе [25]. Здесь напомним только основной результат и выводы.

Поскольку теория предполагает совпадение функции нагружения и пластического потенциала, целесообразно оценку теории произвести, сравнивая кривые нагружения при постоянных уровнях пластической работы. Такое сравнение для трех значений пластической работы приведено на рис. 8. Теоретические значения  $\bar{\sigma}$  для каждого пути и соответствующего уровня пластической работы наносились на лучи в плоскости  $\Sigma_1$ ,  $\Sigma_2$  и соединялись кривыми.

Здесь же нанесены точки, определяющие экспериментальные значения эквивалентного напряжения.

По итогам проведенных экспериментов можно заключить: для использованной в опытах

хромоникелевой стали X18H10T в изученном диапазоне пропорциональных путей нагружения (и, по-видимому, для иных путей малой кривизны) все основные положения теории пластического течения Хилла для ортотропного металла подтверждаются с достаточной для практических целей точностью.

Заклячая статью, сформулируем некоторые выводы.

По сути, настоящая работа освещает некоторые результаты наших исследований в области экспериментальной пластичности и обработки металлов давлением за последние более чем тридцать лет. К сожалению, здесь оказались не затронутыми вопросы потери устойчивости пластического деформирования изотропных и анизотропных металлов, весьма важные для приложений, эксперименты по пластическому деформированию металлов по ломаным (двух- или трехзвенным) траекториям. Последние посвящались в основном проверке гипотез и постулатов деформационной теории пластичности. Не названы также результаты исследования кратковременной ползучести хромоникелевой стали при нормальной температуре [26, 27]. Тем не менее экспериментальные исследования подобного рода играют важную роль в понимании упругопластических, а также вязко-упруго-пластических процессов, в подтверждении или опровержении гипотез механики деформируемого твердого тела, многие из которых и по сегодняшний день остаются спорными. Кроме того, результаты таких исследований могут внести полезный вклад в разработку новых технологических процессов обработки материалов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горохов М.Ю., Мельников Б.Е., Семенов А.С. Циклическая нестабильность при расчетах больших упругопластических деформаций // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2003. № 3(33). С. 129.
2. Грешнов В.М. Модель вязкопластического тела с учетом истории нагружения // Изв. РАН. МТТ. 2005. №2. С. 117–125.
3. Пелешко В.А. К построению определяющих соотношений вязкоупругости и ползучести при нестационарных и сложных нагружениях // Изв. РАН. МТТ. 2006. №3. С. 144–165.
4. Хохлов А.В. Определяющее соотношение для реологических процессов: свойства теоретических кривых ползучести и моделирование затухания памяти // Изв. РАН. МТТ. 2007. №2. С. 147–165.
5. Бондарь В.С. Варианты теории неупругости // Изв. РАН. МТТ. 2011. №1. С. 90–95.
6. Мельников Б.Е., Семенов А.С., Семенов С.Г. Многомодельный анализ упругопластического деформирования материалов и конструкций. Современное состояние // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2010. № 53. С. 85–92.

7. **Богатырев И.С., Ильюшин А.А., Ленский В.С., Панферов В.М.** Машина СН для исследования пластического деформирования металлов при сложном нагружении // Инженерный журнал, 1961. №2. С. 150–163.
8. **Толоконников О.Л.** О влиянии гидростатического давления на конечное формоизменение несжимаемого материала // Общие задачи и методы исследования пластичности и вязкоупругости материалов и конструкций: Сборник АН СССР. / Уральский научный центр. 1986. С. 110–115.
9. **Гигиняк Ф.Ф., Шкодзинский О.К., Федоров Р.К., Сторчак М.В., Башта В.В.** Автоматизированный стенд для испытаний конструкционных материалов в условиях сложного напряженного состояния // Проблемы прочности. 1991. №10. С. 70–74.
10. **Ягн Ю.И., Изотов И.Н., Митюков А.Г.** Установка для испытаний материалов при объемном напряженном состоянии // Заводская лаборатория, 1973. №1. С. 92–94.
11. **Павлов П.А., Изотов И.Н., Кузнецов Н.П., Митюков А.Г., Симаненок А.Н.** Установка для испытаний материалов при объемном напряженном состоянии // Проблемы прочности, 1986, №2. С. 104–107.
12. **Шаховский Г.П. Гоникберг М.Г.** Вентиль точной регулировки // Приборы и техника эксперимента, 1966. №1. С. 218.
13. **Бриджмен П.** Физика высоких давлений / ОНТИ НКТП СССР. М., Л., 1935. 402 с.
14. **Мельников Б.Е., Митюков А.А., Митюков А.Г., Попов В.А.** Испытание трубчатых образцов в условиях кольцевого растяжения // Гидротехническое строительство. 2007. № 5. С. 77–79.
15. **Изотов И.Н., Кузнецов Н.П., Мельников Б.Е., Митюков А.Г.** Упругопластическое поведение стальных трубчатых образцов при сложном трехосном нагружении // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2003. № 3. С. 114.
16. **Prandtl L.** Spannungsverteilung in plastischen Körper, Verhandl // d. I Jnt. Kongr. Für tech Mechanik, 1924.
17. **Прагер В.** Влияние деформации на условие пластичности вязко–пластических тел // Теория пластичности: Сб. статей. М., 1948. С. 291–301.
18. **Ильюшин А.А.** О связи между напряжениями и малыми деформациями в механике сплошных сред // ПММ. 1954. Т. XVIII, Вып. 6. С. 641–666.
19. **Хилл Р.** Математическая теория пластичности. М.: ГИТТЛ, 1956. 407 с.
20. **Кузькин А.Ю., Мельников Б.Е., Митюков А.Г., Попов В.А.** Об использовании гипотезы «единой» кривой при исследовании неустойчивости пластического деформирования // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2006. № 48, Т. 1. С. 85–88.
21. **Жуков А.М.** Некоторые особенности поведения металлов при упруго-пластическом деформировании // Вопросы теории пластичности. М.: Изд-во АН СССР, 1961. С. 30–57.
22. **Фредеркинг Р.М., Сайдботтом О.М.** Экспериментальная проверка теорий пластичности анизотропных металлов // Труды АОИМ. 1971. С. 14–21.
23. **Дилламор И.Л., Дж. Хейзел, Уотсон Т.В., Хедден П.** Экспериментальное изучение механической анизотропии некоторых общепотребительных металлов: Сб. переводов // Механика, 1972. №5. С. 134–147.
24. **Кузькин А.Ю., Митюков А.А., Митюков А.Г., Попов В.А.** Экспериментальная проверка теории пластичности ортотропного металла с изотропным упрочнением // Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации материалов и конструкций: Сб. трудов XIV Международной научно-технической конференции. СПб., 2008. С. 130–139.
25. **Бердичевский Е.Г., Мельников Б.Е., Митюков А.А., Митюков А.Г., Попов В.А., Семенов С.Г.** Экспериментальное изучение деформирования металла с ортотропной анизотропией // Научно-технические ведомости. СПбГПУ. 2010. № 1(95). С. 193–198.
26. **Латышев Д.В., Митюков А.А., Петров М.Ю., Попов В.А.** Вязкопластические свойства хромоникелевой стали при возрастающих и постоянных нагрузках: Часть 1 // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер.: Наука и образование, 2012. № 2(147), Т. 2. С. 151–160.
27. **Латышев Д.В., Митюков А.А., Петров М.Ю., Попов В.А.** Об изменении коэффициента поперечной вязкопластической деформации. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер.: Наука и образование. 2012. № 4(159). С. 85–92.

## REFERENCES

1. **Gorokhov M.Yu., Melnikov B.Ye., Semenov A.S.** TSKlicheskaya nestabilnost pri raschetakh bolshikh uprugoplasticheskikh deformatsiy. *Nauchno-tehnicheskkiye vedomosti SPbGPU*. 2003. № 3(33). S. 129. (rus.)
2. **Greshnov V.M.** Model vyazkoplasticheskogo tela s uchetom istorii nagruzheniya. *Izv. RAN. MTT*. 2005. №2. S.117–125. (rus.)
3. **Peleshko V.A** K postroyeniyu opredelyayushchikh sootnosheniy vyazkouprugosti i polzuchesti pri nestatsionarnykh i slozhnykh nagruzheniyakh. *Izv. RAN. MTT*. 2006. №3. S.144–165. (rus.)
4. **Khokhlov A.V.** Opredelyayushcheye sootnosheniye dlya reologicheskikh protsessov: svoystva teoreticheskikh krivykh polzuchesti i modelirovaniye zatukhaniya pamyati. *Izv. RAN. MTT*. 2007. №2. S.147–165. (rus.)
5. **Bondar V.S.** Varianty teorii neuprugosti. *Izv. RAN. MTT*. 2011. №1. S. 90–95. (rus.)

6. **Melnikov B.Ye., Semenov A.S., Semenov S.G.** Многомоделный анализ упругопластического деформирования материалов и конструкций. Современное состояние. *Труды ТсНИИ им. акад. А.Н. Крылова*. 2010. № 53. С. 85–92. (rus.)
7. **Bogatyrev I.S., Ilyushin A.A., Lenskiy V.S., Panferov V.M.** Mashina SN dlya issledovaniya plasticheskogo deformatsionirovaniya metallov pri slozhnom nagruzhnenii. *Inzhenernyy zhurnal*, 1961. №2. С. 150–163. (rus.)
8. **Tolokonnikov O.L.** O vliyaniy gidrostaticheskogo davleniya na konechnoye formoizmeneniye neszhimayemogo materiala. *Obshchiye zadachi i metody issledovaniya plastichnosti i vyazkoprugosti materialov i konstruktsiy: Sbornik AN SSSR*. Uralskiy nauchnyy tsentr, 1986. С. 110–115. (rus.)
9. **Giginyak F.F., Shkodzinskiy O.K., Fedorov R.K., Storchak M.V., Bashta V.V.** Avtomatizirovannyi stend dlya ispytaniy konstruktsionnykh materialov v usloviyakh slozhnogo napryazhennogo sostoyaniya. *Problemy prochnosti*. 1991. №10. С. 70–74. (rus.)
10. **Yagn Yu.I., Izotov I.N., Mityukov A.G.** Ustanovka dlya ispytaniy materialov pri obyemnom napryazhennom sostoyanii. *Zavodskaya laboratoriya*, 1973. №1. С. 150–163. (rus.)
11. **Pavlov P.A., Izotov I.N., Kuznetsov N.P., Mityukov A.G., A.N.Simanenok.** Ustanovka dlya ispytaniy materialov pri obyemnom napryazhennom sostoyanii. *Problemy prochnosti*, 1986, №2. С. 104–107. (rus.)
12. **Shakhovskiy G.P., Gonikberg M.G.** Ventil tochnoy regulirovki. *Pribory i tekhnika eksperimenta*, 1966. №1. С. 218. (rus.)
13. **Bridzhmen P.** Fizika vysokikh davleniy. *ONTI NKTP SSSR*. M., L., 1935. 402 s. (rus.)
14. **Melnikov B.Ye., Mityukov A.A., Mityukov A.G., Popov V.A.** Ispytaniye trubchatykh obratstov v usloviyakh koltsevoogo rastyazheniya. *Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo*. 2007. № 5. С. 77–79. (rus.)
15. **Izotov I.N., Kuznetsov N.P., Melnikov B.Ye., Mityukov A.G.** Uprugoplasticheskoye povedeniye stalnykh trubchatykh obratstov pri slozhnom trekhosnom nagruzhnenii. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU*. 2003. № 3. С. 114. (rus.)
16. **Prandtl L.** Spanngugverteilung in plastischen Körper, *Verhandl / d. IJnt. Congr. Für tech Mechanik*. 1924. (rus.)
17. **Prager V.** Vliyaniye deformatsii na usloviye plastichnosti vyazko–plasticheskikh tel. *Teoriya plastichnosti: Sb. statey*. M., 1948. С. 291–301. (rus.)
18. **Ilyushin A.A.** O svyazi mezhdru napryazheniyami i malymi deformatsiyami v mekhanike sploshnykh sred. *PMM*. 1954. T. XVIII, Vip. 6. С. 641–666. (rus.)
19. **Khill R.** Matematicheskaya teoriya plastichnosti. M.: GITTL, 1956. 407 s. (rus.)
20. **Kuzkin A.Yu., Melnikov B.Ye., Mityukov A.G., Popov V.A.** Ob ispolzovanii gipotezy «yedinoy» krivoy pri issledovanii neustoychivosti plasticheskogo deformatsionirovaniya. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU*. 2006. № 48, T. 1. С. 85–88. (rus.)
21. **Zhukov A.M.** Nekotoryye osobennosti povedeniya metallov pri uprugo–plasticheskom deformatsionirovanii. *Voprosy teorii plastichnosti*. M.: AN SSSR, 1961. С. 30–57. (rus.)
22. **Frederking R.M., Saydbottom O.M.** Eksperimentalnaya proverka teorii plastichnosti anizotropnykh metallov. *Trudy AOIM*. 1971. С. 14–21. (rus.)
22. **Dillamor I.L., Dzh. Kheyzel, Uotson T.V., Kheden P.** Eksperimentalnoye izucheniye mekhanicheskoy anizotropii nekotorykh obshche-upotrebitelnykh metallov: Sb. perevodov. *Mekhanika*, 1972. №5. С. 134–147. (rus.)
23. **Kuzkin A.Yu., Mityukov A.A., Mityukov A.G., Popov V.A.** Eksperimentalnaya proverka teorii plastichnosti ortotropnogo metalla s izotropnym uprochneniyyem. *Problemy resursa i bezopasnoy ekspluatatsii materialov i konstruktsiy: Sb. trudov XIV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. SPb., 2008. С. 130–139. (rus.)
24. **Berdichevskiy Ye.G., Melnikov B.Ye., Mityukov A.A., Mityukov A.G., Popov V.A., Semenov S.G.** Eksperimentalnoye izucheniye deformatsionirovaniya metalla s ortotropnoy anizotropiyey. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU*. 2010. № 1(95). С. 193–198. (rus.)
25. **Latyshev D.V., Mityukov A.A., Petrov M.Yu., Popov V.A.** Vyazkoplasticheskkiye svoystva khromonikel'evoy stali pri vozrastayushchikh i postoyannykh nagruzhkakh. Chast 1. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU*. Ser.: Nauka i obrazovaniye. 2012. № 2 (147), Vol. 2. С. 151–160. (rus.)
26. **Latyshev D.V., Mityukov A.A., Petrov M.Yu., Popov V.A.** Ob izmenenii koeffitsiyenta poperechnoy vyazkoplasticheskoy deformatsii. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU*. Ser.: Nauka i obrazovaniye. 2012. № 4(159). С. 85–92. (rus.)

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**КУЗЬКИН Андрей Юрьевич** — кандидат технических наук доцент кафедры «КГМ и ТМ» Санкт-Петербургского государственного горного института имени Г.В. Плеханова; 199026, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21-я линия, 2, Россия; e-mail: kuskinay@bk.ru

**ЛАТЫШЕВ Дмитрий Викторович** — заведующий лабораторией кафедры строительных конструкций НовГУ им. Ярослава Мудрого; В.Новгород, ул. Великая д.9/3, кв.1; Russia; e-mail:drag@list.ru

**ПЕТРОВ Михаил Юрьевич** — старший преподаватель кафедры строительных конструкций НовГУ им. Ярослава Мудрого; В.Новгород, ул. К.Маркса, д. 13, кв. 29; Russia; e-mail:michael\_petrov@isn.ru

**ПОПОВ Владимир Алексеевич** — кандидат технических наук доцент кафедры художественной и пластической обработки материалов НовГУ им. Ярослава Мудрого; Великий Новгород, ул. Черняховского д.60, кв.16; Russia; e-mail: pva-pva-pva@yandex.ru

#### **AUTHORS**

**KUZKIN Andrey Yu.** — St. Petersburg state mining institute im. G.V.Plekhanova; 199026, Saint Petersburg, Vasilyevskiy is island, 21- I line, 2, Russia; e-mail: kuzkinay@bk.ru

**LATYSHEV Dmitriy V.** — Yaroslav-the-Wise Novgorod State University; V. Novgorod, ul Great d.9/3, kv.1; Russia; e mail:drag@list.ru

**PETROV Mikhail Yu.** — Yaroslav-the-Wise Novgorod State University; V.Novgorod, ul K. Marksa, d. 13, kv. 29; Russia; e mail:michael\_petrov@lism.ru

**ПОПОВ Vladimir A.** — Yaroslav-the-Wise Novgorod State University, V. Novgorod, ul Chernyakhovskogo of d. 60, kv. 16; Russia; e-mail: pva-pva-pva@yandex.ru

УДК 621.785

*Н.В. Безенкин*

## **ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА МЕДНЫХ ПОКОВОК СТЕНОК КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ**

*N.V. Bezenkin*

### **THE EFFECT OF PLASTIC DEFORMATION ON STUCTURE AND PROPERTIES OF COPPER PLATES IN CASTING MOLD**

Эффективность процесса непрерывного литья заготовок зависит от многих факторов, в частности от механических свойств рабочих стенок кристаллизаторов, служащих для отвода теплоты при формировании слитка. Анализировали образцы из бескислородной меди в диапазоне температур 23–400 °С. Исследованы зависимости механических свойств от температуры для образцов со степенью суммарной деформации от 15 до 85 %. Выявлено, что наилучшими эксплуатационными свойствами обладают стенки кристаллизаторов из бескислородной меди М-ЭЛП, деформированные до суммарной степени деформации 20–25 % при количестве проходов кузнечного бойка равном 10.

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ; НЕПРЕРЫВНОЕ ЛИТЬЕ; СБОРНЫЙ КРИСТАЛЛИЗАТОР; БЕСКИСЛОРОДНАЯ МЕДЬ; ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ.

The metal production efficiency in the case of continuous casting mostly depends on mechanical properties of copper plates in casting mold. Experiments had been provided on oxygen-free copper specimens under conditions of high-temperature — 23–400 °С. The relations betwen mechanical properties of deformed specimens (15–85 % degree of stain) and temperature had been studied. The casting mold plates made of oxygen-free copper were shown to have best operating propeties being deformed by 20–25 % degree of stain.

MATERIAL SCIENCE; CONTINUOUS CASTING; COPPER PLATE MOLD; OXYGEN-FREE COPPER ALLOY; PLASTIC DEFORMATION.

Металлургия относится к базовым отраслям передовых в промышленном отношении стран. Для развития отрасли в нашей стране необходимо повысить эффективность производственных процессов, ибо пока здесь низкая производительность труда, высокая стоимость изделий, велики затраты материалов и невысокое качество продукции. Одна из главных задач отечественной черной металлургии — повышение конкурентоспособности заготовок, полученных на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Кристаллизатор, служащий для отвода теплоты при кристаллизации затвердевающего металла, относится к ответственным узлам в МНЛЗ. Рабочие стенки кристаллизатора рабо-

тают в условиях циклических интенсивных тепловых потоков и термодинамических напряжений, интенсивного износа, разных типов коррозии, температур в диапазоне 20–550 °С. Срок службы стенок кристаллизаторов значительно меньше срока службы других сменных деталей МНЛЗ. Отказы приводят к простоям, авариям на производстве, влияют на экологическую безопасность и безопасность труда.

Для существующего отечественного производства медных кристаллизаторов характерны низкий технологический уровень, значительный износ оборудования, большая трудоемкость процесса, нерентабельность, низкий уровень качества продукции и, как следствие, ее неконкурент-

тоспособность на мировом рынке [1–5]. Применяемые сегодня технологии изготовления кристаллизаторов недостаточно совершенны и требуют научного обоснования, вследствие чего особую актуальность приобретает выбор материала и степени пластической деформации, обеспечивающих высокие эксплуатационные свойства кристаллизаторов.

Анализ публикаций и экспертные оценки специалистов показали, что на физико-механические свойства технической меди оказывают влияние в различной степени химический состав примесей, напряженно-деформированное состояние (литое, деформированное, отожженное), способ получения полуфабриката (прокатка, прессование, ковка, волочение), температура испытания, степень, скорость и дробность пластической деформации. В то же время в существующей научно-технической литературе нет рекомендаций по выбору наиболее эффективных технологических режимов получения медных стенок кристаллизаторов повышенной износостойкости и прочности [2–9].

Цель нашей работы заключалась в выборе технологии изготовления стенок кристаллизаторов из бескислородной меди, обладающих высокими эксплуатационными свойствами.

### Материал и методика

Для исследования напряженно-деформированного состояния и механических свойств заготовок стенок кристаллизаторов из бескислородной меди М-ЭЛП была проведена серия высокотемпературных испытаний на образцах с различной дробностью и степенью пластической деформации. Применялись методы механических испытаний в соответствии с ГОСТ 9651–84 и ГОСТ 1497–84. Исследования выполнены на испытательной машине ИМ12-А, снабженной муфельной печью для нагрева образцов и системой регулирования температуры.

Машина ИМ-12А рассчитана на максимальное разрывное усилие 120 кН. Конструктивно машина ИМ-12А относится к типу испытательных машин с механическим нагружением образца и механическим динамометром. Испытания проводили в диапазоне температур 20–400 °С. Время нагрева до заданной температуры и выдержку выбирали из условия равномерности распределения температуры по длине

образца и минимальной длительности испытаний. Общая продолжительность нагрева не превышала 60 мин. Время выдержки при каждой заданной температуре составляло 20 мин. Температуру регистрировали хромель-алюмелевой термопарой (диаметр проволоки 0,2 мм), закрепленной в центре рабочей части образца, и регулируемым потенциометром КСПЗ-П. Диапазон измерений составляет от –50 °С до 1000 °С.

Образец крепили в зажимах испытательной машины. На диаграммном записывающем устройстве воспроизводился процесс испытания в виде кривой, расположенной в системе координат «нагрузка — деформация». Масштабы записи по оси деформации находились в диапазоне 1–100 мм.

### Результаты экспериментов

На основании проведенных испытаний в диапазоне 23–500 °С были построены сериальные кривые (рис. 1), определены в зависимости от температуры испытания прочностные и пластические свойства материала кристаллизатора: условный предел прочности  $\sigma_B$ , относительное удлинение  $\delta$  и сужение  $\psi$ .

Как видно из графика, изображенного на рис. 1, с увеличением степени предварительной пластической деформации от 14 до 34 % во всем температурном диапазоне материала кристаллизатора наблюдается плавное увеличение прочностных свойств и скачкообразное уменьшение пластических свойств.

На рис. 2 приведены кривые изменения твердости меди в зависимости от температуры после различной степени деформации  $\varepsilon$ .

### Обсуждение результатов

Пластичность материала предопределяет износостойкость и усталостную прочность стенок кристаллизаторов. Для оценки указанных характеристик в качестве контрольной величины допускается использовать значение твердости *НВ* по Бринеллю. По результатам изменения твердости определяют интенсивности напряжений и деформаций в пластической области. Недостаток данной характеристики в том, что величина твердости не позволяет достаточно точно определить степень деформации сдвига, соответствующую разрушению металла [2]. В качестве локальной характеристики пластичности

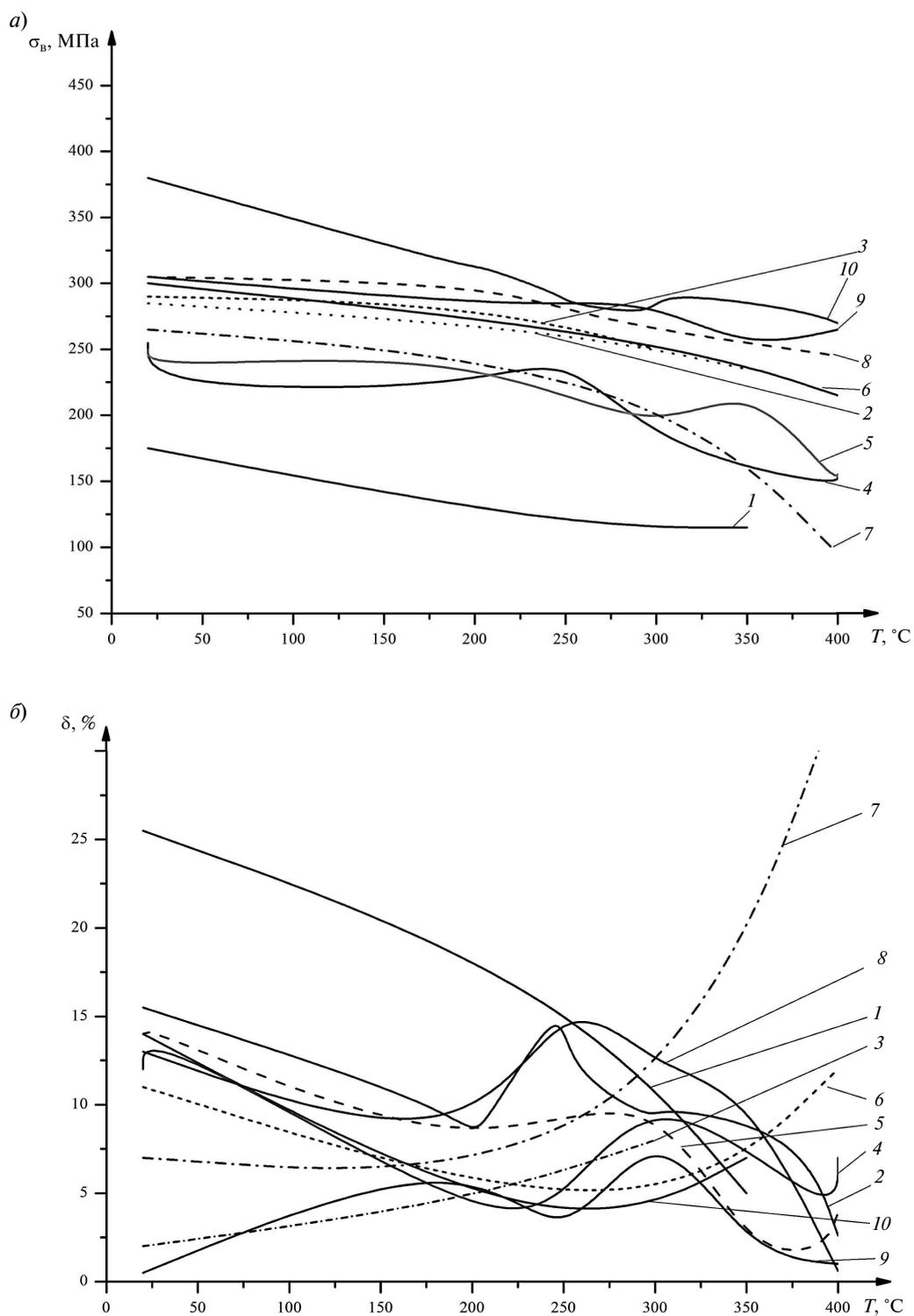


Рис. 1. Температурная зависимость предела прочности  $\sigma_B$  (а), удлинения  $\delta$  (б) и сужения  $\psi$  (в) меди после различной степени деформации  $\varepsilon$ , %:

14,28 (1); 34,2 (2); 34,2 (3); 37,5 (4); 40,6 (5); 42,5 (6); 50 (7); 70,6 (8); 73,45 (9); 82,3 (10)

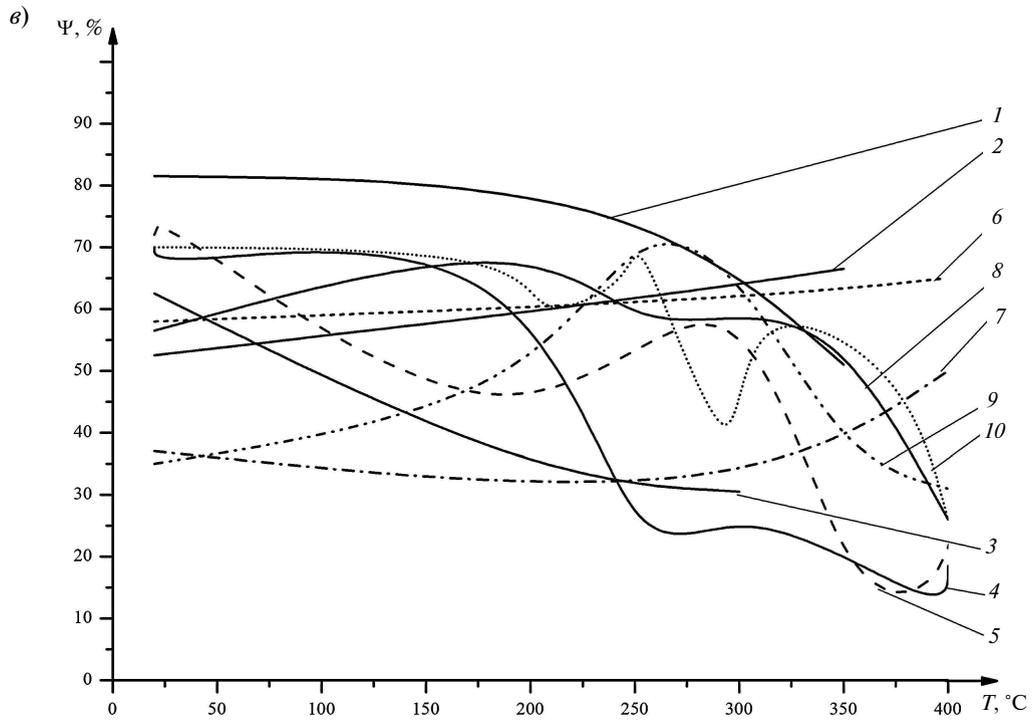


Рис. 1. (Окончание)

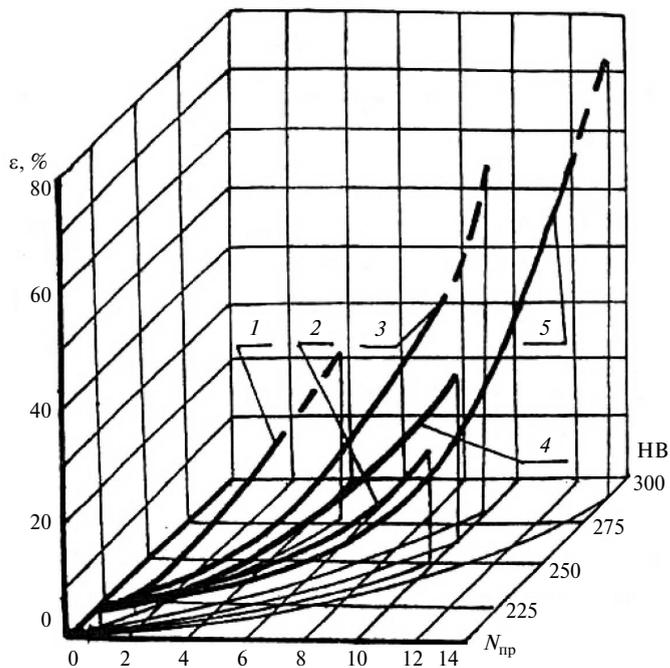


Рис. 2. Влияние дробного деформирования на показатели механических свойств стенок сборного кристаллизатора при холодной кузнечной протяжке:  
 1 —  $\varepsilon = 30\%$ ,  $N_{пр} = 5$ ; 2 —  $\varepsilon = 22\%$ ,  $N_{пр} = 10$ ; 3 —  $\varepsilon = 58\%$ ,  $N_{пр} = 10$ ; 4 —  $\varepsilon = 30\%$ ,  $N_{пр} = 10$ ; 5 —  $\varepsilon = 80\%$ ,  $N_{пр} = 14$

В.Л. Колмогоров [3] предложил два показателя напряженного состояния: показатель

$$\Pi = \frac{\sigma}{T_i} = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{\sqrt{3}\sigma_i}$$

(здесь  $T_i$  — интенсивность касательных напряжений,  $T_i = \frac{\sigma_i}{\sqrt{3}}$ ;  $\sigma_i$  — интенсивность нормальных напряжений;  $\sigma = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3$ ;  $\sigma$  — гидростатическое давление) и показатель Лоде

$$\mu_\sigma = \frac{2\sigma_{yy} - \sigma_{xx} - \sigma_{zz}}{\sigma_{xx} - \sigma_{zz}}$$

Показатель Лоде не зависит ни от формы шейки образца, ни от давления и остается неизменным в процессе испытания.

Оценка деформируемости материала основана на сопоставлении интенсивности деформации  $\epsilon_p$ , которую частица претерпела в процессе формоизменения, с критической интенсивностью деформации  $\epsilon_p$ , предсказанной по диаграмме пластичности.

Степень деформации сдвига  $\lambda_p$  при растяжении определяли по формуле, предложенной в [4]:

$$\lambda_p = 2\sqrt{3} \ln \frac{d_0}{d_p},$$

где  $d_0$  — исходный диаметр образца;  $d_p$  — диаметр образца в момент разрушения.

Диаграмма пластичности бескислородной меди М-ЭЛП в зависимости от суммарной относительной деформации  $\epsilon_\Sigma$  и количества  $N_{пр}$  проходов заготовки кузнечным бойком приведена на рис. 3 [4].

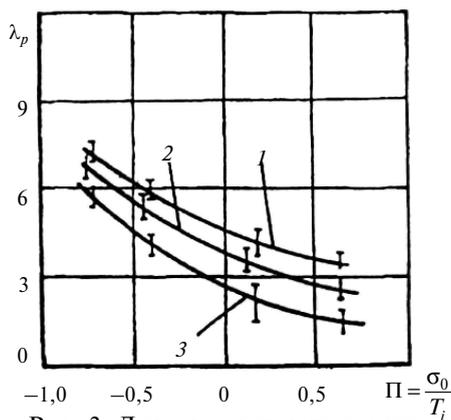


Рис. 3. Диаграмма пластичности меди М-ЭЛП в зависимости от суммарной степени деформации заготовки  $\epsilon$ :

1 —  $\epsilon = 0$ ; 2 —  $\epsilon = 22$ ,  $N_{пр} = 10$ ;  
3 —  $\epsilon = 73\%$ ,  $N_{пр} = 14$

Производственные испытания показали, что рационален следующий технологический режим предварительной пластической деформации материала заготовки кристаллизатора:  $\epsilon = 20-25\%$ ,  $N_{пр} = 10$ . Полученная мелкозернистая структура, соответствующая данному режиму, представлена на рис. 4, а.

Увеличение степени пластической деформации до 40 % за те же 10 проходов приводит к формированию вдоль границ зерен частиц второй фазы (концентраторы) в виде окислов и закислов меди (рис. 4, б), которые оказывают отрицательное влияние на пластичность, технологичность и коррозионную стойкость медной заготовки.

Дистракционная пластичность металла приводит к возникновению микронесплошности и образованию магистральных трещин [5]. Магистральные трещины можно устранить увеличением количества проходов бойка, но это снижает производительность процесса [5]. При степени деформации поковки, превышающей 37 %, образуется строчечная структура металла, которая ухудшает механические свойства медных стенок кристаллизаторов.

Улучшение механических свойств меди в результате их деформирования объясняется тем, что в деформированных зернах активное окисление границ зерен снижается, а прочность границ зерен уменьшается менее существенно. Кроме того, измельчение зерен при деформировании также способствует повышению прочности границ [7].

Механические свойства и однородность получаемой структуры медных стенок кристаллизаторов, формообразованных холодной кузнечной протяжкой, существенно зависят от неравномерности перераспределения дислокационных скоплений в процессе пластической деформации. Исследования плотности дислокаций выполнялись на электронном микроскопе Philips.

Установлено, что в исходном (литом) состоянии заготовки плотность дислокаций соответствует  $\rho_{дис} = 10^6-10^7$  см<sup>-2</sup>. Возникновение при холодном деформировании литой заготовки различного рода препятствий движению дислокаций обеспечивает увеличение плотности дислокаций до  $\rho_{дис} = 10^{11}-10^{13}$  см<sup>-2</sup> и делает их распределение более равномерным. Это благоприятный фактор, так как высокая плотность

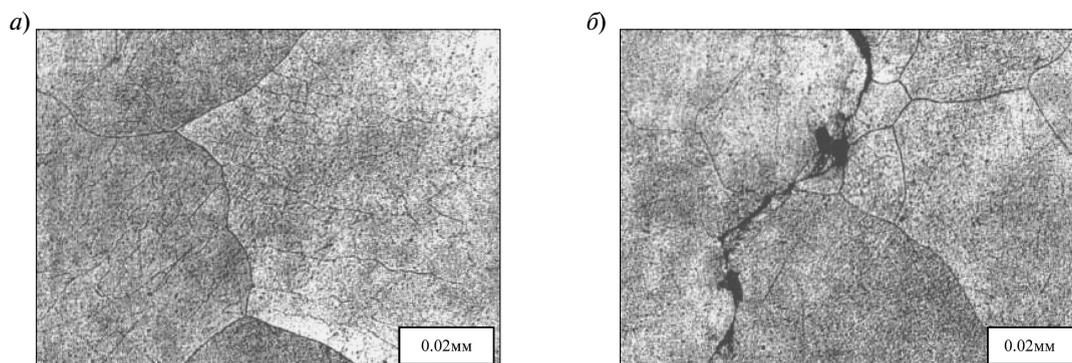


Рис. 4. Микроструктура материала стенки кристаллизатора после деформации:  
 а —  $\varepsilon = 22\%$ ,  $N_{пр} = 10$ ; б —  $\varepsilon = 40\%$ ,  $N_{пр} = 10$

дислокаций и равномерность их распределения способствуют локализации деформации.

При суммарной степени деформации более 37 % плотность  $\rho_{дис}$  дислокаций превышает  $10^{12} \text{ см}^{-2}$ , что приводит к значительному возрастанию взаимодействия полей от близко расположенных дислокаций и межкристаллитной деформации [2].

В результате перераспределения дислокационных скоплений в развитую субструктуру заготовки стенок кристаллизатора из бескислородной меди М-ЭЛП (99,98 % Cu; 0,002 % Vi; 0,002 % P; 0,004 % Fe; 0,001 % S; 0,001 % O<sub>2</sub>; 0,001 % Zn), формируемые при суммарной степени деформации  $\varepsilon = 20\text{--}25\%$ , имеют механические свойства, сопоставимые со свойствами горячекатаной меди М1р (99,9 % Cu+Ag, 0,002 % P).

Лучшие эксплуатационные характеристики имеют стенки кристаллизаторов из бескислородной меди М-ЭЛП, деформированные холодной кузнечной протяжкой до суммарной отно-

сительной деформации  $\varepsilon_{\Sigma} = 20\text{--}25\%$  при количестве проходов кузнечного бойка  $N_{пр} = 10$ .

В результате проведенных исследований установлено следующее:

с ростом степени предварительной пластической деформации поковок до 37 % улучшаются механические свойства стенок кристаллизаторов, работающих в диапазоне температур 970–1000 К за счет измельчения структуры и повышения прочности меди;

при увеличении числа проходов (дробность) пластической деформации происходит увеличение твердости (прочность) материала поковок;

в процессе холодной кузнечной протяжки поковок из меди М-ЭЛП при суммарной относительной деформации 20–25 % и количестве проходов кузнечного бойка 10 происходит улучшение механических свойств материала, что позволяет рекомендовать этот режим деформирования заготовки для изготовления стенок кристаллизаторов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Паршин В.М. Сооружение литейно-прокатных комплексов — решение проблемы производства конкурентоспособной продукции // Сталь. 1999. № 6. С. 26–28.
2. Аптекарева О.Н. Технология изготовления заготовок из бескислородной меди для стенок сборных кристаллизаторов: Автореф. дис. ... канд. тех. наук СПб., 2008. — 16 с.
3. Колмогоров В.Л. Пластичность и разрушение / Под ред. В.Л. Колмогорова. М.: Metallurgy, 1977. 336 с.
4. Абрамова Н.Б., Аптекарева О.Н., Востров В.Н. Надежность бойков для холодной кузнечной протяжки медных поковок // Металлообработка. 2010. № 3(57). С. 26–32.
5. Абрамова Н.Б., Аптекарева О.Н. Разработка технологии изготовления заготовок для медных стенок кристаллизаторов МНЛЗ // Заготовительные производства в машиностроении. 2007. №3. С. 53–55.
6. Паршин В.М., Буланов Л.В. Непрерывная разливка стали. Липецк: Изд-во ОАО «НЛМК», 2011. 221 с.

7. **Скворцов А.А., Акименко А.Д.** Теплопередача и затвердевание стали в установках непрерывной разливки. М.: Metallurgiya, 1966. 190 с.

8. **Ferry M.** Direct Stripcasting of Metals and Alloys: Processing, Microstructure and Properties.

Woodhead Publishing Limited and CRC Press LTD, 2006. 275 p.

9. **Sahai Y., Emi T.** Tundish Technology For Clean Steel Production. World Scientific Publishing Company. 2008. 316 p.

#### REFERENCES

1. **Parshin V.M.** Sooruzheniye liteyno-prokatnykh kompleksov — resheniye problemy proizvodstva konkurentosposobnoy produktsii. *Stal.* 1999. № 6. S. 26–28. (rus.)

2. **Aptekareva O.N.** Tekhnologiya izgotovleniya zagotovok iz beskislородной меди для стенок сборных кристаллизаторов: Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. SPb., 2008. 16 s. (rus.)

3. **Kolmogorov V.L.** Plastichnost i razrusheniye / Pod red. V.L. Kolmogorova. M.: Metallurgiya, 1977. 336 s. (rus.)

4. **Abramova N.B., Aptekareva O.N., Vostrov V.N.** Nadezhnost boykov dlya kholodnoy kuznechnoy protyazhki mednykh pokovok. *Metalloobrabotka.* 2010. № 3(57). S. 26–32. (rus.)

5. **Abramova N.B., Aptekareva O.N.** Razrabotka tekhnologii izgotovleniya zagotovok dlya mednykh stенок кристаллизаторов MNLZ. *Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyenii.* 2007. №3. S. 53–55. (rus.)

6. **Parshin V.M., Bulanov L.V.** Nepreryvnaya razlivka stali. — Lipetsk: Izd-vo OAO «NLMK», 2011. 221 s. (rus.)

7. **Skvortsov A.A., Akimenko A.D.** Teploperedacha i zatverdevaniye stali v ustanovkakh nepreryvnoy razlivki. M.: Metallurgiya, 1966. 190 s. (rus.)

8. **Ferry M.** Direct Stripcasting of Metals and Alloys: Processing, Microstructure and Properties. Woodhead Publishing Limited and CRC Press LTD. 2006. 275 p.

9. **Sahai Y., Emi T.** Tundish Technology For Clean Steel Production. World Scientific Publishing Company. 2008. 316 p.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**БЕЗЕНКИН Николай Валентинович** — аспирант Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: vol4arok@gmail.com

#### AUTHORS

**BEZENKIN Nikolay V.** — St.-Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya Str., St.-Petersburg, 195251, Russia. E-mail: vol4arok@gmail.com

УДК 621.867.212.3

*Ю.Н. Кожубаев, И.М. Семенов*

## **СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЛЕНТОЧНЫМ КОНВЕЙЕРОМ**

*Yu.N. Kozhubaev, I.M. Semenov*

### **CONTROL SYSTEMS FOR BELT CONVEYORS**

В статье выбран способ управления ленточными конвейерами с целью повысить их надежность. Определены входные и выходные лингвистические переменные, сформированы базы правил систем нечеткого вывода, построены графики терм-множеств входных и выходных лингвистических переменных с функциями принадлежности, реализован алгоритм Мамдани в качестве алгоритма нечеткого вывода, получена поверхность нечеткого вывода для системы нечеткого управления. С помощью специального пакета расширений Fuzzy Logic Toolbox в программной среде Matlab/Simulink разработана модель системы нечеткого управления. Доказана эффективность разработанной модели системы нечеткого управления, которая может быть использована при проектировании и эксплуатации многоприводных ленточных конвейеров.

ЛЕНТОЧНЫЙ КОНВЕЙЕР; НЕЧЕТКАЯ ЛОГИКА; СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ; ПРИВОД; НАДЕЖНОСТЬ; АВАРИЙНЫЙ РЕЖИМ; КОНВЕЙЕРНАЯ ЛЕНТА.

Chosen method of controlling the conveyor belt in order to improve its reliability. Defined input and output linguistic variables, formed the rule base of fuzzy inference systems, the graphs of the term-sets of input and output linguistic variables with the membership functions, the algorithm is implemented as a Mamdani fuzzy inference algorithm, the surface obtained fuzzy inference system for fuzzy control. With a special extension package Fuzzy Logic Toolbox in the software Matlab / Simulink simulation model is developed fuzzy control system. The efficacy of the developed model of fuzzy control, which can be used in the design and operation of multi-drive tape conveyors.

CONVEYOR SYSTEM; FUZZY LOGIC CONTROL SYSTEM; DRIVERS; RELIABILITY; EMERGENCY MODE; CONVEYOR BELT.

Конвейерный транспорт на шахтах, карьерах, рудниках, объектах подземного строительства получает все более широкое распространение вследствие существенных его преимуществ перед другими видами транспорта, обеспечивающих наибольшую технико-экономическую эффективность.

Вместе с тем становится все более очевидной необходимость обеспечения достаточной надежности ленточных конвейеров, т. к. снижение их надежности уменьшает пропускную способность всего технологического процесса

и уменьшает машинное время работы ленточных конвейеров. Снижение машинного времени работы ленточных конвейеров по мере снижения их надежности подтверждается данными, полученными в работе [1]. Как правило, аварийность работы ленточных конвейеров проявляется в потере устойчивости ленты на приводных барабанах (в проскальзывании ленты относительно приводных барабанов). Такой аварийный режим работы ленточных конвейеров принято называть пробуксовкой. Пробуксовка ленты на приводных барабанах ленточных конвейеров

является причиной простоев [2] и возникновения пожаров [3], сопровождаемых большими убытками, а иногда и человеческими жертвами.

В большинстве случаев пробуксовка ленты на приводных барабанах вызвана неравномерным распределением нагрузки между приводными барабанами в ленточных конвейерах. На перераспределение нагрузки влияют следующие возмущающие факторы: изменение радиусов приводных барабанов (износ, загрязнение); различная толщина верхней и нижней обкладок ленты, изменение упругости ленты; изменение общего тягового усилия и прочие факторы. Возможен режим, когда только один из приводных барабанов ведет ленту без пробуксовки, а на втором наблюдается существенная разница между линейной скоростью обода барабана и скоростью ленты. Подобный аварийный режим работы недопустим.

Поэтому цель данной работы — повышение надежности ленточных конвейеров за счет обеспечения равномерного распределения нагрузки между приводными барабанами, исключая возможность пробуксовки ленты.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- 1) выбрать способ обеспечения равномерного распределения нагрузки между приводными барабанами, при котором возможность пробуксовки была бы исключена;
- 2) разработать модель системы автоматического управления ленточным конвейером для реализации выбранного способа;
- 3) доказать эффективность разработанной модели системы автоматического управления ленточным конвейером и возможность ее использования, при проектировании и эксплуатации ленточных конвейеров.

Вопросы обеспечения надежной работы ленточных конвейеров рассмотрены в работах [4, 5]. Авторами предложена система автоматического управления натяжением ленты. Основной принцип работы заключается в том, что информация о натяжении сбегавшей ветви ленты  $S_{сб}$ , которое измеряется датчиком натяжения, поступает в блок управления, где сравниваются фактическое  $S_{сб}$  и заданное  $S_{сз}$  натяжения, а усиленный сигнал, соответствующий разности этих значений, формирует сигнал по управлению приводом натяжного устройства. Данный способ

имеет существенные недостатки. Увеличение общего натяжения может привести к снижению долговечности и даже к обрыву ленты.

Условие отсутствия пробуксовки ленты относительно приводного барабана можно записать в виде [6]

$$\frac{S_{нб}}{S_{сб}} \leq e^{\mu\alpha}, \quad (1)$$

где  $\mu$  — коэффициент сцепления ленты с приводным барабаном;  $S_{нб}$  и  $S_{сб}$  — натяжения ленты соответственно в точках набегания и сбегания с приводного барабана;  $\alpha$  — угол обхвата лентой приводного барабана;  $e^{\mu\alpha}$  — тяговый фактор приводного барабана.

Для обеспечения безаварийного режима работы ленточного конвейера предлагается введение коэффициента запаса по тяговому фактору  $K_{T\max} > 1$ . Получено выражение

$$\frac{S_{нб}}{S_{сб}} \leq \frac{e^{\mu\alpha}}{K_{T\max}}. \quad (2)$$

Для того чтобы обеспечить реализацию тяговых усилий, для каждого приводного барабана принято выбирать двигатели соответствующей мощности [7]. К примеру, мощность двигателей для ленточного конвейера с двумя приводами выбирается по формулам

$$N_1 = \frac{W_1 v_1}{1000 \eta_1} \quad (3)$$

и

$$N_2 = \frac{W_2 v_2}{1000 \eta_2}, \quad (4)$$

где  $N_1, N_2$  — мощности двигателей;  $v_1$  и  $v_2$  — скорости ленты на приводных барабанах;  $W_1, W_2$  — расчетные максимальные тяговые усилия приводных барабанов.

В процессе эксплуатации возможен износ ленты и футеровки на приводных барабанах, из-за которого могут изменяться значения тяговых усилий, что приводит к перераспределению нагрузок между барабанами и, как результат, создает предпосылки для аварийного режима работы конвейера. Таким образом, получается, что уже при расчетах и проектировании закладывается такое соотношение мощностей между приводами, при котором нагрузка на двигатели была бы неодинакова.

Данную проблему можно решить путем автоматического регулирования величины коэффициента распределения нагрузки —  $k_p$ .

Оптимальным значением коэффициента распределения нагрузки может быть такое значение  $k_p$ , при котором коэффициент запаса по тяговой способности  $K_{T\max}$  каждого приводного барабана с увеличением нагрузки исчерпывался бы равномерно, а величина коэффициента распределения нагрузки на приводах была бы пропорциональна характеристикам уже выбранных приводов с учетом окружных скоростей на каждом из приводных барабанах.

Тогда получаем следующую формулу:

$$k_p = \frac{S_{нб1}}{S_{сб1}} = \frac{S_{нб2}}{S_{сб2}} = K_{T\max}. \quad (5)$$

Также из формулы (2) получаем

$$\frac{e^{\mu\alpha} S_{сб}}{S_{нб}} \geq K_{T\max}. \quad (6)$$

Условия работы ленточного конвейера при отсутствии пробуксовки могут быть выражены формулами (7) и (8). Реализация этих условий может быть достигнута путем автоматического регулирования распределения величины моментов  $M_1$  и  $M_2$  на приводах. Отметим, что все изложенное справедливо для ленточных конвейеров с любым числом приводов.

Наиболее подходящими для реализации автоматического управления ленточными конвейерами являются системы нечеткого управления с нечетким регулятором. Основные преимущества системы нечеткого управления перед другими системами: значительное повышение быстродействия процессов управления при использовании нечетких контроллеров; возможность создания систем управления для объектов, алгоритмы функционирования которых трудно формализуемы методами традиционной математики; повышение точности алгоритмов фильтрации случайных возмущений при обработке информации от датчиков.

Принцип системы нечеткого управления базируется на теории нечетких множеств, основные идеи которой были предложены американским математиком Лотфи Заде [8, 9] и позволяют описывать качественные, неточные понятия и знания об окружающем мире, а также оперировать этими знаниями с целью получения новой информации. При разработке и моделировании системы нечеткого управления используем программную среду MATLAB. Для реализации процесса нечеткого моделирования в среде

MATLAB предназначен специальный пакет расширения Fuzzy Logic Toolbox, который позволяет выполнять необходимые действия с нечеткими моделями.

Для реализации нечеткого управления необходимо сформировать эвристические правила. С учетом экспериментальных данных предложены следующие эвристические правила:

1) ЕСЛИ  $K_{T1}/K_{T2}$  меньше нормы, а  $K_{T\max}$  в пределах нормы, то следует оставить  $M_2/M_1$  без изменений;

2) ЕСЛИ  $K_{T1}/K_{T2}$  в пределах нормы и  $K_{T\max}$  в пределах нормы, то следует оставить  $M_2/M_1$  без изменений;

3) ЕСЛИ  $K_{T1}/K_{T2}$  больше нормы, а  $K_{T\max}$  в пределах нормы, то следует оставить  $M_2/M_1$  без изменений;

4) ЕСЛИ  $K_{T1}/K_{T2}$  в пределах нормы, а  $K_{T\max}$  меньше нормы, то следует оставить  $M_2/M_1$  без изменений;

5) ЕСЛИ  $K_{T1}/K_{T2}$  меньше нормы, а  $K_{T\max}$  меньше нормы, то следует уменьшить  $M_2/M_1$ ;

6) ЕСЛИ  $K_{T1}/K_{T2}$  больше нормы, а  $K_{T\max}$  меньше нормы, то следует увеличить  $M_2/M_1$ .

В качестве входных лингвистических переменных выбираем  $f_1 - K_{T1}/K_{T2}$ ,  $f_2 - K_{T\max}$ , в качестве выходной  $f_3 - M_2/M_1$ . Тогда получим следующие правила:

ПРАВИЛО\_1: ЕСЛИ « $f_1$  есть  $L1$ » И « $f_2$  есть  $N2$ » ТО « $f_3$  есть  $N3$ ».

ПРАВИЛО\_2: ЕСЛИ « $f_1$  есть  $N1$ » И « $f_2$  есть  $N2$ » ТО « $f_3$  есть  $N3$ ».

ПРАВИЛО\_3: ЕСЛИ « $f_1$  есть  $R1$ » И « $f_2$  есть  $N2$ » ТО « $f_3$  есть  $N3$ ».

ПРАВИЛО\_4: ЕСЛИ « $f_1$  есть  $N1$ » И « $f_2$  есть  $L2$ » ТО « $f_3$  есть  $N3$ ».

ПРАВИЛО\_5: ЕСЛИ « $f_1$  есть  $L1$ » И « $f_2$  есть  $L2$ » ТО « $f_3$  есть  $L3$ ».

ПРАВИЛО\_6: ЕСЛИ « $f_1$  есть  $R1$ » И « $f_2$  есть  $L2$ » ТО « $f_3$  есть  $R3$ ».

В качестве терм-множеств первой лингвистической переменной  $f_1$  будем использовать множество  $T_1 = \{\text{«меньше нормы»}, \text{«норма»}, \text{«больше нормы»}\}$ , или в символическом виде  $T_1 = \{L_1, N_1, R_1\}$  с функциями принадлежности, изображенными на рис. 1, а. В качестве терм-множества второй лингвистической переменной будем использовать множество  $T_2 = \{\text{«меньше нормы»}, \text{«норма»}\}$ , или в символическом виде  $T_2 = \{L_2, N_2\}$  с функциями принадлежности,

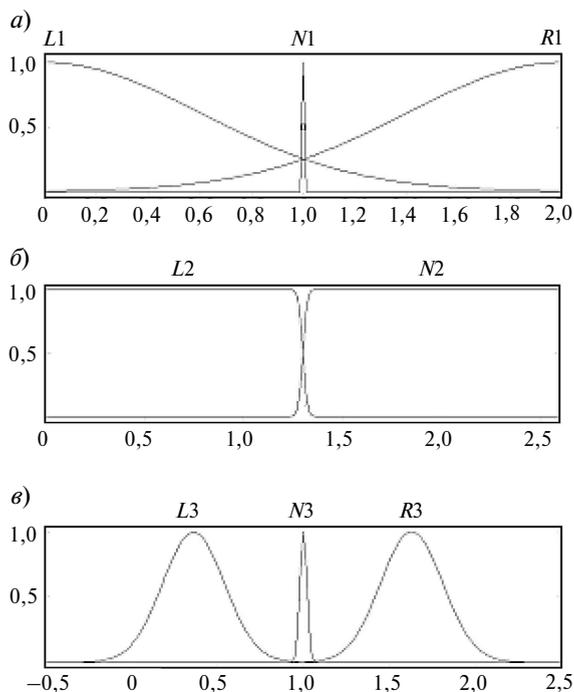


Рис. 1. Графики функций принадлежности лингвистических переменных терм-множеств

изображенными на рис. 1, б. В качестве терм-множества выходной лингвистической переменной будем использовать множество  $T_3 = \{\text{«уменьшить момент } M_2 \text{ относительно } M_1\text{»}, \text{«оставить момент } M_2 \text{ равным } M_1\text{»}, \text{«увеличить момент } M_2 \text{ относительно } M_1\text{»}\}$ , или в символическом виде  $T_3 = \{L_3, N_3, R_3\}$  с функциями принадлежности, изображенными на рис. 1, в.

В качестве алгоритма выбираем алгоритм Мамдани, который нашел широкое применение в системах нечеткого вывода.

Следующий этап нечеткого вывода — активизация заключений в нечетких правилах продукций.

Аккумуляция заключений нечетких правил продукций с использованием операции максимизации приводит к получению нечеткого множества. Дефаззификация выходных лингвистических переменных методом центра площади для значений функции принадлежности приводит к получению значения управляющей переменной, равной величине изменения  $M_2/M_1$ . Это значение и есть результат решения задачи нечеткого вывода для текущих значений входных величин.

Для общего анализа разработанной модели нечеткого управления может оказаться полезной визуализация полученной поверхности нечеткого вывода (рис. 2). Поверхность нечеткого вывода позволяет установить зависимость значений выходной лингвистической переменной от значений входных лингвистических переменных нечеткой модели системы управления ленточным конвейером. Эта зависимость может послужить основой для программирования контроллера или аппаратной реализации соответствующего нечеткого алгоритма управления в форме таблицы решений. В дополнение к этому установление данной зависимости является, по сути, решением задачи, известной в классической теории управления как задача синтеза управляющих воздействий. При этом для ее решения использованы средства нечеткой логики и теории нечетких множеств.

Отметим, что все написанное выше можно распространить на ленточные конвейеры с любым числом приводов. Если число приводных барабанов более двух, то следует рассматривать последовательно каждую пару, причем один и тот же приводной барабан в одной паре будет первым, а в соседней этот же барабан будет вторым.

Для реализации разработанной нечеткой модели используем разработанную имитационную

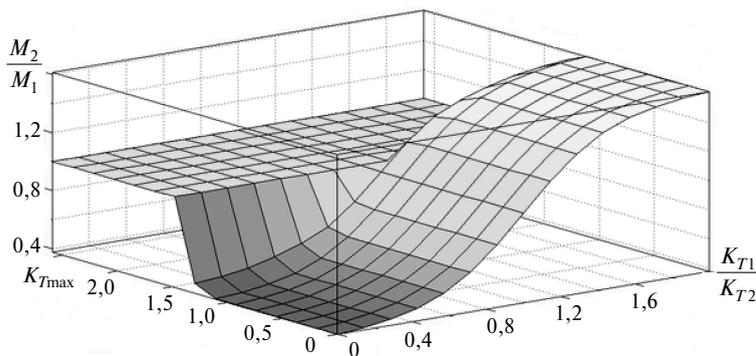


Рис. 2. Поверхность нечеткого вывода

модель ленточного конвейера в программной среде Matlab/Simulink [10]. Параметры выбранного ленточного конвейера близки к параметрам конвейеров, используемых при строительстве подземных сооружений для проходки тоннелей; о чем говорят следующие данные:

Длина конвейера, $L$ , м .....	3900
Ширина ленты, $H_L$ , мм .....	1000
Тип конвейера .....	Туннельный
Высота подъема, $H_L$ , м .....	64
Транспортируемый материал .....	Суглинок, торф и песок
Плотность материала, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> .....	1667
Производительность, $Q_{\max}$ , т/ч .....	1000
Скорость движения ленты, $v$ , м/с .....	3,5
Мощность двигателей, $N_p$ , кВт .....	5×160
Тип привода .....	Конический мотор-редуктор с частотным регулятором

На рис. 3 представлены результаты экспериментальных исследований работы имитационной модели ленточного конвейера в режиме пуска незагруженного конвейера (с 0 по 7 секунды), при работе конвейера с установившейся скоростью ленты 3,5 м/с и производительностью 1000 т/ч (с 7 по 200 секунды), при остановке конвейера (с 200 по 207 секунды) и при пуске уже загруженного конвейера (с 230 по 240 секунды).

На рис. 3, а и б — результаты моделирования работы имитационной модели ленточного конвейера с моделью системы нечеткого управления (рис. 3, а) и без нее (рис. 3, б). Видно, что с помощью разработанной системы нечеткого управления удалось существенно увеличить коэффициент запаса по тяговой способности, что повышает надежность ленточного конвейера.

Таким образом, в рамках статьи выбран способ управления ленточными конвейерами с целью повысить их надежность. Определены входные и выходные лингвистические переменные, сформированы базы правил систем нечеткого вывода, построены графики терм-множеств входных и выходных лингвистических переменных с функциями принадлежности, реализован алгоритм Мамдани в качестве алгоритма нечеткого вывода, получена поверхность нечеткого вывода для системы нечеткого управления. С помощью специального пакета расширений Fuzzy Logic Toolbox в программной среде Matlab/Simulink разработана модель системы нечеткого управления. Доказана эффективность разработанной модели системы нечеткого управления, которая может быть использована при проектировании и эксплуатации многоприводных ленточных конвейеров.

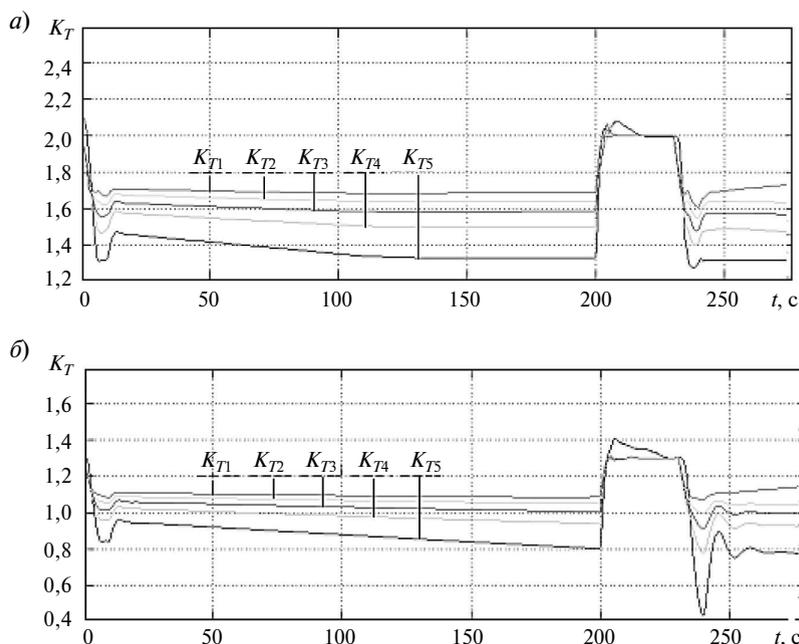


Рис. 3. Графики изменения коэффициентов запаса по тяговой способности на приводных барабанах

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Хачатрян С.А.**, Проблемы надежности конвейерного транспорта угольных шахт. СПб.: Изд-во СПбГТУ «Горный», 2004. 182 с.
2. **Волоткинский В.С., Кармаев Г.Д., Драя М.И.** Выбор оборудования карьерного конвейерного транспорта. М.: Недра, 1990. 192 с.
3. **Буткий Н.В., Белик И.П., Маркович Ю.М.** Пожарная безопасность подземных ленточных конвейеров // Безопасность труда в промышленности. 1988. №7. С. 44–45.
4. **Шахмейстер Л.Г., Дмитриев В.Г.** Теория и расчет ленточных конвейеров. М.: Машиностроение, 1987. 336 с.
5. **Шахмейстер Л.Г., Солод Г.И.** Подземные конвейерные установки / Под ред. чл.-кор. АН СССР А.О.Спиваковского. М.: Недра, 1976. 432 с.
6. **Галкин В.И., Дмитриев В.Г., Дьяченко В.П., Запенин И.В., Шешко Е.Е.** Современная теория ленточных конвейеров горных предприятий. М.: Изд-во МГГУ, 2005. 543с.
7. **Ромакин Н.Е.** Машины непрерывного транспорта: учеб. пособие для студ. Высш. учеб. заведений. М.: Изд-во центр «Академия», 2008. 432с.
8. **Zade L.A.** Fuzzy sets // *Information and Control*. 1965. Vol. 8. P. 338–353.
9. **Zade L.A.** Fuzzy logic // *IEEE Transactions on Computers*. 1988, Vol. 21, № 4, P. 83–93.
10. **Кожубаев Ю.Н., Прокофьев О.В., Семенов И.М.** Имитационная модель ленточного конвейера. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2011. №3(130). С. 116–121.

## REFERENCES

1. **Khachatryan S.A.** Problemy nadezhnosti konveyernogo transporta ugolnykh shakht. SPb.: Izd-vo SPbGTU «Gornyy», 2004. 182 s. (rus.)
2. **Volotkinskiy V.S., Karmayev G.D., Draya M.I.** Vybor oborudovaniya karyernogo konveyernogo transporta. M.: Nedra, 1990. 192 s. (rus.)
3. **Butkiy N.V., Belik I.P., Markovich Yu.M.** Pozharnaya bezopasnost podzemnykh lentochnykh konveyerov. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*. 1988. №7. S. 44–45. (rus.)
4. **Shakhmeyster L.G., Dmitriyev V.G.** Teoriya i raschet lentochnykh konveyerov. M.: Mashinostroyeniye, 1987 336 s. (rus.)
5. **Shakhmeyster L.G., Solod G.I.** Podzemnyye konveyernyye ustanovki / Pod red. chl.-kor. AN SSSR A.O.Spivakovskogo. M.: Nedra, 1976. 432 s. (rus.)
6. **Galkin V.I., Dmitriyev V.G., Dyachenko V.P., Zapenin I.V., Sheshko Ye.Ye.** Sovremennaya teoriya lentochnykh konveyerov gornnykh predpriyatiy. M.: Izd-vo MGGU, 2005. 543 s. (rus.)
7. **Romakin N.Ye.** Mashiny nepreryvnogo transporta: ucheb. posobiye dlya stud. Vyssh. ucheb. zavedeniy. M.: Izd-vo tsentr «Akademiya», 2008. 432 s. (rus.)
8. **Zade L.A.** Fuzzy sets. *Information and Control*. 1965. Vol. 8. P. 338–353.,
9. **Zade L.A.** Fuzzy logic. *IEEE Transactions on Computers*, 1988. Vol. 21, № 4, P. 83–93. (rus.)
10. **Kozhubayev Yu.N., Prokofyev O.V., Semenov I.M.** Imitatsionnaya model lentochnogo konveyera. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU*. 2011. №3(130). S. 116–121. (rus.)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**КОЖУБАЕВ Юрий Нургалевич** — аспирант кафедры систем и технологий управления института информационных технологий и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.21, Россия; e-mail: um-urii@rambler.ru

**СЕМЁНОВ Игорь Михайлович** — кандидат технических наук профессор кафедры систем и технологий управления института информационных технологий и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21, Россия; e-mail: semenov@saugtu.nord.nw.ru

## AUTHOR

**KOZHUBAEV Yurii N.** — St.-Petersburg state polytechnical University. 194021, St.-Petersburg, street Polytechnical, 21, Russia, tel.:89112502000 e-mail: um-urii@rambler.ru

**SEME NOV Igor M.** — St.-Petersburg state polytechnical university. 194021, St.-Petersburg, street Polytechnical, 21, Russia; tel.: e-mail: semenov@saugtu.nord.nw.ru



УДК 621.7.015

*Э.Л. Жуков, С.А. Любомудров,  
М.М. Радкевич, О.Ю. Ротаренко*

## **ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЗАНИЯ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ СПЛАВОВ**

*E.L. Zhukov, S.A. Lyubomudrov,  
M.M. Radkevich, O.Yu. Rotarenko*

### **THE INFLUENCE OF THE CUTTING ON THE SURFACE QUALITY OF DETAILS MADE FROM PROMISING HARD-TO-PROCESS MATERIALS**

Приведены исследования высотных параметров шероховатости поверхности в зависимости от скорости резания и размерного износа режущего инструмента при чистовой токарной обработке титанового и алюминиевого сплавов. Предоставлены рекомендации по выбору скорости резания с целью получения минимального значения высотных параметров шероховатости поверхности.

ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ; ЧИСЛЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ ШЕРОХОВАТОСТИ; СКОРОСТЬ РЕЗАНИЯ; РАЗМЕРНЫЙ ИЗНОС; ЧИСТОВОЕ ТОЧЕНИЕ.

Studies of high-altitude parameters of surface roughness, depending of the speed and size of wear of the cutting tool with finish machining of titanium and aluminium alloys. Recommendations of selection cutting speeds with the aim of obtaining the minimum value of high-altitude parameters of surface roughness

SURFACE ROUGHNESS; NUMERAL PARAMETERS OF SURFACE ROUGHNESS; SPEED OF CUTTING; WEAR DIMENSIONAL; FINISHING TURNING.

Качество деталей в машиностроении определяется величиной отклонений размеров, формы, взаимного расположения элементов деталей и параметров шероховатости поверхности.

В современном машиностроении возросла роль качества поверхности в функциональном назначении детали [1].

Требования к качеству поверхности устанавливаются с целью обеспечения требуемых функциональных свойств поверхности и определяются его численными значениями, величина которых должна обеспечить требуемые эксплуатационные характеристики.

В машиностроении, особенно при обработке цветных сплавов, нередко, когда это позволяет точность станков [2], детали окончательно получают чистовым точением. Поэтому вопрос получения требуемой величины параметров шероховатости поверхности при чистовом точении заготовок из цветных сплавов — актуальная задача.

На величину численных параметров шероховатости поверхности изготовленной детали оказывают влияния многие технологические факторы. При обработке резанием величина, форма и направление микронеровностей зависят от методов, режимов, схемы обработки и геометрии инструмента. Из параметров режимов резания наиболее существенное влияние на величину шероховатости поверхности оказывают скорость резания и подача инструмента.

Влияние скорости резания на шероховатость поверхности зависит от образования нароста на режущей кромке инструмента, от захвата и отрыва слоев, расположенных под режущей кромкой резца, а также от наличия и величины вибраций при точении.

Влияние подачи инструмента на шероховатость в первом приближении определяется из сопоставления двух смежных положений резца, смещенных на величину подачи, по формуле

$$Rz = \frac{S^2}{8r} \text{ мкм}, \quad (1)$$

где  $Rz$  — параметр шероховатости (средняя высота профиля по 10 точкам);  $S$  — величина подачи на оборот;  $r$  — радиус при вершине резца [3].

Эта формула вполне справедлива для варианта обработки стальных заготовок резцами с радиусом закругления режущей кромки.

Подобные рекомендации по расчету параметров шероховатости поверхности в зависимости от скорости резания отсутствуют.

Проведенные ранее исследования при точении заготовок из сталей показали, что значения параметров шероховатости при увеличении скорости резания сначала улучшаются, а по достижении определенного значения снова начинают ухудшаться [4].

В числе других основных причин возникновения микронеровности — колебания, которые часто возникают во время резания. Наличие колебаний и их величина зависят от скорости резания [5].

Конкретные рекомендации по выбору скорости резания исходя из получения минимальных численных значений параметров шероховатости поверхности при точении цветных сплавов практически в публикациях отсутствуют.

В большинстве машиностроительных чертежей деталей задается параметр шероховатости  $Ra$  (среднеарифметическое отклонение профиля) как наиболее информативный.

Другой высотный параметр —  $Rz$  (средняя высота профиля по десяти точкам) — в чертежах применяется реже, хотя именно он лучше характеризует качество лезвийной обработки поверхности.

С учетом изложенного представляется важным проведение исследований влияния скорости резания и других параметров технологического процесса на величину численных параметров шероховатости поверхности с целью нахождения зоны устойчивого резания, в которой значения этих параметров минимальны.

Цель нашей работы — определить интервал скоростей резания при обработке точением жаропрочных материалов на основе титана и алюминия, в котором значения параметров шероховатости минимальны и резание носит устойчивый характер. Кроме того, необходимо определить максимальную стойкость инструмента, при которой параметры шероховатости имеют прием-

лемые значения. Цель достигается за счет проведения экспериментальных исследований и анализа процесса резания.

### Материалы и методика

В современном машиностроении все чаще применяются высокоточные детали из титановых сплавов [6], к которым предъявляют повышенные требования к точности размеров и минимальным значениям параметров шероховатости поверхности.

Значения параметра шероховатости  $Ra$  на различных рабочих поверхностях может достигать величины 0,4–0,2 мкм, например в деталях авиационных двигателей [7]. Высокая точность размеров и формы диктует повышенные требования к шероховатости поверхности, при этом примерное соотношение значения параметра шероховатости  $Ra$  и допуска на размер составляет один к десяти [8].

Предприятия ОАО «Объединенная двигателестроительная корпорация», по заказу которой проводились исследования, широко применяют сплавы на основе титана и порошковые сплавы на основе алюминия. Эти сплавы имеют высокие эксплуатационные характеристики при пониженной массе изготавливаемых из них деталей.

Типичные представители этих сплавов — титановый сплав ВТ1–00 и порошковый сплав на основе алюминия САС-400. Именно на них и отработывалась методика определения рациональных режимов резания с целью обеспечения требуемых численных параметров шероховатости поверхности.

Методика экспериментальных исследований основана на проведении однофакторного эксперимента по точению деталей из названных выше сплавов при различных скоростях резания.

Материал и геометрия режущего инструмента выбирались согласно рекомендациям фирмы-производителя инструмента.

Для оценки шероховатости поверхности использовались два численных параметра —  $Ra$  и  $Rz$ : первый как наиболее часто используемый, а второй как лучше характеризующий процесс резания. Кроме того, соотношение этих параметров дает информацию об устойчивости процесса резания. При устойчивом резании резцом с радиусом при вершине соотношение между значениями параметров  $Ra$  и  $Rz$  постоянно,

а именно выдерживается примерное соотношение  $4Ra \approx Rz$ .

По графикам зависимости численных параметров шероховатости от скорости резания и их соотношения определялся интервал скоростей резания, обеспечивающий приемлемые значения параметров шероховатости.

Для дальнейшего анализа формы профиля при некоторых скоростях резания записывалась профилограмма обработанной поверхности.

По данным размерный износ режущего инструмента значительно влияет на шероховатость обрабатываемой поверхности [9]. До достижения износом определенной величины значение параметров шероховатости поверхности меняется мало, а после достижения этой величины — резко возрастает.

Для проверки этой гипотезы были проведены эксперименты по определению значения параметра шероховатости  $Ra$  в зависимости от величины размерного износа резца. Для этого последовательно обрабатывались заготовки из порошкового алюминиевого сплава и периодически измерялись размерный износ и высотный параметр шероховатости  $Ra$ .

#### Экспериментальная установка

Для проведения исследований на кафедре технологии машиностроения СПбГПУ была создана экспериментальная установка.

Исследования проводились на универсальном токарном станке высокой точности — 16Б16КА; он имеет достаточный диапазон скоростей, а частота вращения шпинделя может быть установлена от 16 до 2000 об/мин.

Обрабатываемые заготовки имели цилиндрическую форму и крепились в шпинделе станка с помощью специальной оправки. Такая схема крепления обеспечивает большую жесткость.

После обработки заготовок параметры шероховатости  $Ra$  и  $Rz$  измерялись с помощью профилометра-профилографа М400 фирмы Маhr.

Основные технические характеристики этого прибора:

измеряемые характеристики — полный профиль, волнистость и шероховатость;

измерительная система — индуктивная система со сменными щупами с радиусом закругления 2 мкм; измерительное усилие составляет 0,7 мкН, крепление наконечников магнитное;

фильтры — гауссов фильтр и  $Ls$ -фильтр; прибор позволяет измерять параметры DIN/ISO ( $Ra$ ,  $Rq$ ,  $Rz$ ,  $R_{max}$ ,  $Rp$ ,  $Rv$ ,  $Rpk$ ,  $Rk$ ,  $Rvk$ ,  $Mr1$ ,  $Mr2$ ,  $A1$ ,  $A2$ ,  $Vo$ ,  $Rt$ ,  $R3z$ ,  $RPc$ ,  $Rmr(3x)$ ,  $HSC$ ,  $RSm$ ,  $Rsk$ ,  $Rdc$ ,  $Rdq$ ,  $Pa$ ,  $Pt$ ,  $PMr(3x)$ ,  $Pdc$ ) и MOTIF ( $R$ ,  $Ar$ ,  $Rx$ ,  $W$ ,  $Wx$ ,  $Wte$ ,  $CR$ ,  $CL$ ,  $CF$ ,  $NR$ ,  $NCRx$ ,  $NW$ ); отсечка шага — 0,08, 0,25, 0,8 и 2,5 мм, причем производится автоматически;

скорость трассирования — 0,2 и 1 мм/с.

Для измерения размерного износа режущего инструмента применялось расположенное в задней бабке токарного станка приспособление, которое изображено на рис. 1.

Датчик 2 измеряет положение вершины режущего инструмента. Датчик 1 измеряет положение державки резца. Предварительно датчики настраивают на ноль. Индуктивные датчики подключают к измерительной системе М-200. Разность между показаниями датчиков и является величиной износа инструмента. Цена деления датчиков — 0,1 мкм, рабочий ход составляет  $\pm 1$  мм.

#### Проведение экспериментов

При обработке титанового сплава ВТ1–00 согласно рекомендациям [10] был выбран инструмент с пластиной твердого сплава VCGX160404-AL N10 и следующие режимы резания: подача  $S = 0,1$  мм/об и глубина резания  $t = 0,3$  мм. Скорость резания менялась от 40 до 500 м/мин.

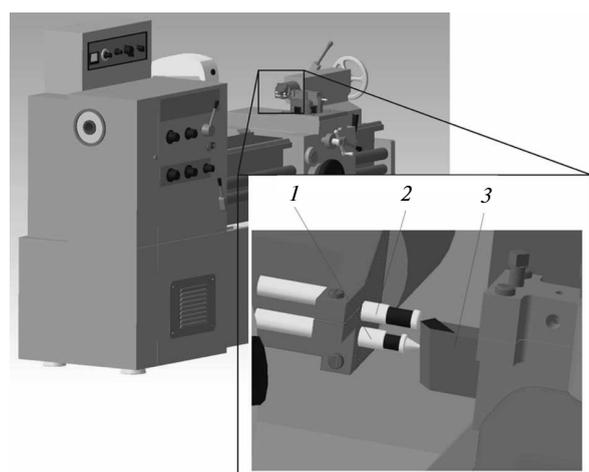


Рис. 1. Устройство для измерения размерного износа инструмента на токарном станке:

1 — датчик, измеряющий положение державки резца;  
2 — датчик, измеряющий положение вершины резца;  
3 — резец

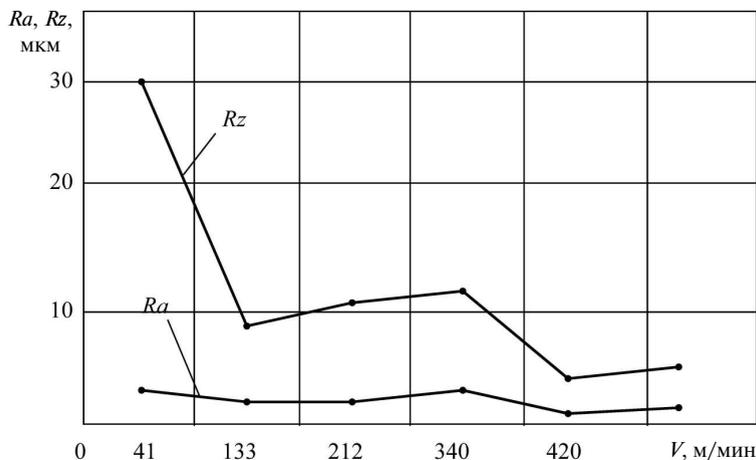


Рис. 2. Зависимость высотных параметров шероховатости поверхности от скорости резания при точении титанового сплава

Протачивались заготовки цилиндрической формы диаметром 100–120 мм и длиной 80 мм.

Численные значения параметров шероховатости измерялись в различных точках обработанной детали (от пяти до десяти точек), находилось их среднее значение.

Зависимости параметров шероховатости от скорости резания  $V$  приведены на рис. 2.

Графики на рис. 2 показывают, что наиболее рациональная скорость резания для обеспечения шероховатости поверхности при точении титанового сплава ВТ1–00 — около 420 м/мин.

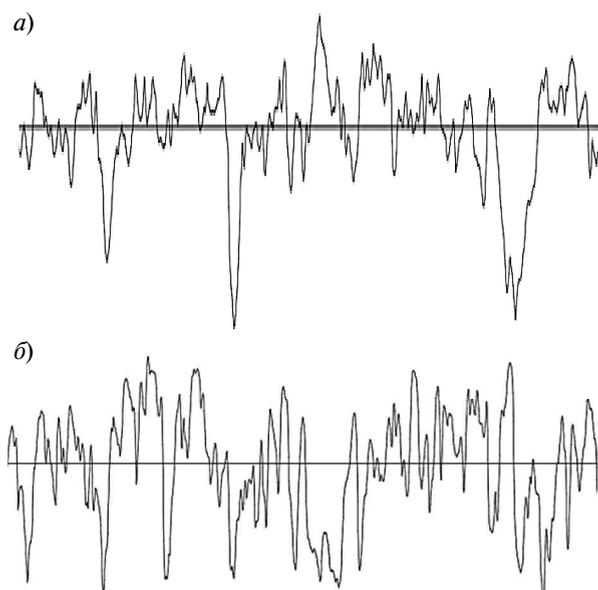


Рис. 3. Профилограмма поверхности детали при скорости резания 312 (а) и 526 (б) м/мин

При скоростях 212 и 526 м/мин были сняты профилограммы поверхности обработанной детали, которые приведены на рис. 3.

Точение заготовок из алюминиевого сплава диаметром 150 мм велось согласно рекомендациям [11] при следующих режимах резания: глубина резания — 0,1 мм, подача — 0,02 мм/об, скорость резания менялась и принимала значения соответственно 100, 200, 300, 400 и 600 м/мин.

После точения заготовок на профилографе-профилометре измеряли значения параметров  $Ra$  и  $Rz$  в десяти точках по длине заготовки и находили средний размер указанных параметров. Зависимости значения среднего значения численных параметров шероховатости поверхности от скорости резания приведены на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что при малых скоростях резания значения параметров шероховатости весьма значительны, а при увеличении скорости резания они уменьшаются и достигают минимума при скорости 400 м/мин. Далее численные значения параметров снова увеличиваются.

Для определения зависимости параметра шероховатости  $Ra$  от величины размерного износа были проведены эксперименты по точению алюминиевого сплава резцом из композита 01 при глубине резания 0,1 мм, подаче 0,02 мм/об и скорости резания 405 м/мин.

Зависимость значения параметра  $Ra$  от величины размерного износа резца  $i$  приведена на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что при достижении резцом размерного износа 8 мкм происходит резкое уве-

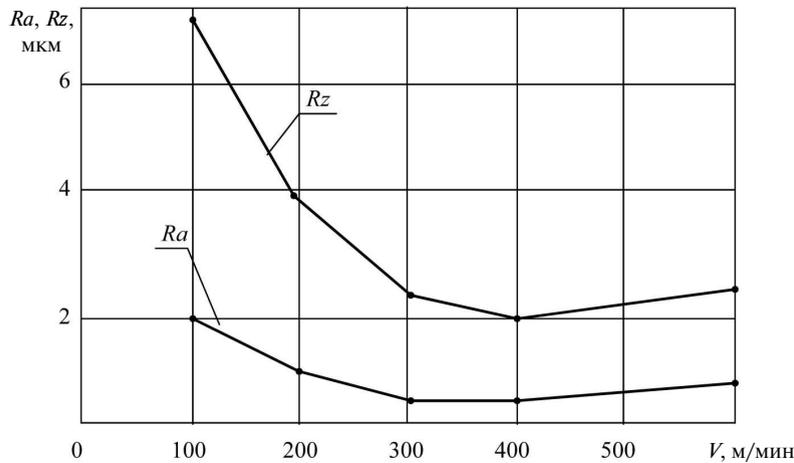


Рис. 4. Зависимость высотных параметров шероховатости поверхности от скорости резания при точении алюминиевого сплава

личение значения параметра  $Ra$ . При этом путь резания, пройденный резцом, составляет примерно 25 км.

#### Анализ результатов

Из графиков на рис. 2 видно, что при точении титанового сплава имеется значительная разница между величинами параметров  $Ra$  и  $Rz$  при малых скоростях резания  $V$ , что свидетельствует о нерегулярном характере шероховатости. Это видно и на профилограмме поверхности обработанной детали (рис. 3). На рис. 3, а показана профилограмма поверхности детали после обработки со скоростью 212 м/мин, на ней видны четкие следы инструмента в виде борозд, которые значительно превышают среднее значения высоты профиля на других участках. Это свидетельствует о наличии наростообразования при резании.

В зоне образования нароста, который возникает при малых скоростях, значение параметра  $Rz$  значительно превышает значение параметра  $Ra$ . Вершина нароста, выступая впереди лезвия резца и ниже линии реза, увеличивает шероховатость лезвия, формирующего обработанную поверхность, оставляет на поверхности среза глубокие борозды и разрывы, которые влияют на значение параметра  $Rz$  больше, чем на параметр  $Ra$ , поскольку параметр  $Ra$  является средним значением и учитывает все факторы, влияющие на шероховатость поверхности, а параметр  $Rz$  — максимальная высота профиля по 10 точкам — отражает один доминирующий фак-

тор, который в этом случае сильно превосходит остальные.

При скорости резания около 100 м/мин параметр  $Rz$  имеет значение 30 мкм, а параметр  $Ra$  — значение 3,1 мкм.

При скоростях резания выше 450 м/мин величина шероховатости начинает увеличиваться по сравнению с зоной оптимального резания. Это связано с возникновением колебаний в зоне резания.

Колебания особенно заметны, если технологическая система неустойчива [12]. Колебания инструмента отражаются на поверхности и увеличивают численные значения параметров шероховатости поверхности. Соотношение параметров  $Rz$  и  $Ra$  снова начинает увеличиваться. На рис. 3, б показана профилограмма поверх-

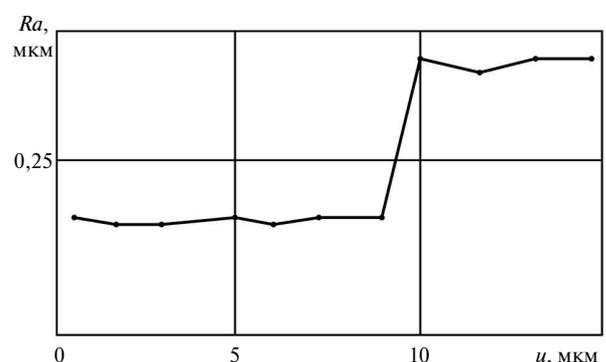


Рис. 5. Зависимость параметра  $Ra$  от размерного износа инструмента  $u$  при обработке алюминиевого сплава

ности детали после обработки со скоростью 526 м/мин, на ней четко видны следы колебаний.

Исследования по точению порошкового алюминиевого сплава САС-400 резцами из кубического нитрида бора дали такой же результат, что и при точении титана.

Исследования зависимости параметра  $Ra$  от размерного износа инструмента (ее график приведен на рис. 5) показали, что до того, как износ достигнет определенной величины, шероховатость поверхности практически не меняется. Резкое ухудшение шероховатости происходит при достижении резцом из кубического нитрида бора величины размерного износа 8,2 мкм. Значение параметра  $Ra$  при этом изменилось с 0,18 до 0,43 мкм.

Характер размерного износа после этого не изменился, но на задней грани резца появилась четко различимая в микроскопе фаска износа.

Этот момент резкого ухудшения шероховатости целесообразно считать границей стойкости инструмента. Учитывая, что путь резания до этого момента составил 25 км, а скорость резания была 405 м/мин, стойкость инструмента составила 61 минуту.

Приведенные выше данные исследований позволили сделать следующие выводы.

Полученные в результате экспериментов зависимости высотных параметров шероховатости поверхности от скорости резания имеют выраженный минимум. Для титанового сплава ВТ1-00 он наступает при 420 об/мин, для алюминиевого сплава САС-400 — при 400 м/мин.

В зонах неустойчивого резания наблюдается большая разница между значениями параметров  $Ra$  и  $Rz$  и изменяется их соотношение; в зоне устойчивого резания это соотношение минимально.

В результате экспериментов по точению алюминиевого сплава САС-400 выяснилось, что при достижении резцом размерного износа 8 мкм параметр шероховатости  $Ra$  резко ухудшается.

Проведенные исследования позволили определить зону устойчивого резания. Эта зона находится для сплава ВТ1-00 в диапазоне скоростей резания от 400 до 500 м/мин, для САС-400 — в диапазоне от 350 до 450 м/мин. В этих зонах и рекомендуется проводить обработку указанных сплавов.

Момент резкого ухудшения шероховатости можно считать границей стойкости инструмента при чистовом точении цветных сплавов. Для резца из композита 01 при точении сплава САС-400 стойкость инструмента составила 1 час.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Табенкин А.Н., Тарасов С.Б., Степанов С.Н. Шероховатость, волнистость, профиль. Международный опыт / Под ред. Н.А. Табачниковой. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та 2007. 136 с.
2. Анухин В.И., Макарова Т.А., Любомудров С.А. Оценка точностных возможностей токарных станков // «Вестник Инжексона». Сер.: Технические науки. Вып. 3. Санкт-Петербург. 2005. С. 108–111.
3. Жуков Э.Л. [и др.] Основы технологии машиностроения. Этапы проектирования и точность технологических процессов : учеб. пособие / Под общ. ред. С.Л. Мурашкина. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 408 с.
4. Рыжкин А.А., Шучев К.Г., Климов М.М. Обработка металлов резанием. Ростов на Дону: Феникс, 2008. 411 с.
5. Мурашкин С.Л., Схиртладзе А.Г., Соболейчик А.М., Жуков Э.Л., Козарь И.И., Розовский Б.Я., Дегтярев В.В. Технология машиностроения. Колебания и точность при обработке материалов резанием: Учеб. пособие / Под ред. С.А. Мурашкина СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. 280 с.
6. Иноземцев А.А., Башкатов И.Г., Коряковцев А.С. Титановые сплавы в изделиях разработки ОАО «Авиадвигатель» // Современные титановые сплавы и проблемы их развития: Сборник. М.: ВИАМ, 2010. С. 43–46.
7. Соловейчик А.М. [и др.]. Технологическое обеспечение качества изделий в машиностроении: учебное пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 250 с.
8. Анухин В.И. Допуски и посадки: учеб. пособие. 5-е изд. СПб. : Питер, 2012. 244 с.
9. Любомудров С.А., Макарова Т.А. Обеспечение качества обработки специальных алюминиевых сплавов при тонком точении // Управление качеством: проблемы, исследования, опыт: Сборник научных трудов. СПб.: СПбГИЭУ, 2007. Вып. 5. С. 86–97.
10. Руководство по металлообработке. Технический справочник. АВ Sandvik Coromant. 2010. 201 с.
11. Зубарев Ю.М., Парсегов О.В. Прогрессивный режущий инструмент на основе кубического нитрида бора. Л.: ЛДНТП, 1988. 32 с.
12. Козарь И.И., Соловейчик А.М., Колодяжный Д.Ю., Плавник С.Л. Устойчивость движения технологических систем при прерывистой обработке // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2006. № 2(44). С. 91–97.

## REFERENCES

1. **Tabenkin A.N., Tarasov S.B., Stepanov S.N.** Roughness, waviness, profile. International experience / Pod red. N.A. Tabachnikovoi. SPb.: Izd-vo Politechn. Un-ta 2007. 136 s. (rus.)
2. **Anuchin V.I., Makarova T.A., Lyubomudrov S.A.** Appraisal precision possibility of lathes. *Magazine messenger of Injecon. Series of technical science.* SPb. 2005. Issue 3. S. 108–111. (rus.)
3. **Zhukov E.L.** [and other]. Technological basics of machine-building. Stages of project and accuracy of manufacturing processes: Manual / Pod red. prof. S.L. Murashkina SPb.: Izd-vo Politechn. un-ta, 2008. 408 s. (rus.)
4. **Ryzhkin A.A., Shusev K.G., Klimov M.M.** Machining of metal by cutting. Rostov-in-Don: Feniks, 2008. 411 s. (rus.)
5. **Murashkin S.L., Skritladze A.G., Soloveichik A.M., Zhukov E.L., Kozar I.I., Rozovski B.I., Degtiarev V.V.** Technology of machine-building. Vibration and accuracy during machining of metal by cutting: Manual / Pod red. S.A. Murashkina. SPb.: Izd-vo Politechn. un-ta, 2003. 280 s. (rus.)
6. **Inozemtsev A.A., Bashkatov I.G., Koryukovtsev A.S.** Alloys of titan for the pieces of the OAO «Aviation engine». Modern alloys of titan and problems of progress: a Collection. M.: VIAM, 2010. S. 43–46. (rus.)
7. **Soloveichik A.M. [and others.]** Technological guaranteeing of the quality of pieces in the machine-building: Manual. SPb.: Izd-vo Politechn. un-ta, 2010. 250 s. (rus.)
8. **Anuchin V.I.** Tolerances and fits: Manual. 5-e izd. SPb.: Peter, 2012. 244 s. (rus.)
9. **Lyubomudrov S.A., Makarova T.A.** Guaranteeing of the quality of cutting special pac alloys during finish turning. *Management of quality: problems, researches, experience. Collection of works scientific.* SPb.: SPbGIEU, 2007. Vyp. 5. S. 73–81. (rus.)
10. Guidance for machining: Reference book. AB Sandvik Coromant. 2010. 201 s.
11. **Zubarev Y.M., Parsegov O.V.** Progressive cutting tool on the basis cube nitride boron. L.: Izd-vo LDNTP, 1988. 32 s. (rus.)
12. **Kozar I.I., Soloveichik A.M., Kolodiyjny D.Y., Plavnik S.L.** Stability of the manufacturing systems motion's during jerking cuttcing. *Nauchno-technicheskie vedomosti SPbGPU.* 2006. № 2(44). S. 90–97. (rus.)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ЖУКОВ Эдуард Леонидович** — кандидат технических наук профессор кафедры технологии машиностроения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: kii49@yandex.ru

**ЛЮБОМУДРОВ Сергей Александрович** — кандидат технических наук заведующий кафедрой технологии и машиностроения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: Lyubomudrow@yandex.ru

**РАДКЕВИЧ Михаил Михайлович** — доктор технических наук заведующий кафедрой технологии конструкционных материалов и материаловедения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: mmftkm@yandex.ru

**РОТАРЕНКО Ольга Юрьевна** — студент, лаборант Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: olga.rotarenko@mail.ru

## AUTHORS

**ZHUKOV Eduard L.** — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: kii49@yandex.ru

**LYUBOMUDROV Sergey A.** — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: Lyubomudrow@yandex.ru

**RADKEVICH Mikhail. M.** — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: mmftkm@yandex.ru

**ROTARENKO Olga Yu.** — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: olga.rotarenko@mail.ru

УДК 621.941.1:621.9.014

*И.И. Козарь, Д.Ю. Колодяжный,  
М.М. Радкевич, Т.А. Цимко*

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОГРЕШНОСТИ ПРИ ТОЧЕНИИ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ СПЛАВОВ**

*I.I. Kozar, D.Yu. Kolodyazhniy,  
M.M. Radkevich, T.A. Tsimko*

### **A MATHEMATICAL MODEL OF ERROR FOR INTRACTABLE ALLOY TURNING**

Приведена математическая модель образования погрешности обработки при точении труднообрабатываемых материалов. Приведено описание лабораторной установки для определения и проверки коэффициентов математической модели. Рассмотрены различные параметры, которые влияют на точность и производительность обработки.

ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ; ТОКАРНАЯ ОБРАБОТКА; МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ; РАЗМЕРНЫЙ ИЗНОС; СИЛЫ РЕЗАНИЯ; ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫЕ СПЛАВЫ.

Presented mathematical model error formation during turning high-temperature titanium alloys. Presented description of the experimental plant for determination and verification of the mathematical model coefficients. Investigated different parameters, which influence on the accuracy and productivity cutting.

ACCURACY OF CUTTING; TURNING; MATHEMATICAL MODEL; WEAR DIMANSIONAL; CUTTING FORCES; INTRACTABLE ALLOYS.

Повышение эффективности современных авиадвигателей и аналогичных силовых установок становится невозможным без использования принципиально новых конструкционных материалов [1–5].

К деталям, изготавливаемым из подобных материалов, предъявляются повышенные требования по точности изготовления [6]. В настоящее время основным возможным методом обеспечения этих требований является обработка резанием. Однако реализация такой обработки затруднена из-за практически полного отсутствия рекомендаций по выбору режимов резания, инструмента и оборудования и большой трудоемкости по подбору таких рекомендаций.

Цели нашего научного исследования — создание и отработка математической модели образования погрешности на примере токарной обработки партии заготовок и разработка экспериментальной установки для определения с ее

помощью коэффициентов модели и, в конечном итоге, управления точностью.

В общем случае точность обработки размеров деталей зависит от большого числа воздействующих технологических факторов во время обработки. Они приводят к образованию составляющих погрешности обработки, которые, суммируясь по определенным законам, смещают уровень настройки инструмента. Суммарная погрешность обработки образуется из следующих составляющих:

из-за упругих деформаций технологической системы;

из-за тепловых деформаций технологической системы;

из-за размерного износа режущего инструмента;

из-за ошибки настройки инструмента на размер;

из-за геометрических погрешностей станка [7].

Для исследования точности механической обработки необходимо создать математическую модель образования погрешности в зависимости от параметров технологического процесса. В дальнейшем на основе этой модели возможен выбор рациональных режимов резания, обеспечивающих минимальную погрешность обработки.

Предварительная оценка составляющих погрешности обработки при чистовом точении показала, что доминирующее воздействие на нее при изготовлении партии деталей оказывают размерный износ резца, упругие деформации технологической системы, температурные деформации резца и детали [8].

Все эти факторы были учтены при создании математической модели образования погрешности изготовления заготовок на токарном станке.

### Создание математической модели погрешности обработки

Общий вид математической модели, описывающей погрешность токарной обработки, [9] следующий:

$$Y_i = f_1(x_1, x_2, \dots) + f_2(x_1, x_2) + \dots + \varepsilon_i \quad (1)$$

где  $f_1, f_2, \dots$  — составляющие погрешности (тепловые и силовые деформации технологической системы, износ режущего инструмента и т. д.);  $x_1, x_2, \dots$  — входные параметры и возмущающие воздействия, которые характеризуют состояние обрабатываемых заготовок, режущего инструмента и станка, режимы резания и т. д.

Формула, описывающая изменения отклонения диаметральных размеров при чистовом точении партии деталей, имеет вид [10]

$$y_i = 2 \left[ \Delta(i) + u(i, \tau) - \xi_p(i, \tau, u, t) - \xi_d(\xi_p) + \Delta_y(t, u) \right] + \eta_i, \text{ мкм}, \quad (2)$$

где  $\Delta(i)$ , мкм, — суммарная погрешность позиционирования;  $u(i, \tau)$ , мкм, — износ режущего инструмента;  $\xi_p(i, \tau, u, t)$ , мкм, — тепловая деформация режущего инструмента;  $\xi_d(\xi_p)$  — тепловая деформация детали;  $\Delta_y(t, u)$ , мкм, — упругие деформации технологической системы;  $\eta_i = \pm 3\sigma$ , мкм, — неучтенная часть случайной составляющей погрешности обработки;  $i$  — номер детали в партии;  $\tau$  — время обработки  $i$ -й детали;  $t$  — глубина резания;  $\tau_{\text{охл}}$  — время охлаждения режущего инструмента перед обработкой  $i$ -й детали.

Далее определяются все составляющие погрешности в зависимости от параметров технологического процесса.

Суммарная погрешность позиционирования в зависимости от номера детали рассчитывается по формуле

$$\Delta(i) = K_1 \times (i - 1) + K_2, \quad (3)$$

Износ инструмента находится по формуле

$$u(i, \tau) = K_3 \tau + K_3(i - 1) + K_4 \left( 1 - e^{-\frac{(i-1)\tau}{K_5}} \right). \quad (4)$$

Тепловая деформация режущего инструмента определяется из выражения

$$\xi_p(i, \tau, u, t) = K_6 t^{0,85} (1 + K_7 u) \left( 1 - e^{-\frac{\tau}{K_8}} \right) + e^{-\frac{\tau_{\text{охл}}}{8}} \xi_{p(i-1)}^{\text{max}} e^{-\frac{\tau}{K_8}}. \quad (5)$$

Тепловая деформация детали равна

$$\xi_d(\xi_p) = K_9 \xi_p, \text{ мкм}. \quad (6)$$

Упругие деформации технологической системы определяются из следующей зависимости:

$$\Delta_y(t, u) = K_{10} t (1 + K_{11} u) (1 - K_{12} \tau). \quad (7)$$

Подстановка зависимостей (3)–(7) в формулу (2) позволяет получить модель образования погрешности при токарной обработке. Во всех приведенных выше формулах  $K_1, K_2, \dots, K_{12}$  — коэффициенты, зависящие от параметров обработки (материала детали и инструмента, характеристик станка и т. п.).

Для определения конкретных коэффициентов этой модели была создана экспериментальная установка, на которой и проводились дальнейшие исследования.

### Материалы и методика

Все экспериментальные исследования проводились при точении заготовок из титанового труднообрабатываемого сплава, условно названного «Титановый сплав № 1», химический состав которого следующий:

Ti.....	Основа
Al.....	5,8–6,6
W.....	0,35–0,8
Si.....	0,25–0,45
Zr.....	2,0–4,0
Mo.....	0,8–1,5
Sn.....	2,5–4,5
V.....	—

Таблица 1

Физико-механические свойства титанового сплава №1

Температура испытания, °С	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	КСУ, КДж/м <sup>2</sup>	HRC
20	1100	1050	5,8	9,2	45	35
400	1100	1040	6,0	11,5	380	35
600	910	860	11,0	19,5	320	25
800	540	785	16,5	29,5	585	17

Физико-механические свойства этого сплава приведены в табл. 1.

Методика проведения экспериментов и используемое оборудование приведены в следующем разделе.

**Экспериментальная установка для исследования образования погрешности обработки**

На кафедре «Технология машиностроения» была спроектирована экспериментальная установка для одновременного контроля различных параметров, влияющих на точность обработки.

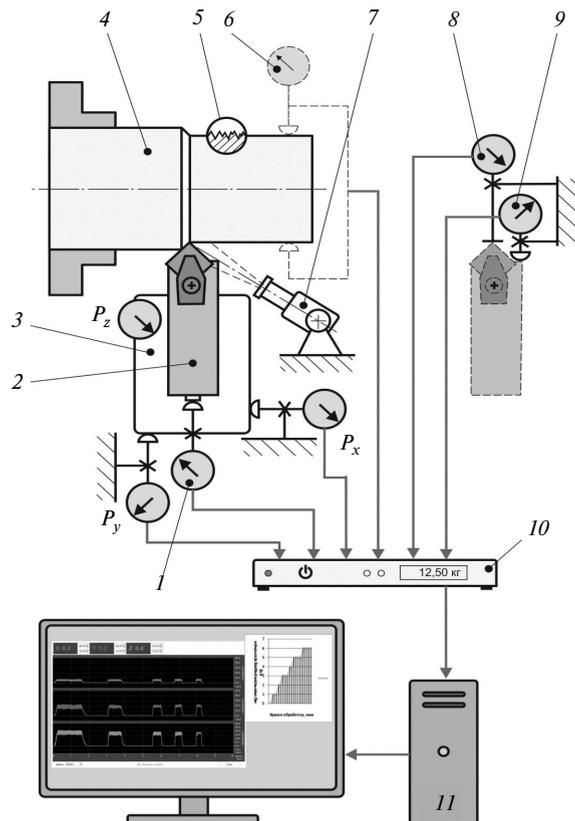


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

На основании уравнения (2), описывающего изменение размеров обрабатываемых заготовок, была разработана программа, позволяющая по экспериментальным результатам, полученным при изготовлении партии деталей, подбирать коэффициенты математической модели таким образом, чтобы расхождения между точечными диаграммами изменения диаметральных размеров, полученных экспериментально и рассчитанных с помощью модели, были бы минимальными.

На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки.

Экспериментальная установка размещена на токарном станке 16Б16КА и включает в себя следующие измерительные системы: систему измерения 1 температурной деформации резца в процессе резания; динамометр 3 для измерения трех составляющих силы резания ( $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$ ) во время обработки.

Деталь 4 закрепляется на специальной оправке или в патроне. Измерительная скоба 6 контролирует диаметр детали до и после обработки. Тепловизор 7 измеряет температуру в зоне резания. Устройство 8, расположенное в задней бабке, измеряет положения режущей кромки резца, а устройство 9 — положения державки резца. Вся информация обрабатывается контроллером 10 и передается на компьютер 11, который предварительно обрабатывает информацию и записывает ее. Компьютер соединен по сети с другим компьютером, на который передается информация после проведения эксперимента.

Размеры и форма обработанной заготовки после снятия со станка измерялась на координатно-измерительной машине Contura G2, погрешность измерений которой составляет 1,8 мкм.

Для определения сил резания на токарно-винторезном станке 16Б16КА вместо резцедержателя на суппорт устанавливался универсаль-

ный модернизированный динамометр УДМ-100М со специальным приспособлением для крепления резца.

В комплект измерительного комплекса входит: динамометр-датчик УДМ-100М, блок сбора и обработки первичной информации УДП, блок вторичной обработки информации, прогнозирования и выдачи управляющего сигнала (ЭВМ). Кроме перечисленного, в комплекс включена система измерения температурной деформации резца.

Мгновенные значения сил резания в диапазоне частот от 0 до 500 Гц можно измерять с погрешностью не более 10 %, регистрируя показания динамометра на устройстве вывода [11, 12].

Для проведения экспериментов была проведена глубокая модернизация динамометра: ламповый тензоусилитель заменен тензоусилителем на интегральной схеме; использован микроконтроллер для аналого-цифрового преобразования сигналов и передачи данных на компьютер в реальном масштабе времени; разработана программа хранения и обработки результатов эксперимента на компьютере, а также программа вывода данных на дисплей в реальном масштабе времени; изготовлен резцедержатель, позволяющий устанавливать специальную конструкцию резца с устройством для измерения температурной деформации в процессе резания; модернизирована механическая часть динамометра; встроены кронштейны для крепления первичного преобразователя для измерения температурной деформации резца.

В ходе проведения эксперимента полученные аналоговые сигналы по трем координатам поступали в блок сбора и обработки первичной информации. Затем они усиливались и преобразовывались в цифровую форму и с дискретностью 0,02 с передавались на ЭВМ, где записывались в файл и одновременно выводились на дисплей в виде трех графиков и таблиц, содержащих в себе численные значения сил, измеренные с заданным интервалом времени.

Для измерения температурного поля на верхней поверхности стружки и передней поверхности резца был применен тепловизор модели VALTECH TR-01500.

Определение коэффициентов излучения проводили при одновременном нагреве струж-

ки титанового сплава и резца. Резец и стружку выдерживали в муфельной печи, нагретой до определенной температуры, до полного прогрева. Температура прогрева измеряли двумя образцовыми термометрами. Проводили съемку и устанавливали коэффициенты излучения передней поверхности резца и верхней поверхности стружки.

В процессе резания записывали также и температурную деформацию державки резца, измерение которой производили с помощью специально разработанного приспособления (см. схему на рис. 2).

В державке резца 1 выполнено сквозное отверстие, в котором проходит стержень 2 из инвара. Одним концом стержень крепится под режущей кромкой в поперечной плоскости, проходящей через вершину резца. Другой конец стержня проходит через втулку по скользящей посадке (втулка выполнена из теплоизоляционного материала) и упирается своим торцом в измерительный наконечник индуктивного датчика 4, закрепленного на кронштейне 5. В процессе обработки резец нагревается, удлиняется, изменяется положение вершины резца относительно места его крепления, что приводит к перемещению стержня, которое фиксируется датчиком 4. Обладая коэффициентом линейного расширения приблизительно в двадцать раз меньше, чем у стали, стержень из инвара практически не меняет своей длины, что дает возможность следить за тепловыми деформациями резца. Информация, получаемая при измерении, фиксируется индуктивной измерительной системой М-200 и записывается с помощью контроллера в память компьютера.

Измерение износа резца по задней грани производилось на микроскопе модели VMS-001–200х с вмонтированной в нем камерой, которая непосредственно соединена с ЭВМ.

Измерение размерного износа проводили с помощью приспособления, установленного в задней бабке станка.

Система измерения размерного износа позволяет непосредственно на станке измерить размерный износ резца без предварительной температурной стабилизации державки резца.

Измерение положения резца происходит со стороны заготовки с помощью индуктивных измерительных датчиков.

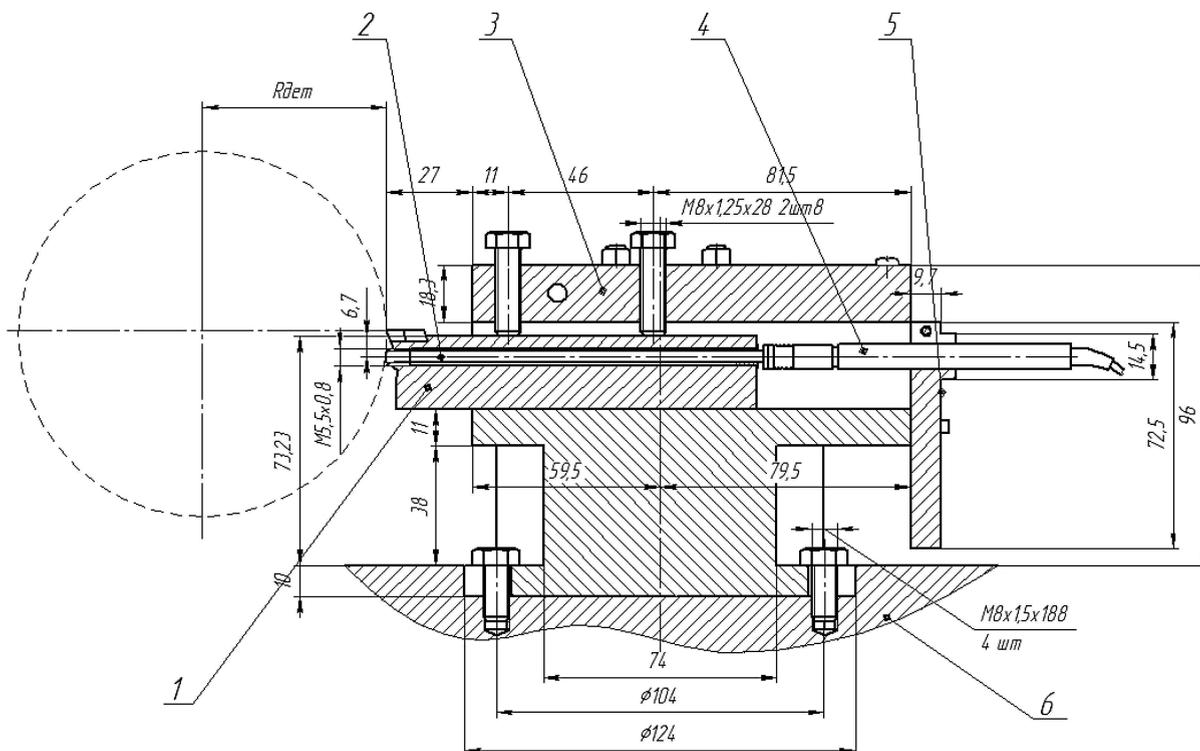


Рис. 2. Устройство для измерения температурного удлинения резца

Датчики измерения положения реперной точки на державке резца и положения его вершины расположены практически в одной плоскости, что дало возможность исключить влияние температурной деформации резца. Данные измерений размерного износа записывает ЭВМ после каждого рабочего хода.

### Проведение экспериментов

Подбор коэффициентов модели осуществляется в диалоговом режиме с использованием дополнительной информации о ходе технологического процесса обработки. Например, возможен учет влияния изменения глубины резания при изготовлении конкретной детали в партии и тепловой деформации резца, связанной с этим изменением, а также учет влияния этих факторов на размер следующей детали.

Чем больше дополнительной информации вводится при определении коэффициентов модели, тем с большей точностью описывается процесс изменения диаметральных размеров в партии.

Качество подбора коэффициентов математической модели в процессе точения было оце-

нено с помощью статистических характеристик, приведенных в табл. 2.

Анализ данных, приведенных в табл. 2, позволяет сделать заключение о совпадении результатов моделирования с экспериментом не только по внешнему виду, основным статистическим характеристикам, но и по параметрам, отражающим внутренние взаимосвязи процесса формообразования.

Результаты работы программы, полученные в графической форме, представлены на рис. 3, где по вертикальной оси отложены отклонения диаметров деталей  $y_i$  в мкм в зависимости от номера детали в партии  $i$ .

График изменения диаметральных размеров в партии деталей был получен при точении колец диаметром 140 мм и длиной 40 мм со следующими режимами резания: скорость резания  $V = 200$  м/мин, подача  $S = 0,03$  мм/об. Обработка велась резцом, оснащенным пластинкой из твердого сплава Т15К6. Глубина резания при изготовлении партии деталей изменялась от 0,12 до 0,24 мм.

На рис. 3 представлены точечные диаграммы изменения диаметральных размеров партии

Таблица 2

Параметры проверки модели

Наименование параметра	Экспериментальные данные	Данные, полученные по модели
Наибольший разброс размеров в партии $y_{\max} - y_{\min}$ , мкм	85	83
Среднее значение рассеяния размеров деталей в партии, мкм	53	52
Среднее квадратическое отклонение рассеяния деталей в партии, мкм	22,5	22
Коэффициент корреляции между колебанием глубины резания и колебанием размеров в начале обработки	0,7	0,85
Коэффициент корреляции между колебанием глубины резания и колебанием размеров в конце обработки	0,81	0,9

проточенных колец при выбранных режимах резания, а также смоделированные точечные диаграммы изменения размеров колец.

График 1 относится к размерам колец у правого торца, что соответствует началу обработки, а график 2 — к размерам колец у левого торца, то есть в конце обработки.

Графики 3 и 4 относятся к смоделированным размерам колец соответственно у правого и левого торца.

При моделировании учитывалось колебание глубины резания, которое происходило при изготовлении данной партии деталей.

Полученные соотношения дают возможность заключить, что при чистовом точении

действуют, по крайней мере, пять факторов, которые соизмеримы по влиянию на точность обработки. Устранение или компенсация одного из них не только не гарантирует уменьшение суммарной погрешности обработки, но может, напротив, привести к ее увеличению.

Сравнение результатов чистовой обработки нескольких партий заготовок с результатами моделирования показало хорошее качественное и количественное их совпадение. Погрешности моделирования составили:

по изменению диаметра детали по длине обработки — в среднем 10 %;

по отлнчию величины тренда на одну деталь — примерно 5 %;

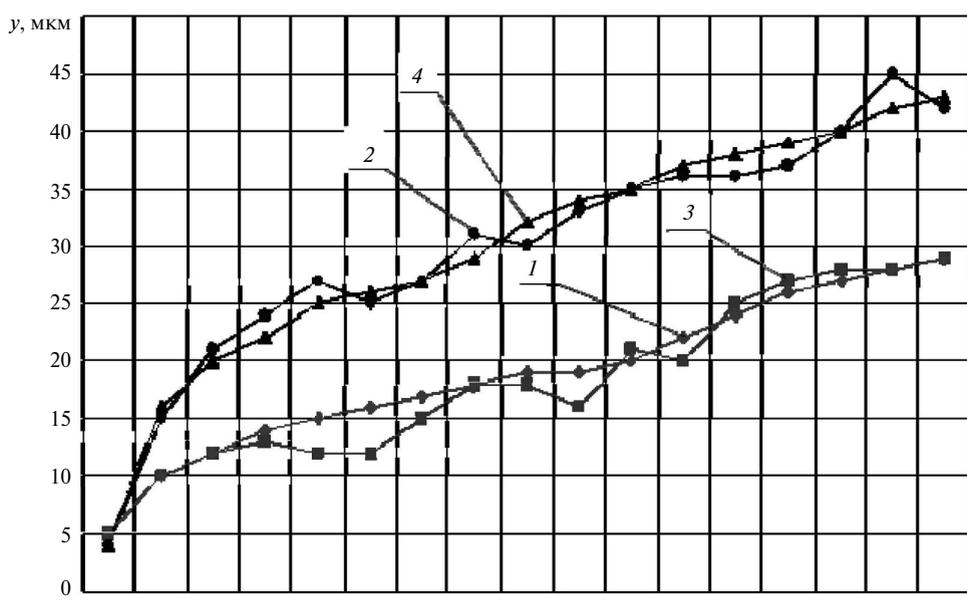


Рис. 3. Точечные диаграммы изменения диаметральных размеров деталей и смоделированные точечные диаграммы изменения размеров этих же деталей ( $i$  — номер детали в партии)

по коэффициентам корреляции между глубиной резания и изменением диаметров деталей — около 15 %.

Подведем итоги.

Для обеспечения точности токарной обработки партии заготовок возможны достоверное моделирование процесса образования суммарной погрешности.

Созданная математическая модель колебания диаметральных размеров деталей в партии при чистовом точении дает возможность прогнозировать результаты применения возможных способов компенсации погрешностей обработки.

Имитация обработки резанием при различных режимах с помощью модели позволяет получить результаты по точности обработки и таким образом изучить влияние на нее режимов резания.

Модель позволяет проводить анализ причин развития погрешностей на этапе отладки технологического процесса изготовления партии деталей.

В модели нашли отражение наиболее существенные закономерности, свойственные токарной обработке, и, как показывают эксперименты, она может быть применена при анализе любых других видов лезвийной обработки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скибин В.А., Солонин В.И., Сосунов В.А. Авиационному двигателю 100 лет // ТВФ. 2004. № 5.
2. Кашапов О.С., Новак А.В., Ночовная Н.А., Павлова Т.В. Состояние, проблемы и перспективы создания жаропрочных титановых сплавов для деталей ГТД. 2010. // Труды ВИАМ. 2013. С. 8–13 с.
3. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия). М.: Изд-во МИСиС, 2001. 632 с.
4. Мухин В.С. Основы технологии машиностроения (авиадвигателестроение). Уфа: Изд-во УГАТУ, 2007. 148 с.
5. TMC-0614. Timet Datasheet alloy 834 Timet. 2000. 3 p. /<http://www.timet.com/images/document/datasheets/alphaalloys/834.pdf>
6. Иноземцев А.А., Башкатов И.Г., Коряковцев А.С. Титановые сплавы в изделиях разработки ОАО «Авиадвигатель» // Современные титановые сплавы и проблемы их развития: Сборник. М.: Изд-во ВИАМ, 2010. 43–46 с.
7. Колкер Я.Д. Математический анализ точности

механической обработки. Киев.: Техника, 1976. 200 с.

8. Любомудров С.А. Технологическое обеспечение качества: учебное пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 195 с.

9. Жуков Э.Л., Козарь И.И., Мурашкин С.Л. [и др.]. Технология машиностроения: в двух кн. Кн. 1. Основы технологии машиностроения. Учебное пособие для вузов / Под ред. С. Л. Мурашкина. 3-е изд., доп. М.: Высш. шк., 2008. 278 с.

10. Анухин В. И., Любомудров С.А., Макарова Т.А. Обеспечение качества чистовой токарной обработки путем дискретной стабилизации размеров. // Управление качеством: проблемы, исследования, опыт. Сборник научных трудов. Вып. 2. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2002. С. 167–180.

11. Любомудров С.А., Тарасов С.Б. Метрология, стандартизация сертификация. Выбор средств измерения: Учебное пособие. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2008. 95 с.

12. <http://www.renishaw.ru>. Контактные измерительные системы для станков с ЧПУ, 2010.

### REFERENCES

1. Skibin V.A., Solonin V.I., Sosounov V.A. Air engine 100 year. *TVF*. 2004. № 5. (rus.)
2. Kashaпов O.S., Novak A.V., Nochovnaya N.A., Pavlova T.V. State, problems and prospects of creation of heat resisting titanic alloys for GTD details. *Electronic scientific magazine» Works VIAM»*. 2013. S. 8–13. №3 (rus.)
3. Kablov E.N. Cast in vanes of the engines gas-turbine (alloys, technologie, cover). M.: Izd-vo MISIS, 2001. 632 p. (rus.)
4. Moukhin V.S. Technology of machine building (aircraft industry). Ufa: Izd-vo UGAYU, 2007. 148 p. (rus.)
5. TMC-0614. Timet Datasheet alloy 834 Timet. 2000. 3 p. /<http://www.timet.com/images/document/datasheets/alphaalloys/834.pdf>

6. Inozemhsev A.A., Bachcatov I.G., Korykovchev A.S. Alloys of titanium in the manufacturing article design which are ОАО «Aviadvigatel». *Modern alloys of titanium and problems of their development: Collection*. M.: VIAM, 2010. 43–46 p. (rus.)

7. Kolker Y.D. Mathematical analysis of the accuracy of cutting. Kiev.: Technika, 1976. 200 p. (rus.)

8. Lyubomudrov S.A. Technological guaranteeing of the quality: manual. SPb.: Publishing house Politech. university, 2010. 195 p. (rus.)

9. Zhoukov E.L., Kozar I.I., Mourashkin S.L. [and others.]. Technology of machine building: two manual, M-al.1. third publ., add. M.: Higher school, 2008. 278 p. (rus.)

10. Anouhin V.I., Lyubomudrov S.A., Makarova T.A. Guaranteeing of cutting quality during finish turning by means of discrete stabilization sizings. *Management of quality: problems, research, experience. Collection of the sciences works*. Т. 2. SPb: Izd-vo SPbGPU, 2008. 95 p. (rus.)

11. Lyubomudrov S.A., Tarasov S.B. Metrology, standardization and certification. Election of means measure: manual. SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2008. 95 p. (rus.)

12. <http://www.renishaw.ru>. Measuring contacts systems for machine-tool with numerical program control, 2010.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**КОЗАРЬ Иван Иванович** — кандидат технических наук доцент кафедры технологии машиностроения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: kii49@yandex.ru

**КОЛОДЯЖНЫЙ Дмитрий Юрьевич** — кандидат технических наук доцент кафедры технологии машиностроения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: kolod@uk-odk.ru

**РАДКЕВИЧ Михаил Михайлович** — доктор технических наук заведующий кафедрой технологии конструкционных материалов и материаловедения Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: mmftkm@yandex.ru

**ЦИМКО Татьяна Анатольевна** — студент, лаборант Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: *TS/m-koshka@mail.ru*

#### AUTHORS

**KOZAR Ivan I.** — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: kii49@yandex.ru

**KOLODYAZHNIY Dmitriy Yu.** — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: kolod@uk-odk.ru

**RADKEVICH Mikhail M.** — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: mmftkm@yandex.ru

**TSIMKO Tatiana A.** — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: *TS/mkoshka@mail.ru*

УДК 551.5

*К.А. Дубаренко, С.В. Авакян, Л.А. Баранова,  
Н.А. Воронин, Г.А. Никольский*

## **ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗА ПОГОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК С УЧЕТОМ СОЛНЕЧНО-ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ**

*K.A. Dubarenko, S.V. Avakyan, L.A. Baranova,  
N.A. Voronin, G.A. Nikolskiy*

## **THE ABILITY OF FORECASTING THE WEATHER AND CLIMATIC PARAMETERS SUBJECT TO SOLAR GEOMAGNETIC ACTIVITY**

При анализе данных спутниковой регистрации глобального распределения полной (общей) облачности выявлена положительная корреляция между площадью облачности и всплесками величины солнечной постоянной, а также отрицательная корреляция с числом солнечных пятен. На основе полученных результатов рассмотрены возможности учета активности Солнца в среднесрочных (недельно-месячные) прогнозах таких основных погодных характеристик, как площадь (балльность) полного облачного покрова и аномалии температуры приземного воздуха.

**СОЛНЕЧНО-ГЕОМАГНИТНАЯ АКТИВНОСТЬ; ВАРИАЦИИ ОБЛАЧНОСТИ; ПРОГНОЗЫ ОБЛАЧНОСТИ И АНОМАЛИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ.**

The analysis of the registered satellite data of the distribution of the full (general) cloudiness has shown positive correlation between the cloudiness area and the burst of solar constant as well as the negative correlation with the number of sunspots. On the basis of the received results the article demonstrates the possibility of taking into account the solar activity in medium-term prospects of such major weather characteristics as full cloudiness area and the anomalies of the ground air temperature.

**SOLAR-GEOMAGNETIC ACTIVITY; THE VARIATIONS OF CLOUDINESS; PREDICTIONS OF THE CLOUDINESS AND TEMPERATURE ANOMALIES.**

Одной из сложных и важных проблем практической метеорологии является расширение возможности прогноза погодных характеристик за тот примерно двухнедельный срок, который считается современными метеорологами реальным ограничением. Это связано с существующей методикой предсказания физических условий в тропосфере, формирующих погоду. Очевидно, что реальным путем увеличения периодов заблаговременности предсказания

погодных характеристик может быть учет солнечной вариабельности, а именно — факторов солнечно-геомагнитной активности. Целью работы было определение путей прогноза погоды в этом случае.

### **Учет активности Солнца в среднесрочных прогнозах погодных характеристик**

В статье [1] мы представили результаты исследований корреляций изменения распростра-

ненности облачного покрова в глобальном масштабе с вековым ходом солнечно-геомагнитной активности, а в [2] дано объяснение наличия периодов 2–5,5 лет в вариациях температуры приземного воздуха и осадков (при отсутствии 11-летней изменчивости). В настоящей статье рассматриваются эффекты солнечно-тропосферных связей на временной шкале в несколько месяцев.

Из рис. 1 следует, что внутри последнего 11-летнего цикла активности Солнца наблюдается положительная корреляция между площадью облачности и всплесками величины солнечной постоянной ( $TSI$ ) и отрицательная корреляция с числом солнечных пятен ( $R$ ). Следует констатировать, что по количеству пятен, появляющихся на диске Солнца, и факельным полям в солнечной фотосфере можно заблаговременно (до нескольких месяцев) прогнозировать изменение площади облачного покрова (балльность облачности), а следовательно, и теплорадиационный баланс Земли (исходя из известной статистики времени жизни этих образований в фотосфере Солнца).

Сведения о связи всплесков в величине солнечной постоянной с факельными полями (всплески величины  $TSI$  связаны с факельным УФ-излучением атмосферы Солнца) и роль пятенной активности в фотосфере Солнца обсуждались в [3]. Интересно двойственное проявление

пятен в вариациях  $TSI$ . Долговременные изменения  $TSI$  в течение цикла активности Солнца имеют тот же знак, что и изменения числа пятен: чем меньше пятен, тем меньше  $TSI$ . Наоборот, кратковременные и хорошо понятные корреляции  $TSI$  с прохождением пятен имеют противоположный знак, т. е. чем больше пятен, тем меньше величина  $TSI$ . Отдельные большие пятна (группы) уменьшают мгновенные значения  $TSI$ , особенно при появлении этих групп. В [3] получено наличие примерного баланса избытка и недостатка излучения объектов — «факелы — пятна», хотя время жизни факельной составляющей — более двух оборотов Солнца, тогда как пятна в среднем существуют около одного оборота. Таким образом, факельная составляющая генерируется структурами, у которых время жизни гораздо больше, чем типичное время жизни пятна. В целом пятна не блокируют УФ-излучение факелов, так как они блокируют видимое и ИК-излучения диска Солнца.

Статистические данные по продолжительности пятенной и факельной активности Солнца приведены в [4]. Время жизни средней группы пятен — 6 суток, а для больших групп, определяющих изменение солнечной активности, — 1,5 месяца. Для большого пятна время уменьшения площади в  $e$  раз составляет примерно 11 суток. Время жизни среднего факела — 15 суток, а время жизни больших факелов,

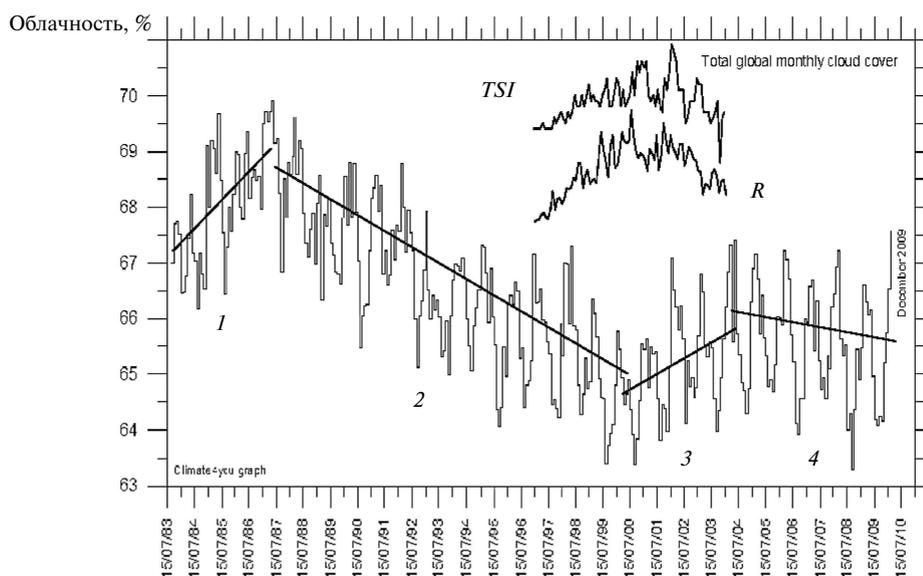


Рис. 1. Изменение глобальной облачности по наблюдениям со спутников по данным сайта <http://isccp.giss.nasa.gov/climanal7.html>

определяющих изменения солнечной активности, — 2,7 месяца. Таким образом, действительно, факельная составляющая генерируется структурами, у которых время жизни гораздо больше, чем типичное время жизни пятна. Приведенные данные о временах релаксации пятенной и факельной структур на Солнце определяют (в рамках предложенного нами способа учета активности Солнца в среднесрочных прогнозах погодно-климатических характеристик) те минимальные (от недели) и максимальные (до 2,7 месяца) периоды прогнозирования вариаций площади полного облачного покрова в той части, которая связана с проявлением пятенной (она дает уменьшение площади облачности, что равносильно уменьшению балльности облачности) и факельной (которая приводит к приросту балльности облачного покрова) активностей Солнца.

На основе банка данных по температурным аномалиям, созданного ГУ ВНИИ Гидрометеорологической информации — Мировым центром данных, по совокупности измерений всеми метеорологическими станциями Российской Федерации с 1966 года получено [5], что в холодное полугодие тепляющий эффект облачности определяет около 50 % общей изменчивости температуры. В теплое полугодие охлаждающий эффект облачности определяет около 25 % общей изменчивости. А в апреле и октябре (месяцы смены полугодий) доля вариации температуры, объясненной облачностью, составляет только около 5 %. Там же приведены соотношения между изменениями количества полной (общей) облачности (в виде вариаций балльности облачности) и температурой в абсолютных значениях по аномалиям, полученные на основе обобщения по всем метеостанциям России в широтной зоне 50–70° с.ш. по восьмисрочным (то есть, через каждые три часа) суточным наблюдениям с 1966 года. В качестве норм взяты средние значения за 1966–1990 годы, а аномалии температуры и количества облачности по пятидневкам вычислялись за 1991–2004 гг. В среднем во всех случаях изменение количества облачности на 0,1 балла сопровождалось изменением температуры приземного воздуха примерно на 0,4–0,5 °С. Из зависимостей на рис. 1 следует, что вариации площади полной облачности, обусловленные заметными изменениями пятен-

ной и факельной солнечной активности (в величинах  $R$  и  $TSL$ ), составляют не более 2–3 %, что меняет балльность облачного покрова на 0,2–0,3 балла (поскольку по определению сто-процентное покрытие небосвода облачным покровом соответствует десяти баллам облачности), а соответственно в среднем такое изменение площади облаков сопровождается вариациями в температуре воздуха примерно на 0,8–1,5 °С.

В отдельные месяцы и пятидневки изменения температуры (в градусах Цельсия), связанные с вариациями площади облачного покрова (в баллах облачности), оказываются в несколько раз выше. Соответствующие коэффициенты пересчета можно получать из графиков ВНИИГМИ (рис. 2 и 3) [5] (эти графики позволяют по изменениям в балльности полной (общей) облачности определять аномалии температуры с увеличением скважности до пяти суток). В январе—феврале за 1991–2004 годы сравнительно большое увеличение количества облачности (на 0,5–1,0 балл) сопровождалось повышением температуры воздуха над Россией в эти же месяцы на 3–5 °С, а в октябре, начале ноября и во второй половине декабря — на 0,3–0,4 балла с повышением температуры на 1–2 °С. Уменьшение количества облачности во второй половине ноября и начале декабря на 0,4 балла сопровождалось понижением температуры воздуха над Россией на 2 °С.

В теплую часть года (с 21 по 59 пятидневку) отрицательные аномалии количества облачности сопровождаются повышением температуры, а положительные — понижением. При отрицательных аномалиях количества облачности от –0,21 до –0,26 баллов наблюдаются положительные аномалии температуры от +1,1 до +1,4 °С, а отрицательная аномалия температуры (–0,2 °С) наблюдается только в 52-ю пятидневку (сентябрь) при самой большой положительной аномалии количества облачности (0,51 балла).

#### **Наблюдения реакции метеорологических параметров на мощные солнечно-магнитосферные события**

На рис. 4 приведены изменения приземного давления  $P$  и температуры воздуха  $T$  по трехчасовым данным метеостанции Шаджатмас (вблизи Кисловодска) для октября 2003 года, а также изменения солнечной постоянной в обращен-

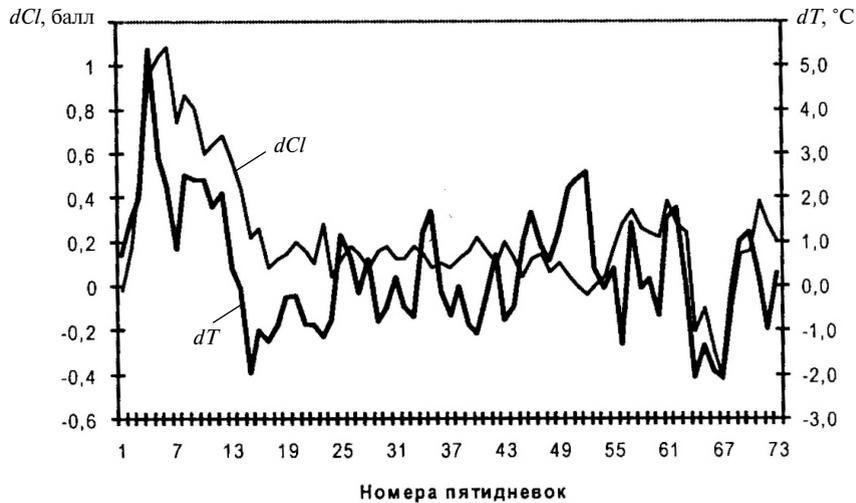


Рис. 2. Годовой ход (по пятидневкам) аномалий температуры воздуха ( $dT$ ) и количества полной (общей) облачности ( $dCl$ ) за 1991–2004 годы относительно средних за 1966–1990 годы:  
 — —  $dCl$ ; — —  $dT$

ной шкале ее значений. «Спокойный» ход синоптических вариаций в первой половине месяца (когда фактически отсутствовали солнечно-геомагнитные возмущения, включая вспышки на Солнце и мировые магнитные бури) в последующие недели нарушается. Вторая половина среднего «статистического» октября на Северном Кавказе характеризуется установлением глубокого антициклона с давлением, примерно показанным прямой «Тенденция». Анализ текущего синоптического процесса показывает, что уже с 16 октября под воздействием повышения сначала только геомагнитной активности, а с 19 октября и вспышечной активности Солнца начинается деструкция естественного термобарического соотношения в воздушной массе над станцией.

Наш анализ по вариациям  $P$  с учетом приведенной в нижней части рис. 4 ситуации с изменениями параметров наиболее известных характеристик солнечно-геомагнитной активности в октябре 2003 года (поток мягкого рентгеновского излучения Солнца и величина  $K_p$  — индекс магнитной активности) подтверждает известное влияние основных проявлений такой активности — солнечных вспышек и магнитных бурь — на величину  $P$ .

Рассмотрим эти эффекты более подробно. Изменения давления на высоте 2100 м при воздействии солнечных вспышек (групп вспышек)

полностью соответствуют экспериментальным данным [6], где по измерениям на высокогорной станции Юнгфрауйох (3475 м) обнаружено, что вспышка вызывает уменьшение атмосферного давления, а Форбуш-эффект падения интенсивности всенаправленного потока галактических космических лучей (ГКЛ) в окрестности Земли приводит к росту  $P$ . Что касается эффекта Форбуша, то он, причем аномально сильный, в рассматриваемый период наблюдался один раз — с начала суток 29 октября — и имел максимум

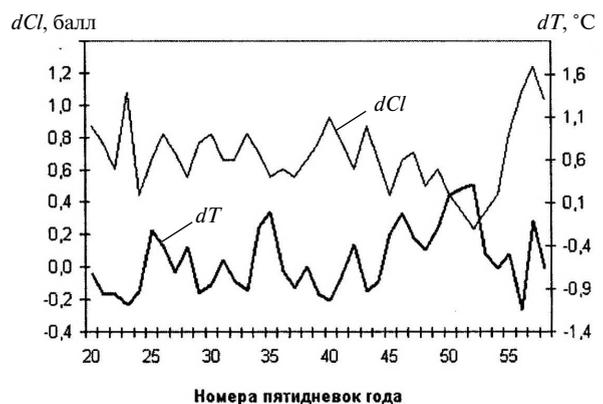


Рис. 3. Изменения в теплую часть года (по пятидневкам) аномалий температуры воздуха ( $dT$ ) и количества полной (общей) облачности ( $dCl$ ), в баллах, за 1991–2004 гг. относительно средних за 1966–1990 гг. Станции России в широтной зоне 50–70°:  
 — —  $dCl$ ; — —  $dT$

падения интенсивности ГКЛ по данным нейтронного монитора на ст. Апатиты — более 20 % в 14–16 часов (UT). Такого уровня выраженный минимум закончился к началу суток 30 октября, и это действительно сопровождалось (см. рис. 4) резким всплеском атмосферного давления  $P$ . Столь выраженный пик давления связан, возможно, и с вкладом двух мощных событий — прибытия к земной поверхности потока солнечных космических лучей (СКЛ) 28 октября в 12–20 UT и 29 октября в 00–03 UT. СКЛ способны воздействовать на тропосферу так же, как и солнечные коротковолновые (рентгеновские) вспышки [7], увеличивая общую облачность, а значит, как правило, приводить к спа-

ду давления  $P$ . Эти два события действительно сопровождалось резкими спадами  $P$  в конце суток 28 и 29 октября. Согласно [8] при Форбуш-эффекте уменьшается количество перистых облаков, а по данным публикации при появлении таких облаков (они генерируются после солнечных вспышек и геомагнитных бурь и являются, как правило, разогревающими) уменьшается давление на 5–6 гПа и одновременно идет небольшой рост температуры воздуха. Таким образом, в период Форбуш-эффекта следует ожидать уменьшения температуры воздуха, что и наблюдается на зависимости рис. 4 (до достижения уровня абсолютного температурного минимума за весь октябрь 2003 г.).

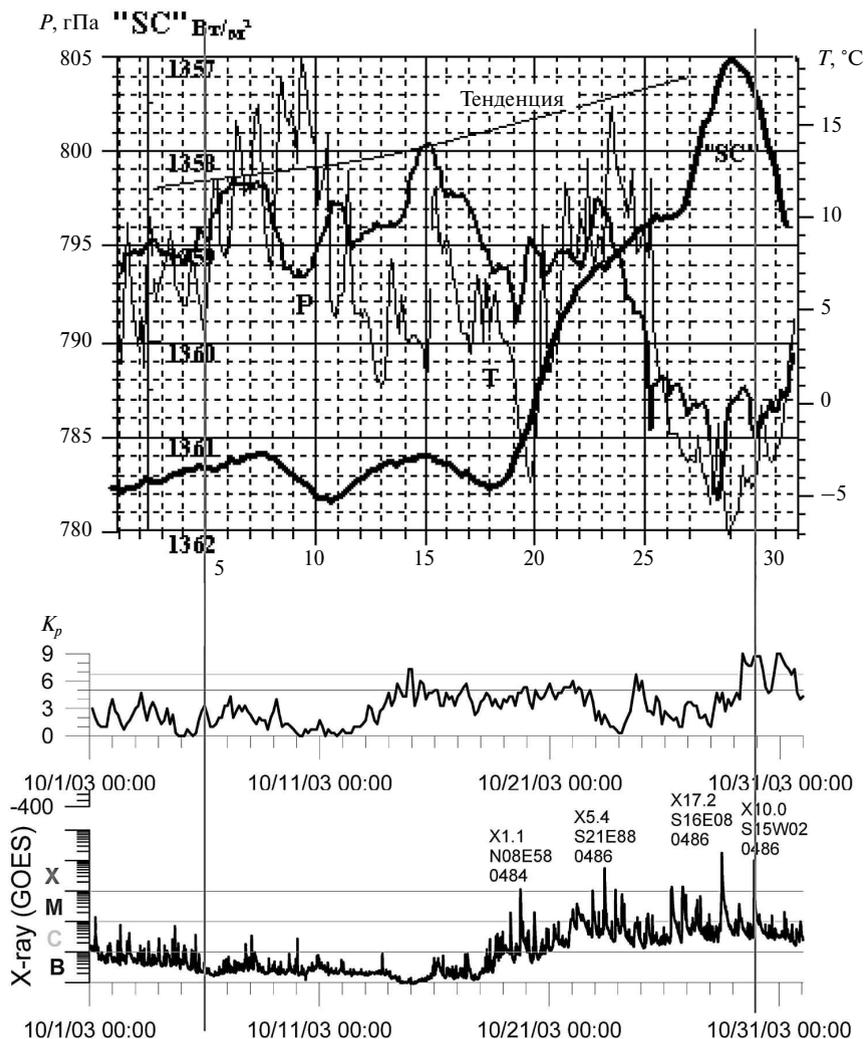


Рис. 4. Изменения приземного давления  $P$  и температуры воздуха  $T$  по трехчасовым данным метеостанции Шаджатмас для октября 2003 года

Сравним картину появления рентгеновских солнечных вспышек (по данным КА GOES — нижняя кривая на рис. 4) с вариациями величины давления  $P$ . Учитываем только вспышки средней и высокой интенсивности (класса  $M$  — их число больше 4). Таких вспышек в октябре 2003 года было 11 (все — после 19 октября) из них 4 — класса  $X$ . Как правило, наисильнейшим вспышкам предшествовало более чем за 10 часов по несколько вспышек в интервале классов от  $M1$  до  $X1$ . Следует напомнить, что эффективность проявления рентгеновских вспышек в тропосфере (согласно радиооптическому механизму) зависит от того, как освещена Солнцем вышележащая ионосфера, на высотах более 100 км, т. е. в областях генерации микроволнового излучения между ридберговскими (высоково возбужденными) состояниями.

Оказалось, что для всех мощных вспышек наблюдались в основном спады давления (9 случаев) и лишь в двух случаях подъем в величине давления  $P$  — после вспышек класса ( $X17.2$ ) и ( $X10.0$ ). Но эти исключения, как уже было сказано, обусловлены, скорее, превалирующим вкладом самых мощных в 2003 года событий СКЛ.

Теперь рассмотрим случаи, когда были сильные геомагнитные возмущения (мировые магнитные бури с планетарным индексом геомагнитной активности  $K_p = 5$  и более). Согласно радиооптическому механизму, буря в тропосфере действует так же, как и вспышка, за счет усиления ионосферного потока микроволн и, соответственно, сопровождается увеличением облачности, причем первоначально преимущественно перистой — разогревающей. Это четко проявилось в увеличениях температуры воздуха (см. рис. 4) в 16 случаях из 19 буревых событий. Сложность такого сопоставления заключается в известном отставании на 1–3 суток реакции тропосферных характеристик, прежде всего количества облачности, на буревые эффекты корпускулярных высыпаний, что отмечалось еще в [10]. Обычно буря вызывает падение давления; на рис. 4 два из этих падений следуют одновременному воздействию солнечных вспышек, обычно почти всегда вызывающих спад давления.

В целом со второй половины октября антициклон начал разрушаться под влиянием воз-

действия сильной солнечно-геомагнитной активности, и это разрушение сначала было обусловлено одиночным влиянием геомагнитных возмущений (магнитных бурь), хотя абсолютный минимум в давлении и температуре был достигнут на фоне самой мощной ( $X17.2$ ) вспышки на Солнце 28 октября в большой мере за счет наложения воздействий уникальных для всего этого года явлений — двух событий СКЛ (согласно зарегистрированному потоку солнечных протонов на земной поверхности) и самого мощного за год Форбуш-понижения галактических космических лучей (которые и в обычных случаях вызывают только рост давления [6]).

Итак, разрушению стандартного (для этого времени года в Кисловодске) антициклона в октябре 2003 года способствовала цепь событий в солнечно-земной физике (серия солнечных вспышек и геомагнитных бурь). Дополнительный вклад внесли также уникальные по силе два события в СКЛ и мощнейшее (более 20 %) Форбуш-понижение ГКЛ. Соответственно радиофизическому механизму вспышки и бури, во-первых, образуют оптически тонкую (разогревающую) облачность, обычно верхнего яруса (перистую), во-вторых, после них понижается атмосферное давление и, как следствие, антициклонический характер погоды заменяется на циклонический. Интересно, что еще М.В. Ломоносов так описывал наблюдаемые в детстве в Холмогорах полярные сияния: «Сияния чаще приходилось видеть в ветреную погоду сквозь прерывистые облака». Но это прямо соответствует гипотезе о связи циклонического типа погоды (ветер и облака) с корпускулярными высыпаниями (причиной возбуждения сияния) [11].

Следует отметить, что на поведение облачности оказывают значительное влияние солнечные космические лучи. На рис. 5 показаны случаи солнечных протонных событий, зафиксированных нейтронными мониторами на земной поверхности [12], после которых, как правило, увеличивается количество общей облачности. Это влияние требует дальнейшего анализа и исследования с учетом временной задержки после проникновения СКЛ через полярную шапку, а также их связей с характеристиками солнечной вспышки — баллом в оптическом диапазоне и классом в рентгеновском.

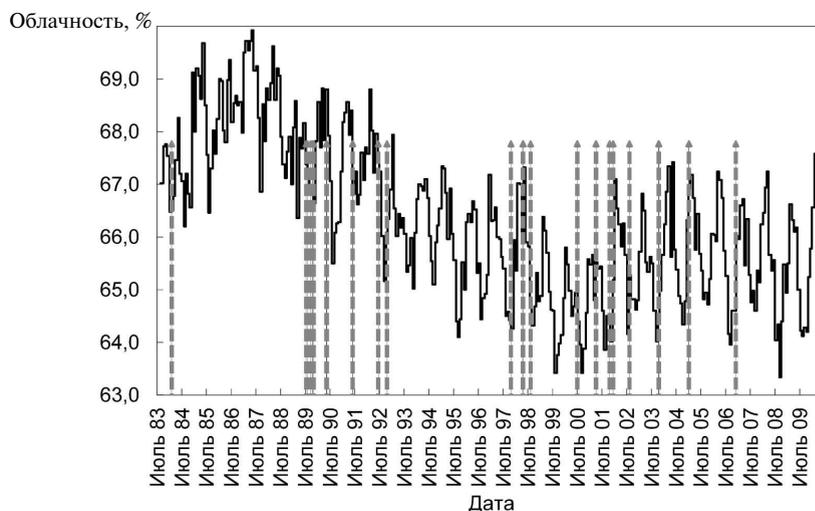


Рис. 5. Изменение глобальной облачности по данным спутников. Вертикальными стрелками показаны солнечные протонные события

При анализе данных спутниковой регистрации глобального распределения полной (общей) облачности выявлена положительная корреляция между площадью облачности и всплесками величины солнечной постоянной и отрицательная корреляция с числом солнечных пятен.

На основе полученных результатов рассмотрены возможности учета активности Солнца в среднесрочных (недельно-месячные) прогнозах таких основных погодных характеристик, как площадь (балльность) полного (общего) об-

лачного покрова и аномалии температуры приземного воздуха.

Представлены результаты сопоставления величин метеорологических параметров на высокогорной станции вблизи Кисловодска (на высоте 2100 м) с патрульными данными по мощным эффектам солнечно-геомагнитных возмущений для октября 2003 года. Получено качественное подтверждение вклада радиооптического трехступенчатого триггерного механизма солнечно-погодных связей [1, 2].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авакян С.В. Возможные подходы к среднесрочным прогнозам погоды с учетом солнечно-геомагнитной активности // Труды XVI Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика-2012». 24–28 сентября 2012 года, Санкт-Петербург. ГАО РАН. С. 487–490.
2. Avakyan S.V. Climate as task of the ionospheric and solar-terrestrial physics. Possible approaches to the long-term weather predicting based on taking into account solar-geomagnetic activity // Proceeding of IX International Conference «Problem of Geocosmos», 8–12 October 2012, St.-Petersburg. SPbSU. P. 193–198.
3. Макарова Е.А., Харитонов А.В., Казачевская Т.В. Поток солнечного излучения. М.: Физматгиз, 1991. 400 с.
4. Аллен К.У. Астрофизические величины. М.: Мир, 1977. С. 265–266.
5. Шерстюков Б.Г. Региональные и сезонные закономерности изменений современного климата / ГУ «ВНИИГМИ-МЦД». Обнинск, 2008. 246 с.
6. Богданов М.Б., Сурков А.Н., Федоренко А.В. Влияние космических лучей на атмосферное давление в высокогорных условиях // Геомагнетизм и аэронаука. 2006. Т. 46, № 2. С. 268–274.
7. Веретенко С.В., Пудовкин М.И. Вариации общей облачности в ходе всплесков солнечных космических лучей // Геомагнетизм и аэронаука. 1996. Т. 36, № 1. С. 153–156.
8. Веретенко С.В., Пудовкин М.И. Эффекты Форбуш понижения галактических космических лучей в вариациях общей облачности // Геомагнетизм и аэронаука. 1994. Т. 34, №4. С. 38–44.
9. Борисенков Е.П., Базлова Т.А., Ефимова Л.Н. Перистая облачность и ее влияние на атмосферные процессы. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 119 с.
10. Дмитриев А.А., Говоров Д.В. Взаимная связь физического и гелиогеофизического экспериментов // Труды ААНИИ. 1972. Т. 311. С. 132–137.
11. Алексеева Л.М. Небесные сполохи и земные заботы. М.: Знание, 1985. 160 с.

12. **Miroshnichenko L.I., Perez-Peraza J.A.** Astrophysical aspects in the studies of solar cosmic rays // In-

ternational Journal of Modern Physics A. 2008. Vol. 23, No. 1. P. 1–141.

## REFERENCES

1. **Avakyan S.V.** Vozmozhnyye podkhody k srednedolgosrochnym prognozam pogody s uchetom solnechno-geomagnitnoy aktivnosti. *Trudy XVI Vserossiyskoy yezhegodnoy konferentsii po fizike Solntsa «Solnechnaya i solnechno-zemnaya fizika-2012»*. 24–28 sentyabrya 2012 goda, Sankt-Peterburg, GAO RAN, S. 487–490. (rus.)

2. **Avakyan S.V.** Climate as task of the ionospheric and solar-terrestrial physics. Possible approaches to the long-term weather predicting based on taking into account solar-geomagnetic activity. *Proceeding of IX International Conference «Problem of Geocosmos»*, 8–12 October 2012, St.-Petersburg: SPbSU. P. 193–198. (rus.)

3. **Makarova Ye.A., Kharitonov A.V., Kazachevskaya T.V.** Potok solnechnogo izlucheniya. M.: Fizmatgiz, 1991. 400 s. (rus.)

4. **Allen K.U.** Astrofizicheskiye velichiny. M.: Mir, 1977. S. 265–266. (rus.)

5. **Sherstyukov B.G.** Regionalnyye i sezonnyye zakonmernosti izmeneniy sovremennogo klimata / GU «VNIIGMI-MTsD». Obninsk, 2008. 246 s. (rus.)

6. **Bogdanov M.B., Surkov A.N., Fedorenko A.V.** Vliyaniye kosmicheskikh luchey na atmosfernoye davleniye

v vysokogornyykh usloviyakh. *Geomagnetizm i aeronomiya*. 2006. T. 46, № 2. S. 268–274. (rus.)

7. **Veretenenko S.V., Pudovkin M.I.** Varia *TSI* obshchey oblachnosti v khode vspleskov solnechnykh kosmicheskikh luchey. *Geomagnetizm i aeronomiya*. 1996. T. 36, № 1. S. 153–156. (rus.)

8. **Veretenenko S.V., Pudovkin M.I.** Effekty Forbush ponizheniy galakticheskikh kosmicheskikh luchey v varia *TSI*yakh obshchey oblachnosti. *Geomagnetizm i aeronomiya*. 1994. T. 34, № 4. S. 38–44. (rus.)

9. **Borisenkov Ye.P., Bazlova T.A., Yefimova L.N.** Peristaya oblachnost i yeye vliyaniye na atmosfernyye protsessy. L.: Gidrometeoizdat, 1989. 119 s. (rus.)

10. **Dmitriyev A.A., Govorov D.V.** Vzaimnaya svyaz fizicheskogo i geliogeofizicheskogo eksperimentov. *Trudy AANII*. 1972. T. 311. S. 132–137. (rus.)

11. **Alekseyeva L.M.** Nebesnyye spolokhi i zemnyye zaboty. M.: Znaniye, 1985. 160 s. (rus.)

12. **Miroshnichenko L.I., Perez-Peraza J.A.** Astrophysical aspects in the studies of solar cosmic rays. *International Journal of Modern Physics A*. 2008. Vol. 23, No. 1. P. 1–141.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ДУБАРЕНКО Константин Андреевич** — кандидат исторических наук доцент Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: dekan\_fkb@mail.ru

**АВАКЯН Сергей Вазгенович** — доктор физико-математических наук начальник лаборатории ФГУП ВНИЦ «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова». 199034, г. Санкт-Петербург, Биржевая линия, 12. E-mail: avak@soi.spb.ru

**БАРАНОВА Любовь Александровна** — кандидат физико-математических наук старший научный сотрудник Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН. 194021, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26. E-mail: l.baranova@mail.ioffe.ru

**ВОРОНИН Николай Анатольевич** — научный сотрудник ФГУП ВНИЦ «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова». 199034, г. Санкт-Петербург, Биржевая линия, 12. E-mail: avak2@mail.ru

**НИКОЛЬСКИЙ Генрик Андреевич** — кандидат физико-математических наук старший научный сотрудник Санкт-Петербургского государственного университета; 199034, Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб. д. 7–9. E-mail: gnik777@mail.ru

## AUTHORS

**DUBARENKO, Konstantin A.** — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: dekan\_fkb@mail.ru

**AVAKYAN Sergey V.** — Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Research Center» Vavilov State Optical Institute. SI Vavilov». 199034, St. Petersburg, Exchange line 12. E-mail: avak@soi.spb.ru

**BARANOVA Lubov A.** — Physico-Technical Institute. Ioffe RAS. 194021, St. Petersburg, St. Polytechnique., 26. E-mail: l.baranova@mail.ioffe.ru

**VORONIN Nikolay A.** — Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Research Center» Vavilov State Optical Institute. SI Vavilov». 199034, St. Petersburg, Exchange line 12. E-mail: avak2@mail.ru

**NIKOLSKIY Genrikh A.** — St. Petersburg State University. Universitetskaya emb., 7–9, St. Petersburg, Russia, 199034. E-mail: gnik777@mail.ru

УДК 621.3-1/-8

*В.И. Гуменюк, А.М. Гренчук*

## **О ВОЗМОЖНОСТИ МАССОВОГО ПРИМЕНЕНИЯ СРЕДСТВ ДИАГНОСТИКИ ПОЖАРООПАСНОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ**

*V.I. Gumenyuk, A.M. Grenchuk*

### **ABOUT THE POSSIBILITY OF MASS USAGE OF TOOLS INTENDED FOR THE DIAGNOSTICS OF THE ELECTRICAL EQUIPMENT FIRE STATE**

Рассмотрены вопросы обеспечения пожарной безопасности электрооборудования в части предупреждения аварийных ситуаций, связанных с ростом переходного сопротивления контактных соединений. Предложены средства диагностики перегрева болтовых контактных соединений для их массового использования в электроустановках.

ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ; СРЕДСТВА ДИАГНОСТИКИ; ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНТАКТНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ; ЗАЩИТА; ПЕРЕХОДНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ.

The problems of ensuring fire safety of electrical equipment to prevent accidents that are caused by growth of electric contacts intermediate resistances are analyzed. Tools for diagnostics of electrical contact connections overheating, which are suitable for mass usage in electrical equipment, are proposed.

FIRE SAFETY; DIAGNOSTICS; ELECTRICAL CONTACT CONNECTIONS; PROTECTION; INTERMEDIATE RESISTANCE.

Электрические контактные соединения (КС) — неотъемлемая часть электроэнергетических систем. В связи с увеличением энергонасыщенности технических объектов и повышением уровня их автоматизации особую актуальность приобретают вопросы, связанные с обеспечением пожарной безопасности, в частности диагностика и мониторинг состояния КС для выявления предпожарных ситуаций. Цель нашей работы — повышение пожарной безопасности электроустановок благодаря уменьшению трудоемкости обслуживания болтовых КС за счет разработки и массового внедрения средств визуальной диагностики.

Согласно [1] основными аварийными режимами в электросетях, приводящими к пожару, являются: короткое замыкание; перегрузка; увеличение переходного сопротивления контактных соединений; перенапряжение; работа электрооборудования в непредусмотренных конструкцией условиях.

Борьба с пожароопасным действием перегрузок, перенапряжений и токов коротких замыканий в настоящее время ведется посредством устройств защитного отключения. Однако при помощи этих устройств невозможно определить локальный перегрев элементов электроустановок, вызванный нарушением работы КС, — такого рода изменения не сопровождаются увеличением токов свыше штатных режимов работы электрооборудования. Поэтому далее будут рассмотрены проблемы, связанные с аварийным состоянием КС.

Особенность контактирования двух тел в том, что поверхность материала никогда не является идеально плоской, и если соприкасающиеся элементы абсолютно жесткие, то касание происходит не более чем в трех точках. В реальных КС из-за действия давления в контактной зоне всегда возникает пластическая или упругая деформация контактирующих элементов. Наличие деформаций обуславливает преобразова-



ние начальных точек соприкосновения в небольшие контактные поверхности и появление новых контактных пятен. Сумма соприкасающихся поверхностей составляет контактную поверхность, воспринимающую усилие, причем ее площадь всегда меньше кажущейся площади соприкосновения.

Таким образом, возникновение контакта твердых тел сводится к образованию на их поверхности проводящих участков, в результате чего в зоне контакта появляется так называемое сопротивление стягивания, вызывающее перегрев (механизмы проводимости при этом могут иметь различную природу [2, 3]). Фактическая площадь касания с точки зрения электропроводности может включать:

- участки соприкосновения металлических поверхностей (образуются в результате механического разрушения окисных пленок на контактирующих поверхностях);

- участки квазиметаллического контакта, покрытые тонкими адгезионными и пассивирующими пленками;

- участки, покрытые органическими пленками и пленками потускнения.

Сопротивление пленок потускнения, появляющихся на соприкасающихся поверхностях в процессе эксплуатации, может превышать сопротивление стягивания в  $10^7$  раз. Таким образом, пленки потускнения, если они не разрушены в результате электрического пробоя, практически изолируют электрические контакты. Адгезионные и пассивирующие пленки благодаря хорошим химическим связям могут выдерживать большие механические нагрузки. Однако малая толщина таких пленок делает их проницаемыми для электрического тока в силу туннельного эффекта.

Начальная стадия развития дефекта КС может протекать, не приводя долгое время к видимым изменениям, так как свойства кластеров контактных пятен и их общее сопротивление меняются незначительно. Отрицательное влияние могут оказывать ток нагрузки, режим работы электроустановки, воздействие химических реагентов, ветровых нагрузок, начальное усилие затяжки болтов, наличие стабилизации давления контактов. Однако, если контактное сопротивление меняется, приводя к существенному локальному перегреву, то наблюдается ускоренное

ухудшение контакта из-за синергетического эффекта, проявляющегося в результате совокупного действия тепловых, химических и механических процессов. Резкое увеличение переходного сопротивления сопровождается интенсивным тепловыделением, характеризующим аварийное состояние КС.

В результате роста переходного сопротивления, а следовательно, и нагрева слой контактной смазки, препятствующий образованию пленок потускнения, испаряется. Такого рода процессы приводят к уменьшению числа и площади пятен контакта, вместе с чем происходит дальнейшее увеличение плотности тока в них. Температура последнего пятна контакта достигает температуры плавления материалов КС, и между контактирующими поверхностями образуется перешеек из жидкого металла, температура которого, повышаясь, доходит до кипения, что приводит к ионизации пространства вокруг контактного соединения. Таким образом, создаются благоприятные условия для возникновения электрической дуги и многофазного замыкания в распределительном устройстве. Электрическая дуга, перемещающаяся под действием магнитных сил, может легко стать причиной возгорания электроустановки.

По условиям эксплуатации электрическая схема электроустановки во многих случаях должна иметь возможность отделения элементов друг от друга. Вместе с тем электрические контакты — это слабое звено в любых системах распределения энергии, управления промышленными процессами и машинами. По статистическим данным [2] аварийность в электрических сетях из-за нарушения работы КС составляет 10 % общего числа аварий.

Поэтому уделяется все большее внимание обеспечению надежности и мониторингу КС, для надежной работы которых необходима определенная система для своевременного выявления неисправности и их устранения, предусматривающая приемочный и периодический контроль, уход и ремонт, выполняемые в сроки, установленные инструкциями и правилами технической эксплуатации электрооборудования. Квалифицированное проведение технического обслуживания и ремонта обеспечивает безопасную эксплуатацию КС, предотвращая аварийные ситуации и отказы электроустановок [4].

Техническая диагностика и мониторинг ставят целью прогнозировать работоспособность устройств и их компонент так, чтобы ремонт и обслуживание осуществлялись до наступления аварийных ситуаций [5].

Поскольку в любых технических устройствах со временем в результате накопления повреждений происходит ухудшение рабочих характеристик, возникает необходимость неразрушающего контроля этих процессов. Мониторинг предусматривает непрерывную либо периодическую регистрацию характеристик отдельных компонент или системы в целом. Для этих целей используются одна или несколько характеристик, дающих информацию о состоянии объекта. При этом для характеристик, исполняющих функцию предупреждения, должны быть известны критические значения, предшествующие аварийным состояниям объекта мониторинга.

Эксплуатационные испытания контактных соединений сводятся в основном к параметрическому контролю их состояния, в результате которого определяется их соответствие ПУЭ [6] или ГОСТ 10434 [7].

В зависимости от условий контроль ведется путем измерения омического сопротивления контакта либо температуры. Эти измерения в большинстве случаев проводятся в рамках системы осмотров и планово-предупредительного ремонта электрооборудования [8].

С помощью измерения сопротивления или падения напряжения при протекании рабочего тока выявляются возникающие в контакте дефекты. Контроль температуры нагрева контактов позволяет выявить дефекты на более поздней стадии развития, когда опасность аварии с контактным соединением значительно нарастает.

Температурный мониторинг электрических контактов включает контактные и бесконтактные методы. Однако для большей части болтовых КС в настоящее время применяется органолептический метод контроля, при котором визуально выявляется почернение контактов и обгорание изоляции. Такие внешние признаки характерны для поздней стадии развития дефектов, когда вероятность возникновения аварийной ситуации резко возрастает.

Во время регламентных работ для восстановления усилия контактного нажатия используется ручная подтяжка болтовых КС, не предъявляющая специальных требований к квалификации

обслуживающего персонала. Ее трудоемкость применительно к одному КС невысока, однако, учитывая большое количество таких соединений, она может занимать до 30 % трудоемкости регламентных работ по обслуживанию электрооборудования. При этом необходимость восстановления усилия затяжки резьбы возникает лишь для незначительного количества КС, свойства которых ухудшились во время эксплуатации. Таким образом, подтяжка всех КС представляется неэффективной, и электротехнический персонал, как правило, пренебрегает этой операцией, что может привести к аварийным ситуациям.

В процессе работы мы проанализировали имеющиеся на сегодняшний день методы и средства диагностики КС. В таблице систематизированы сравнительные характеристики средств диагностики болтовых КС с точки зрения возможности их массового использования электроустановках.

Внедрение технико-технологических инноваций, модифицирующих процесс диагностики предожарного состояния болтовых КС, может быть сопряжено со значительными трудностями. Наличие большого количества эксплуатируемых устройств разных производителей предъявляет повышенные требования к знанию обслуживающим персоналом технических сторон применяемых средств. Это необходимо, чтобы исключить сбои в работе и, если нужно, провести срочный ремонт узлов в условиях непрерывного производственного процесса.

Несмотря на многообразие существующих средств диагностики (см. таблицу), они не нашли применения в подавляющем большинстве электроустановок. Базируясь на анализе конструкций электрооборудования и особенностей диагностирования больших переходных сопротивлений КС, можно сформулировать следующие критерии для средств диагностики, подходящие для широкого применения:

использование средств диагностики болтовых КС не должно предусматривать изменения конструкций монтажных узлов электрооборудования и подключаемых к ним токоведущих наконечников жил кабелей;

возможность массового производства должна быть обеспечена простотой конструкции и изготовления, невысокой стоимостью (порядка стоимости КС) и удобством эксплуатации изделия;

## Сравнительные характеристики средств диагностики болтовых контактных соединений

Средства диагностики болтовых контактных соединений	Достоинства	Недостатки
Термоуказатели с легкоплавким припоем	Наглядность диагностики, низкая стоимость	Являются индикаторами однократного действия, при срабатывании загрязняют полость электрооборудования
Контактные датчики температуры (термопары, термометры)	Точность температурных измерений	Сложность при обработке получаемой с датчиков информации
Бесконтактные датчики температуры (инфракрасные термометры, пирометры, инфракрасные сканеры изображений и опволоконные термометры)	Обладают быстродействием и могут быть установлены в труднодоступных или опасных для человека местах	Сложность обслуживания; предъявляют повышенные требования к квалификации электротехнического персонала
Индикаторы из сплавов с памятью формы (СПФ-индикаторы)	Наглядность диагностики, невысокая стоимость	Влияние механической обработки СПФ-материалов на температуру срабатывания индикатора
Температурные наклейки, термоиндикаторные краски и карандаши	Простота применения, невысокая стоимость	Низкая стойкость при воздействии агрессивной окружающей среды (например, морского тумана); нанесение и удаление красок требует проведения дополнительных малярных работ в полости электрооборудования
Датчики контактной нагрузки	Устройство контроля силы затяжки болта, выполненное в виде тензодатчика из фольги и установленное в отверстии внутри болта, является элементом болтового соединения	Изменение силы затяжки болтов контролируется с центрального пульта, что требует специальной сети проводов, усложняя устройство электроустановки
Ультразвуковые детекторы	Фиксируют нарушение контакта по акустическому излучению на ранних стадиях деградации	Сложность устройства; относительно высокая стоимость

критичными являются требования к размерам средств диагностики — они не должны существенно превышать габариты КС;

для обеспечения функционирования средств диагностики крайне нежелательно применение проводов и кабелей питания, так как введение дополнительных проводников в зону, подверженную дуговым разрядам, может негативно сказываться на пожарной безопасности электроустановок.

В качестве решения, удовлетворяющего перечисленным требованиям, можно предложить использовать биметаллические термоиндикаторы перегрева болтовых КС многократного действия [9, 10]. Индикаторы содержат чувствительный элемент из термобиметалла, деформирующийся в процессе нагревания. В результате температурной деформации чувствительного элемента индикатор фиксируется в аварийном положении, что при визуальном

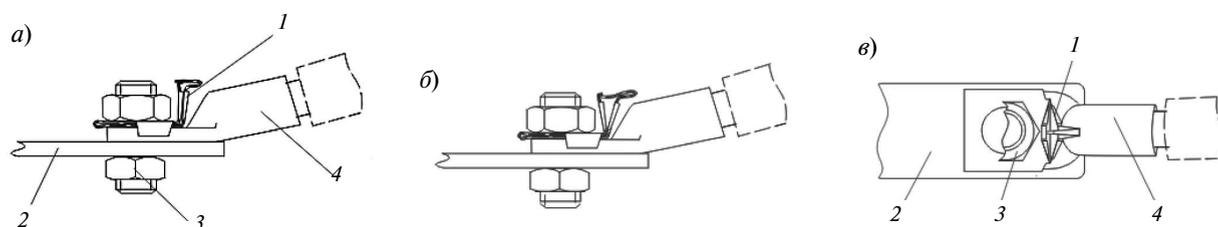


Рис. 1. Схема установки термоиндикатора в виде шайбы КС:

*а* — рабочее положение; *б* — аварийное положение; *в* — то же, вид сверху:

1 — чувствительный элемент индикатора; 2 — токоведущая шина; 3 — болтовое соединение; 4 — кабельный наконечник

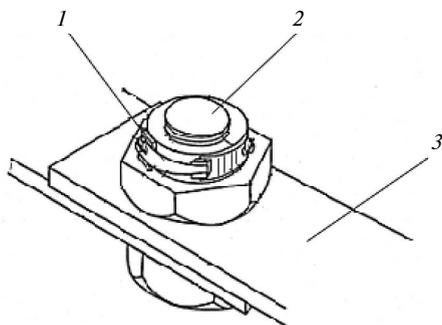


Рис. 2. Схема установки термоиндикатора в виде гайки или контргайки:  
1 — чувствительный элемент индикатора;  
2 — резьбовое соединение; 3 — токоведущие шины

осмотре указывает на аварийное состояние болтового КС. После соответствующего обслуживания КС (восстановление усилия контактного нажатия) чувствительный элемент принудительно возвращается в рабочее положение с целью дальнейшего использования термоиндикатора. При этом индикатор является элементом болтового соединения и устанавливается вместо шайбы (рис. 1) либо вместо гайки или контргайки КС (рис. 2).

Электрический ток через термоиндикаторы не проходит, поэтому их отрицательное влияние на электрические параметры КС отсутствует. Термобиметалл, используемый для термоиндикаторов, по химическому составу аналогичен нержавеющей стали, по электрохимическим параметрам — материалам деталей резьбового соединения. Его коррозионная устойчивость не хуже, чем у деталей КС.

Таким образом, в результате разработки средств визуальной диагностики перегрева болтовых КС решена задача обеспечения эффективности диагностирования без существенного усложнения элементов электроустановок.

Использование таких индикаторов призвано во время регламентного обслуживания электроустановок обеспечить электротехнический персонал информацией о пожароопасном состоянии болтовых КС.

Положительный эффект от использования средств диагностики обеспечит снижение суммарных затрат на мероприятия по пожаробезопасности электрооборудования, в том числе работающего в условиях воздействия вибрационных и ударных нагрузок, а также в условиях агрессивной внешней среды.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование пожаров, связанных с аварийным режимом работы электрооборудования: Метод. рекомендации. Красноярск: Изд-во СЭУ ФПС ИПЛ по Красноярскому краю, 2013. 22 с.
2. Бойченко В.И., Дзекцер Н.Н. Контактные соединения токоведущих шин. Л.: Энергия, 1978. 144 с.
3. Хольм Р. Электрические контакты. М.: Изд-во иностр.лит, 1961. 464 с.
4. Иванченко О.И. О болтовом соединении шин // Электрические станции. 1961. №8. С. 58.
5. Мышкин Н.К., Кончиц В.В., Браунович М. Электрические контакты. Долгопрудный : Интеллект, 2008.— 558 с.
6. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е изд. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004.
7. ГОСТ 10434—82. Соединения контактные элект-

рические. Классификация. Общие технические требования. 01.01.1983.

8. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей (ПТЭП). М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004.

9. Патент № 2491687 РФ. МПК H01R 4/00. Устройство для диагностики ослабления затяжки резьбового контактного соединения с токоведущим наконечником / А.И. Горшков, А.М. Гренчук и др. Приоритет от 11.10.2011. Бюл. изобр. 2013. № 24. 27.08.2013.

10. Патент № 2493640 РФ. МПК H01R 4/30. Устройство для диагностики ослабления затяжки гайки резьбового контактного соединения токоведущих шин / А.И. Горшков, А.М. Гренчук и др. Приоритет от 11.10.2011. Бюл. № 26, 20.09.2013

#### REFERENCES

1. Issledovaniye pozharov, svyazannykh s avariynym rezhimom raboty elektrooborudovaniya: Metod. rekomenda-tsi. Krasnoyarsk: Izd-vo SEU FPS IPL po Krasnoyarskomy krayu, 2013. 22 s. (rus.)

2. Boychenko V.I., Dzektser N.N. Kontaktnyye soyedineniya tokovedushchikh shin L.: Energiya, 1978. 144 s. (rus.)

3. **Kholm R.** Elektricheskiye kontakty. M.: Izd-vo inostr.lit, 1961. 464 s. (rus.)
4. **Ivanchenko O.I.** O boltovom soyedinenii shin. *Elektricheskiye stantsii*. 1961. №8. S. 58. (rus.)
5. **Myshkin N.K., Konchits V.V., Braunovich M.** Elektricheskiye kontakty. Dolgoprudnyy : Intellect, 2008. 558 s. (rus.)
6. Pravila ustroystva elektroustanovok (PUE). 7-ye izd. M.: Izd-vo NTs ENAS, 2004.
7. **GOST 10434–82.** Soyedineniya kontaktnyye elektricheskiye. Klassifikatsiya. Obshchiye tekhnicheskiye trebovaniya. 01.01.1983 g.
8. Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii elektroustanovok potrebiteley (PTTEP). M.: Izd-vo NTs ENAS, 2004.
9. **Patent № 2491687 RF. MPK H01R 4/00.** Ustroystvo dlya diagnostiki oslableniya zatyazhki rezbovogo kontaktnogo soyedineniya s tokovedushchim nakonechnikom./ A.I. Gorshkov, A.M. Grenchuk [i dr.]. Prior. 11.10.2011. Byul. № 24, 27.08.2013.
10. **Patent № 2493640 RF. MPK H01R 4/30.** Ustroystvo dlya diagnostiki oslableniya zatyazhki gayki rezbovogo kontaktnogo soyedineniya tokovedushchikh shin./ A.I. Gorshkov, A.M. Grenchuk [i dr.]. Prior. 11.10.2011. Byul. № 26, 20.09.2013.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ГУМЕНИЮК Василий Иванович** — доктор технических наук профессор заведующий кафедрой управления и защиты в чрезвычайных ситуациях Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: kaf-uzchs@mail.ru

**ГРЕНЧУК Андрей Михайлович** — аспирант кафедры управления и защиты в чрезвычайных ситуациях Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: grenchuk@yandex.ru

### AUTHORS

**GUMENYUK Vasily I.** — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Polytechnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: kaf-uzchs@mail.ru

**GRENUK Andrei M.** — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Polytechnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: grenchuk@yandex.ru



# ЗНАМЕНАТЕЛЬНЫЕ ДАТЫ

УДК 378

*А.И. Федотов*

## ПОПЕЧИТЕЛЬСКОМУ СОВЕТУ СПБГПУ — 10 ЛЕТ

*A.I. Fedotov*

### POLYTECHNIC UNIVERSITY THE BOARD OF TRUSTEES — 10 YEARS

В статье освещается деятельность Попечительского совета СПбГПУ в течение 10 лет, со дня его образования. Совет был создан для оказания содействия руководству вуза в осуществлении уставной деятельности университета, в решении актуальных задач его развития, конкурентоспособности СПбГПУ на отечественном и международном рынках образовательных услуг и научных исследований.

ПОПЕЧИТЕЛЬСКИЙ СОВЕТ; СПБГПУ; ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ УСЛУГИ; НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ; ЗАДАЧИ РАЗВИТИЯ УНИВЕРСИТЕТА.

In the article covering action by the Board of Trustees SPbSPU for 10 years, from the day of its formation. The Council was established to assist in the implementation the management of the university authorized activity of the University, in solving urgent problems its development of competitiveness at SPbSPU the national and international market of educational services and research.

THE BOARD OF TRUSTEES; SPBSPU; EDUCATIONAL SERVICES; RESEARCH; DEVELOPMENT TASKS OF THE UNIVERSITY

10 лет назад приказом ректора СПбГПУ назначена рабочая группа под руководством президента СПбГПУ академика РАН Ю.С. Васильева для проведения организационной работы по созданию Попечительского совета (ПС) и определено место пребывания ПС и срок начала его работы. ПС создан решением Ученого совета СПбГПУ для оказания содействия руководству вуза в осуществлении уставной деятельности университета, в решении актуальных задач его развития, содействия в обеспечении его конкурентоспособности на отечественном и международном рынках образовательных услуг и научных исследований.

Для выполнения этих задач Попечительский совет:

привлекает добровольные вклады юридических и физических лиц, в том числе зарубежных, в виде денежных, материальных и иных средств;

оказывает помощь университету в получении грантов, заключении договоров на выполнение НИР;

выступает инициатором и участвует в финансировании, содержании и материально-техническом оснащении учебно-научных структур СПбГПУ;

поддерживает инициативы представителей научной интеллигенции, различных фондов и организаций, направленные на развитие университета и его структурных подразделений;

участвует в создании Фонда развития университета;

исходя из средств, находящихся в его распоряжении, устанавливает именные стипендии студентам, аспирантам и пособия молодым преподавателям.

Основные направления в работе ПС: оказание спонсорской и другой помощи универси-



Заседание Попечительского совета СПбГПУ

тету, укрепление информационной и материально-технической базы, расширение связей с предприятиями, взаимодействие с организациями, объединяющими выпускников-политехников, и решение отдельных вопросов деятельности университета. На первом заседании рабочей группы сформирован первичный состав ПС, а на состоявшемся в этот же день общем собрании ПС избраны председатель ПС (им стал президент СПбГПУ, академик РАН Ю.С. Васильев), а также заместитель и секретарь. В дальнейшем число членов ПС возросло до 29, были избраны правление, рабочая группа и контрольно-ревизионная комиссия.

Членами Попечительского совета стали: Валентин Александрович Дмитриев — директор ОАО «Трест Гидромонтаж» филиала СПКТБ «Ленгидросталь»; Юрий Юрьевич Заплаткин — генеральный директор ОАО «Корпорация «Аэрокосмическое оборудование», академик РИА; Дмитрий Иванович Игнатъев — председатель правления ОАО ПО «Ленстройматериалы»; Сергей Рудольфович Комаров — председатель совета директоров ЗАО «Морские навигацион-

ные системы»; Ростислав Иванович Костюк — генеральный директор ОАО «Юго-Западная ТЭЦ», академик СПбИА; Леонид Григорьевич Кузнецов — генеральный директор ОАО «Компрессор», академик СПбИА; Сергей Анатольевич Левчук — генеральный директор ЗАО «Аргус-Спектр», академик РИА; Владимир Кондратьевич Лошак — генеральный директор ЗАО «Гидроэнергопром»; Валерий Ростиславович Мигуренко — генеральный директор ОАО Ордена Трудового Красного Знамени Трест «Спецгидроэнергоремонт» (ОАО «СГЭМ»), член-корреспондент РИА; Владимир Григорьевич Пешехонов — директор ОАО «Концерн ЦНИИ Электроприбор», академик РАН; Павел Гарьевич Плавник — председатель совета директоров ОАО «Звезда»; Сергей Валерьевич Семкин — генеральный директор ЗАО «ИНТЕХ»; Михаил Владимирович Сильников — генеральный директор НПО «Специальные материалы», член-корреспондент РАН; Кирилл Александрович Соловейчик — президент ОАО «Ленполиграфмаш», академик РИА; Юрий Николаевич Фомин — президент ОАО «Трест Сев-

запморгидрострой»; Максим Валерьевич Шубарев — президент корпорации «Петербургская недвижимость»; Георгий Анатольевич Фокин — генеральный директор ООО «Газпромтрансгаз Санкт-Петербург»; Алексей Сергеевич Орыщенко — генеральный директор ЦНИИ КМ «Прометей», академик РИА, и др.

Для финансового сопровождения деятельности Попечительского совета был образован Благотворительный фонд «Содействие развитию СПбГПУ», который создал базу данных из 250 выпускников-политехников, ставших руководителями организаций и предприятий, и эти сведения были доведены до структурных подразделений университета.

Одним из важных направлений в работе ПС стало оказание спонсорской и иной помощи университету как членами ПС, так и выпускниками-политехниками. За период деятельности ПС университетом были получены определенные средства на ремонт помещений, на учебно-материальную базу, на стипендии и другие цели. Заключены договоры по научной и иной деятельности между нашим университетом и предприятиями, где руководителями являются выпускники-политехники.

Попечительским советом закуплено для университета оборудование и введена в эксплуатацию мультимедийная лаборатория, а выпускниками механико-машиностроительного факультета построен фонтан и памятник студенту-политехнику. Проведена реставрация памятника политехникам, погибшим в годы Великой Отечественной войны. Члены ПС участвовали в финансировании проведения «Вечеров в Политехническом» и приобретении для Белого зала рояля.

С 2010 года систематически (два раза в год) издается журнал «Новости», который рассылается на факультеты СПбГПУ, членам ПС и заинтересованным организациям.

Издано и передано университету 240 экземпляров книги «СПбГПУ — биографии (Энциклопедия)». Оказывалась материальная помощь и производилось поощрение сотрудников университета. Санаторий-профилакторий обеспечивался лекарственными препаратами для лечения студентов и сотрудников СПбГПУ.

На одном из заседаний ПС сделал доклад А.И. Рудской, ректор СПбГПУ, член-коррес-

пондент РАН, который рассказал о ближайших задачах развития университета. Он довел до сведения ПС развернутый план проводимой реструктуризации Университета по образовательной и финансово-экономической деятельности. Подробно изложил принципы формирования зарплаты преподавательского состава, исходя из рейтинга.

Большое внимание ректор уделил переходу вуза в разряд автономных. Рассказал о созданном Фонде целевого капитала развития СПбГПУ и подготовке к созданию Ассоциации выпускников-политехников. Кроме того, он обратил особое внимание на оказание спонсорской помощи университету предприятиями, где руководителями являются друзья и выпускники-политехники, на ремонт аудиторий, расширение учебно-материальной базы, выплату стипендий и оказание материальной помощи студентам и сотрудникам, а также затронул вопросы заключения между этими предприятиями и университетом договоров по научной деятельности, выпуску книг, взаимодействию с организациями, объединяющих выпускников-политехников и др.

Попечительским советом были организованы съемки различными кинокомпаниями телевизионных, художественных и документальных фильмов, повышающих имидж университета. Так был создан документальный фильм «Физики и лирики» о выдающихся выпускниках-политехниках. Издано более 30 книг культурно-исторического направления с частичной или полной оплатой. Так, на средства ПС были выпущены книга «Политехники в странах Африки» и др. Оказано содействие в выпуске книг «110 лет на службе России», посвященной 110-летию основания СПбГПУ, и «Ленинградские политехники в Великой Отечественной войне» к 65-летию Победы в Великой Отечественной войне, для Фундаментальной библиотеки приобретены книги «Великая Россия» (Энциклопедия), «Нобелевские лауреаты». К Году экологии издана книга «Академик В.И. Вернадский», а ко дню Победы — «Книга памяти погибшим политехникам в годы ВОВ». Попечительский совет организовал сбор денежных средств на реконструкцию памятника погибшим политехникам; средства поступили от руководителей организаций, которые являются выпускниками СПбГПУ.



Президент СПбГПУ академик РАН *Ю.С. Васильев*,  
ректор СПбГПУ член-корреспондент РАН *А.И. Рудской*,  
заместитель председателя Попечительского совета доктор технических наук *А.И. Федотов*

В честь 65-летия Победы проведена торжественная встреча с работающими в университете участниками Великой Отечественной войны. Участникам войны были подарены жидкокристаллические телевизоры «Toshiba», а Совету ветеранов ВОВ, военной службы и жителей блокадного Ленинграда — компьютер в сборе.

Большое значение уделялось взаимодействию с организациями, объединяющими выпускников-политехников. Оказано содействие в создании Ассоциации политехнических предприятий «Полибизнес» и Благотворительного фонда «Политех», основная задача которых — внедрение разработок сотрудников и студентов СПбГПУ в промышленность. Проведена координация действий организаций, объединяющих выпускников-политехников (клуб выпускников СПбГПУ, Ассоциация «Полибизнес», Благотворительный фонд «Политех», клубы выпускников ММФ и ЭлМФ).

ПС успешно решал отдельные вопросы деятельности университета. Так члены ПС в лице

не только представителей СПбГПУ, но и руководителей организаций проводят занятия со студентами. ПС принял участие в работе по подготовке создания Ассоциации выпускников-политехников.

Всем членам ПС и сотрудникам возглавляемых ими предприятий университет предоставлял услуги, определенные коллективным договором, что позволило расширить взаимовыгодные связи Университета с предприятиями. Увеличилось количество посещающих оздоровительную базу «Политехник», спортивный комплекс, концерты в Белом зале, типографию, подготовительные курсы и курсы изучения иностранных языков, столовые и кафе. Некоторые сотрудники предприятий получают в СПбГПУ второе высшее образование, выбирают для своих детей и родственников получение первого высшего образования именно в СПбГПУ.

Члены ПС активно участвуют в заседаниях Ученого совета и в различных научных, технических и других конференциях, а также празд-

нических мероприятиях. Ученому совету университета Попечительский совет представлял лиц, внесших большой вклад в развитие СПбГПУ, на присвоение почетных званий. В главном здании при участии ПС создана галерея видных ученых.

В ПС был проведен анализ тем диссертаций аспирантов, результаты этой работы доложены ректору. Созданы рабочая группа по мониторингу реализации программы развития инновационной инфраструктуры СПбГПУ, а также комиссия для выработки предложений по более

эффективному использованию возможностей в связи с переходом вуза в разряд автономных.

Подписан договор Попечительского совета с Советом ветеранов ВОВ, военной службы и жителей блокадного Ленинграда о совместной деятельности по военно-патриотическому воспитанию студентов. ПС представлял интересы СПбГПУ на 80 различных мероприятиях как в России, так и за рубежом.

Ряд предприятий и организаций, руководимых членами ПС, участвуют в проведении ярмарок вакансий и производственной практики.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Коноваленко В.А.** Российская академия наук // «Новости» 2013. №2 (8). СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2013.
2. **Скуратов В.И.** Попечительскому совету — 10 лет // «Новости» 2014. №1 (9). Изд-во СПбГПУ, 2014.
3. **Скуратов В.И.** Попечительский совет СПбГПУ // «Политехник» №12–13 от 28.04.2014 г. СПбГПУ, 2014.

### REFERENCES

1. **Konovalevko V.A.** Rossiyskaya akademiya nauk. *Novosti*. 2013. №2 (8). SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2013.
2. **Skuratov V.I.** Popечitel'skomu sovetu — 10 let. *Novosti*. 2014. №1(9). SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2014.
3. **Skuratov V.I.** Popечitel'skiy sovet SPbGPU. *Politekhnik*. №12-13 ot 28.04.2014. SPbGPU. 2014.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**ФЕДОТОВ Алексей Иванович** — доктор технических наук профессор, президент Санкт-Петербургской инженерной академии, заместитель председателя Попечительского совета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая д. 29, Санкт-Петербург, Россия; тел.: (812) 596–27–00, e-mail: ps@spbstu.ru

### AUTHORS

**FEDOTOV Aleksei I.** — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; phone: (812) 596–27–00, e-mail: ps@spbstu.ru

УДК 001:929

*А.С. Семенов*

## К 85-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ ЛЕОНИДА БОРИСОВИЧА ГЕЦОВА

*A.S. Semenov*

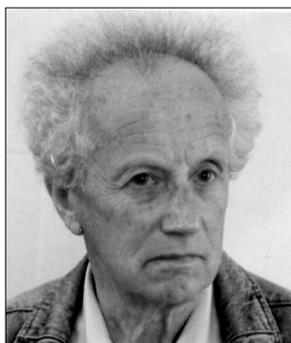
### THE 85-TH ANNIVERSARY OF THE BIRTHDAY OF LEONID GETSOV

Приводятся краткие сведения о биографии, трудовых и научных достижениях профессора Л.Б. Гецова, которому в этом году исполнилось 85 лет со дня рождения.

Л.Б. ГЕЦОВ; 85 ЛЕТ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ.

This article presents biographical notes on L.B. Getsov. In connection with its 85-year of the birth date.

L.B. GETSOV; 85 YEARS SINCE THE BIRTH.



И с п о л н и л о с ь 85 лет со дня рождения известного специалиста в области прочности металлических материалов доктора технических наук Леонида Борисовича Гецова и 60 лет его трудовой деятельности.

1941–1942 годы Л.Б. Гецов провел в блокадном Ленинграде, где мальчиком участвовал в защите города, сбрасывая с крыш вражеские зажигательные бомбы.

Окончив в 1953 году металлургический факультет Ленинградского политехнического института и физический факультет Ленинградского университета, Л.Б. Гецов много лет проработал в промышленности в должности мастера, заместителя начальника цеха, главного металлурга, заведующего лабораторией, ведущего научного сотрудника.

Большой цикл работ Л.Б. Гецова в начальный период его деятельности посвящен технологическим разработкам в области термической обработки, обработки металлов давлением и литейного производства. Им проведены оригинальные работы по профильной прокатке

и штамповке лопаток, по точному литью лопаток и рабочих колес насосов, по центробежному электрошлаковому литью деталей насосов и газовых турбин.

Леонид Борисович начал трудовой путь в Центральном котлотурбинном институте (ЦКТИ) еще в студенческие годы (в 1952 году) в качестве лаборанта в котельном отделе. Затем многие годы Л.Б. Гецов сочетал свою производственную деятельность с работой в отделе металлов ЦКТИ, а также в ЦНИИ КМ «Прометей», где занимался исследованиями ползучести, длительной прочности, сопротивления релаксации и термической усталости металлических материалов. В настоящее время Леонид Борисович, будучи штатным сотрудником отдела ресурса, технической диагностики и ремонтно-восстановительных технологий металлов энергооборудования НПО ЦКТИ, руководит рядом работ, связанных с определением и продлением ресурса элементов газотурбинных установок.

С 1982-го по 1986 годов Леонид Борисович читал лекции в Санкт-Петербургском институте машиностроения. С 2000 года Л.Б. Гецов — профессор кафедры сопротивления материалов СПбГПУ, а в 2006–2011 годах — профессор кафедры промышленной теплоэнергетики СПбГПУ. Л.Б. Гецов подготовил и читает студентам старших курсов лекции по дисциплине

«Материалы и прочность оборудования ТЭС и АЭС». В 2008 году под редакцией Л.Б. Гецова и В.М. Боровкова опубликовано учебное пособие «Материалы и прочность оборудования ТЭС» [1].

Отличительной чертой Л.Б. Гецова как ученого всегда была практическая направленность его исследований. Этим объясняется многочисленность проблем, которые он решал в разные периоды своей научной деятельности. Одной из первых и наиболее сложных была его работа по изучению закономерностей поведения материалов и элементов конструкций при нестационарных режимах нагружения и созданию соответствующих расчетных методик. В процессе выполнения этих работ был предложен ряд формулировок критериев разрушения материалов при нестационарном нагружении, а в 1971 году — широко известный «универсальный» деформационный критерий разрушения, выдержавший многолетнюю проверку временем. Многочисленные экспериментальные работы, в том числе выполненные в ЦКТИ и на кафедре сопротивления материалов СПбГПУ, подтвердили адекватность определения условий разрушения образцов и деталей с помощью этого критерия.

Среди исследований, выполненных под руководством Л.Б. Гецова и имеющих большое как научное, так и практическое значение, следует отметить цикл работ по совершенствованию методов выбора режимов ускоренных испытаний газотурбинных установок (ГТУ), позволяющих надежно подтверждать их назначенный ресурс.

Большое значение имеют также выполненные Л.Б. Гецовым вместе с В.И. Никитиным и А.И. Рыбниковым исследования коррозионно-механического поведения материалов и деталей ГТУ в условиях агрессивного воздействия продуктов сгорания топлива и в морских условиях эксплуатации. Л.Б. Гецов активно участвовал в работах по созданию и внедрению новых высокотемпературных защитных покрытий для лопаток турбин. Им совместно с А.И. Рыбниковым разработаны методы аттестации защитных покрытий, в том числе при термоциклическом нагружении, предложены расчетные методы прогнозирования коррозионной долговечности сплавов в условиях эксплуатации при высоких температурах.

На основе результатов исследований свойств материалов и изготовленных из них дисков при

стационарных и нестационарных режимах испытания Л.Б. Гецов в 1962 году защитил кандидатскую диссертацию. А в 1979 году Леонид Борисович защитил докторскую диссертацию на тему «Разработка критериев разрушения материалов для обоснования надежности деталей газовых турбин, работающих при нестационарных режимах» по специальности «Динамика и прочность машин, приборов и аппаратуры».

Многие из учеников профессора Л.Б. Гецова успешно защитили кандидатские и докторские диссертации. Он продолжает и в настоящее время активную работу с молодежью. В декабре 2013 года его аспирантом Н.А. Катанхой была успешно защищена кандидатская диссертация.

Л.Б. Гецов — один из авторов ряда нормативных документов: «Норм прочности судовых газовых турбин», «Норм прочности турбо- и электронасосов», «Методических рекомендаций Госстандарта СССР по расчетному определению запасов прочности дисков газовых турбин при термоциклических нагрузках», «Методических рекомендаций Госстандарта СССР по определению параметров кривых ползучести и накопления повреждений при одноосном нагружении». В 2013 году под руководством юбиляра подготовлены «Нормы прочности стационарных ГТУ». В последние годы под руководством Л.Б. Гецова ведутся в ЦКТИ и СПбГПУ интенсивные экспериментальные и расчетные работы по изучению прочности и долговечности жаропрочных монокристаллических сплавов для лопаток газотурбинных двигателей.

Леонидом Борисовичем выполнены исследования по определению характеристик сопротивления релаксации напряжений в металлах и сплавах и по изучению конструктивной прочности различных деталей газовых турбин. Долголетняя практика работы в конструкторском бюро и специализация юбиляра в вопросах выбора материалов для изготовления ответственных деталей энергетического оборудования сделала его непререкаемым авторитетом в стране в этой области.

В 1972 году совместно с профессором А.М. Борздыкой юбиляр опубликовал монографию «Релаксация напряжений в металлах и сплавах». Второе издание [2] этой получившей широкую известность книги было осуществлено в 1978 году.

Обобщением большинства работ Л.Б. Гецова является его монография «Материалы и прочность деталей газовых турбин» [3], выдержавшая четыре издания (1973, 1982, 1996 и 2011 гг.) и ставшая настольной книгой газотурбинистов, а также опубликованный в соавторстве с сотрудниками Челябинского политехнического института (теперь Южноуральский университет) в 1996 году в Екатеринбурге справочник «Механические

свойства сталей и сплавов при нестационарном нагружении» [4]. Кроме того, Л.Б. Гецовым написано и опубликовано на страницах отечественных и иностранных журналов около 400 научных статей по различным вопросам металловедения и прочности материалов и конструкций.

*Поздравляем профессора Леонида Борисовича Гецова с юбилеем, желаем здоровья и дальнейших творческих успехов.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Боровков В.М., Гецов Л.Б., Воробьев Ю.С., Копсов А.Я., Петин С.В., Пигрова Г.Д., Рыбников А.И.** Материалы и прочность оборудования ТЭС: учеб. пособие / Под ред. В.М. Боровкова, Л.Б. Гецова. СПб: Политехник, 2008. 610 с.

2. **Борздыка А.М., Гецов Л.Б.** Релаксация напряжений в металлах и сплавах. Москва, 1978. 2-е издание, переработанное и дополненное. 304 с.

3. **Гецов Л.Б.** Материалы и прочность деталей газовых турбин: в 2 книгах. 4-е издание. Рыбинск: ООО «Издательский дом Газотурбинные технологии». 2010, 610 с. (1 том); 2011, 493 с. (2 том).

4. **Гохфельд Д.А., Гецов Л.Б., Кононов К.М., Кульчихин Е.Т., Ребяков Ю.Н., Садаков О.С., Тимашев С.А., Чепурский В.Н.** Механические свойства сталей и сплавов при нестационарном нагружении: Справочник. Екатеринбург, 1996. 408 с.

### REFERENCES

1. **Borovkov V.M., Getsov L.B., Vorobyev Yu.S., Kopsov A.Ya., Petinov S.V., Pigrova G.D., Rybnikov A.I.** Materialy i prochnost oborudovaniya TES [Text]: ucheb. posobiye / Pod red. V.M. Borovkova, L.B. Getsova. SPb: Izd-vo Politehnik, 2008. 610 s. (rus.)

2. **Borzdyka A.M., Getsov L.B.** Relaksatsiya napryazheniy v metallakh i splavakh. Moskva, 1978. 2-ye izdaniye, pererabotannoye i dopolnennoye. 304 s. (rus.)

3. **Getsov L.B.** Materialy i prochnost detaley gazovykh turbin. v 2 knigakh. (4-ye izdaniye). Rybinsk: ООО «Izdatelskiy dom Gazoturbinnyye tekhnologii», 2010. 610 s. (1 tom); 2011, 493 s. (2 tom). (rus.)

4. **Gokhfeld D.A., Getsov L.B., Kononov K.M., Kulchikhin Ye.T., Rebyakov Yu.N., Sadakov O.S., Timashev S.A., Chepurskiy V.N.** Mekhanicheskiye svoystva staley i splavov pri nestatsionarnom nagruzhenii: Spravochnik. Yekaterinburg, 1996. 408 s. (rus.)

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**СЕМЁНОВ Артем Семёнович** — кандидат физико-механических наук доцент кафедры механики и процессов управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: Semenov.Artem@googlegmail.com

### AUTHORS

**SEMENOV Artyom S.** — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: Semenov.Artem@googlegmail.com

УДК 011:929

*Ю.С. Васильев*

## **ПРОФЕССОР АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ МОРОЗОВ**

*Yu.S. Vasiliev*

### **PROFESSOR ALEXANDER MOROZOV**

Статья посвящена выдающемуся энергетнику А.А. Морозову, выпускнику Политехнического института 1913 года, который один из первых занимался проблемами «утилизации водной энергии» и руководил проектированием по одноименной дисциплине на инженерно-строительном факультете. В начале 30-х годов под его руководством в гидроэнергoproекте выполнен большой объем проектно-изыскательских работ по использованию рек в европейской части страны. Большой вклад А.А. Морозов внес в подготовку кадров, в том числе и высшей квалификации, работая в вузе заведующим кафедрой.

СТУДЕНТ; ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ; ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ; УТИЛИЗАЦИЯ ВОДНОЙ ЭНЕРГИИ; ГИДРОЭНЕРГОПРОЕКТ; НАЧАЛЬНИК ТЕХНИЧЕСКОГО ОТДЕЛА; ПРОФЕССОР; ОРДЕНОНОСЕЦ.

The article is devoted to outstanding power engineering specialist AA Morozov, a graduate of the Polytechnic Institute in 1913, which is one of the first dealt with problems "disposal of water power "and supervised the design of the same name on the discipline Engineering Construction Faculty. In the early of 30th years under his leadership Hydroenergoproject a large volume of design and survey works on the use of of the rivers in the European part of the country.

Great contribution A.A. Morozov has made to The Professional Training, including of higher qualification, working in the university head of the chair.

STUDENT; POLYTECHNIC INSTITUTE; OF DIPLOMA PROJECT; WATER RECYCLING ENERGY; HYDROENERGOPROJECT; HEAD OF TECHNICAL DEPARTMENT; PROFESSOR; HOLDER OF ORDER.

12 февраля 2014 года исполнилось 125 лет со дня рождения выдающегося ученого и инженера профессора Александра Александровича Морозова. Он родился в городе Владикавказе в семье военного. Его отец, Александр Доримедонтович, дворянин, во время Первой мировой войны командовал артиллерийской бригадой в чине генерал-майора. После Октябрьской революции был мобилизован в Красную Армию и назначен начальником запасных войск Московского военного округа. Вел формирование и руководил обучением частей Красной Армии во время гражданской войны. Его мать, Вера Алексеевна Морозова (до замужества Колчина), вела частные уроки, а после переезда в Москву служила в Центральном статистическом управлении.

Александр Александрович Морозов после окончания реального училища во Владикавказе поступил в 1905 году на электромеханическое отделение Петербургского политехнического института.

Будучи студентом первого курса, он с увлечением занимался химией и физикой. На старших курсах он был одним из активнейших участников студенческого «научно-технического кружка электриков», а также принимал участие в организации и работе «Всероссийских энергетических съездов».

Его дипломный проект «Невская ГЭС у Кривого колена» выполнялся под руководством Бориса Александровича Бахметьева (в дальнейшем основатель школы гидравликов в Колумбийском университете в США).

Окончив в 1913 году Политехнический институт, А.А. Морозов был оставлен при нем в качестве «стипендиата» для педагогической деятельности. Осенью того же года ему было поручено ведение практических занятий по курсу гидравлики на электромеханическом отделении. С весны 1914 года он руководил курсовым проектированием по специальной дисциплине «Утилизация водной энергии» на инженерно-

строительном отделении. Его педагогическая работа на этих двух отделениях (позднее факультетах) продолжалась всю жизнь.

Одновременно с преподаванием в вузе А.А. Морозов вел большую инженерную работу. Он заведовал изысканиями для Рионской ГЭС в Закавказье, для Константиновской ГЭС в Донбассе и для Роухиала ГЭС в Финляндии. В молодые годы он дополнил свое блестящее теоретическое образование разносторонним практическим изучением богатейших водных ресурсов СССР, использованию которых с таким исключительным успехом посвятил всю свою дальнейшую жизнь.

После Великой Октябрьской социалистической революции деятельность А.А. Морозова становится все более многогранной. В 1918 году он заведует отделом плотин в «Управлении Свирского строительства», работая одновременно с большим успехом в составе руководимой М.А. Шателеном Петроградской группы ГОЭЛРО, где составляет «Сводку водно-энергетических ресурсов Северо-Запада».

В 32 года, благодаря своему таланту и творческой энергии, был единогласно избран Ученым советом ЛПИ профессором по курсу «Утилизация водной энергии».

С 1921 по 1922 год он состоит секретарем инженерно-строительного факультета, а с июля 1922 года по ноябрь 1924-го — проректором по учебным делам института. Неустанным заботам Александра Александровича обязан наш институт быстрым восстановлением нормальной учебной жизни в послереволюционный период.

С осени 1921 года до весны 1930-го он также преподавал «Утилизацию водной энергии» и в Ленинградском технологическом институте. Одновременно, в 1921–1923 годах Александр Александрович вел преподавание этой дисциплины и во Втором (бывшем женском) политехническом институте.

В истории СПбГПУ 1921 год можно считать официальной датой создания крупнейшей школы советских гидроэнергетиков.

Эта школа выпускала кадры по трем направлениям:

1) строителей-гидротехников (отсюда вышли руководители крупнейших проектных организаций и строек ГЭС);

2) электриков-эксплуатационников (из них сформировались многие директора и главные инженеры ГЭС);



Заслуженный деятель науки и техники  
доктор технических наук профессор  
Александр Александрович Морозов  
(1889–1956)

3) конструкторов гидротурбин в Политехническом и Технологическом институтах (из которых образовался, в частности, состав руководящих работников Ленинградского металлургического завода).

Более 10 человек из школы А.А. Морозова были избраны членами Академии наук СССР и Российской академии наук. Большая плеяда его учеников связала свою деятельность с научной работой. Они успешно защитили кандидатские и докторские диссертации.

Практическая инженерная деятельность Александра Александровича в 20-е и 30-е годы прошлого века принимала все более и более значимый характер. Руководя проектированием многочисленных объектов гидроэнергостроительства, он одновременно разрабатывает теорию водохозяйственных расчетов. Впервые выдвинул идею и разработал методику составления так называемых «диспетчерских графиков» регулирования стока. «Диспетчерские графики» являются теперь общепризнанной, неотъемлемой частью всех водно-энергетических расчетов, определяющих основные параметры мощных гидростанций с крупными водохранилищами.

Одновременно с этим в период 1923—1927 годов он активно работает в созданном при Государственном мелиорационном институте «Бюро по проектированию ДзораГЭС» и, в частности, выдвигает оригинальную мысль об устройстве на плотине горной реки самовыкатывающегося цилиндрического затвора (блестяще сконструированного впоследствии известным русским специалистом в области затворов гидросооружений профессором В.Г. Гебелем). За удачный проект ДзораГЭС Александр Александрович был награжден грамотой ЦИКа Армении.

В том же научно-исследовательском институте были разработаны под руководством Александра Александровича первые типовые проекты малых ГЭС.

1929 год можно считать началом особо выдающегося периода творческой инженерной деятельности Александра Александровича, возглавившего тогда техническое руководство крупной проектно-издательской организации треста «Гидроэнергопроект» (ныне «Ленгидропроект»).

Среди работ, выполненных Гидроэнергопроектом под непосредственным руководством Александра Александровича как начальника технического отдела и главного инженера треста, особого внимания заслуживает водно-энергетическая схема центра Европейской части СССР (схема использования рек Волги, Камы, Оки, Дона и Днепра), а также схема использования рек северных и северо-западных районов (Тулома, Нева, Свирь, Вуокса, Нарова и др.).

К середине 30-х годов относится интенсивная и ответственная работа А.А. Морозова в Госплане СССР. Здесь он как член и председатель специальных экспертных комиссий рассматривал проекты использования водных сил крупнейших районов.

С 1937 года А.А. Морозов решает посвятить себя в основном педагогической деятельности и в связи с этим прекращает работу в качестве главного инженера Гидроэнергопроекта, оставаясь в нем лишь постоянным консультантом.

Руководя кафедрой «Утилизация водной энергии» в ЛПИ, он ежегодно обеспечивает в течение последних предвоенных лет большие выпуски специалистов — число дипломантов кафедры достигает 30—50 человек в год.

В этот период ему была присвоена ученая степень доктора технических наук без защиты диссертации.

Работая во время Великой Отечественной войны в Ташкенте, он принимал самое активное участие в проектировании и строительстве каскада Чирчик—Бозсуйских гидростанций и наиболее мощной в Средней Азии — Фархадской ГЭС. Большую практическую помощь оказывал он и Узбекэнерго в налаживании эксплуатации вновь построенных станций. В этот же период он преподавал во вузах, находящихся в Ташкенте. За свою плодотворную деятельность в области энергетического хозяйства Средней Азии и подготовки национальных кадров специалистов А.А. Морозов был награжден Почетной грамотой Верховного Совета Узбекской ССР.

К военному же периоду относится и напряженная работа Александра Александровича, связанная с восстановлением Днепровской ГЭС. Он — автор исключительно ценного предложения, позволившего значительно увеличить установленную мощность гидростанции.

Вернувшись в 1944 году в Ленинград, А.А. Морозов отдал весь свой огромный опыт педагогической и практической работы делу создания учебника для вуза и пособия по проектированию. Им были составлены два капитальных труда: «Использование водной энергии» (переведен на китайский и румынский языки), изданный в 1948 году, и справочник «Турбинное оборудование гидроэлектростанций», изданный в 1949 году.

А.А. Морозов был видным общественным деятелем. На I Всесоюзном съезде гидротехников в 1931 году его избрали членом Президиума Всесоюзного ГидроНИТО. После слияния этого общества с НИТО строителей Александр Александрович вошел в состав правления его гидротехнической секции.

А.А. Морозов был председателем Окружной избирательной комиссии по выборам в Верховный Совет СССР и председателем Окружной избирательной комиссии по выборам в местные советы, а также заместителем председателя районной комиссии по выборам в Верховный Совет РСФСР.

Выдающаяся научно-производственная, педагогическая и общественная деятельность Александра Александровича была высоко оценена Правительством, наградившим его в 1944 году орденом Трудового Красного Знамени.

Кроме того, он награжден медалями «За оборону Ленинграда» и «За доблестный труд в Великой Отечественной войне».

В 1946 году ему было присвоено почетное звание заслуженного деятеля науки и техники РСФСР.

В последние годы своей жизни Александр Александрович много занимался как общими вопросами развития энергетических систем СССР и их объединений, так и конкретными задачами создания единых энергетических систем Европейской части СССР и Сибири.

Александр Александрович вел большую общественную работу. Им был прочитан цикл популярных лекций, освещающих гидроэнергетическое строительство Советского Союза; сделана серия докладов, в которых с исключительной ясностью были обрисованы задачи электрификации СССР, значение отдельных объектов гидроэнергостроительства и перспективы, открывающиеся в нашей стране в связи с осуществлением этих строек.

Большое участие Александр Александрович принимал в работе ряда инженерно-технических обществ, а также Дома ученых в Лесном.

Он был награжден Орденом Ленина, Трудового Красного Знамени, медалями «За доблестный труд в Великой Отечественной войне», «За оборону Ленинграда».

Александр Александрович был обаятельным человеком, строгим и взыскательным к своим сотрудникам и ученикам, как и к себе, но вместе с тем исключительно доброжелательным и справедливым. В силу этого он снискал к себе всеобщую любовь, признательность и уважение. Всегда жизнерадостный, полный кипучей энергии — таким он остался в памяти его учеников.

Профессор А.А. Морозов скончался 18 сентября 1956 года.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**ВАСИЛЬЕВ Юрий Сергеевич** — доктор технических наук профессор, президент Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, академик РАН; 195251, ул. Политехническая 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: president@spbstu.ru

#### AUTHOR

**VASILIEV Yuriy S.** — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Polytechnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: president@spbstu.ru

УДК 001:929

*А.Г. Морачевский, Е.Г. Фирсова*

**ПРОФЕССОР ПАВЕЛ ПАВЛОВИЧ ФЕДОТЬЕВ  
(к 150-летию со дня рождения)**

*A.G. Morachevskiy, E.G. Firsova*

**PROFESSOR PAVEL P. FEDOT'EV  
(the 150 th anniversary of his birth)**

Очерк посвящен жизни, педагогической и научной деятельности профессора Петербургского (Петроградского, Ленинградского) политехнического института (с 1904 по 1934 год), члена-корреспондента АН СССР П.П. Федотьева (1864–1934), крупнейшего специалиста в области минеральной технологии и технической электрохимии, одного из основателей отечественной алюминиевой промышленности.

ОЧЕРК; ПЕДАГОГИЧЕСКАЯ И НАУЧНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ; ПРОФЕССОР; ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ; ЧЛЕН-КОРРЕСПОНДЕНТ АН СССР; П.П. ФЕДОТЬЕВ; ОСНОВАТЕЛЬ.

Essay is dedicated to of life, pedagogical and scientific activity professor of Petersburg (Petrograd, Leningrad) Polytechnic Institute (from 1904 to 1934.), corresponding Member of the USSR Academy of P.P. Fedot'ev (1864–1934), largest expert in the field of mineral technologies and technical electrochemistry, one of the founders of the domestic aluminum industry.

ESSAY; PEDAGOGICAL AND SCIENTIFIC ACTIVITY; PROFESSOR; ST. PETERSBURG POLYTECHNIC INSTITUTE; A MEMBER OF THE USSR ACADEMY OF SCIENCES; P.P. FEDOT'EV; FOUNDER.

Павел Павлович Федотьев, крупнейший специалист в области минеральной технологии и прикладной электрохимии, преподавал в Петербургском (Петроградском, Ленинградском) политехническом институте с 1904-го по 1934 год. С его именем связано развитие целого ряда электрохимических производств в нашей стране, прежде всего — создание отечественной алюминиевой промышленности.

П.П. Федотьев родился 22 июня 1864 года в г. Благовещенске-на-Амуре в семье старшего военного фельдшера. Среднее образование будущий ученый получил в Сибирской военной гимназии в Омске, по окончании которой поступил в 1881 году в Николаевское инженерное училище в Санкт-Петербурге. Через год, оставив училище, он перешел в Петербургский технологический институт. П.П. Федотьев окончил Технологический институт в 1888 году по химическому отделению. Каких-либо сведений о периоде его обучения в институте найти не удалось.

Свою инженерную деятельность П.П. Федотьев начал в 1889 году на Бондюжском химическом заводе Товарищества П.К. Ушкова и компании, входящем в число Волго-Камских химических заводов, вблизи Елабуги. Позднее работал в Минске, Петербурге, длительное время — с 1894 по 1902 год — занимал различные технические должности на Охтинском пороховом заводе (Петербург). Одновременно П.П. Федотьев занимался активной литературной деятельностью. За период с 1896 по 1902 год им опубликованы шесть брошюр «для химиков, инженеров, заводчиков и студентов» по актуальным вопросам развития химических производств в России. В 1902 году П.П. Федотьев был приглашен в Политехнический институт и сразу же направлен в страны Западной Европы на срок с 1 декабря 1902 года по 1 июня 1904-го для работы над диссертацией на звание адъюнкта и ознакомления с состоянием химических производств. Основным местом командировки П.П. Федотьев выбрал созданный и руководи-

мый В. Оствальдом Физико-химический институт при Лейпцигском университете (Германия).

Диссертационную работу П.П. Федотьев выполнил на тему «Аммиачно-содовый процесс с точки зрения учения о фазах». Этот процесс получения соды был предложен бельгийским химиком и промышленником Э. Сольве в 1861 году и к концу XIX века завоевал популярность, был более простым и дешевым, чем процесс, предложенный в 1791 году французским инженером Лебланом. Работа П.П. Федотьева была полностью опубликована в журнале «Известия Санкт-Петербургского политехнического института» (1904 г.). Ее автор выполнил большой объем экспериментальных исследований, и одним из первых в России применил правило фаз Гиббса для объяснения происходящих процессов. В 1904 году после успешной защиты диссертации на звание адъюнкта П.П. Федотьев был избран Советом Политехнического института экстраординарным профессором минеральной технологии и технической электрохимии. В последующие годы П.П. Федотьев неоднократно выезжал в Западную Европу, ознакомился с развитием там химической промышленности. К 1910 году ему удалось достаточно хорошо оборудовать лаборатории как технической электрохимии, так и минеральной технологии, что позволило, наряду со студенческими практикумами, выполнять дипломные работы и более крупные научные исследования. В 1910 году П.П. Федотьев был избран на должность ординарного профессора.

В 1912-м Павел Павлович со своим учеником В.П. Ильинским публикует «Экспериментальное исследование по электрометаллургии алюминия», которое получило мировую известность и послужило началом работ П.П. Федотьева и его научной школы в области электрометаллургии легких металлов. В 1913 и 1915 годах П.П. Федотьев и В.П. Ильинский публикуют еще две работы в этой области.

В 1915-м в связи с первой мировой войной и применением немцами отравляющих (удушающих) веществ встал вопрос о срочном увеличении производства хлора в сжиженном состоянии на заводах России. П.П. Федотьев был назначен председателем созданной при Главном Артиллерийском управлении комиссии по расширению производства хлора на заводах Юга



Федотьев Павел Павлович

России (Донбасс). В 1916 году П.П. Федотьев был назначен директором завода в г. Славянске. Одновременно он руководил и другим заводом, где сохранилась бельгийская администрация. Поставки жидкого хлора полностью удовлетворяли потребности армии. Успешно была решена также задача производства фосгена.

Тяжелое время голода и холода (1919–1921 гг.) П.П. Федотьев провел в Петрограде, лишь изредка выезжая в командировки, по мере необходимости производя научные исследования. В холодной квартире он усиленно работал над рукописью учебника «Электрометаллургия», который в виде трех выпусков был опубликован в 1921–1923 гг.

В 1920 году П.П. Федотьев был избран профессором Технологического института для чтения специального курса по технической электрохимии. Он читал эти лекции до реформы высшего образования в стране (1930). С 1921 по 1923 год П.П. Федотьев был деканом созданного в Политехническом институте Химического факультета, проявлял большую энергию и инициативу в налаживании учебного процесса и научной работы.

Период жизни с 1924-го по 1934 год характеризуется весьма интенсивной научной и научно-организационной деятельностью П.П. Федотьева. Увеличилось число студентов, выполняющих

дипломные работы под его руководством, на кафедре появились аспиранты. С момента учреждения государственных квалификационных комиссий (1925 г.) П.П. Федотьев состоял председателем квалификационной комиссии по химическому факультету. Он был членом Ленинградского областного научно-технического совета и Технического совета при Высшем совете народного хозяйства (ВСНХ) в Москве.

В 1924 году под руководством П.П. Федотьева была создана крупная установка для рафинирования серебра, в производственных масштабах реализован процесс снятия олова с вторичной жести, на заводе «Красный выборжец» налажено производство медного порошка из латуни и отходов медных сплавов, оставшихся со времени первой мировой войны.

П.П. Федотьев принимает самое активное участие в создании производства алюминия в СССР, организует на заводе «Красный выборжец» опытное производство алюминия полностью из отечественного сырья. 27 августа 1929 года были получены первые килограммы алюминия [П.П. Федотьев. Алюминий в мировом хозяйстве и возникновение алюминиевой промышленности в СССР // Химия и хозяйство.

1929. № 1. С. 77–81]. На основании проведенных исследований было начато и к маю 1930 года закончено строительство в Ленинграде Опытного завода, назначением которого было освоение в производственных условиях процесса получения алюминия. Это позволило в кратчайшие сроки построить в стране два алюминиевых завода: в Ленинградской области на базе Волховской ГЭС и в г. Запорожье на базе Днепровской ГЭС. В работе на Опытном заводе П.П. Федотьеву помогали его ученики, Ю.В. Баймаков (1894–1980) и Н.П. Федотьев (1897–1969), впоследствии известные электрохимики, доктора технических наук, профессора.

В 1933 году П.П. Федотьев был избран членом-корреспондентом АН СССР. В марте 1934 г., возвращаясь из очередной поездки на Волховский алюминиевый завод, П.П. Федотьев простудился. 14 марта он провел заседание квалификационной комиссии, которое для него оказалось последним. 20 марта 1934 года на семидесятом году жизни он скончался от воспаления легких.

Более подробные сведения о П.П. Федотьеве и его научной школе содержатся в работе [1]. Жизни и деятельности ученого посвящены также работы [2–6].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морачевский А.Г. Профессор Павел Павлович Федотьев и его научная школа / Под ред. акад. РАН Ю.С. Васильева. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. 89 с.
2. Морачевский А.Г. Химия и химии в Политехническом институте. Санкт-Петербург, Петроград, Ленинград. 1902–1930 гг. / Под ред. акад. РАН Ю.С. Васильева. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 288 с.
3. Беляев А.И., Павлова О.И. Павел Павлович Федотьев. М.: Metallurgiya, 1965. 94 с.
4. Меншуткин Б.Н. Памяти Павла Павловича Федотьева // Природа. 1934. № 5. С. 89–91.
5. Баймаков Ю.В. Павел Павлович Федотьев. // Тр. Ленингр. политехн. ин-та. 1948. № 1. С. 133–139.
6. Баймаков Ю.В. Кафедра электрометаллургии цветных металлов // Труды Ленинградского политехнического института. 1949. № 1. С. 43–53.

#### REFERENCES

1. Morachevskiy A.G. Professor Pavel Pavlovich Fedot'yev i yego nauchnaya shkola / Pod red. akad. RAN Yu.S. Vasilyeva. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2011. 89 s. (rus.)
2. Morachevskiy A.G. Khimiya i khimiki v Politekhnicheskom institute. Sankt-Peterburg, Petrograd, Leningrad. 1902–1930 gg. / Pod red. akad. RAN Yu.S. Vasilyeva. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2012. 288 s. (rus.)
3. Belyayev A.I., Pavlova O.I. Pavel Pavlovich Fedot'yev. M.: Metallurgiya, 1965. 94 s. (rus.)
4. Menshutkin B.N. Pamyati Pavla Pavlovicha Fedot'yeva. Priroda. 1934. № 5. S. 89–91. (rus.)
5. Baymakov Yu.V. Pavel Pavlovich Fedot'yev. Tr. Leningr. Politekhn. in-ta. 1948. № 1. S. 133–139. (rus.)
6. Baymakov Yu.V. Kafedra elektrometallurgii tsvetnykh metallov. Trudy Leningr. Politekhn. in-ta. . 1949. № 1. S. 43–53. (rus.)

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**МОРАЧЕВСКИЙ Андрей Георгиевич** — доктор технических наук профессор кафедры физико-химии и технологий микросистемной техники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, заслуженный деятель науки и техники РФ; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия.

**ФИРSOVA Елена Германовна** — кандидат технических наук доцент кафедры физико-химии и технологий микросистемной техники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия.

**AUTHORS**

**MORACHEVSKY Andrei G.** — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politechnicheskaya Str., 29, St. Petersburg, Russia.

**FIRSOVA Elena G.** — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politechnicheskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia.

Научное издание

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбГУ**

**№ 2 (195) 2014**

Учредитель – Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

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 *Е.А. Типцовой*

Телефон редакции (812) 294-47-72

E-mail: ntv-nauka@spbstu.ru

---

Подписано в печать 26.06.2014. Формат 60×84 1/8. Бум. тип. № 1.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 29,25. Тираж 1000. Заказ 188.

---

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,  
Издательство Политехнического университета,  
член Издательско-полиграфической ассоциации университетов России.  
Отпечатано в типографии издательства:  
Россия, 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

## 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 агентства «Роспечать» (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 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.;

- результаты исследований;
- обсуждение результатов;
- выводы или заключение;
- список литературы – не менее 7–10 источников;
- сведения об авторах: ФИО, место работы, рабочий телефон, должность, ученое звание, ученая степень, контактный телефон, e-mail;
- e-mail и адрес для корреспонденции автора, ответственного за переписку.

2.2.4. Набор текста осуществляется в редакторе MS Word, формул – в редакторе MS Equation.

Таблицы набираются в том же формате, что и основной текст. Таблицы должны быть составлены лаконично, однотипные таблицы строятся одинаково. Цифровые данные следует округлять в соответствии с точностью эксперимента. Сведения в таблицах и на рисунках не должны повторяться.

Шрифт – TNR, кегль шрифта основного текста – 14, интервал – 1,5. Таблицы большого размера могут быть набраны 12 кеглем. Параметры страницы: поля слева 3 см, сверху, снизу 2,5 см, справа 2 см. Текст размещается без переносов. Абзацный отступ – 1 см.

Рисунки, таблицы, фотографии размещаются по тексту статьи.

### **2.3. Рассмотрение материалов**

Представленные материалы первоначально рассматриваются редакционной коллегией, после чего передаются на рецензирование. После одобрения материалов и согласования различных вопросов с автором (при необходимости) редакционная коллегия сообщает автору решение об опубликовании статьи, в противном случае она направляет автору мотивированный отказ.

При отклонении материалов из-за нарушения требований по оформлению или как не отвечающих тематике журнала материалы не публикуются и не возвращаются.

Редакционная коллегия не вступает в дискуссию с авторами отклоненных материалов.

Более подробную информацию можно получить по телефону/факсу редакции:

(812) 294-47-72 (с 10 до 18 часов, Олег Александрович)

или по e-mail: ntv-nauka@spbstu.ru