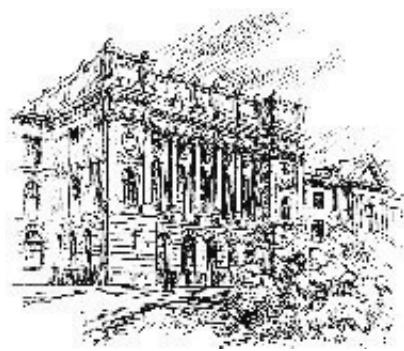


2(219)/2015



# Научно-технические ведомости СПбГПУ

Санкт-Петербург. Издательство Политехнического университета

Министерство образования и науки РФ

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

# НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбГПУ

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

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

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

Алферов Ж.И., академик РАН;

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

Костюк В.В., академик РАН;

Лагар'ков 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;

Тенслер М.Б., ин. член РАН (Швеция);

Федоров М.П., академик РАН

## EDITORIAL COUNCIL

Vasiliev Yu.S. — full member of the Russian Academy of Sciences, Scientific director of the Peter the Great 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

## 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;

Башкарев 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

## JOURNAL EDITORIAL BOARD

Vasiliev Yu.S. — full member of the Russian Academy of Sciences, President of the Peter the Great 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 ВИНИТИ 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 объединенном каталоге «Пресса России».

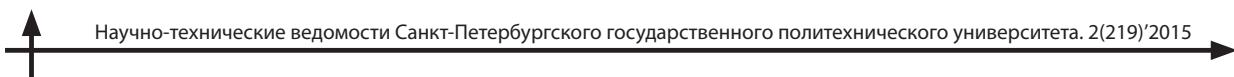
С 2005 года журнал включен в базу данных «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ), размещенную на платформе Научной электронной библиотеки на сайте <http://www.elibrary.ru>

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

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

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2015



# Содержание

## Энергетика

<b>Иванченко И.П., Топаж Г.И., Щур В.А.</b> Оценка надежности гидротурбин со сроком службы выше нормативного .....	7
<b>Шпензер Г.Г.</b> Срывные явления и нестационарные процессы во влажнопаровых ступенях цилиндров низкого давления паровых турбин .....	16
<b>Русинов Р.В., Добрецов Р.Ю.</b> О параметрах топливоподачи в дизелях .....	25
<b>Беркович А.Л., Полищук В.Г., Назаренко А.В.</b> Форсирование стационарных газотурбинных установок оптимальным впрыском воды в компрессор .....	33
<b>Халилов Ф.Х., Котляров Э.Р.</b> Отказ от тросовых молниеводоходов и трубчатых разрядников на воздушных линиях 35–150 кВ в районах Крайнего Севера .....	41
<b>Николаев Н.И., Шипулин А.В., Купавых К.С.</b> Повышение энергоэффективности процесса освоения скважин .....	48
<b>Горожанкин С.А., Савенков Н.В., Чухаркин А.В.</b> Комбинированные газотурбинные установки с двигателями Стирлинга .....	58
<b>Епихин А.И.</b> Технологические ограничения и особенности сжигания водоугольного топлива в судовых энергетических установках .....	67
<b>Жавроцкий С.В., Стребков А.С., Осипов А.В.</b> Повышение эффективности утилизации избыточного давления топливного газа в двухступенчатом детандере .....	72
<b>Кортиков Н.Н., Миронова М.В.</b> Виртуальный стенд для исследования теплового состояния охлаждаемых роторов паровых турбин .....	83

## Электротехника

<b>Шакиров М.А.</b> Универсальная теория автотрансформатора .....	91
<b>Передельский Г.И., Диденко Ю.В.</b> Свойства частотно-независимых двухполюсников .....	110
<b>Гатауллин А.М., Матухин В.Л., Низамов И.И.</b> Метод неразрушающего контроля полимерных композитных изоляторов напряжением 35 кВ .....	119

## Металлургия и материаловедение

<b>Пташник А.В.</b> Метод количественного анализа структуры сплавов с дисперсными включениями с использованием электронной микроскопии .....	126
<b>Галевский Г.В., Руднева В.В., Ефимова К.А.</b> Разработка научных и технологических основ плазменного синтеза наноборида титана .....	141

## Машиностроение

<b>Башкарёв А.Я., Кущенко А.В.</b> Деформационные особенности и свойства тонкослойных полиамидных покрытий при создании соединений с натягом .....	151
--	-----

<b>Арсентьева К.С., Кункин С.Н., Мамутов А.В., Мамутов В.С.</b> Диаграммы предельных деформаций тонколистового металла при формовке подвижными средами .....	159
<b>Усов О.А., Гусев М.Н., Лойко А.В., Макаров А.С.</b> Электромеханическая трансмиссия для военной гусеничной машины с гибридной силовой установкой .....	167
<b>Попов И.П., Чумаков В.Г., Терентьев А.Д.</b> Редукция мощности привода решетных сортировальных машин .....	175
<b>Носов В.В., Номинас С.В., Зеленский Н.А.</b> Оценка прочности судов давления на основе использования явления акустической эмиссии.....	182

### Хроника событий

<b>Иванов А.В.</b> Двадцать лет назад: хроника создания одного журнала .....	191
<b>Железняков А.Б., Кораблёв В.В.</b> Освоение космоса Японией .....	197
<b>Матенев О.А.</b> Имена ученых Петербурга на небосводе .....	210
<b>Волкова В.Н.</b> Вячеслав Михайлович Молотов .....	213
<b>Демидов А.И.</b> Николай Владимирович Агеев. Путь в науку .....	218
<b>Морачевский А.Г.</b> Академик Владимир Александрович Кистяковский (к 150-летию со дня рождения) 226	

## Contents

### Power Engineering

<b>Ivanchenko I.P., Topazh G.I., Shyr V.A.</b> Reliability estimation for hydro-turbines with prolonged lifetime .....	7
<b>Shpenzer G.G.</b> Flow separation and nonstationary processes in LP wet stages .....	16
<b>Rusinov R.V., Dobretsov R.Yu.</b> On parameters of fuel injection in diesel engines.....	25
<b>Berkovich A.L., Polischuk V.G., Nazarenko A.V.</b> Boosting gas turbine power plants through optimal water injection into compressor .....	33
<b>Khalilov F.Kh., Kotlyarov Ed.R.</b> Avoiding the use of protection wire and tubular rods of 35–150 kV for lightning protection of overhead power lines and substations in conditions of Far North .....	41
<b>Nikolayev N.I., Shipulin A.V., Kupavikh K.S.</b> Energy efficiency improvement of well development .....	48
<b>Gorozhankin S.A., Savenkov N.V., Chukharkin A.V.</b> Combined gas turbine power plants with Stirling engines .....	58
<b>Epikhin A.I.</b> Technological limitations and features of burning coal-water slurry fuels in ship power plants.....	67
<b>Zhavrockij S.V., Strebkov A.S., Osipov A.V.</b> Inproring the efficiency utilization of fuel gas excess pressure in two-stage expander .....	72
<b>Kortikov N.N., Mironova M.V.</b> Virtual stand for studying the thermal state of steam turbine cooled rotors .....	83

### Electrical Engineering

<b>Shakirov M.A.</b> Universal theory of autotransformer .....	91
<b>Peredelsky G.I., Didenko Yu.V.</b> Properties of frequency — independent two-terminal networks .....	110
<b>Gataullin A.M., Matukhin V.L., Nizamov N.I.</b> Nondestructive testing method of polymer 35 kV composite insulators .....	119

### Metallurgy and Material Science

<b>Ptashnik A.V.</b> Method of the quantitative analysis of structure of alloys with disperse inclusions using electron microscopy.....	126
<b>Galevsky G.V., Rudneva V.V., Efimova K.A.</b> Development of scientific and technological foundations for plasma synthesis of titanium nanoboride.....	141

### Mechanical engineering

<b>Bashkarev A.B., Kushchenko A.K.</b> Deformation characteristics and properties of thin-layer polyamide coatings in compression connections .....	151
---	-----

<b>Arsentyeva X.S., Kunkin S.N., Mamutov A.V., Mamutov V.S.</b> <i>Forming limit diagram for thin sheet metal at metal forming by movable media</i> .....	159
<b>Usov O.A., Gusev M.N., Loyko A.V., Makarov A.S.</b> <i>Electromechanical transmission for military tracked vehicle with hybrid power plant</i> .....	167
<b>Popov I.P., Chumakov V. G., Terentyev A.D.</b> <i>Reduction in drive power of screen graders</i> .....	175
<b>Nosov V.V., Nominas S.V., Zelensky N.A.</b> <i>Pressure vessel strength assessment based on acoustic emission parameters</i> .....	182

### Chronicle of Events

<b>Ivanov A.V.</b> <i>Twenty years ago: the chronicle of one journal's creation</i> .....	191
<b>Zheleznyakov A.B., Korablev V.V.</b> <i>Japan's outer space exploration</i> .....	197
<b>Matenev O.A.</b> <i>Names of St. Petersburg scientists in the firmament</i> .....	210
<b>Volkova V.N.</b> <i>Vyacheslav M. Molotov</i> .....	213
<b>Demidov A.I.</b> <i>Nikolay Vladimirovich Agueyev. Way to science</i> .....	218
<b>Morachevskij A.G.</b> <i>Academician Vladimir Aleksandrovich Kistyakovsky (for the 150th anniversary)</i> .....	226

DOI 10.5862/JEST.219.1

УДК 621.224.7

И.П. Иванченко, Г.И. Топаж, В.А. Щур

## ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ГИДРОТУРБИН СО СРОКОМ СЛУЖБЫ ВЫШЕ НОРМАТИВНОГО

*I.P. Ivanchenko, G.I. Topazh, V.A. Schyr*

### RELIABILITY ESTIMATION FOR HYDRO-TURBINES WITH PROLONGED LIFETIME

Для количественной оценки надежности гидротурбин предложен физически обоснованный коэффициент оперативной готовности. Расчеты показали, что в зависимости изменения во времени коэффициентов готовности можно выделить три характерных участка: начальный период эксплуатации с пониженными значениями показателей надежности оборудования, период эксплуатации с максимальными значениями этих коэффициентов и период постепенного снижения показателей надежности оборудования. Предложена методика, позволяющая оценить целесообразность реконструкции гидротурбины по условию надежности.

ГИДРОТУРБИНА; НАДЕЖНОСТЬ; КОЭФФИЦИЕНТ ОПЕРАТИВНОЙ ГОТОВНОСТИ; СРОК СЛУЖБЫ; ГЕНЕРАТОРНЫЙ РЕЖИМ; РЕМОНТ; РЕЗЕРВ.

The original physically-grounded formulation of the operative readiness coefficient has been proposed as a quantitative index of hydro-turbine reliability. Computations of dynamics demonstrate that one can detect three typical periods of turbine exploitation: initial period with low reliability indices, period of normal exploitation with high indices and final period characterized by a gradual decrease in reliability. The proposed index is used in the special method which allows estimating the necessity of turbine reconstruction for reliability reasons. It is based on comparing the estimated value of the operative readiness coefficient for a hydro-power station (HPS) planned for reconstruction with the respective coefficient for the similar HPS. If such a value is less than the same one for the considered analogue HPS, it proves to be necessary to perform the reconstruction of the checked hydro turbine for reliability reasons.

HYDRO-TURBINE; RELIABILITY; COEFFICIENT OF OPERATIVE READINESS; LIFETIME; GENERATION MODE; REPAIR; RESERVE.

#### Введение

Вопросам надежности энергетического оборудования сегодня во всем мире уделяется повышенное внимание, что объясняется, прежде всего, экономическими соображениями. По опубликованным данным [1] ущерб от вынужденного простоя турбогенератора в течение

2–3 месяцев соизмерим с его первоначальной стоимостью. По оценкам американских специалистов повышение надежности гидростанций США на 1 % дает чистую прибыль около 125 млн долл. в год.

Повышение надежности и долговечности машин вообще и энергетических в частности — одна из важнейших задач человеческого обще-



ства. Актуальность этой проблемы для гидротурбин тем более очевидна, что моральное старение оборудования замедляется с годами. Действительно, по уровню гидравлического КПД и кавитационным качествам гидротурбины уже достигли в ряде случаев предельных значений, и поэтому необходимость их замены будет диктоваться в основном соображениями повышения надежности гидромашин. После развода СССР в России работало 98 крупных ГЭС общей мощностью 44 млн кВт, причем около 80 % из них уже выработали нормативный срок эксплуатации (30 лет) и требуют существенного ремонта и реконструкции. Для крупных ГЭС более эффективны модернизация и реконструкция существующего оборудования ГЭС, что по техническому эффекту может сравняться с вводом новой электростанции. При этом, прежде всего, необходимо оценить целесообразность проведения реконструкции рассматриваемой ГЭС, в частности выяснить фактические показатели ее эксплуатационной надежности и остаточного ресурса.

Ориентируясь на терминологию Академии наук [2] под «надежностью гидроагрегата» понимается его способность работать в режимах, предусмотренных техническими условиями, без снижения эксплуатационных показателей.

Нахождение количественных показателей надежности основано на статистической информации, получаемой при эксплуатации действующего оборудования. Опыт эксплуатации действующих гидроагрегатов является громадным по объему экспериментом с реальными условиями работы оборудования, который не может быть проведен ни в одной лаборатории.

В процессе эксплуатации гидроагрегата определяется целый ряд показателей, характеризующих надежность его работы, таких, как:

продолжительность  $t_{\text{ген}}$  работы в генераторном режиме или коэффициент  $K_{\text{ген}} = \frac{t_{\text{ген}}}{t_k}$ , где  $t_k$  — календарное время, час.;

продолжительность  $t_{\text{СК}}$  работы в режиме синхронного компенсатора или коэффициент

$$K_{\text{СК}} = \frac{t_{\text{СК}}}{t_k};$$

продолжительность  $t_{\text{рез}}$  нахождения в резерве, коэффициент  $K_{\text{рез}} = \frac{t_{\text{рез}}}{t_k}$ ;

суммарный простой  $\Sigma t_p$  в ремонте и плановый простой  $t_{p\text{ пл}}$  в ремонте.

В современных номенклатурных документах для количественной оценки надежности оборудования в основном используются коэффициент готовности  $K_r$  и коэффициент оперативной готовности  $K_{o\text{г}}$ . Их определение базируется на времени готовности агрегата к работе и времени его простоя.

Коэффициент оперативной готовности определяется по формуле

$$K_{o\text{г}} = \frac{t_{\text{ген}} + t_{\text{СК}} + t_{\text{рез}}}{t_k} = \frac{t_{\text{рез}} - \sum t_p}{t_k}. \quad (1)$$

Отличие коэффициента готовности  $K_r$  от коэффициента  $K_{o\text{г}}$  заключается только в том, что он подразделяет ремонты на плановые и вынужденные. С учетом плановости ремонтов коэффициент готовности может быть записан в следующем виде:

$$K_r = \frac{t_{\text{ген}} + t_{\text{СК}} + t_{\text{рез}}}{t_k - t_{p\text{ пл}}}, \quad (2)$$

где  $t_{p\text{ пл}}$  — продолжительность плановых ремонтов, час.

Действующие официальные нормы простоя гидроагрегатов в планово-предупредительных ремонтах были разработаны Минэнерго в советские годы [3].

Несомненными достоинствами коэффициента  $K_{o\text{г}}$  являются простота его определения по отчетным материалам электростанций и возможность сравнения надежности разнообразных видов энергетического оборудования. В советские годы коэффициент  $K_{o\text{г}}$  был одним из главных показателей отчетности об использовании гидроагрегатов действующих ГЭС страны.

Недостатком этого коэффициента можно считать то, что он не разделяет календарное время эксплуатации гидроагрегата на работу его в нагруженном генераторном режиме и на время нахождения в резерве или в режиме синхронного компенсатора, когда гидроагрегат практически не нагружен. Опыт эксплуатации действующих ГЭС со сроком службы выше нормативного показывает, что значения коэффициентов оперативной готовности, найденные по формуле (1), существенно различаются для разных гидроагрегатов и, как правило, полу-



ченные по этой формуле значения  $K_{o\Gamma}$  значительно завышают фактическую надежность гидроагрегата.

Следует отметить, что в настоящее время отсутствует методика расчета, позволяющая достоверно оценить фактическую надежность гидротурбинного оборудования.

С учетом сказанного целью и основной задачей данной работы было развитие методики расчета надежности гидроагрегатов действующих ГЭС со сроком службы выше нормативного. Для решения этой задачи выполнены расчеты по оценке надежности работы более 20 гидроагрегатов действующих ГЭС на основе более обоснованного коэффициента их оперативной готовности, который учитывает только фактическое время работы гидроагрегата в генераторном режиме и время его простоя в ремонте.

### Коэффициент оперативной готовности генераторного режима

Согласно структуре формул (1) и (2) одни и те же значения коэффициентов готовности  $K_{o\Gamma}$  и  $K_r$  могут быть получены за счет разных состояний агрегатов. На одних ГЭС (например, Иркутской) основное состояние машин — это генераторный режим (составляет 95 % календарного времени), полностью отсутствуют режим синхронного компенсатора и пребывание в резерве. Зато на Рыбинской ГЭС нахождение агрегатов в резерве превышает 40 % календарного времени. Совершенно очевидно, что одинаковые значения коэффициентов готовности в этих случаях должны оцениваться по-разному.

Определяющим надежность работы оборудования является генераторный режим, вызывающий накопление усталостных явлений в металле основных узлов. Чтобы подчеркнуть эту роль генераторного режима, в данной работе предложен дополнительный показатель оперативной готовности  $K_{o\Gamma}^*$  генераторного режима, который, по нашему мнению, является более физически обоснованным для оценки надежности гидротурбины по сравнению с коэффициентом  $K_{o\Gamma}$ . Он представляет собой отношение общего времени  $t_{\text{ген}}$  безотказной работы машины в генераторном режиме за межремонтный период  $t_k$  к сумме  $t_{\text{ген}}$  и суммарного времени ремонтов  $\Sigma t_p$ :

$$K_{o\Gamma}^* = \frac{t_{\text{ген}}}{t_{\text{ген}} + \Sigma t_p}, \quad (3)$$

где  $t_{\text{ген}}$  — общая продолжительность работы турбины в генераторном режиме за рассматриваемый межремонтный календарный период, час;  $\Sigma t_p$  — общая продолжительность всех ремонтов турбины (текущие, капитальные) за рассматриваемый межремонтный период, час.

В общепринятой практике показатели надежности рассматриваются как случайные величины, а расчет их значений выполняется по отдельным годам. На малоагрегатных ГЭС такая обработка стационарных сведений может дать искаженную картину о надежности оборудования: в годы проведения капитальных ремонтов надежность агрегатов оказывается значительно ниже, чем в остальное время. Например, осредненный по агрегатам коэффициент оперативной готовности оборудования Нарвской ГЭС (установлено три машины) составлял в 1979 году  $K_{o\Gamma} = 0,974$  (капитальных ремонтов не было), а в 1980 году был равен  $K_{o\Gamma} = 0,739$  (проводился капитальный ремонт одной из турбин).

Учитывая сказанное, обработка отчетных стационарных сведений выполнялась нами при следующих условиях:

1. Показатели надежности гидроагрегата в разрезе календарного времени  $t_k$  представляются дискретными функциями  $K_{o\Gamma} = f(t_k)$ ,  $K_{o\Gamma}^* = f(t_k)$  и  $K_r = f(t_k)$ , расчет которых ведется по отдельным периодам. Продолжительность периода отсчитывается от начала эксплуатации машины после  $i$ -го капитального ремонта до завершения  $(i+1)$ -го капитального ремонта. Каждый период учитывает все состояния гидроагрегата: продолжительность  $t_{\text{ген}}$  работы в генераторном режиме; продолжительность работы  $t_{\text{ск}}$  в режиме синхронного компенсатора; время  $t_{\text{рез}}$  нахождения в резерве; общее время  $\Sigma t_p$  простоя в ремонте.

2. Рассчитанные по формулам (1), (2) и (3) показатели надежности агрегата  $K_{o\Gamma}$ ,  $K_{o\Gamma}^*$  и  $K_r$  считаются постоянными для всего рассматриваемого периода. В результате выполнения расчетов по всем периодам работы получаются ступенчатые графики  $K_{o\Gamma} = f(t_k)$ ,  $K_{o\Gamma}^* = f(t_k)$  и  $K_r = f(t_k)$ .

3. Каждый агрегат дает одну реализацию случайной дискретной функции (число реализаций



равно числу агрегатов на ГЭС). В результате осреднения этих реализаций по отдельным временным интервалам (например, через  $\Delta t_k = 20 \cdot 10^3$  часов календарного времени) получаются функции  $\bar{K}_{\text{ог}} = f(t_k)$ ,  $\bar{K}_{\text{ог}}^* = f(t_k)$  и  $\bar{K}_{\text{г}} = f(t_k)$ , которые характеризуют надежность некоего условного гидроагрегата обследованной ГЭС.

В качестве иллюстрации на рисунке показаны функции  $\bar{K}_{\text{ог}} = f(t_k)$  и  $\bar{K}_{\text{ог}}^* = f(t_k)$  с начала эксплуатации до момента последнего обследования гидроагрегатов Нижегородской ГЭС. Представлены две группы машин. Агрегаты

1–4 работают в пиковой части графика электропотребления ( $\bar{K}_{\text{ген}} = 0,38–0,40$ ) и большую часть времени находятся в резерве ( $\bar{K}_{\text{рез}} = 0,51–0,56$ ). Агрегаты 5–8 эксплуатируются, наоборот, большую часть времени в генераторном режиме с небольшими мощностями ( $\bar{K}_{\text{ген}} = 0,63–0,75$ ), поддерживая санитарный уровень в реке. В резерве они находятся значительно меньше, чем агрегаты первой группы. Коэффициенты готовности  $\bar{K}_{\text{ог}}$  этих групп машин практически одинаковы, тогда как коэффициент  $\bar{K}_{\text{ог}}^*$  существенно выше у машин второй группы.

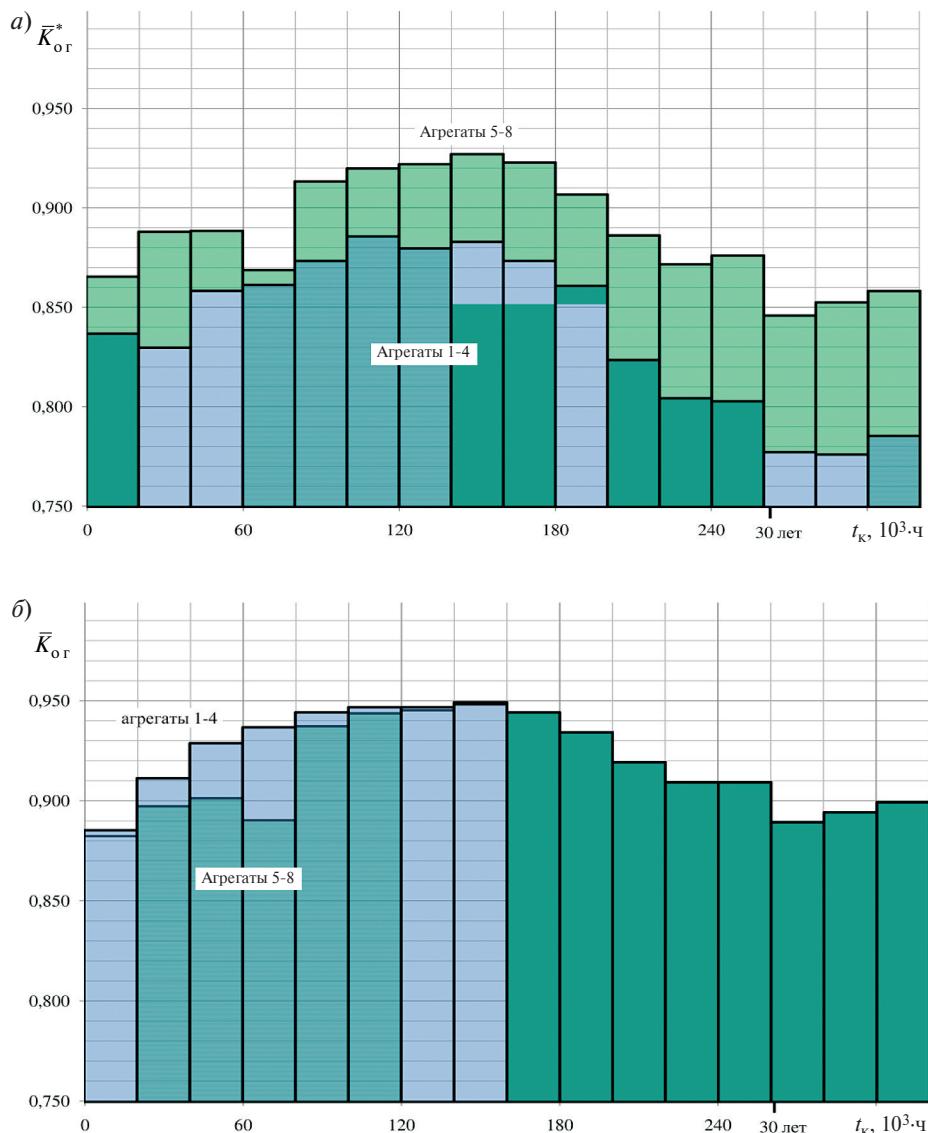


Рис. 1. Показатели надежности гидроагрегатов Нижегородской ГЭС с начала эксплуатации:  $a$  — коэффициент  $\bar{K}_{\text{ог}}^* = f(t_k)$ ;  $\delta$  — коэффициент  $\bar{K}_{\text{ог}} = f(t_k)$

Этот пример убедительно показывает, что при анализе надежности гидромашин коэффициент готовности  $\bar{K}_{\text{ог}}^*$  является более информативным, чем коэффициент  $\bar{K}_{\text{ог}}$ .

В общем случае в графиках зависимостей показателей надежности гидромашин от календарного времени  $t_k$  можно выделить три характерных участка (см. рис.):

начальный период эксплуатации с пониженными значениями показателей надежности оборудования;

период эксплуатации с максимальными значениями коэффициентов готовности;

период постепенного снижения показателей надежности оборудования.

Начальный период эксплуатации с низкой надежностью оборудования отмечался на большинстве действующих ГЭС, особенно при установке новых, неотработанных типов турбин и генераторов. В этот период проявляются дефекты изготовления и монтажа гидроагрегатов, ошибочные проектные решения, недостатки в подготовке эксплуатационного персонала.

По мере освоения оборудования надежность гидроагрегатов увеличивается, и через некоторое время показатели надежности  $\bar{K}_r$ ,  $\bar{K}_{\text{ог}}$  и  $\bar{K}_{\text{ог}}^*$  достигают максимальных значений. По достигнутому максимальному уровню надежности агрегаты разнятся не только по ГЭС, но отличаются заметно даже внутри одной и той же ГЭС.

Наглядным примером могут служить гидротурбины ДнепроГЭС-І. После второй мировой войны на этой ГЭС были установлены три радиально-осевые машины (агрегаты 1–3) фирмы

«Newpot-News» (США). Остальные восстановленные турбины (агрегаты 4–9) были советские, производства ЛМЗ [4]. Советский Союз не имел в то время опыта создания столь мощных гидротурбин, а культура производства уступала американской (сказывались отсутствие квалифицированной рабочей силы после войны, отсталость технологий производства и станочного парка). Преимущества американских машин в полной мере проявились в показателях надежности машин в последующие годы эксплуатации (табл. 1).

Показатели надежности американских машин ДнепроГЭС-І были всегда выше советских, хотя и работали больше по времени в генераторном режиме. К настоящему времени на ДнепроГЭС-І советские машины заменены, а американские продолжают эксплуатироваться при высоких показателях надежности.

В целом по достигнутым максимальным значениям показателей надежности отечественное гидротурбостроение соответствует мировому уровню. Подтверждением сказанному служат следующие данные.

Выборочное обследование 28 ГЭС в США за период с 1970 по 1980 год показало, что осредненное значение коэффициента оперативной готовности гидроагрегатов —  $\bar{K}_{\text{ог}} = 0,95$ , а у обратимых гидромашин — ниже и составляет  $\bar{K}_{\text{ог}} = 0,85$  [5]. В Чехословакии анализировались суммарные наработки и простоя гидромашин 23 ГЭС с начала их пуска до момента обследования; коэффициент их оперативной готовности  $K_{\text{ог}}$  чаще всего был равен 0,92–0,95 [6]. Следует отметить, что ситуации с выходом гидроагрегатов на максимальный уровень

Таблица 1

Коэффициенты надежности  $\bar{K}_{\text{ог}}$  и  $\bar{K}_{\text{ог}}^*$  агрегатов ДнепроГЭС-І

Фирма	Коэффициенты	Значения коэффициентов надежности в разные периоды календарного времени $t_k$ , $10^3$ час.										
		40–60	60–80	80–100	100–120	120–140	140–160	160–180	180–200	200–220	220–240	240–260
ЛМЗ (СССР)	$\bar{K}_{\text{ог}}$	0,938	0,927	0,954	0,974	0,974	0,971	0,970	0,962	0,952	0,947	0,942
	$\bar{K}_{\text{ог}}^*$	0,928	0,901	0,927	0,959	0,959	0,956	0,957	0,943	0,918	0,890	0,870
Newpot-News (США)	$\bar{K}_{\text{ог}}$	0,961	0,972	0,975	0,982	0,982	0,979	0,976	0,968	0,956	0,982	0,983
	$\bar{K}_{\text{ог}}^*$	0,959	0,969	0,970	0,975	0,974	0,970	0,966	0,956	0,939	0,970	0,966

надежности существенно разнятся по времени для различных гидростанций. Так, высоконапорные гидротурбины Усть-Хантайской ГЭС достигли максимальной надежности только в последние пятнадцать лет, хотя к этому времени их срок службы превысил нормативный. На Иркутской ГЭС наивысшие показатели надежности  $\bar{K}_{\text{ог}}$  были достигнуты по истечении нормативного срока службы. Этот факт свидетельствует о больших скрытых резервах в части повышения надежности гидроагрегатов и о хорошей адаптации созданных в советские годы машин к современным техническим достижениям.

Чаще всего гидроагрегаты с осевыми турбинами начинали выходить на максимальный уровень надежности после  $t_{\text{к}} = 50 \cdot 10^3$  час.; причем основная масса машин выходила на высокие показатели  $\bar{K}_{\text{г max}}$  и  $\bar{K}_{\text{ог max}}$  во временном интервале  $60 \cdot 10^3 - 120 \cdot 10^3$  час. Однако более типична тенденция постепенного снижения уровня надежности машин, но катастрофического его падения (когда прекращается эксплуатация машин) не наблюдалось ни на одной ГЭС даже после 30–50 лет эксплуатации. Снижение показателей надежности оборудования после длительного периода эксплуатации в гидротурбинах связано, как правило, с ростом отказов ресурсоопределяющих узлов. Хорошой организацией восстановительных ремонтных работ можно поддерживать надежность оборудования на высоком уровне очень долгое время. Работы этого направления были основой технической политики России в 90-е годы в гидроэнергетике.

Зарубежные исследования также подтверждают сохранение гидромашинами высокой надежности за пределами нормативного срока службы оборудования. По данным иностранных специалистов гидротурбины мощностью от 100 до 200 МВт со сроком службы 30–45 лет имели коэффициенты оперативной готовности  $K_{\text{ог}} = 0,90 - 0,94$ , а на турбинах мощностью до 50 МВт удавалось достигнуть  $K_{\text{ог}} \geq 0,95$  даже после 60 лет эксплуатации. Сделанный в данной работе вывод противоречит бытующему в нашей стране мнению, что возраст машин играет определяющую роль в снижении ее надежности и что следует ожидать лавинообразного нарастания отказов оборудования после завершения нормативного срока службы [7, 8].

Следует отметить, что повышенная надежность оборудования ГЭС связана с особенностями применяемой Гидропроектом методики экономического обоснования мощности ГЭС, которая предопределяет наличие на ГЭС резерва, обеспечивающего поддержание ее гарантированных параметров [9]. Благодаря существующим резервам мощности, агрегаты эксплуатируются на большинстве ГЭС в генераторном режиме 50–70 % календарного времени. Наибольшее число часов работы в генераторном режиме на обследованных ГЭС имеют турбины Иркутской ГЭС ( $\bar{K}_{\text{ген}} > 0,92$ ), а наименьшее — турбины Угличской ГЭС ( $\bar{K}_{\text{ген}} = 0,2 - 0,3$ ). Ограничение времени работы агрегатов в генераторном режиме позволяет действующим машинам сохранять высокий уровень надежности (высокие значение  $\bar{K}_{\text{ог}}$ ) даже на момент их реконструкции.

### Методика оценки надежности работы гидроагрегатов

В нашей работе с целью развития методики оценки надежности гидроагрегатов действующих ГЭС были выполнены расчеты коэффициентов оперативной готовности  $\bar{K}_{\text{ог}}$  и  $\bar{K}_{\text{ог}}^*$  для двадцати ГЭС со сроком службы больше нормативного. Результаты этих расчетов представлены в табл. 2.

Представленные в табл. 2 коэффициенты оперативной готовности  $\bar{K}_{\text{ог}}^*$  на момент замены оборудования могут быть приняты за базовые значения, при достижении которых на других ГЭС со сроком службы выше нормативного также целесообразно ставить вопрос о реконструкции машин по условию надежности. По существу, гидростанции, рассмотренные в табл. 2, являются ГЭС-аналогами для тех гидростанций, на которых ставится вопрос о замене оборудования по критерию надежности. Подбор ГЭС-аналога для рассматриваемой ГЭС должен осуществляться с учетом напора ( $H_{\text{max}}$ ) и продолжительности работы агрегатов в генераторном режиме ( $\bar{K}_{\text{ген}}$ ). Если с учетом указанных условий коэффициент  $\bar{K}_{\text{ог}}^*$  рассматриваемой ГЭС меньше коэффициента  $\bar{K}_{\text{ог}}^*$  ГЭС-аналога, то целесообразно ставить вопрос о реконструкции гидротурбины рассматриваемой ГЭС по условию надежности.

Таблица 2  
Значение коэффициентов оперативной готовности  $\bar{K}_{\text{ог}}$  и  $\bar{K}_{\text{ог}}^*$  гидроагрегатов.

Наименование ГЭС	Тип турбины	Проектные параметры турбины			Максимальные значения			Значения после $t_{\text{к}} \geq 200 \cdot 10^3$ ч		
		$H_{\text{max}}$ , м	$D_1$ , м	$N_{\text{т}}$ , МВт	$t_{\text{к}}$ , $10^3 \cdot \text{ч}$	$K_{\text{ген}}$	$\bar{K}_{\text{ог}}^*$	$\bar{K}_{\text{ог}}$	$K_{\text{ген}}$	$\bar{K}_{\text{ог}}^*$
Угличская (агрегаты 1–2)	К-91	16	9	55	320	0,264	0,903	0,945	0,331	0,902
Рыбинская (агрегаты 1–6)		18	9	65	140	0,489	0,928	0,936	0,522	0,888
Кегумская (агрегаты 1–3)	KMW Швеция	15,9	4,87	18,85	60	0,829	0,946	0,939	0,480	0,904
Кайрак-Кумская (агрегаты 1–6)	ПЛ-495	24,5	5	20,9	80	0,611	0,890	0,902	0,568	0,870
Нарвская (агрегаты 1–3)		25	6,6	48	140	0,502	0,907	0,903	0,678	0,828
Цимлянская (агрегаты 1–4)		23,5	6,6	41,6	40	0,851	0,942	0,928	0,540	0,831
Камская (агр. 1–6) (агрегаты 19–23)	ПЛ-510	21	5	21,8	100	0,650	0,926	0,916	0,500	0,864
					100	0,361	0,903	0,928	0,558	0,897
Нижегородская (агрегаты 5–8)		18	9	59	160	0,642	0,928	0,916	0,608	0,859
Иркутская (агрегаты 1–8)	ПЛ-577	32	7,2	90	260	0,967	0,971	0,937	0,908	0,912
Волгоградская (агрегаты 1–22)	ПЛ-587	30	9,3	108,5	80	0,711	0,926	0,897	0,673	0,877
Жигулевская (агрегаты 1–20)		27	9,3	108,5	80	0,741	0,917	0,918	0,754	0,912
Дубоссарская (агрегаты 1–4)	Tampella Финляндия	11,5	3,9	10,5	200	0,900	0,945	0,920	0,797	0,872
Чир-Юртская (агрегаты 1–2)	ПЛ-642	45,3	3,7	36	260	0,850	0,937	0,888	0,750	0,874
Усть-Хантайская (агрегаты 1–7)	ПЛ-5а	55,5	4,1	65	200	0,787	0,916	0,865	0,787	0,829
ДнепроГЭС I (агрегаты 1–3) (агрегаты 4–9)	NN Америка	39,4	5,426	73,6	120	0,704	0,975	0,968	0,413	0,954
		39,4	5,45	75	120	0,601	0,959	0,949	0,387	0,923
Нива-II (агрегаты 1–4)	PO-123	37,5	2,5	15,3	300	0,931	0,954	0,933	0,928	0,928
Усть-Каменогорская (агрегаты 1–4)		41,8	5,45	85	60	0,735	0,910	0,894	0,601	0,863
Нива-III (агрегаты 1–4)		79	2,95	39	60	0,852	0,922	0,909	0,797	0,896
Риони (агрегаты 1–4)	PO-100	62	1,75	12,6	320	0,950	0,976	0,941	0,965	0,928
Красноярская (агрегаты 1–6)	PO-697	100,5	7,5	508	140	0,690	0,915	0,884	0,563	0,841
Земоавчальская (агрегаты 1–4)	Ф-140	24,12	1,95	3,2	440	0,887	0,970	0,954	0,835	0,949



Выполненный анализ надежности гидротурбин со сроком службы выше нормативного позволяет сделать следующие выводы:

Для оценки надежности гидротурбин следует использовать физически обоснованный коэффициент оперативной готовности  $\bar{K}_{\text{ог}}^*$  генераторного режима.

В общем случае для зависимостей изменения во времени коэффициентов надежности  $\bar{K}_{\text{г}} = f(t_{\text{к}})$ ,  $\bar{K}_{\text{ог}}^* = f(t_{\text{к}})$  и  $\bar{K}_{\text{ог}} = f(t_{\text{к}})$  характерны три участка: начальный период эксплуатации с пониженными значениями показателей надежности оборудования, период эксплуатации с максимальными значениями этих коэффициентов и период постепенного снижения показателей надежности оборудования.

Снижение со временем надежности гидроэнергетического оборудования (впрочем, как и всех объектов материального мира) подчиняется экспоненциальному закону [10]. Возраст гидротурбин не играет определяющей роли в снижении надежности оборудования, и после завершения его нормативного срока службы не происходит лавинообразного нарастания отказов оборудования.

3. Предложена методика, позволяющая оценить целесообразность реконструкции гидротурбины по условию надежности. Она основана на сопоставлении расчетных значений коэффициента оперативной готовности  $\bar{K}_{\text{ог}}^*$  намеченной к реконструкции ГЭС с соответствующим коэффициентом  $\bar{K}_{\text{ог}}^*$  ГЭС-аналога.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Быков В.М., Глебов И.А.** Научные основы анализа и прогнозирования надежности генераторов. Л.: Наука, 1984. 213 с.
2. Надежность систем энергетики: Сборник рекомендуемых терминов). М.: ИАЦ «Энергия», 2007. 192 с.
3. Справочник по эксплуатации и ремонту гидротурбинного оборудования / Под ред. Е.П. Штерна. М.: Энергоатомиздат, 1985.
4. **Ковалев Н.Н.** Новые турбины Днепровской ГЭС им. В.И. Ленина. М.-Л: Машгиз, 1951.
5. **Hartman O.** Reliability Improvements for Hydroplants in the USA // Int. Water Power and Dam Constr. 1984. № 1. P. 15–20.
6. **Parmo A.** Spolahllyvost technologicheskogo zariadeniya hydroenergetike. Bull. EGU. 1983, P. 92, 71–86, 103, 105.
7. **Бойков А.И., Руденко А.П.** Состояние гидросилового оборудования на гидроэлектростанциях России // Гидротехническое строительство. 2012. №5. С. 54–57.
8. **Григорьев В.И.** Пути повышения надежности и долговечности гидротурбинного оборудования при реконструкции гидроэлектростанций // Гидротехническое строительство. 1994. №12. С. 6–9.
9. **Платов В.И.** Разработка предложений по концепции предотвращения аварий на энергетических объектах и в энергосистемах // Труды Гидропроекта. М., 1990. С. 78–84.
10. **Хан Г., Шапиро С.** Статические модели в инженерных задачах. М.: Мир, 1969. 390 с.

## REFERENCES

1. **Bykov V.M., Glebov I.A.** Nauchnyye osnovy analiza i prognozirovaniya nadezhnosti generatorov. [Scientific basis of generator reliability analysis and forecasting]. L.: Nauka, 1984. 213 s. (rus.)
2. Nadezhnost sistem energetiki: Sbornik rekomenduemykh terminov. [Reliability of Energy Systems: Glossary] M.: IATs «Energiya», 2007. 192 s. (rus.)
3. Spravochnik po ekspluatatsii i remontu gidroturbinogo oborudovaniya / Pod red. Ye.P. Shterna [Handbook for the exploitation and repair of hydraulic turbine equipment] M.: Energoatomizdat. 1985. (rus.)
4. **Kovalev N.N.** Novyye turbiny Dneprovskoy GES im. V.I. Lenina [New turbines for Dnieper Hydro Power Station named after V.I. Lenin]. M.-L: Mashgiz, 1951. (rus.)
5. **Hartman O.** Reliability Improvements for Hydroplants in the USA. Int. Water Power and Dam Constr. 1984. № 1. P. 15–20.
6. **Parmo A.** Spolahllyvost technologicheskogo zariadeniya hydroenergetike. Bull. EGU. 1983, P. 92, 71–86, 103, 105.
7. **Boykov A.I., Rudenko A.P.** Sostoyaniye gidrosilovogo oborudovaniya na gidroelektrostantsiyakh Rossi [State of hydropower equipment in Russian hydropower stations] Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo. 2012. №5. С. 54–57. (rus.)
8. **Grigoryev V.I.** Puti povysheniya nadezhnosti i dolgovechnosti gidroturbinnogo oborudovaniya pri rekonstruktsii gidroelektrostantsiy. [Approaches for improving reliability and durability of hydraulic turbine equipment under reconstruction of hydroelectric plants] Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo. 1994. №12. S. 6–9.
9. **Platov V.I.** Razrabotka predlozheniy po kontseptsiyi predotvrascheniya avariya na energeticheskikh obyek-

takhiv. [Proposals on the concept of accident prevention at power stations and power systemsenergosistemakh]. *Trudy Gidroproyekta*. M., 1990. S. 78–84. (rus.)

10. **Khan G., Shapiro S.** Staticheskiye modeli v inzhenernykh zadachakh. [ Static models in engineering problems]. M.: Mir, 1969, 390 s. (rus.)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ИВАНЧЕНКО Игорь Петрович** — кандидат технических наук заместитель заведующего отделом Научно-производственного объединения по проектированию энергетического оборудования. 191167, Санкт-Петербург, Атаманская ул., 3/6. E-mail: hydroturbo@ckti.ru

**ТОПАЖ Григорий Ицкович** — доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: topaj@mail.ru

**ЩУР Василий Алексеевич** — заведующий лабораторией Научно-производственного объединения по проектированию энергетического оборудования. 191167. Санкт-Петербург, Атаманская ул., 3/6. E-mail: schvas@gmail.ru

## AUTHORS

**IVANCHENKO Igor P.** — Scienyific and Development Association on Design of Power Eguipment. 3/6, Atamanskaya str, St-Peterburg, 191167, Russia. E-mail: hydroturbo@ckti.ru

**TOPAZH Grigorii I.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: topaj@mail.ru

**SHYR Vasili A.** — Scientific and Development Association on Design of Power Eguipment. 3/6, Atamans- kaya str., St-Peterburg, 191167, Russia. E-mail: schvas@gmail.ru

DOI 10.5862/JEST.219.2

УДК 621.165

Г.Г. Шпензер

## СРЫВНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ ВО ВЛАЖНОПАРОВЫХ СТУПЕНЯХ ЦИЛИНДРОВ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ ПАРОВЫХ ТУРБИН

*G.G. Shpenzer*

### FLOW SEPARATION AND NONSTATIONARY PROCESSES IN LP WET STAGES

Рассмотрены особенности формирования проточной части цилиндров низкого давления мощных паровых турбин с учетом работы последних ступеней в пульсирующих потоках. Получены и обобщены результаты исследований проточных частей низкого давления на экспериментальных стендах на влажном паре. Проанализировано влияние различных факторов на возникновение и усиление опасных колебаний параметров пульсирующих потоков влажного пара.

ПАРОВЫЕ ТУРБИНЫ; ВЛАЖНОСТЬ; ПОСЛЕДНИЕ СТУПЕНИ; ПУЛЬСАЦИИ ПОТОКА; ЭФФЕКТИВНОСТЬ СТУПЕНИ.

The paper considers forming a LP running part of large power steam turbines allowing for the performance in the last stages of pulsating streams. The authors have obtained and generalized the results of researching LP running parts at experimental stands with wet steam. This paper discusses the physical model of a wet steam flow in LP last stages and the influence of various factors on the increase in flow pulsations and energy losses and on the reduction in the turbine stage efficiency. The research results of the experimental turbine are presented and analyzed. Important dependences have been obtained, including flow fluctuations and stability zones, as well as dynamic stresses while changing the operating mode.

STEAM TURBINES; MOISTURE; LAST STAGES; FLOW PULSATIONS; STAGE EFFICIENCY.

#### Введение

Методы расчета срывных явлений и нестационарных процессов в концевых зонах последних ступеней цилиндров низкого давления (ЦНД), работающих на влажном паре, только начинают развиваться. Известны лишь единичные результаты в этом направлении. В работах [1–3] проанализированы и обобщены результаты исследований проточных частей низкого давления на экспериментальных стендах. Выявлены различия между результатами расчетов потерь кинетической энергии последних ступеней ЦНД и результатами экспериментов. Одна из главных причин этого расхождения — в том, что в расчетах не учитывается ряд важных факторов, ускоряющих развитие срывных нестационарных процессов в концевых зонах влажнопаровых ступеней.

Известны результаты газодинамических исследований проточных частей низкого давления на экспериментальных стендах фирм Siemens [4], Alstom [5, 6], Hitachi [7], Mitsubishi Heavy Industries [8] и др. Аналогичные исследования проводились в университетах Дюссельдорфа, Штутгарта, Гливице [9–12]. В ряде публикаций экспериментальные характеристики последних ступеней ЦНД приведены в сравнении с результатами численного моделирования. Сложность изучения газодинамических процессов двухфазных потоков приводит к некоторой противоречивости информации, полученной разными авторами, при сопоставлении теоретических и экспериментальных исследований. Из ряда публикаций известно, что интегральные характеристики последних ступеней, полученные опытным и численным методами, имеют определенные различия. Та-



ким образом, существует актуальная проблема учета и описания пульсирующих турбулентных течений, в том числе отрывных явлений, требующая комплексного подхода с использованием экспериментальных и теоретических методов.

В предлагаемой статье обращено внимание на крайне негативное влияние пульсаций потока на эффективность работы последних ступеней. С ростом предельной высоты рабочих лопаток это влияние будет усиливаться. Поэтому конструкция проточной части низкого давления мощных и сверхмощных паровых турбин АЭС и ТЭС должна по возможности обеспечивать минимальные возмущения потока.

#### **Факторы, ускоряющие развитие срывных и нестационарных процессов на влажном паре**

Для повышения экономичности и надежности работы ЦНД необходимо исследовать физические явления, происходящие в высокоскоростном влажнопаровом потоке, и их влияние на характеристики турбинных ступеней. В результате такого исследования появится возможность определенными мероприятиями ослабить негативное влияние срывных явлений на показатели работы ступени.

Срывные явления считаются наименее изученными. Причина заключается в особой сложности их протекания в концевых зонах ступеней ЦНД. Срывные явления в турбинных ступенях рассматриваются изолированно, в то время как их протекание связано со всеми показателями структуры потока: степенью неравномерности  $\chi_{C1} = \frac{c_{1\max} - c_{1\min}}{2c_{1cp}}$ ; степенью турбулентности  $\epsilon_0$ ; степенью влажности и пульсациями потока.

Влияние степени турбулентности, пульсаций потока и степени влажности при рассмотрении нестационарных процессов во влажнопаровых ступенях ЦНД практически не учитывалось в силу сложности их одновременного учета. Настоящая работа направлена на решение проблемы аэродинамического совершенствования проточной части ЦНД мощных паровых турбин для ТЭС и АЭС за счет ослабления влияния нестационарных и срывных явлений на влажном паре и их последствий на экономичность и надежность ступеней ЦНД.

Сложность поставленной задачи потребовала рассмотрения накопленного в турбиностроении экспериментального материала, полученного в разные годы.

На стендах ЛПИ [13–15] исследовалось влияние степени турбулентности и пульсаций давления на выпадение мелкодисперсных аэрозолей на поверхность проточной части турбины. В результате исследования установлено, что наличие возмущений в потоке приводит к более раннему выпадению капельной влаги на поверхностях лопаточных аппаратов, в то время как расчеты по осредненным значениям параметров состояния пара показывают ее практически полное отсутствие. Стала ясна необходимость учета потерь из-за более раннего выпадения влаги, особенно в концевых зонах ступеней ЦНД, где нестационарные эффекты наиболее интенсивны. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют об увеличении неравномерности потока при наличии жидкой фазы, а следовательно, и усилении взаимного влияния последовательно расположенных ступеней.

При исследованиях на экспериментальных стенах ЛПИ впервые обнаружено явление значительного роста срывных и нестационарных процессов в пульсирующих потоках влажного пара. Эффект от этого явления настолько значителен, что его учет при проектировании проточной части ЦНД мощных паровых турбин гарантированно повысит эффективность работы последней ступени ЦНД.

#### **Локальные отрывы потока**

Рассмотрим развитие нестационарных и срывных явлений в концевых зонах ступеней ЦНД.

Согласно результатам исследований [13] даже слабые срывные явления в переохлажденном потоке могут резко усиливаться из-за появления в этом месте скачка конденсации и явлений конденсационной нестационарности. Так, например, в опытах ЛПИ у периферии направляющего аппарата (НА) последней ступени с рабочими лопатками РЛ-960 (ЛМЗ) были обнаружены местные замкнутые отрывы потока. На сравнительно небольшом расстоянии от них наблюдается открытый отрыв на выпуклой стороне направляющих лопаток.

Локальный отрыв не всегда приводит к существенному снижению КПД ступени, однако



может проявляться его опасная активность, особенно вредная при наличии неблагоприятных условий на входе в ступень. Для устранения локальных отрывов необходимо воздействовать на поток в непосредственной близости от места их образований. Как показали опыты ЛПИ, к числу таких мер следует отнести эффективность безлопаточного диффузорного участка, на которую особое влияние оказывают уменьшение угла раскрытия на входе в ступень, правильная организация периферийной струи из предыдущего рабочего колеса, непосредственное воздействие на периферийный концевой вихрь, например местными турбулизаторами потока при входе в диффузор. Широкие лопатки могут устраниить существенную часть переходного диффузора и тем самым ликвидировать стимул для образования локальных отрывов.

Такое решение проблемы было проверено на модельном стенде ЛПИ применительно к последней ступени типа РЛ-960 (масштаб 1:3). Несмотря на наличие небольших отрывов на выпуклой стороне профиля, на вогнутой стороне локальные отрывы практически были ликвидированы. В этих же опытах было выявлено заметное положительное влияние турбулизаторов при входе как в узкий, так и в широкий направляющий аппарат.

#### Влияние турбулентности и пульсаций давления на характеристики последней ступени мощной паровой турбины

Возникновение углов атаки происходит в любой ступени по многим причинам, например из-за наличия изломов в проточной части ЦНД, значительных углов  $\gamma_2''$  и  $v''$  раскрытия

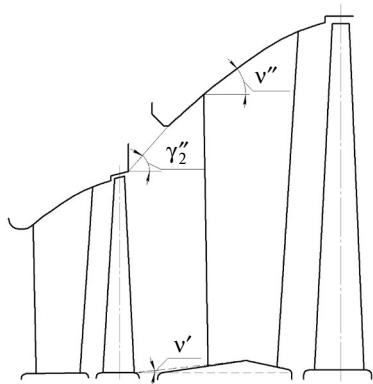


Рис. 1. Вход потока в направляющий аппарат последнего отсека ЦНД

проточной части у периферии (рис. 1), неправильно выбранных осевых зазоров и по ряду других причин.

На режиме  $(u/c_0)_{\text{opt}}$  потери энергии, связанные с углами атаки в данной ступени, и потери энергии на входе в ступень в двухступенчатом отсеке обычно невелики (десятые доли процента от КПД ступени). При большом числе ступеней в ЦНД и наличии стимуляторов пульсаций потока эффекты от углов атаки накладываются и могут приводить к серьезным последствиям.

Рассмотрим совместное влияние на отрывные явления в последних ступенях ЦНД сильных факторов, а именно углов раскрытия периферийного обвода  $\gamma_2''$ ,  $v''$  и последнего рабочего колеса (РК). То есть рассмотрим одновременное влияние двух главных стимуляторов на экономичность ступени. В ЛПИ проводились опыты с рабочим колесом РЛ-960 при одних и тех же углах раскрытия  $\gamma_2'' = v'' = 55^\circ$  (рис. 2).

На рис. 2 характеристики 1 и 2 относятся к результатам испытаний двухступенчатого отсека с подготовительной ступенью на входе. Отсек испытывался при двух значениях объемного расхода  $\bar{G}v = 1,0$  и  $\bar{G}v = 0,3$ .

Характеристика 3 относится к результатам опытов с той же последней ступенью РЛ-960 без предшествующей ступени, турбулизирующей поток на входе, но с установленной подготовительной решеткой, имеющей угол  $\gamma_2'' = 55^\circ$ . Опыты проводились на режиме  $\bar{G}v = 0,4$ . На режимах, близких к холостому ходу, наблюдалось увеличение потерь энергии на 15–20 %. Такое падение КПД ступени можно объяснить сильными отрывами потока в корневой зоне рабочего колеса. Зона отрыва потока за рабочим колесом на этом режиме достигала 49 % от высоты рабочей лопатки  $l_2$ .

Характеристика 3 дает представление об увеличении потерь энергии под влиянием локальных отрывов (стимуляторы пульсаций) в периферийной зоне ступени. Траверсирование потока за последним рабочим колесом в двухступенчатом отсеке показало, что в корневой области зона отрыва потока составляла на режимах близких к холостому ходу не более 10–15 % от высоты рабочей лопатки  $l_2$ .

Проведенный анализ углов атаки и линий тока по высоте ступени (рис. 3) свидетельствуют о том, что во всех ступенях при переходе от



$(u/c_0)_{\text{opt}}$  к удвоенной его величине углы атаки изменяются одинаково, тогда как последствия от этих углов атаки оказываются совершенно различными.

Таким образом, результаты опытов свидетельствуют о том, что при отсутствии подготовительной ступени углы атаки и отрывы потока в направляющем аппарате при больших углах раскрытия совершенно иначе стимулируют отрывы потока по всей высоте рабочих лопаток. Следовательно, турбулизация потока за подготовительной ступенью — это сильнейший фактор, снижающий отрывы потока в последнем рабочем колесе.

В полуторном отсеке ЦНД (рис. 4) не был обнаружен значительный рост потерь на периферии направляющего аппарата при номинальном режим работы ступени типа РЛ-960. Высокий уровень турбулентности потока за РК предшествующей ступени по опытным данным МЭИ, БИТМ, ЛПИ, ЦКТИ достигал 20–25 % и устранил сильные отрывы потока у периферии исследуемой ступени [16]. Однако, если конструктор будет опираться только на существующие методики расчета и не учитывать негативное влияние пульсаций потока во влажнопаровых ступенях с резким раскрытием периферийных границ и высокими значениями  $M''_{w2}$ , то никакая турбулизация потока на входе в последнюю ступень не окажется достаточной, чтобы предотвратить расхождение результатов расчетов и опытов, а в итоге будет снижение КПД и надежности работы последней ступени [1, 2, 14].

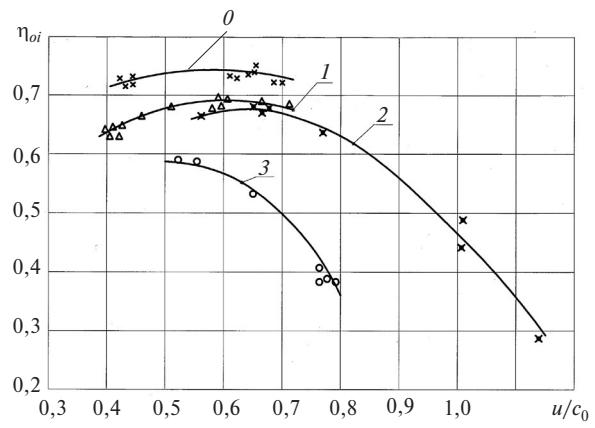


Рис. 2. Влияние углов атаки при наличии срывных явлений в направляющем аппарате

на КПД ступени типа РЛ-960: 0 — одиночная ступень, 1 — двухступенчатый отсек с подготовительной ступенью на входе ( $\bar{G}v = 1,0$ ); 2 — двухступенчатый отсек с подготовительной ступенью на входе ( $\bar{G}v = 0,3$ ); 3 — ступень с подготовительной решеткой с углом  $\gamma''_2 = 55^\circ$  ( $\bar{G}v = 0,4$ )

В испытаниях ЛПИ, ЛМЗ и ЦКТИ, когда число предшествующих ступеней перед последней ступенью типа РЛ-960 увеличивалось от 2 до 5, КПД снижался на 5 % [3]. В опытах со ступенью ВК-50 увеличение числа ступеней от 2 до 5 снизило КПД последней ступени на 9 %.

При проектировании проточной части ЦНД при высоких значениях углов  $\gamma''_2$  и  $v''$  на развитие срывных и нестационарных процессов существенное влияние могут оказывать такие стимуляторы пульсаций и особенно их наложение, как, например, периферийные струи, условия входа в НА и выхода из него для предшествующих

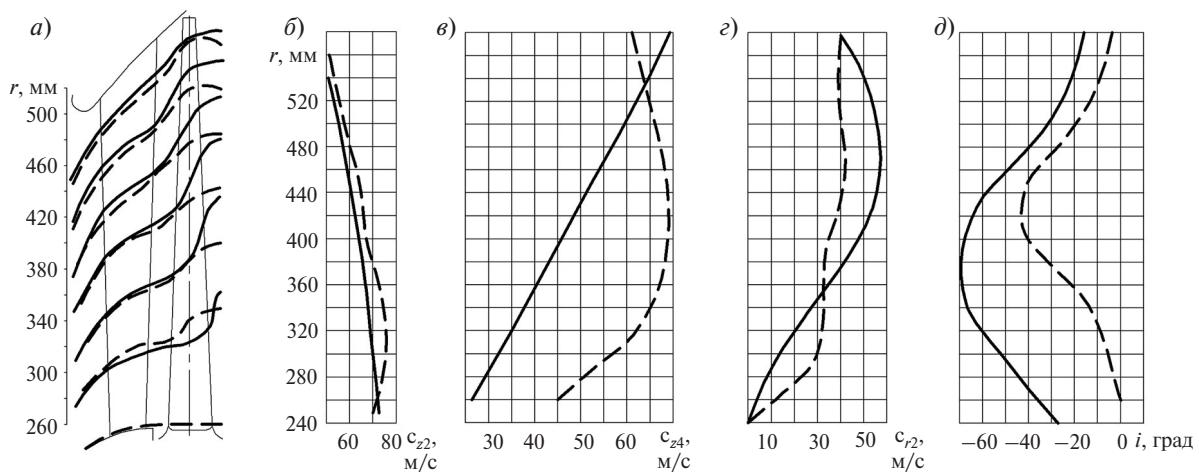


Рис. 3. Влияние отношения  $u/c_0$  на распределение газодинамических параметров потока в ступени: ---- —  $u/c_0 = (u/c_0)_{\text{opt}}$ ; — —  $u/c_0 = 1,2$

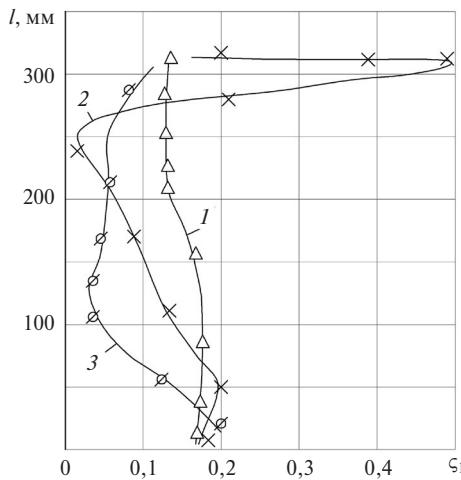


Рис. 4. Распределение потерь энергии за направляющим аппаратом 29-й ступени К-300-240 ЛМЗ [16]:  
1 — полуторный отсек (НА с предшествующей ступенью); 2 — решетка на входе, угол  $\gamma_2'' = 55^\circ$ ;  
3 — решетка на входе, угол  $\gamma_2'' = 30^\circ$

ступеней, не исключая первую ступень, перекрыши на входе в рабочее колесо и другие факторы [9].

В работе [2] изучена взаимосвязь отрывов потока в рабочем колесе на режимах близких к холостому ходу на КПД ступени при номинальном режиме ее работы. Установлено, что устойчивое течение в последних ступенях зависит от различных факторов, стимулирующих развитие пульсаций параметров потока. Высокий КПД ступени на номинальном режиме расширяет область устойчивой работы ступени на переменных режимах. При проектировании ЦНД необходимо учитывать отрицательное влияние стимуляторов пульсаций и по возможности сводить их к минимуму.

Раскрытие проточной части в корневой области целесообразно для снижения больших углов раскрытия у периферии и устранения локальных срывов. Корневая зона чувствительна к диффузорным эффектам, поэтому можно допустить лишь небольшое корневое раскрытие проточной части. Для опытов была выбрана проточная часть с рабочей лопаткой РЛ-960. Периферийный угол за подготовительными решетками во всех опытах поддерживался равным  $\gamma_2'' = 55^\circ$ . Для того чтобы проследить влияние на устойчивость потока угла раскрытия  $\nu' = -10^\circ$  и накопления пограничного слоя на поверхно-

стях перед направляющим аппаратом, было испытано три варианта меридионального обвода.

В первом варианте поток подводился по цилиндрической поверхности.

Во втором варианте поверхность перед направляющим аппаратом была значительно опущена ( $\nu' = -10^\circ$ ).

В третьем варианте перед направляющим аппаратом имелась коническая поверхность, на которой накапливался пограничный слой, что заметно ухудшало структуру потока за рабочим колесом и снижало КПД ступени приблизительно на 1,5 % по сравнению со вторым вариантом.

Анализ испытаний, выполненных на режимах объемного расхода пара  $\bar{Gv} = 0,30-0,35$  [16], позволяет сделать вывод, что раскрытие проточной части в корневой зоне до  $\nu' = -10^\circ$  (вариант 2) практически не дает снижения КПД ступени по сравнению с подводом по цилиндрической поверхности.

### Влияние влажности в современных конструкциях мощных паровых турбин

В турбинных ступенях значительная часть влаги сосредоточена в кромочных следах. Из-за дробления влаги при ее сходе с лопаток и дальнейшем разгоне ее в межвенцовых зазорах снижается скорость пара в кромочном следе. В результате этого возрастает неравномерность потока, а также замедляется его выравнивание при значительной степени влажности, что требует увеличения межвенцовых зазоров на периферии. Нестационарный эффект, связанный с влажностью потока, с особой силой проявляется в периферийной зоне ступени из-за повышенного содержания влаги и сильных вторичных течений в этой зоне.

Чтобы снизить вредное влияние влажности потока на экономичность ступени и устойчивость потока в РК, необходимо соблюдать меры, которые рекомендуются с целью организации безотрывного течения в проточной части турбины, а именно избегать больших углов раскрытия на периферии, взаимодействия корневых и периферийных струй с основным потоком, наличия изломов, уступов, перекрыш, больших открытых камер, а также значительных разрывов «твёрдых» ограничивающих поверхностей [3]. В противном случае нарастание негативных не-

стационарных процессов и срывных явлений в многоступенчатой турбине может принять ламиообразный характер, снижая как экономичность, так и надежность работы последней влажнопаровой ступени ЦНД.

Для удаления влаги из проточной части турбины может быть рекомендована высокоеффективная бескамерная система влагоудаления [17, 18].

В эксперименте на турбине К-300-240 ЛМЗ на ГРЭС-19 коэффициент влагоудаления в широком диапазоне режимов через бескамерную систему влагоудаления (от  $\bar{Gv}_{\text{ном}}$  до  $\bar{Gv}_{\text{холостого хода}}$ ) достигал значений  $\psi = 4,3-5\%$ .

### Источники потерь энергии в проточной части ЦНД

К числу основных источников потерь энергии могут быть отнесены: диффузорно-конфузорный участок с углом раскрытия  $v''$  внутри НА; безлопаточный диффузор, предшествующий НА, с углом  $\gamma_1'$ ; диффузорный неограниченный твердыми стенками участок с углом  $\gamma_2''$ ; диффузорно-конфузорные зоны с углом раскрытия  $v'$ ; зона между предшествующим РК и НА последней ступени размером  $\bar{S}_{Z2}$ ; осевой зазор между НА и РК  $\bar{\delta}_{Z\alpha}$ ; сверхзвуковые течения в корневой зоне НА ( $M'_{c1}$ ) и в периферийной области РК ( $M''_{w2}$ ); процессы конденсации, порождающие пульсации в потоке. Размеры  $\bar{S}_{Z2}$  и  $\bar{\delta}_{Z\alpha}$  входят в состав характеристик источников отрывов, так как сильно влияют на степень турбулентности и неравномерность потока.

Существует еще ряд важных факторов, стимулирующих пульсации потока и влияющих на потери энергии. Эти факторы характеризуют влияние предшествующих ступеней на последнюю ступень. Их условимся называть «*z*-факторами». К числу факторов, порождающих дополнительные потери во влажнопаровой ступени, относятся: концевые периферийные и корневые струи; перекрыши между НА и РК; уступы, изломы и резкие переходы на ограничивающих поверхностях проточной части; большие отборы пара; аэродинамически несовершенная организация потока при входе в первую ступень ЦНД.

Эта группа потерь в существующих турбинах все еще играет весьма заметную роль. Технические средства для устранения или смягчения этих потерь найдены. Разумеется, конструктор

всегда стремится избежать в проточной части уступов и изломов, выбирать оптимальные перекрыши, а также наилучшим образом направлять концевые струи.

Однако проектирование проточной части ЦНД современных турбин встречается с большими трудностями, и нередко конструктор по технологическим и экономическим соображениям вынужден принимать решения, способные искажать аэродинамику потока. В совокупности небольшие погрешности при числе ступеней более двух—трех могут в сумме вызвать при неблагоприятных условиях появление пульсаций, больших углов атаки, трудно предсказуемых последствий. Соответствующие этим *z*-факторам снижение запаса по устойчивости потока и потери энергии зависят от тех компромиссных решений, которые принимает конструктор, далеко не всегда располагая достоверными оценками влияния различных технологических упрощений.

Резкое раскрытие периферийных обводов и высокие значения  $M''_{w2}$  являются одними из главных стимуляторов пульсаций потока — источников роста потерь энергии в концевых зонах влажнопаровых ступеней большой веерности [19, 20]. Повышенные потери при наличии локальных отрывов потока усиливаются вынужденными колебаниями в зонах интенсивной конденсации [13].

Эти обстоятельства требуют уменьшения углов раскрытия периферийного обвода ступени. Оптимизируя меридиональные обводы, можно допускать корневой угол раскрытия в последнем двухступенчатом отсеке  $v' = -10^\circ$  с углом раскрытия в предшествующем отсеке  $v' = -5^\circ$  (с суммарным отклонением  $v'_\Sigma = -15^\circ$ ). Это позволяет значительно снизить угол раскрытия проточной части у периферии последней влажнопаровой ступени ЦНД.

### Заключение

Взаимосвязь КПД последней ступени наnominalном режиме с устойчивостью потока в РК требует для повышения эффективности работы этой ступени ЦНД проектировать проточную часть с минимальными возмущениями потока. Необходимо устранять локальные отрывы потока в последней ступени. Стимуляторами локальных отрывов могут быть углы атаки на входе



в ступень и другие возмущения потока, исходящие из проточной части, передаваемые импульсы со стороны периферийной зоны РК из сверхзвукового потока, неравномерного по окружности, а также из направляющего аппарата, где могут быть локальные отрывы на профилях не только в периферийной зоне при значительном местном падении давления (зона интенсивной конденсации). В корневой зоне РК локальный отрыв может формироваться из-за углов атаки, которые возможны уже на номинальном режиме, но особенно значительны на режимах торможения.

Таким образом, в последней ступени ЦНД формируется треугольник пульсаций: корневая зона РК — периферийная зона РК — периферийная зона НА. В этот треугольник пульсаций

прямо или косвенно поступают сигналы от стимуляторов отрывов и из проточной части ЦНД.

Большое количество стимуляторов отрывов потока для ступеней, работающих на влажном паре, требует от конструктора формирования треугольника пульсаций, обеспечивающего надежную работу ступени по устойчивости потока в рабочем колесе и с минимальными потерями энергии в широком диапазоне режимов. С ростом предельной высоты рабочих лопаток задача усложняется, что требует разработки физической модели потока в ЦНД, без которой в настоящее время невозможно гарантировать высокоэффективную конструкцию, наметить необходимый эксперимент и разработать расчетные формулы для влажнопаровых ступеней ЦНД с лопатками предельной длины.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Захаров А.В., Шпензер Г.Г. Критические режимы работы последних ступеней мощных паровых турбин с лопатками предельной длины // Научно-технические ведомости СПб ГПУ. 2013. №1(166). С. 41–44.
2. Захаров А.В., Шпензер Г.Г., Рассохин В.А. Устойчивость потока в рабочем колесе при различных условиях на входе в ступень // Научно-технические ведомости СПб ГПУ. 2013. №3(178). С. 28–30.
3. Шпензер Г.Г., Захаров А.В., Тюхтяев А.М. Устойчивость потока в последних ступенях цилиндров низкого давления паровых турбин // Научно-технические ведомости СПб ГПУ. 2014. №3(202). С. 54–61.
4. Starzmann J., Kaluza P., Casey M.V., Sieverding F. On kinematic relaxation and deposition of water droplets in the last stages of low pressure steam turbines // Journal of turbomachinery. 2013. Vol. 136. № 7. 071001. TURBO-13-1137.
5. Megerle B., Rice T.S., McBean I., Ott P. Numerical and experimental investigation of the aerodynamic excitation of a model low-pressure steam turbine stage operating under low volume flow // J. Eng. Gas Turbines Power. 2012. Vol. 135. № 1. 012602. GTP-12-1199.
6. Megerle B., Rice T.S., McBean I., Ott P. Unsteady aerodynamics of low-pressure steam turbines operating under low volume flow // J. Eng. Gas Turbines Power. 2012. Vol. 136. № 9. 091008. TURBO-13-1252.
7. Shigeki Senoo, Hideki Ono, Takanori Shibata1, Susumu Nakano, Yutaka Yamashita, Kunio Asai1, Kazuya Sakakibara, Hideo Yoda, Takeshi Kudo. Development of titanium 3600rpm-50inch and 3000rpm-60inch last stage blades for steam turbines // International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems. 2014. Vol. 6. №2. P. 9–16.
8. Satoshi Miyake, Itsuro Koda, Satoru Yamamoto, Yasuhiro Sasao, Kazuhiro Momma, Toshihiro Miyawaki, Hiroharu Ooyama. Unsteady wake and vortex interactions in 3-D steam turbine low pressure final three stages // ASME Turbo Expo 2014: Turbine technical conference and exposition. 2014. GT2014-25491.
9. Stetter H., Ebz G., Zimmermann C., Hosenfeld H.-G. Experimental verification of the improvements achieved by a new LP-blade design in a steam turbine // International gas turbine and aeroengine congress and exposition cologne. Germany. 1992. 92-GT-225.
10. Grübel M., Starzmann J., Schatz M., Eberle T., Vogt D.M., Sieverding F. Two-phase flow modeling and measurements in low-pressure turbines // J. Eng. Gas Turbines Power. 2014. Vol. 137. №4. 042602. GTP-14-1442.
11. Wróblewski W., Dykas S., Gardzilewicz A., Kovalovratnik M. Numerical and experimental investigations of steam condensation in LP part of a large power turbine // J. Fluids Eng. 2009. Vol. 131. 4. 041301. DOI: 10.1115/1.3089544.
12. Zhang L.Y., He L., Stueer H. A numerical investigation of rotating instability in steam turbine last stage // Journal of turbomachinery. 2013. Vol. 135. № 1. 011009. TURBO-11-1092.
13. Кириллов, И.И. Шпензер Г.Г., Саркар С. Вынужденные колебания параметров потока в срывных зонах сопла Лаваля // Теплоэнергетика. 1983. №12. С. 60–62.
14. Базаров С.М., Шпензер Г.Г. К кинетике влагообразования в возмущенных потоках // Инженерно-физический журнал. 1979. Т.36, № 6. С. 1018–1023.
15. Безюков О.К. Исследование влияния возмущенности потока на образование и трансформацию



влаги в турбинных ступенях: дис. ... канд. техн. наук / Ленинградский политехнический университет. Ленинград, 1978. 155 с.

16. **Носовицкий А.И., Шпензер Г.Г.** Газодинамика влажнопаровых турбинных ступеней. Л.: Машиностроение, 1977. 184 с.

17. **Kirillov I.I., Shpenzer G.G.** Problems of moisture collection and moisture removal in flow part of steam turbine // Thermal Engineering. 1993. №3. Р. 22–24.

18. **Патент 2126088 РФ.** МПК F 01 D 25/32. Ступень паровой турбины со средствами сепарации влаги / Н.А. Забелин, Г.Г. Шпензер, В.И. Кириллов

[и др.]; Заявитель и патентообладатель ОАО «Ленинградский металлический завод». 95116898/06; заявл. 04.10.1995; опубл. 10.02.1999. 3с.: ил.

19. **Сандовский В.Б.** Исследование и отработка последних ступеней паровых турбин большой мощности: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ленинград: ЛПИ, 1977. 21 с.

20. **Байбаков А.Б.** Исследование работы ступеней и отсеков турбин большой мощности в широком диапазоне режимов с целью повышения эксплуатационных характеристик: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ленинград: ЛПИ, 1983. 22 с.

## REFERENCES

1. **Zakharov A.V., Shpenzer G.G.** Kriticheskiye rezhimy raboty poslednikh stupeney moshchnykh parovykh turbin s lopatkami predelnoy dliny [Critical operating modes of the last stages of powerful steam turbines]. *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPb GPU*. 2013. №1(166). S. 41–44. (rus.)
2. **Zakharov A.V., Shpenzer G.G., Rassokhin V.A.** Ustoychivost potoka v rabochem kolese pri razlichnykh usloviyakh na vkhode v stupen [Steam flow stability in the rotor wheel under the different stage inlet conditions]. *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPb GPU*. 2013. №3(178). S. 28–30. (rus.)
3. **Shpenzer G.G., Zakharov A.V., Tyukhtyayev A.M.** Ustoychivost potoka v poslednikh stupenyakh tsilindrov nizkogo davleniya parovykh turbin [Stability of the steam flow in LPC last stages.]. *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPb GPU*. 2014. №3(202). S. 54–61. (rus.)
4. **Starzmann J., Kaluza P., Casey M.V., Sieverding F.** On kinematic relaxation and deposition of water droplets in the last stages of low pressure steam turbines // *Journal of turbomachinery*. 2013. Vol. 136. № 7. 071001. TURBO-13-1137.
5. **Megerle B., Rice T.S., McBean I., Ott P.** Numerical and experimental investigation of the aerodynamic excitation of a model low-pressure steam turbine stage operating under low volume flow. *J. Eng. Gas Turbines Power*. 2012. Vol. 135. № 1. 012602. GTP-12-1199.
6. **Megerle B., Rice T.S., McBean I., Ott P.** Unsteady aerodynamics of low-pressure steam turbines operating under low volume flow. *J. Eng. Gas Turbines Power*. 2012. Vol. 136. № 9. 091008. TURBO-13-1252.
7. **Shigeki Senoo, Hideki Ono, Takanori Shibata1, Susumu Nakano, Yutaka Yamashita, Kunio Asai1, Kazuya Sakakibara, Hideo Yoda, Takeshi Kudo** Development of titanium 3600rpm-50inch and 3000rpm-60inch last stage blades for steam turbines. *International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems*. 2014. Vol. 6. №2. P. 9–16.
8. **Satoshi Miyake, Itsuro Koda, Satoru Yamamoto, Yasuhiro Sasao, Kazuhiro Momma, Toshihiro Miyawaki, Hiroharu Ooyama.** Unsteady wake and vortex interactions in 3-D steam turbine low pressure final three stages. *ASME Turbo Expo 2014: Turbine technical conference and exposition*. 2014. GT2014-25491.
9. **Stetter H., Eyb G., Zimmermann C., Hosenfeld H.-G.** Experimental verification of the improvements achieved by a new LP-blade design in a steam turbine. *International gas turbine and aeroengine congress and exposition cologne*. Germany. 1992. 92-GT-225.
10. **Grübel M., Starzmann J., Schatz M., Eberle T., Vogt D.M., Sieverding F.** Two-phase flow modeling and measurements in low-pressure turbines. *J. Eng. Gas Turbines Power*. 2014. Vol. 137. №4. 042602. GTP-14-1442.
11. **Wróblewski W., Dykas S., Gardzilewicz A., Kowalowratnik M.** Numerical and experimental investigations of steam condensation in LP part of a large power turbine. *J. Fluids Eng.* 2009. Vol. 131. 4. 041301. DOI: 10.1115/1.3089544.
12. **Zhang L.Y., He L., Stueer H.** A numerical investigation of rotating instability in steam turbine last stage. *Journal of turbomachinery*. 2013. Vol. 135. №1. 011009. TURBO-11-1092.
13. **Kirillov I.I., Shpenzer G.G., Sarkar S.** Vynuzhdennyye kolebaniya parametrov potoka v sryvnykh zonakh sopla Lavalya [Forced oscillations of flow parameters in separation zones of the Laval nozzle]. *Teploenergetika*. 1983. №12. S. 60–62. (rus.)
14. **Bazarov S.M., Shpenzer G.G.** K kinetike vlagoo-brazovaniya v vozmushchennykh potokakh [The kinetics of development of moisture in disturbed flows]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*. 1979. T.36, № 6. S. 1018–1023. (rus.)
15. **Bezyukov O.K.** Issledovaniye vliyaniya vozmushchennosti potoka na obrazovaniye i transformatsiyu vlagi v turbinnyykh stupenyakh: dis. ... kand. tekhn. nauk [An investigation of the influence of flow disturbance on the formation and transformation of moisture in turbine stages] / Leningradskiy politekhnicheskiy universitet. Leningrad, 1978. 155 s.
16. **Nosovitskiy A.I., Shpenzer G.G.** Gazodinamika vlaghnoparovykh turbinnyykh stupeney [Gas dynamics of wet turbine stages]. Leningrad: Mashinostroyeniye, 1977. 184 s. (rus.)



17. **Kirillov I.I., Shpenzer G.G.** Problems of moisture collection and moisture removal in flow part of steam turbine. *Thermal Engineering*. 1993. №3. P. 22–24.
18. Patent 2126088 RF, MPK F 01 D 25/32. Stupen parovoy turbiny so sredstvami separatsii vлаги [Steam turbine stage with the moisture separation means] / N.A. Zabelin, G.G. Shpenzer, V.I. Kirillov [i dr.]; Zayavitel i patentooobladel OAO «Leningradskiy metallicheskij zavod». 95116898/06; zayavl. 04.10.1995; opubl. 10.02.1999. 3s.: il. (rus.)
19. **Sandovskiy V.B.** Issledovaniye i otrabotka poslednikh stupeney parovykh turbin bolshoy moshchnosti: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [An investigation and development of the last stages of large power steam turbines]. Leningrad: LPI, 1977. 21 s.
20. **Baybakov A.B.** Issledovaniye raboty stupeney i otsekov turbin bolshoy moshchnosti v shirokom diapazone rezhimov s tselyu povysheniya ekspluatatsionnykh kharakteristik: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Leningrad: LPI, 1983. 22 s. (rus.)

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ШПЕНЗЕР Геннадий Григорьевич** — кандидат технических наук доцент кафедры турбинных двигателей и установок Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: shpenzer.g@gmail.com

#### AUTHORS

**SHPENZER Gennadii G.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: shpenzer.g@gmail.com

DOI 10.5862/JEST.219.3

УДК 629.1.032.001

*P.B. Русинов, Р.Ю. Добрецов*

## **О ПАРАМЕТРАХ ТОПЛИВОПОДАЧИ В ДИЗЕЛЯХ**

*R.V. Rusinov, R.Yu. Dobretsov*

### **ON PARAMETERS OF FUEL INJECTION IN DIESEL ENGINES**

Рассмотрен вопрос выбора параметров распылителя форсунки в системе топливоподачи дизельного двигателя. Предложен метод аналитического определения коэффициента в расчетной модели движения распыленной струи. Приведен пример расчета. Определено место новой методики в общей структуре экспресс-метода оценки параметров рабочего процесса дизельного двигателя.

ДИЗЕЛЬ; ДВИЖЕНИЕ РАСПЫЛЕННОЙ СТРУИ ТОПЛИВА; ФОРСУНКА; ПАРАМЕТРЫ ВПРЫСКА; ТОПЛИВНАЯ АППАРАТУРА ДИЗЕЛЕЙ.

The paper considered the issue of choosing injection spray nozzle parameters in the fuel feeding system of the diesel engine. The authors proposed a method of analytical determination of the coefficient in the calculation model of the dispersed jet motion. There were presented the analytical correlation between the main parameters of the injection process: pressure, density, fuel consumption, speed drops, length of the jet, geometric dimensions of the atomizer and other calculation examples. Experimental data confirm the adequacy of the main provisions of the estimated model. The position of the new methodology was identified in the overall structure of the rapid assessment method for workflow settings of the diesel engine.

DIESEL ENGINES; DISPERSED JET MOTION; NOZZLE; INJECTION PARAMETERS; FUEL INJECTION; DEVICES OF DIESEL ENGINES.

Внедрение систем топливоподачи, управляемых электроникой, дает преимущества в экономичности и экологичности дизелей. При хорошей отработке систем можно говорить о росте надежности и удельной мощности двигателя, увеличении приспособляемости, снижении динамических нагрузок (жесткость работы) [1].

Эти преимущества сопровождаются ростом себестоимости силовой установки, ростом требований к качеству топлива, развитием зависимости от сервисных служб и, фактически, потерей ремонтопригодности в полевых условиях. Поскольку компоненты электронных систем управления обычно производятся за рубежом, дополнительные трудности возникают при их импорте как продукции, имеющей «двойное назначение».

С другой стороны, оптимизация параметров теплового процесса дизеля, дальнейшее совершенствование конструкции системы топливо-

подачи и другие мероприятия позволяют и далее повышать мощностные, экономические и экологические показатели двигателей с системами питания «традиционных» конструкций [2]. На этом пути важно развитие аналитических методов, позволяющих проводить экспресс-оценку параметров конструкции на предпроектном этапе, а также рассматривать задачи оптимизации (в том числе в многопараметрической постановке). Аналитические методы снижают потребность в дорогостоящих экспериментальных исследованиях, позволяют максимально использовать опыт, накопленный в отрасли двигателестроения, и избежать затрат времени, связанных с моделированием при помощи специальных программных пакетов процессов работы двигателя внутреннего сгорания (ДВС).

Проблема выбора параметров системы топливоподачи не является исключением; важным этапом развития методики определения числа



и диаметра сопловых отверстий распылителей форсунок, давления и продолжительности впрыска, т. е. тех исходных данных, от которых непосредственно зависит качество теплового процесса дизелей, уделено много внимания в специальной литературе [3–6]. Однако описанные в этих работах методы не позволяют непосредственно связать интересующие нас параметры системы топливоподачи с процессом распыливания топлива в реальной камере сгорания. В данной статье используются отдельные положения, заимствованные из этих источников.

**Цель** настоящей статьи — обоснование простого аналитического метода выбора первичных параметров системы топливоподачи на этапе предпроектных изысканий при создании нового или выборе стратегии модернизации существующего дизеля.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи: обосновывается выбор математического описания движения струи распыленного топлива в камере сгорания; предлагаются способы расчетного определения составляющих расчетной зависимости; рассматривается проблема корректировки величины давления топлива и моментов впрыска с учетом влияния упругости валов в системе газораспределения. Приводятся результаты расчетов с использованием разработанной методики.

### Основная часть

При выборе основных параметров топливоподачи важно наличие теоретической базы, которая позволяет оценивать необходимые параметры и соотношения конструктивных элементов топливовпрыскивающей аппаратуры, сокращая тем самым затраты времени на их чисто экспериментальный поиск. В расчетном поиске принципиально необходимо знать закон движения распыленного потока топлива в плотных и нагретых газовых средах, характерных для реального состояния сжатого воздуха в камерах сгорания ДВС. Такой закон может быть установлен экспериментально. Важным оказывается влияние основных параметров, определяющих поведение струи топлива в камере сгорания, и варьирование этих параметров в достаточно широких пределах, позволяющих уйти от конкретной геометрии рабочего про-

странства цилиндра и получить обобщенную зависимость. Результаты таких испытаний, проведенных в СПбПУ, опубликованы в работе [7].

В предлагаемой исходной аналитической зависимости времени  $t$  полета распыленной струи топлива в функции ее длины  $l$  [7]

$$t = \frac{1}{2} \frac{l}{V_0} \left[ 1 + \sqrt{1 + \frac{2}{3\eta} \frac{\rho_{cp}}{\rho_t} \left( \frac{l \operatorname{tg} \alpha}{d_c} \right)^2} \right], \quad (1)$$

использованы следующие обозначения:  $V_0$  — начальная скорость вылета топлива из сопел распылителя;  $\alpha$  — угол конуса распыливания (полный угол —  $2\alpha$ );  $\rho_{cp}$  — плотность воздушной среды в камере сгорания дизеля;  $\rho_t$  — плотность впрыскиваемого топлива;  $\eta$  — опытный коэффициент.

В решении проблемы практического использования представленного выражения, естественно, первым возникает вопрос численной оценки опытного коэффициента и объективности самой аналитической зависимости.

Для дальнейшей работы воспользуемся экспериментальными данными ЦНИДИ (рис. 1) по распыливанию топлива в среды различной плотности (сплошные линии), полученные при относительно невысокой температуре внешней среды, но которые можно считать справедливыми и для реальных температурных условий в камерах сгорания дизелей (750–950 К), поскольку в последнем случае — до момента самовоспламенения топлива — традиционно визуальная констатация относительного уменьшения длины струи связана лишь с невидимостью реально существующих паров испаряющихся капель в термически активной зоне фронта распыленной струи.

Для определения величины опытного коэффициента, входящего в зависимость (1), воспользуемся упомянутыми результатами испытаний. Выразим интересующий нас параметр из выражения (1):

$$\eta = \frac{\frac{\rho_{cp}}{\rho_t} \left( \frac{l \operatorname{tg} \alpha}{d_c} \right)^2}{6 \frac{V_0 t}{l} \left( \frac{V_0 t}{l} - 1 \right)}. \quad (2)$$

Сообразно последней формуле при задании, к примеру, исходя из данных рис. 1 для конкретных точек зависимостей пути  $l$  от времени  $t$  полета струи расчет  $\eta$  достаточно прост. Его результаты представлены в табл. 1.

Однако предварительно необходимо задаться рядом начальных значений параметров, входящих в расчетную зависимость (2), или определить пределы, в которых будут варьироваться искомые параметры, с целью нахождения оптимума.

Таким образом, в простейшем случае проблема определения оптимальных значений варьируемых параметров может рассматриваться, как однопараметрическая задача оптимизации, в более общем — как многопараметрическая.

Существенно упростить расчеты можно, воспользовавшись экспериментальными данными (см. рис. 1). В качестве конкретного примера, рассмотрим вариант, соответствующий кривой 1 на рис. 1, для которого при  $l = 250$  мм  $t = 2,01$  мс,  $\rho_{cp} = 1,9$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_t = 0,85$  г/см<sup>3</sup>,  $d_c = 0,62$  мм,  $\mu_c = 0,65$ ,  $2\alpha = 7,5^\circ$  (по экспериментальным данным), откуда  $\operatorname{tg} \alpha/3 = 0,0218$ , давление затяга пружины иглы форсунки  $p_0 = 20$  МПа, давление газовой среды (углекислый газ)  $p_{cp} = 0,11$  МПа.

Определим теперь значения составляющих выражения (2).

Начальная скорость вылета топлива из сопла определяется по соотношению

$$V_0 = \mu_c \sqrt{\frac{2(p_0 - p_{cp})}{\rho_t}}$$

(по мере дальнейшего роста давления впрыска сверх значения  $p_0$  энергия струи топлива расходуется в основном на поддержание ее начальной скорости).

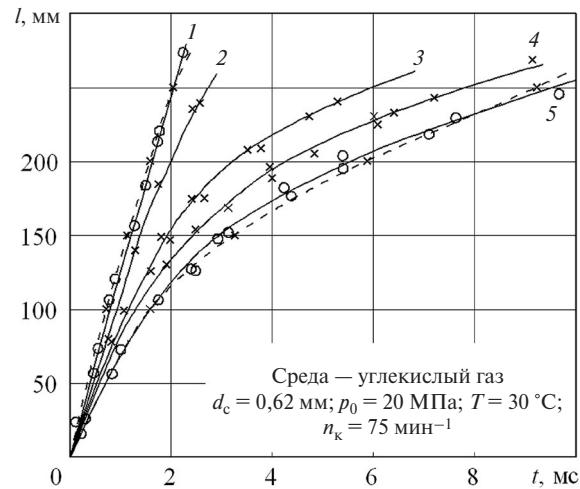


Рис. 1. Экспериментальные данные по длинам (сплошные линии) распыленных струй топлива в функции времени  $t$  для различных плотностей внешней среды и расчетные кривые (пунктир)

для разных вариантов давлений  $p_{cp}$ , МПа, и плотностей  $\rho_{cp}$ , кг/м<sup>3</sup>: 1—0,11 и 1,9; 2—0,5 и 8,7; 3—0,9 и 15,7; 4—1,2 и 21,0; 5—1,5 и 26,2

Коэффициент расхода сопла для рассматриваемого случая ( $d_c = 0,62$  мм) составляет  $\mu_c = 0,65$ .

При отсутствии экспериментальных данных для угла  $2\alpha$  конуса распыленной струи топлива, в расчете  $\eta$  возможно пользоваться зависимостями [7]: при впрыске в «открытое» пространство —  $2\alpha = 7^\circ + 0,47 \rho_{cp}$ ; для «стесненных» объемов камер сгорания дизелей, когда эжекция сжатого в камере сгорания воздуха в распыливаемую струю несколько снижает периферийную плотность воздушного заряда, что приводит к увеличению «раствора» струи, —  $2\alpha = 7,5^\circ + 0,47 \rho_{cp}$ .

Таблица 1

Значение коэффициента  $\eta$  при впрыске топлива в функции плотности внешней среды:

№ варианта	$p_{cp}$ , МПа	$\rho_{cp}$ , кг/м <sup>3</sup>	$p_0 - p_{cp}$ , МПа	$V_0$ , м/с	$2\alpha$ , град.	$\operatorname{tg} \alpha/3$	$l$ , мм	$t$ , мс	$\eta$
1	0,11	1,9	19,89	140,6	7,5	0,0218	250	2,01	0,20
2	0,50	8,7	19,50	139,3	11,4	0,0332	200	2,00	0,36
3	0,90	15,7	19,10	137,8	14,3	0,0416	200	3,10	0,23
4	1,20	21,0	18,80	136,7	16,8	0,0489	200	4,20	0,19
5	1,50	26,2	18,50	135,6	19,1	0,0556	200	5,70	0,15

$d_c = 0,62$  мм;  $\mu_c = 0,65$ ;  $p_0 = 20$  МПа;  $\rho_t = 0,85$  г/см<sup>3</sup>;  $T_c \approx 30$  °C



Результаты расчета по исходной формуле времени  $t$  пролета распыленной струи применительно к значениям «крайних» кривых 1 и 5 на рис. 1 (соответствуют  $\eta = 0,20$  и  $\eta = 0,15$  в табл. 1) для длин  $l = 0; 50; 100; 150; 200$  и 250 мм приведены в табл. 2, а соответствующие им кривые показаны на рис. 1 пунктиром.

Таблица 2

Расчетные длины  $l$  распыленных струй в функции времени  $t$ , соответствующие кривым 1 и 5 на рис. 1

$l$ , мм	$t$ , мс	
	Вариант 1 ( $\eta = 0,20$ )	Вариант 5 ( $\eta = 0,15$ )
0	0	0
50	0,36	0,42
100	0,73	1,65
150	1,12	3,36
200	1,55	5,68
250	2,02	8,61

$d_c = 0,62$  мм;  $\mu_c = 0,65$ ;  $p_0 = 20$  МПа;  $T_c = 0,85$  г/см<sup>3</sup>;  $T_c \approx 30$  °C

Практически имеет место соответствие расчетных и экспериментальных данных для «крайних» кривых, что характеризует и общую достоверность предлагаемой математической зависимости.

Для представления о характере изменения коэффициента  $\eta$  как функции плотности  $\rho_{cp}$  внешней среды расчетные данные для неизменной начальной скорости распыленной струи  $v_0 = 140,6$  м/с с поправкой данных по рис. 1 на время пролета заданного пути —  $t_0 = t \frac{V_0}{140,6}$  — приведены на рис. 2.

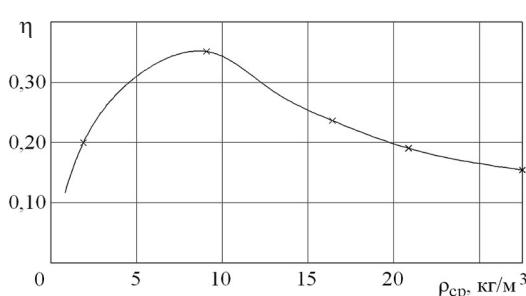


Рис. 2. Коэффициент  $\eta$  в функции плотности внешней среды  $\rho_{cp}$  ( $V_0 = 140,6$  м/с)

При этом, поскольку вводимая поправка сохраняет прежнее значение коэффициента  $\eta$ , то все его значения для неизменной скорости  $V_0 = 140,6$  м/с идентичны и для данных табл. 1.

Для определения коэффициента  $\eta$ , помимо «чисто» экспериментального пути, представляется возможным и косвенный вариант его численной оценки по уже имеющимся данным: сопоставлением искомых и имеющихся данных только в пределах безотрывного от сопла впрыска топлива, после которого дальнейшее продвижение распыленной струи обусловлено только ее инерцией.

Так, применительно к данным рис. 1 при числе оборотов кулачкового вала топливного насоса высокого давления  $n_k = 750$  мин<sup>-1</sup> и ориентировочном значении максимального давления впрыска [8] 20 МПа общая продолжительность впрыска по углу поворота коленчатого вала дизеля составляет  $\varphi = 25^\circ$  п.кол.в., а по кулачковому валу  $\varphi_k = \varphi / 2 = 12,5$  п.кул.в.

По данным ЦНИДИ [7] для указанного давления соотношение реальной и геометрической продолжительностей впрыска  $\Delta = \varphi_k / \varphi_r = 1,40$ , откуда продолжительность впрыска топлива  $\varphi_r = 12,5 / 1,4 = 8,93^\circ$  п.кул.в., или по времени  $t = \varphi_r / 6n_k = 8,93 / 6 \cdot 750 = 1,98 \cdot 10^{-3}$  с  $\approx 2$  мс.

В это время укладывается как предельная длина 100 мм пути наиболее пологой кривой 5 (см. рис. 1), и при сопоставлении, к примеру, времени пролета упомянутого пути для кривых 5 и 1 оказывается возможным оценить коэффициент  $\eta$  для кривой 5 при известных данных для кривой 1.

По причине трудности графической оценки достаточно малого времени пролета пути 100 мм непосредственно по реальным кривым примем соотношения длин по табл. 2:  $t_1 / t_5 = 0,73 / 1,65 = 0,44$ . И тогда получим

$$\eta_5 = 1,65 / 11,85 = 0,146 \approx 0,15.$$

Имеет место практически тождество со значением  $\eta_5$  по табл. 1, в связи с чем, видимо, возможно весьма упрощенное, но достаточно точное определение  $\eta$  для плотных сред по экспериментальным данным при атмосферном давлении ( $\rho_{cp} \approx 1,18$  кг/м<sup>3</sup>), поскольку в пределах собственно впрыска топлива при существенной дальности полета струи в условиях малой плотности внешней среды функция  $l = f(t)$  близка к линейной (кривая 1 на рис. 1).

В первом приближении можно принимать  $t_1/t_x = \alpha_1 V_1/\alpha_x V_x$ .

Примечательно, что именно при расчете системы топливоподачи дизелей с использованием предлагаемой математической зависимости  $t = f(l)$  вообще не требуется проведения каких-либо предварительных экспериментальных исследований по определению коэффициента  $\eta$ .

Дело в том, что начальная стадия организации теплового процесса в дизелях связана с условием непопадания топлива на охлаждающие стенки камеры сгорания за период  $\tau_i$  задержки самовоспламенения (период «индукции») топлива.

Таким образом, при пробеге струей топлива пути, определяемого размерами камеры сгорания дизеля, и продолжительности периода индукции, зависящей от степени сжатия воздуха в камере сгорания, любой задаваемый как реально возможный вариант системы топливоподачи ( $d_c, V_0, \alpha, \rho_{cp}, \rho_t$ ) автоматически соответствует конкретному значению коэффициента  $\eta$  как ориентиру уже для поиска оптимального варианта системы топливоподачи.

Этот оптимум в конечном итоге связан с поиском таких соотношений всех действующих факторов, при которых расчетное суммарное проходное сечение сопловых отверстий распылителей соответствует их целому числу.

Диаметр соплового отверстия при этом рассчитывается по преобразованному выражению для  $\eta$  с учетом длины  $l$  распыленной струи, соответствующей периоду индукции  $\tau_i$  топлива:

$$d_c = \frac{l \operatorname{tg} \alpha / 3}{\sqrt{6\eta \frac{V_0 \tau_i}{l} \left( \frac{V_0 \tau_i}{l} - 1 \right) \frac{\rho_t}{\rho_{cp}}}}.$$

В качестве примера решения задачи расчета распылителя (и параметров впрыска вообще) рассмотрим конкретный вариант с четырехтактным дизелем Д6 (6Ч15/18) мощностью  $N_e = 110,3$  кВт (150 л.с.) при числе оборотов коленчатого вала  $n = 1500$  мин $^{-1}$  ( $n_k = 750$  мин $^{-1}$ ) с удельным расходом топлива  $g_e = 238$  г/кВт·ч, степенью сжатия  $\varepsilon = 16$ , давлением затяга пружины иглы форсунки  $p_0 = 210$  кгс/см $^2$  (20,6 МПа), давлением в камере сгорания в конце процесса сжатия  $p_a = 3,5$  МПа, плотностью сжа-

того в камере сгорания воздуха  $\rho_{cp} = 15$  кг/м $^3$  и продолжительностью топливоподачи  $\varphi = 28^\circ$  п.кол.в. [8].

При угле конуса распыливания  $2\alpha = 7,5^\circ + 0,47 \rho_{cp} = 7,5^\circ + 0,47 \cdot 15 = 15^\circ$  и  $\operatorname{tg} \alpha / 3 = 0,044$  коэффициент расхода сопловых отверстий распылителя (семь отверстий диаметром 0,25 мм) равен  $\mu_c = 0,37$  [7].

По рис. 3 [9] для  $\varepsilon = 16$  период индукции  $\tau_i$  дизельного топлива в градусах угла поворота коленчатого вала опытного двигателя ( $n = 900$  мин $^{-1}$ ) составляет  $\varphi = 7,6^\circ$ , или по времени —  $\tau_i = \frac{\varphi}{6n} = \frac{7,6}{6 \cdot 900} = 0,00141 = 1,41$  мс.

Начальная скорость вылета струи топлива из сопла распылителя

$$V_0 = \mu_c \sqrt{\frac{2(p_0 - p_{cp})}{\rho_t}} = 74,2 \text{ м/с.}$$

При диаметре цилиндра дизеля  $D_6$   $s_k = 150$  мм и центральном расположении форсунки примем длину  $l$  струи за период индукции  $\tau_i$  равной 65 мм. Тогда  $\eta = 0,39$ .

Далее, рассчитаем варианты диаметров  $d_c$  для  $\eta = 0,30; 0,35; 0,45; 0,50$  (результаты представлены в табл. 3).

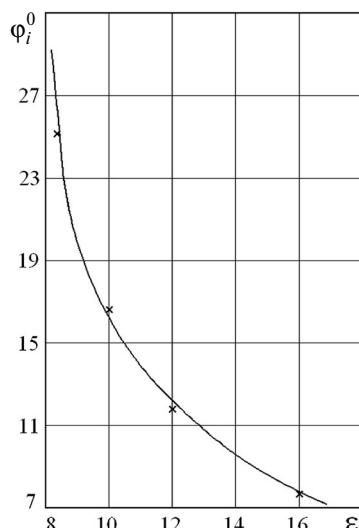


Рис. 3. Период задержки самовоспламенения  $\Phi_i^0$  дизельного топлива в функции степени сжатия  $\varepsilon$  двигателя ( $n = 900$  об/мин.)

Таблица 3

Расчетные значения диаметров  $d_c$  и числа  $n_c$  сопловых отверстий распылителя в функции коэффициента  $\eta$

$\eta$	$d_c$	$n_c$
0,30	0,29	5,24
0,35	0,265	6,28
0,39	0,25	7,05
0,45	0,23	8,34
0,5	0,22	9,11

Суммарная площадь проходного сечения сопловых отверстий распылителя [7]  $f_c = \frac{6ng_{\text{ц}}}{\mu_c \varphi \sqrt{2\rho_t (p_p - p_{\text{ср}})}}$ , где единичная цикловая подача топлива  $g_{\text{ц}} = \frac{N_{e\text{ц}} g_e}{60n_k}$  ( $N_{e\text{ц}} = N_e / i$  — эффективная мощность одного цилиндра двигателя;  $g_e$  — удельный расход топлива;  $n_k = n/2$  — число оборотов кулачкового вала;  $\varphi$  — продолжительность впрыска топлива по углу поворота коленчатого вала двигателя;  $p_p$  — осредненное давление впрыска единичного цикла).

Далее, поскольку  $f_c = n_c \pi d_c^2 / 4$ , то число сопловых отверстий  $n_c = 4f_c / \pi d_c^2$ .

Для двигателя Д6 ( $i = 6$ ) имеем

$$N_{e\text{ц}} = 110,3/6 = 18,4 \text{ кВт};$$

$$g_{\text{ц}} = \frac{18,4 \cdot 238}{60 \cdot 750} = 0,0973 \text{ г/ц.}$$

По данным осциллографирования процесса топливоподачи при продолжительности впрыска  $\varphi = 28^\circ$  п.кол.в. давление впрыска составило  $p_t = 44,1 \text{ МПа}$  (450 кгс/см<sup>2</sup>) [8].

При «осредняющем» переменное давление впрыска топлива коэффициенте порядка 1,75 от половины максимального давления  $p_t$  (с учетом квадратичного характера функциональной зависимости расхода топлива от давления и начала впрыска лишь при давлении выше  $p_0$ ) расчетное давление  $p_p = 1,75$ ,  $p_t/2 = 1,75 \cdot 44,1/2 = 38,6 \text{ МПа}$ ;  $f_c = 0,346 \text{ мм}^2$ .

Число сопловых отверстий для  $d_c = 0,25 \text{ мм}$  равно  $n_c = \frac{4 \cdot 0,346}{\pi \cdot 0,25^2} = 7,05$ .

Из результатов общего расчета  $d_c$  и  $n_c$  (см. табл. 3) очевидно, что только вариант семидыр-

чатого распылителя с диаметром сопел 0,25 мм и целым числом сопловых отверстий является единственно приемлемым (ничтожная дробная часть численного значения  $n_c$  в данном случае обусловлена только расчетными округлениями, да и, в принципе, за малость не может существенно нарушить «баланс» исходных параметров процесса распыливания).

Именно этот вариант распылителя — «7×0,25» — и принят для двигателя Д6 по результатам доводочных испытаний.

Таким образом, в результате выполненного расчета установлены все основные параметры ( $g_{\text{ц}}$ ,  $n_k$ ,  $p_t$ ,  $\varphi$ ,  $\varphi_t$ ,  $n_c \times d_c$ ), необходимые для проектирования системы топливоподачи конкретного дизеля.

Однако при создании новых конструкций и модернизации существующих дизелей, помимо расчета параметров впрыска, объективно необходимо и обеспечение этих параметров.

Так, в традиционных, наиболее используемых системах топливоподачи с кулачковым приводом топливного насоса высокого давления (ТНВД) реально может иметь место неполучение заданного давления и продолжительности впрыска по причине недостаточной жесткости привода.

В зависимости от крутящего момента  $M_{\text{k max}}$  и жесткости  $K_{\text{п}}$  привода ТНВД его угловая деформация [10] определяется по формуле

$$\Delta\varphi_t = \frac{M_{\text{k max}}}{K_{\text{п}}} = \frac{\pi d_{\text{п}}^2}{4K_{\text{п}}} p_t \frac{R_0 + r_0 + h_m}{\sqrt{\left[ \frac{(\varepsilon_0 R_m + r_0) \omega_{\text{k}}}{C_m} \right]^2 - 1}},$$

где  $R_0$ ,  $r_0$ ,  $h_m = h_{\text{п}}/2$ ,  $R_m = R_0 + h_{\text{п}}/2$  — геометрические размеры начальной окружности кулачка и ролика толкателя и половины полного хода плунжера;  $C_m$  — средняя скорость плунжера ТНВД в процессе впрыска топлива;  $\varepsilon_0$  — конструктивный фактор системы привода [7].

Угловая деформация  $\Delta\varphi_t$  в момент собственно впрыска топлива уменьшает угловую скорость  $\omega_{\text{k}}$  кулачкового вала:  $\omega_{\text{k}0} = \omega_{\text{k}} \frac{\varphi_t}{\varphi_t + \Delta\varphi_t}$  ( $\varphi_t$  — геометрическая продолжительность впрыска).

При этом давление впрыска убывает, а его продолжительность сравнительно с расчетным значением возрастает, что недопустимо.

Помимо сказанного, для обеспечения оптимальных показателей теплового процесса дизеля должен быть осуществлен и предварительный анализ самих параметров топливоподачи с поиском их наилучших соотношений. Необходимость поиска связана с тем, что отношение количества топлива  $g_{t_i}$ , подаваемого в камеру сгорания за период индукции топлива, к полной цикловой подаче  $g_{\sigma}$  (фактор жесткости  $\sigma$  теплового процесса) определяет максимальное давление сгорания топлива и интенсивность роста этого давления, которые влияют на надежность работы и срок службы дизелей.

Существо этого анализа заключается в оценке влияния количества теплоты, вводимой в цикл за период индукции топлива при различных комбинациях фактора  $\sigma$  на эффективные показатели двигателей.

В расчетном плане такой анализ рекомендуется осуществлять на базе математической модели теплового цикла [11], в котором теплота, расходуемая на производство только механической работы, оценивается произведением полного количества вводимой в цикл теплоты  $Q_0 = Q_t^H (1 + \alpha L_0)$  на индикаторный КПД  $\eta_i$  двигателя:

гателя:  $Q_1 = \eta_i Q_t^H$  ( $Q_t^H = 42000$  Дж/кг — теплотворная способность дизельного топлива;  $\alpha$  — коэффициент избытка воздуха при сгорании топлива;  $L_0 = 14,3$  кг/кг — теоретически необходимое количество воздуха для сгорания единицы массы дизельного топлива).

Изложенный метод, разработанный в СПбПУ, допускает экспресс-анализ эффективных показателей (мощность, экономичность) двигателей при различных комбинациях основных действующих факторов.

## Выводы

Проведенные расчеты позволяют говорить о достаточной адекватности предлагаемого метода при его применении к решению задач экспресс-оценки вариантов конструкции дизельного ДВС.

Предложенная модель расширяет возможности создаваемого аппарата экспресс-оценки параметров ДВС [11] и может быть использована как при сопровождении опытно-конструкторских работ, так и в учебном процессе, поскольку в простой и наглядной форме позволяет описать взаимосвязи между основными параметрами, характеризующими работу ДВС.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Системы управления дизельными двигателями / Пер. с нем. Первое русское издание. М.: ЗАО «КЖИ «За рулем», 2004. 480 с.
- Вырубов Д.Н., Иващенко Н.А., Ивин В.И. [и др.]**. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей: Учеб. для втузов. / Под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. М.: Машиностроение, 1983. 375 с.
- Астахов И.В. Динамика процесса впрыска топлива в быстроходных дизелях : учеб. для вузов. М.: Изд-во Бюро новой техники, 1948. 90 с.
- Бурячко В.Р., Гук А.В. Автомобильные двигатели: Рабочие циклы. Показатели и характеристики. Методы повышения эффективности энергопреобразования. СПб.: Изд-во НПИКЦ, 2005. 291 с.
- Русинов Р.В., Герасимов И.М., Добрецов Р.Ю. К вопросу организации рабочего процесса // Актуальные проблемы развития и эксплуатации двигателей в транспортном комплексе Азиатско-Тихоокеанского региона. Хабаровск, 2008. С. 83–89.
- Фомин Ю.Я.** Гидродинамический расчет топливных систем судовых дизелей. М.: Водный транспорт, 1959. 83 с.
- Русинов Р.В., Добрецов Р.Ю.** Двигатели наземных транспортно-технологических машин. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. 164 с.
- Русинов Р.В. Топливная аппаратура судовых дизелей. Л.: Судостроение, 1971. 223 с.
- Сомов В.А., Боткин П.П. Топливо для транспортных дизелей. Л.: Судпромгиз, 1964. 204 с.
- Русинов Р.В., Добрецов Р.Ю.** Влияние упругости в системе топливоподачи дизелей на параметры впрыска топлива // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического института. 2013. №1(166). С. 170–174.
- Русинов Р.В., Добрецов Р.Ю.** Математическая модель теплового цикла поршневых двигателей внутреннего сгорания // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического института. 2012. №1(142). С. 182–188.

## REFERENCES

1. Sistemy upravleniya dizelnymi dvigatelyami. Per. s nem. Pervoye russkoye izdaniye. [Control system of diesel engines]. M.: ZAO «KZhI «Za rulem», 2004. 480 s. (rus.)
2. **Vyrubov D.N., Ivashchenko N.A., Ivin V.I. [i dr.]**. Dvigateli vnutrennego sgoraniya: Teoriya porshnevykh i kombinirovannykh dvigateley: Ucheb. dlya vuzov. [Internal combustion engines]. / Pod red. A.S. Orlina, M.G. Kruglova. M.: Mashinostroyeniye, 1983. 375 s. (rus.)
3. **Astakhov I.V.** Dinamika protsessa vpryska topliva v bystrokodnykh dizelyakh: ucheb. dlya vuzov. [The dynamics of the process of fuel injection in high-speed diesel engines]. M.: Izd-vo Byuro novoy tekhniki, 1948. 90 s. (rus.)
4. **Buryachko V.R., Guk A.V.** Avtomobilnyye dvigateli: Rabochiye tsikly. Pokazateli i kharakteristiki. Metody povysheniya effektivnosti energopreobrazovaniya. [Automobile engines]. SPb.: Izd-vo NPIKTS, 2005. 291 s. (rus.)
5. **Rusinov R.V., Gerasimov I.M., Dobretsov R.Yu.** K voprosu organizatsii rabochego protsessa [For the organization of working process]. *Aktualnyye problemy razvitiya i ekspluatatsii dvigateley v transportnom komplekse Aziatko-Tikhoceanskogo regiona*. Khabarovsk, 2008. S. 83–89. (rus.)
6. **Fomin Yu.Ya.** Gidrodinamicheskiy raschet toplivnykh sistem sudovykh dizeley. [Hydrodynamic calculation of fuel systems of marine diesel engines]. M.: Izd-vo Vodnyy transport, 1959. 83 s. (rus.)
7. **Rusinov R.V., Dobretsov R.Yu.** Dvigateli nazemnykh transportno-tehnologicheskikh mashin. [Engines of land transport and technological machines]. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2014. 164 s.
8. **Rusinov R.V.** Toplivnaya apparatura sudovykh dizeley. [Fuel equipment marine diesel engines]. L.: Sudostroyeniye, 1971. 223 s.
9. **Somov V.A., Botkin P.P.** Toplivo dlya transportnykh dizeley. [Fuel for transportation diesel engines]. L.: Sudopromgiz, 1964. 204 s.
10. **Rusinov R.V., Dobretsov R.Yu.** Vliyaniye uprugosti v sisteme toplivopodachi dizeley na parametry vpryska topliva. [Influence of the operating mechanism elasticity in diesel fuel supply system on the fuel injection parameters]. *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo instituta*. 2013. №1(166). S. 170–174. (rus.)
11. Rusinov R.V., Dobretsov R.Yu. Matematicheskaya model teplovogo tsikla porshnevykh dvigateley vnutrennego sgoraniya. [A mathematical model of the thermal cycle reciprocating internal combustion engines]. *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo instituta*. 2012. №1(142). S. 182–188. (rus.)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**РУСИНОВ Ростислав Викторович** — доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: dr-idpo@yandex.ru

**ДОБРЕЦОВ Роман Юрьевич** — кандидат технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: dr-idpo@yandex.ru

## AUTHORS

**RUSINOV Rostislav V.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: dr-idpo@yandex.ru

**DOBRETSOV Roman Yu.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: dr-idpo@yandex.ru

DOI 10.5862/JEST.219.4

УДК 621.51

А.Л. Беркович, В.Г. Полищук, А.В. Назаренко

## ФОРСИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК ОПТИМАЛЬНЫМ ВПРЫСКОМ ВОДЫ В КОМПРЕССОР

A.L. Berkovich, V.G. Polischuk, A.V. Nazarenko

## BOOSTING GAS TURBINE POWER PLANTS THROUGH OPTIMAL WATER INJECTION INTO COMPRESSOR

Статья посвящена решению важнейших вопросов газотурбостроения — улучшению показателей работы ГТУ, снижению энергопотребления на привод отдельных компрессоров и повышению их производительности за счет использования впрыска воды в компрессор. Приводится краткое описание комплекса разработанных в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого программ расчета параметров работы газотурбинной установки с впрыском воды в компрессор. Представлены результаты расчетных исследований влияния впрыска на параметры газотурбинной установки ГТК-10. Полученные результаты позволяют организовать оптимальный впрыск как для испарительного охлаждения воздуха в процессе его сжатия, так и для промывки компрессора «на ходу» и снижения окислов азота в уходящих газах. Разработанная программа апробирована в широком диапазоне мощностных характеристик газотурбинных установок, на которых проводились натурные и экспериментальные исследования. Результаты расчетов имеют хорошую сходимость с результатами экспериментальных исследований.

ГАЗОТУРБИННАЯ УСТАНОВКА; КОМПРЕССОР; ВПРЫСК ВОДЫ; МОЩНОСТЬ; ЭКОНОМИЧНОСТЬ; ОПТИМИЗАЦИЯ ВПРЫСКА; ПРОМЫВКА ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА; ОКИСЛЫ АЗОТА.

The article is dedicated to one of the most important issues of the gas turbine industry — improvement of gas turbine power plant performance, reduction in power consumption for the drive of separate compressors and increase in their productivity through the use of water injection into the compressor. The article provides brief description of a set of parameter calculation programs for the gas turbine power plant performance with compressor-inlet water injection. The complex was developed at St. Petersburg State Polytechnic University. Certain results of the computational study of injection effects on GTK-10 gas turbine are presented to illustrate possibilities of the complex application. The obtained results enable organizing the best option to use injection as for the evaporative cooler during air compression as for the online compressor water wash; and also to control nitrogen oxide emission in exhaust gases. The program, developed by the authors, is tested on a wide range of power characteristics of gas turbines, which are used in full-scale and experimental studies. The calculation results showed good agreement with experimental results.

GAS TURBINE POWER PLANT; COMPRESSOR; WATER INJECTION; POWER; EFFICIENCY; OPTIMIZATION OF FUEL INJECTION; COMPRESSOR BLADES FLUSHING; NITROGEN OXIDES.

### Введение

Исследования по впрыску воды перед компрессором и в его проточную часть получили широкое распространение в мировой энергетике как один из весьма эффективных способов улучшения параметров работы газотурбинных установок (ГТУ). Положительное

воздействие впрыска обусловлено увеличением мощности и коэффициента полезного действия (КПД) ГТУ вследствие испарительного охлаждения воздуха в процессе его сжатия в компрессоре, промывки лопаток компрессора от отложений и уменьшения выбросов окислов азота  $\text{NO}_x$  с уходящими газами (см. например [1–3]).



Организация впрыска воды с максимальной его эффективностью требует разработки расчетных методов, позволяющих детально изучить процессы движения и испарения воды и их влияние на параметры компрессора и ГТУ в целом. Санкт-Петербургским политехническим университетом Петра Великого (СПбПУ) накоплен значительный опыт применения впрыска воды в компрессоры натурных ГТУ и создан экспериментально апробированный комплекс программ, позволяющий выполнять расчеты процессов движения и испарения воды, влияния их на параметры работы компрессора и ГТУ в целом.

**Цель работы** — с помощью усовершенствования разработанного авторами ранее комплекса программ для расчета термодинамических и экологических характеристик газотурбинной установки показать возможности улучшения показателей установок при организации оптимального впрыска воды на входе в компрессор и в его проточную часть.

### Расчетные исследования по программе

В статье представлены основные положения программ, разработанных в СПбПУ [5–7]. Базовой является программа расчетов процессов движения и испарения капель воды в потоке воздуха в проточной части компрессора; в основу этих расчетов положены дифференциальные уравнения для трехмерного пространства, заимствованные из [4].

Расчеты выполнялись в общепринятой цилиндрической системе координат с осью вращения вдоль оси компрессора. По ходу расчетов определялись окружные, радиальные и осевые величины скоростей капель. В процессе решения системы уравнений находились скорости, координаты в трехмерном потоке воздуха, количество воды, испарившейся с поверхности капель и смоченных поверхностей проточной части компрессора, количество капель, осевших на лопатки и корпус компрессора.

Наличие воды в проточной части компрессора является причиной появления дополнительных потерь энергии потока воздуха, связанных с разгоном капель и перемещением пленки на поверхностях лопаток и корпуса, и торможения лопаток рабочих колес ударяющимися о них каплями. Оценка величины этих потерь также была выполнена в данной программе.

Разработанный комплекс программ включает в себя также систему уравнений, позволяющих вычислить параметры компрессора при наличии воды в проточной части. Расчет производится последовательно по ступеням компрессора при постоянных частотах вращения. В расчете учитываются изменение как коэффициента расхода ступеней из-за водоиспарительного охлаждения и, как следствие, коэффициентов напора и КПД ступеней, так и дополнительные потери от влажности. В конце расчетов определяется общая степень повышения давления и КПД компрессора. При этом выражение для КПД компрессора  $h_k$  имеет вид

$$h_k = (l_{2s} - l_1) / (l_2 - l_1 + G_{\text{исп}} r) l,$$

где  $l_1$  — энталпия воздуха перед компрессором;  $l_2$  — то же за компрессором;  $l_{2s}$  — то же за компрессором при изоэнтропическом сжатии воздуха;  $G_{\text{исп}}$  — количество испарившейся воды в компрессоре, отнесенное к 1 кг воздуха;  $r$  — скрытая теплота парообразования воды.

В дополнение к описанным выше программам были разработаны следующие:

программа для вычисления траектории движения струи воды в потоке газа, ее длины и диаметров капель, образующихся после распада струи. Программа необходима для проектирования струйного впрыска воды в проточную часть компрессора;

программы для оценки степени эрозии и вибрации лопаток компрессора, а также возможности задевания ими корпуса компрессора;

программа для определения параметров работы газотурбинного цикла с впрыском воды в компрессор при заданной температуре газов перед турбиной.

Расчеты по указанным программам были выполнены для ряда ГТУ различного типа [8]. В статье представлены основные результаты расчета параметров работы установки ГТК-10–4, широко применяемой на магистральных газопроводах, с помощью усовершенствованного разработанного авторами ранее комплекса программ расчетов термодинамических и экологических характеристик ГТУ. Компрессор установки ГТК-10–4 состоит из 10 ступеней. Расход воздуха через компрессор — 86 кг/с; степень повышения давления — 4,6; частота вращения — 5200 оборотов в минуту. Установка снабжена регенератором.



Расчеты оптимального впрыска воды в компрессор выполнялись для следующих случаев:

для различных количеств воды  $G_{\text{впр}}$ ;

перед различными ступенями  $N_{\text{ст}}$  компрессора;

для капель различного размера, в том числе и для очень малых (менее 1 мкм), образующихся при распыле перегретой воды;

при разной относительной высоте смоченной части лопаток в месте ввода воды —  $H = 0,5\text{--}0,9$ .

В качестве возможных мест ввода воды рассматривались впрыски перед лопаточным аппаратом компрессора и в направляющие аппараты 3 и 7 ступеней. Эти места впрыска конструктивно доступны для установки устройств впрыска. Величина  $H$  в месте впрыска является отношением смоченной части высоты лопаток, отсчитываемой от их корня, к полной высоте лопаток. По ходу движения влаги величина  $H$  вычисляется с учетом радиального смещения капель в нижней и верхней смоченных частях лопаток.

Расчеты производились на кафедре турбогенераторов и авиационных двигателей (ТГиАД) СПбПУ. Результаты расчетов подробно приведены в [9]. Основные результаты расчетов следующие.

До момента сепарации капель от верхней части смоченной высоты лопаток на корпус компрессора величина  $H$  остается неизменной, так как траектории указанных капель практически одинаковы и смешены по высоте лопаток. После указанной сепарации  $H$  уменьшается, потому что верхняя граница смоченной части лопаток ограничена корпусом компрессора, а нижняя — смещается вверх из-за движения капель в радиальном направлении (рис. 1).

В компрессоре установки ГТК-10 испарение воды происходит преимущественно с поверхности лопаточных аппаратов. Влияние дисперсности впрыскиваемой воды согласно результатам расчетов практически отсутствует. Это объясняется интенсивной сепарацией капель всех размеров на лопатки компрессора. Далее по потоку воздуха их размер и поведение определяется только процессами дробления стекающих с лопаток пленок и срывом капель с поверхности лопаток, которые одинаковы для всех сепарировавшихся капель.

Количество испарившейся воды в ступенях компрессора установки ГТК-10 при впрыске в различные ступени разного количества воды показано на рис. 2. Максимальное количество испарившейся воды наблюдается в случае впрыска в третью ступень компрессора. Меньшее значение  $G_{\text{исп}}$  в случае впрыска перед лопатками компрессора связано с плохой испаряемостью из-за невысокой температуры воздуха и интенсивной сепарацией воды на корпус компрессора. Впрыскиваемая же в седьмую ступень вода по сравнению с впрыском в третью попадает в зону более высоких температур воздуха и подвержена меньшей сепарации на корпус компрессора. Однако из-за меньшего количества ступеней, оставшихся до конца проточной части, окончательная величина  $G_{\text{исп}}$  остается примерно той же.

Впрыск воды в проточную часть компрессора вызывает существенное снижение температуры воздуха за ним — 23–24 °C на каждый процент впрыскиваемой воды. Вместе с тем такое снижение температуры увеличивает температурный напор в регенераторе, что существенно интенсифицирует процесс теплообмена в нем. В результате более глубоко утилизируется тепло уходящих газов. Температура же воздуха за регенератором вследствие этого снижается в значительно меньшей степени, чем за компрессором — на 13–15 °C при  $G_{\text{впр}} = 1\%$ . Это обстоятельство важно для увеличения КПД установки.

Результаты расчетов по количеству испарившейся воды, по дополнительным потерям от влажности и по другим параметрам воздуха использовались для расчета параметров работы отдельных ступеней. В этом расчете находились изменения коэффициентов расхода, напора и КПД ступеней, вызываемые впрыском воды. Затем определялись параметры компрессора в целом. В результате впрыска воды изодромы компрессора смешались в сторону более высоких степеней повышения давления и расходов.

Впрыск воды в компрессор вследствие испарительного охлаждения воздуха в процессе его сжатия заметно повышает КПД компрессора, а соответственно, КПД и мощность установки. На рис. 3 и 4 показаны относительные изменения КПД и мощности установки в результате впрыска воды в различные места проточной ча-

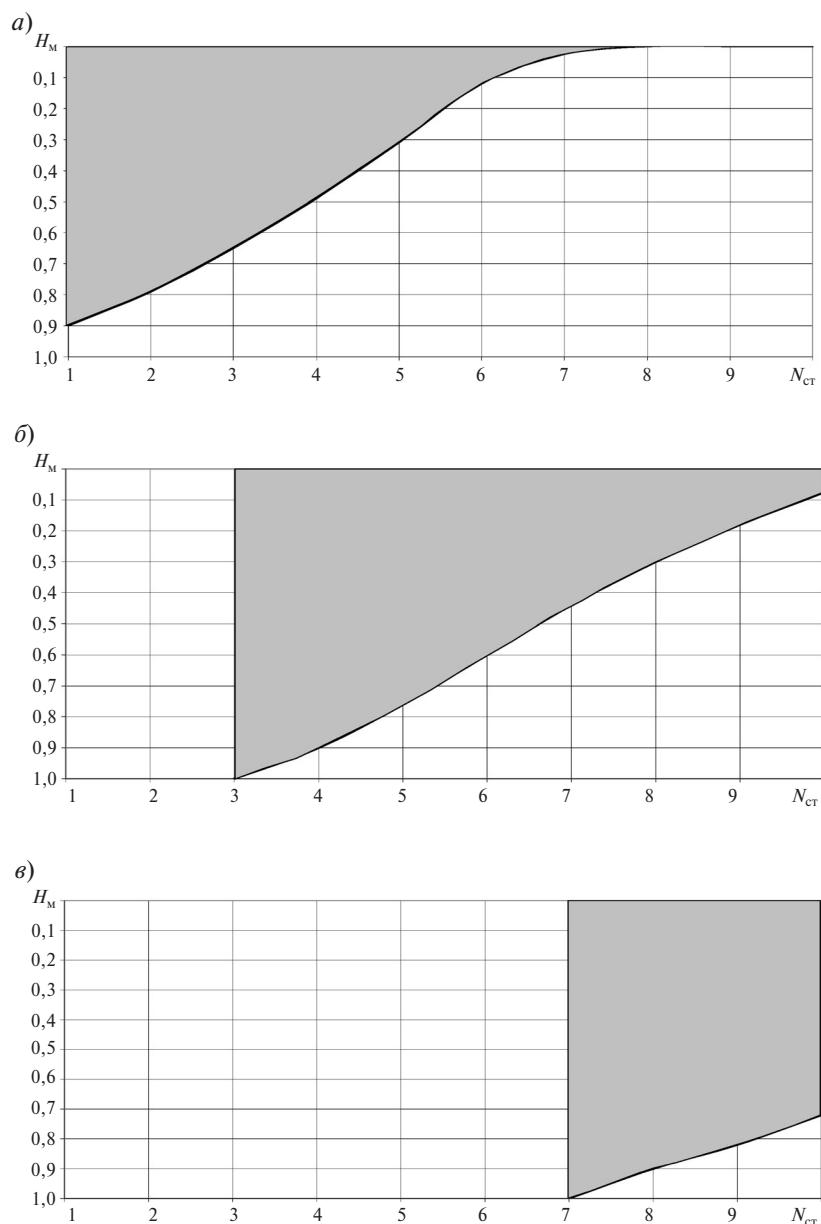


Рис. 1. Распределение относительной величины смачиваемой части лопаток  $H_m$  (заштрихованная область) по ступеням  $N_{ct}$  компрессора установки ГТК-10: а — впрыск перед компрессором; б — впрыск в 3 ступень; в — впрыск в 7 ступень

сти компрессора при температуре наружного воздуха  $T_{нв} = 15$  °C. Максимальная эффективность впрыска воды перед входным направляющим аппаратом (ВНА) компрессора имеет место при  $G_{впр} = 0,2\text{--}0,3\%$ . Здесь относительный прирост КПД установки —  $dh_e = 1,65\%$ , полезной мощности —  $hN_e = 6,3\%$ . При впрыске воды в направляющий аппарат 3 ступени (НА-3) прирост КПД установки достигает 1,2% относитель-

ного, что происходит при  $G_{впр} = 0,4\%$ . Относительный прирост полезной мощности остается примерно тем же. Если впрыск воды осуществляется в направляющий аппарат 7 ступени (НА-5), то прирост КПД установки достигает 0,4% относительных при  $G_{впр} = 0,6\%$ , прирост мощности — 4,2%.

В установках, параметры работы которых меньше номинальных (например, из-за трещин

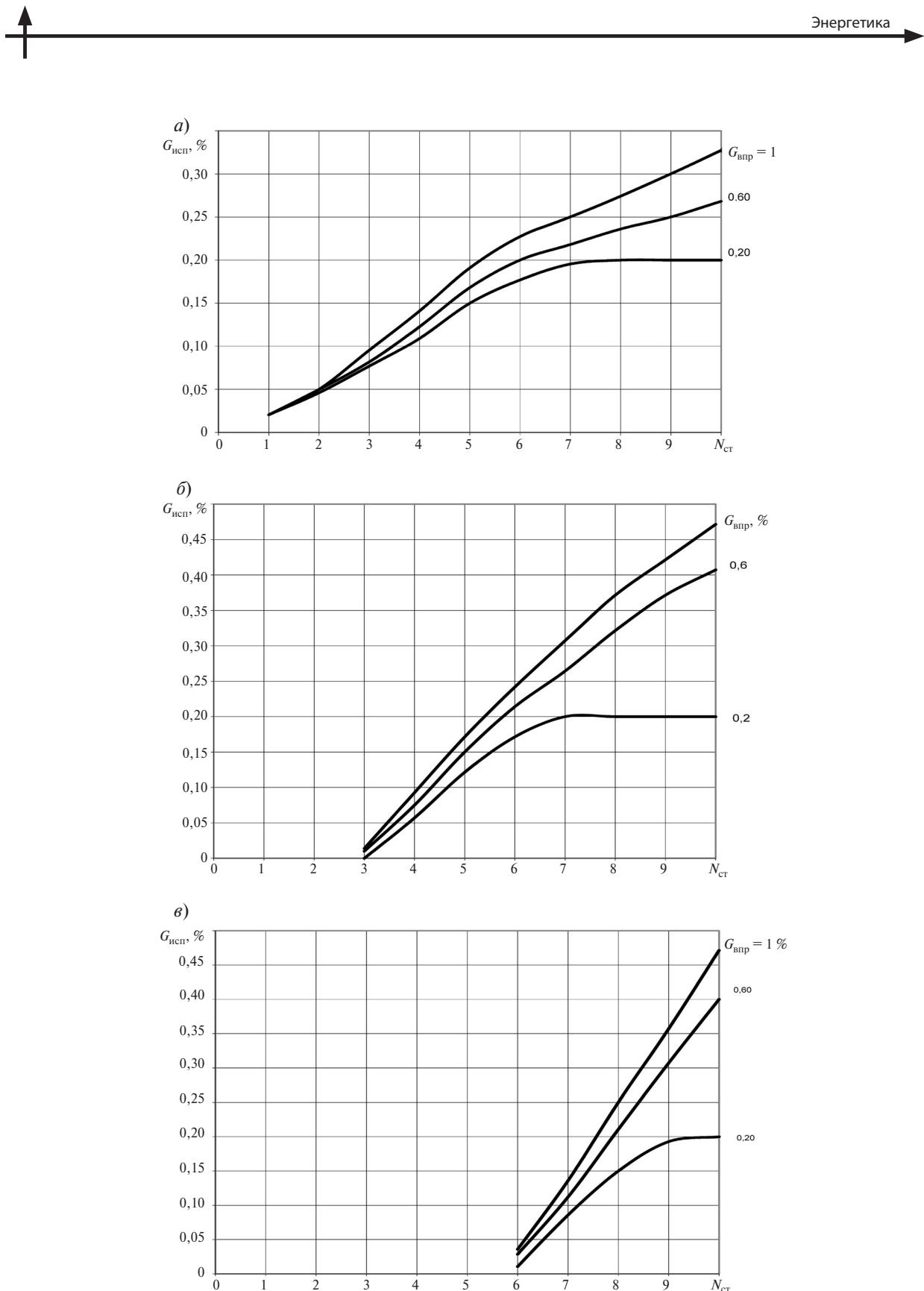


Рис. 2. Распределение количества испарившейся воды  $G_{\text{исп}}$  по ступеням  $N_{\text{ст}}$  при впрыске различного количества воды  $G_{\text{вп}}$  в первую (а), в третью (б) и в седьмую (в) ступени компрессора установки ГТК-10

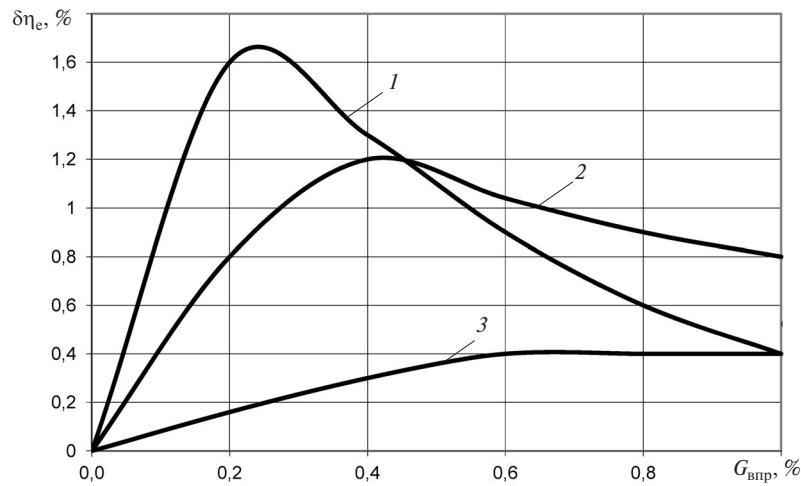


Рис. 3. Зависимости относительного изменения эффективного КПД установки ГТК-10-4 от количества впрыскиваемой воды в разные места проточной части компрессора: 1 — впрыск перед ВНА; 2 — впрыск в НА третьей ступени; 3 — впрыск в НА седьмой ступени

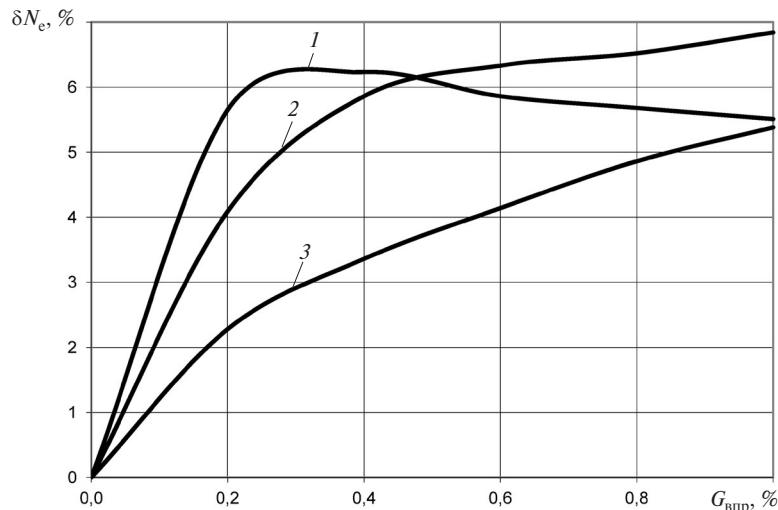


Рис. 4. Зависимость относительного изменения полезной мощности установки ГТК-10-4 от количества впрыскиваемой воды в разные места проточной части компрессора: 1 — впрыск перед ВНА; 2 — впрыск в НА третьей ступени; 3 — впрыск в НА седьмой ступени

в регенераторе, высоких температур наружного воздуха и др.), следует ожидать большего положительного воздействия впрыска. Приращения мощности и КПД в этом случае могут быть в 1,5–2 раза выше указанных.

В случае впрыска в промежуточные ступени более высокая плотность воздуха обусловливает снижение степени сепарации капель на корпус

компрессора и меньший размер капель, образующихся после дробления пленки, стекающей с выходных кромок лопаток. По этим причинам интенсивность испарения воды в проточной части увеличивается. Не успевшая испариться вода в виде пленки на корпусе компрессора вытекает из лопаточного аппарата и испаряется по пути воздуха в регенератор.



## Выводы

Программы расчетов, разработанные в СПбПУ, позволяют дать рекомендации по оптимальному впрыску воды в проточную часть компрессора различной конструкции. Оптимизация впрыска имеет следующие цели:

получить максимально возможное приращение мощности и коэффициента полезного действия установки. Так, например, в установке ГТК-10 одновременный впрыск оптимального количества воды перед компрессором, в 3 и 7 ступени компрессора увеличивает КПД установки на 3,2 %, мощность — на 16,8 %. Общее количество впрыскиваемой воды при этом составляет 1,2 % от расхода воздуха;

достичь более полной промывки поверхностей лопаток компрессора «на ходу», без останова работы установки. В данном случае возможна промывка всех ступеней компрессора:

правильно выбрать устройства для ввода воды в различные ступени компрессора. Рекомендуется впрыск воды осуществлять через отверстия в корпусе компрессора, ориентированные способом, описанным в работе [8];

уменьшить опасность эрозии и вибрацию лопаток компрессора, а также задевание рабочими лопатками корпуса компрессора;

оценить снижение коэффициента запаса по помпажу компрессора, происходящего при впрыске воды;

определить степень уменьшения содержания окислов азота в уходящих газах ГТУ с указанным впрыском воды;

на основе анализа работоспособности различных ГТУ с впрыском воды в компрессор выявить требования к качеству впрыскиваемой воды и представить необходимую для этого химическую водоподготовку [9].

Изложенные в работе [9] материалы показывают, как с помощью разработанного комплекса программ может быть существенно повышена эффективность впрыска воды в компрессор ГТУ.

Подобные расчетные исследования должны проводиться индивидуально для каждого типа ГТУ и условий ее работы. Из известных публикаций о подобных исследованиях можно указать работу [10].

К настоящему времени комплекс программ расчета, разработанных на кафедре ТГиАД, прошел дальнейшую оптимизацию. Это позволяет более точно выбрать места установки устройств впрыска воды в проточную часть компрессора, а также уточнить расходы впрыскиваемой через них воды. Выполненная оптимизация впрыска воды в компрессор позволяет увеличить мощность и КПД ГТУ не только за счет повышения интенсивности испарительного охлаждения воздуха в процессе его сжатия в компрессоре, но и вследствие промывки отложений большой площади лопаток компрессора во время его работы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chaker Mustapha, Meher-Homji Cyrus B., Mee Thomas (III). Inlet fogging of gas turbine engines. Pt I. Fog droplet thermodynamics, heat transfer, and practical considerations // Trans. ASME. J. Eng. Gas Turbines and Power. 2004. Vol. 126, №3. P. 545–558.
2. Chaker Mustapha, Meher-Homji Cyrus B., Mee Thomas (III). Inlet fogging of gas turbine engines. Pt II. Fog droplet sizing analysis, nozzle types, measurement, and testing // Trans. ASME. J. Eng. Gas Turbines and Power. 2004. Vol. 126, №3, P. 559–570.
3. Chaker Mustapha, Meher-Homji Cyrus B., Mee Thomas (III). Inlet fogging of gas turbine engines. Pt III. Fog behavior in inlet ducts, computational fluid dynamics analysis and wind tunnel experiments // Trans. ASME. J. Eng. Gas Turbines and Power. 2004. Vol. 126, №3, P. 571–580.
4. Раушенбах Б.В., Белый С.А., Беспалов И.В., Бородачев В.Я., Волынский М.С., Прудников А.Г. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей. М.: Машиностроение, 1964. С. 526.
5. Беркович А.Л., Розеноэр Е.Е. Форсировка ГТУ впрыском воды в компрессор, Обзор / М.: ЦНИИ-ТЭИСТАЖМАШ // Энергетическое машиностроение. Сер. 3. 1989. Вып. 4. С. 36.
6. Беркович А.Л., Розеноэр Е.Е. Расчет параметров осевого компрессора с впрыском воды в проточную часть // Изв. вуз. Энергетика. 1990. № 8. С. 107–110.
7. Беркович А.Л. Параметры осевого компрессора с вводом воды в проточную часть // Изв. вузов. Энергетика. 1995. № 1. С. 67–70.
8. Беркович А.Л., Полищук В.Г., Канашенко Е.М. Впрыск воды в компрессор газотурбинной установки ГТК-10-4 // Компрессорная техника и пневматика. 2007. №5. С. 34–37.
9. Беркович А.Л., Полищук В.Г., Рассохин В.А.

Впрыск воды в компрессор ГТУ., Изд-во СПбГПУ, 2010. 155 с.

10. Тригорьянц Р.Р., Залкинд В.И., Зейгарник Ю.А. [и др.]. Особенности поведения жидкой

фазы в высокооборотных компрессорах в конверсионных газотурбинных установок и их влияние на характеристики и эффективность «влажного» сжатия // Теплоэнергетика. 2007. №4. С. 55–62.

## REFERENCES

1. Chaker Mustapha, Meher-Homji Cyrus B., Mee Thomas (III). Inlet fogging of gas turbine engines. Pt I. Fog droplet thermodynamics, heat transfer, and practical considerations. *Trans. ASME. J. Eng. Gas Turbines and Power.* 2004. Vol. 126, №3. P. 545–558.
2. Chaker Mustapha, Meher-Homji Cyrus B., Mee Thomas (III). Inlet fogging of gas turbine engines. Pt II. Fog droplet sizing analysis, nozzle types, measurement, and testing. *Trans. ASME. J. Eng. Gas Turbines and Power.* 2004. Vol. 126, №3. P. 559–570.
3. Chaker Mustapha, Meher-Homji Cyrus B., Mee Thomas (III). Inlet fogging of gas turbine engines. Pt III. Fog behavior in inlet ducts, computational fluid dynamics analysis and wind tunnel experiments. *Trans. ASME. J. Eng. Gas Turbines and Power.* 2004. Vol. 126, №3. P. 571–580.
4. Raushenbakh B.V., Belyy S. A., Bespalov I.V., Borodachev V.Ya., Volynskiy M.S., Prudnikov A.G. Fizicheskiye osnovy rabochego protsessa v kamerakh sgoraniya vozдушно-reaktivnykh dvigateley [Physical fundamentals of working process in the combustion chambers of jet engines]. M.: Mashinostroyeniye, 1964. S. 526. (rus.)
5. Berkovich A.L., Rozenoyer Ye.Ye. Forsirovka GTU vpriskom vody v kompressor, Obzor. [Forcing GTU water injection into the compressor, Overview] TsNIITEITY-aZhMASh. *Energeticheskoye mashinostroyeniye.* Seriya 3. M., 1989. Vyp. 4. S. 36.
6. Berkovich A.L., Rozenoyer Ye.Ye. Raschet parametrov osevogo kompressora s vpriskom vody v protochnuyu chast [Dimensioning axial compressor with water injection into the flow part. Math]. *Izv. vuzov, Energetika,* 1990. № 8. S. 107–110. (rus.)
7. Berkovich A.L. Parametry osevogo kompressora s vvodom vody v protochnuyu chast [The parameters of the axial compressor with the introduction of water into the flow part], *Izv. vuzov, Energetika.* 1995. № 1. S. 67–70. (rus.)
8. Berkovich A.L., Polishchuk V.G., Kanashenko Ye.M. Vprisk vody v kompressor gazoturbinnoy ustanovki GTK-10–4 [Water injection into the compressor gas turbine unit SCC-10–4]. *Kompressornaya tekhnika i pневматика.* 2007. №5. S. 34–37/ (rus.)
9. Berkovich A.L., Polishchuk V.G., Rassokhin V.A. Vprisk vody v kompressor GTU [water injection into the gas turbine compressor]. Izd-vo Sankt-Peterburgskogo Gosudarstvennogo Politekhnicheskogo Universiteta, 2010. S. 155. (rus.)
10. Grigoryants R.R., Zalkind V.I., Zeygarnik Yu.A. [и др.]. Osobennosti povedeniya zhidkoy fazy v vysokooborotnykh kompressorakh v konversionnykh gazoturbinnikh ustanovok i ikh vliyanie na kharakteristiki i effektivnost «vlazhnogo» szhatiya [Peculiarities of the behavior of the liquid phase in the high-speed compressors in conversion gas turbines and their impact on performance and efficiency, «wet» compression]. *Teploenergetika.* 2007. №4. S. 55–62. (rus.)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**БЕРКОВИЧ Аркадий Львович** — кандидат технических наук ведущий инженер Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: arkadij.berkovitch@yandex.ru

**ПОЛИЩУК Владимир Григорьевич** — кандидат технических наук доцент заведующий лабораторией Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: turbo@pef.spbstu.ru

**НАЗАРЕНКО Андрей Владиславович** — кандидат технических наук, технический директор ООО КОНСТА-XXI. Москва, улица Зои и Александра Космодемьянских д. 10. E-mail: turbo@pef.spbstu.ru

## AUTHORS

**BERKOVICH Arkadii L.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: arkadij.berkovitch@yandex.ru

**POLISCHUK Vladimir G.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: turbo@pef.spbstu.ru

**NAZARENKO Andrei V.** — OOO KONSTA-XXI. Moskva, ulica Zoi i Aleksandra Kosmodemjanskikh d. 10. E-mail: turbo@pef.spbstu.ru

DOI 10.5862/JEST.219.5

УДК 699.887.2

Ф.Х. Халилов, Э.Р. Котляров

## ОТКАЗ ОТ ТРОСОВЫХ МОЛНИЕОТВОДОВ И ТРУБЧАТЫХ РАЗРЯДНИКОВ НА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ 35–150 КВ В РАЙОНАХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

F.Kh.Khalilov, Ed.R. Kotlyarov

### AVOIDING THE USE OF PROTECTION WIRE AND TUBULAR RODS OF 35–150 KV FOR LIGHTNING PROTECTION OF OVERHEAD POWER LINES AND SUBSTATIONS IN CONDITIONS OF FAR NORTH

Статья посвящена проблеме молниезащиты воздушных линий (ВЛ) и подстанций (ПС) 35–150 кВ, находящихся в районах Крайнего Севера Российской Федерации. В статье говорится, что не все решения ПУЭ отвечают требованиям, предъявляемым к надежности молниезащиты ВЛ и ПС. Их молниезащиту в районах Крайнего Севера можно организовать и без молниезащитных тросов и трубчатых разрядников, рекомендуемых ПУЭ. Предлагаются: альтернативные способы молниезащиты: установка на ВЛ подвесных нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН) и ОПН последнего поколения на подстанциях; каскадная схема молниезащиты; полимерные изоляторы-разрядники. Кроме того, показано, что недоиспользуются коммутационные ресурсы выключателей, которые являются резервом по улучшению молниезащиты.

МОЛНИЕЗАЩИТА; КРАЙНИЙ СЕВЕР; НАДЕЖНОСТЬ; ВОЗДУШНЫЕ ЛИНИИ; ПОДСТАНЦИИ.

This work considers the problem of lightning protection of 35–150 kV overhead power lines and substations in conditions of the Far North of the Russian Federation. The alternative methods of organizing lightning protection are described in this paper, since conclusions, suggested by the Electrical Installation Code, are not able to provide the required level of lightning protection. Recent research shows that the lightning protection of overhead power lines and substations in conditions of the Far North can be arranged without protection wire and tubular rods, which is recommended by EIC. As an alternative the authors offer the following measures to improve the level of protection for these overhead power lines and substations: equipping the overhead power lines with suspended surge protector devices (SPD), launching the last generation SPD at substations, the cascade scheme of lightning protection, using smart polymer arresters. In addition, it's mentioned that the switching resource of the HV circuit breaker is not fully utilized, whereas it's a reserve to improve lightning protection.

LIGHTNING PROTECTION; ELECTRICAL INSTALLATION CODE; OVERHEAD POWER LINES; SURGE PROTECTOR DEVICES; SMART ARRESTERS.

#### Введение

Традиционные мероприятия по молниезащите воздушных линий (ВЛ) 35–150 кВ по ПУЭ [1] предусматривают следующие мероприятия:

1) сооружение многокилометровых молниезащитных тросов с углами защиты не более 25–35°;

2) обеспечение необходимой импульсной электрической прочности линейной изоляции;  
3) обеспечение импульсного сопротивления опор не более  $R_{зи} = 10–20$  Ом в районах с удельным сопротивлением грунтов  $\rho_g$  не более 500 Ом·м и  $R_{зр} = (10–20)\sqrt{\rho_g / 500}$  — в районах с  $\rho_g$  более 500 Ом·м.

#### 4) применение автоматического повторного включения (АПВ).

Кроме того, для обеспечения приемлемой величины показателя надежности подстанций по концам ВЛ устанавливают трубчатые разрядники (РТ).

Однако перечисленные молниезащитные мероприятия (особенно при невыполнении требования п. 3) не дают возможность обеспечить высокий показатель надежности молниезащиты ВЛ и подстанций 35–150 кВ в условиях Крайнего Севера РФ, где  $\rho_r$  достигает величин более 15–20 кОм·м.

#### Цели данной работы:

выделить особенности молниезащиты подстанций в районах Крайнего Севера;

рассмотреть способы нетрадиционной молниезащиты подстанций в районах Крайнего Севера, которые могли бы обеспечить соответствующий уровень надежности.

При расчетах показателя молниезащиты ВЛ и ПС в условиях Крайнего Севера не учитывается ряд обстоятельств:

1. ПУЭ не четко устанавливает слабую грозовую деятельность. Например, при расчетах число грозовых часов в Ленинградской области принимается равным  $T_g = 30–50$  часов, а в Мурманской области оно равно  $T_g = 5–10$  часов.

2. В условиях Крайнего Севера, как отмечено,  $\rho_r > (15–20)$  кОм·м, поэтому импульсное сопротивление опор доходит до сотен Ом, а подстанций — до нескольких Ом. По этой причине для снижения сопротивления контура заземления подстанции применяют «выносные заземлители» через длинные шлейфы, в удаленном конце которых имеются «местные» контуры заземления, находящиеся в болотах, реках, морской воде и т. д. [2–4].

3. В упомянутых районах сооружение молниезащитных тросов на ВЛ 35–150 кВ приводит больше к негативным последствиям, чем к позитивным. Требование ПУЭ к углам защиты молниезащитных тросов ( $\alpha \leq 25–35^\circ$ ), действительно, в значительной мере снижают вероятность прорывов молнии на фазные провода. Вместе с тем наличие молниезащитных тросов приводит к значительному росту вероятности обратных перекрытий как при прямых ударах молнии на тросы, так и при ударах ее в опоры. Это связано с большой величиной импульсного

сопротивления заземления опор. Кроме того, молниезащитные тросы при гололеде могут обрываться и упасть; ликвидация последствий в этом случае потребует привлечения технических и организационных резервов.

4. Молниезащитные тросы обычно рассчитываются с учетом воздействия на них полевых загрязнений и атмосферы; их гарантированный срок эксплуатации без повреждения равен 25–30 лет. Однако в районах с агрессивной атмосферой, например вблизи металлургических заводов и комбинатов, цементных заводов, шахт по добыче угля и железной руды и т. п., тросы подвергаются электрохимической коррозии, и в среднем они без повреждений работают 5–10 лет. Поэтому в таких районах тросы требуют периодической замены, что ведет к определенным капитальным затратам и эксплуатационным неудобствам. По этой причине во многих случаях ВЛ строят без молниезащитных тросов.

5. ВЛ 35–150 кВ в настоящее время являются элементами распределительных сетей, поэтому их длина значительно меньше 20 км. Так, например, из 54 обследованных ВЛ 35 кВ Кольского филиала МРСК Северо-Запада только 7 ВЛ имеют длину более 20 км. В сетях 110 кВ из 67 ВЛ только у 11 протяженность больше 20 км, а в сетях 150 кВ — у 14 из 39 обследованных ВЛ. Таким образом, можно утверждать, что вероятность прямых ударов молнии на таких ВЛ мала и поэтому отказ от молниезащитных тросов возможен.

При малых длинах ВЛ доля тросовых участков на подходах к концевым устройствам — подстанциям — составляет 30 % и более. При этом, если позволяет молниезащита подстанций, то можно вообще отказаться от молниезащитных тросов.

6. При организации молниезащиты ВЛ 35–150 кВ в условиях Крайнего Севера не учитывается коммутационный ресурс выключателей. Во-первых, ВЛ имеют самовосстанавливающуюся изоляцию. Поэтому после молниевого перекрытия изоляции ВЛ за время бестоковой паузы АПВ она восстанавливается, и ВЛ включается в нормальную работу. Во-вторых, между двумя калремонтами выключателей допускается несколько отключений ( $n_o$ ) полного тока КЗ ( $I_o$  — ток КЗ на шинах). Что же касается отключений при перекрытиях вдали от подстанций, разуме-



ется, фактический ток КЗ —  $I_{K3\phi}$  — будет меньше, чем  $I_0$ , т. е. выключатель может фактически отключить ток  $I_{K3\phi} n_\phi$  раз ( $n_\phi > n_0$ ). Это обстоятельство должно быть учтено при организации молниезащиты ВЛ.

7. На многих ВЛ 35–150 кВ Крайнего Севера установлены морально и технически устаревшие защитные аппараты — трубчатые разрядники (РТ). Эксплуатация этих защитных аппаратов связана с большими расходами и неудобствами, а именно:

после каждого грозового сезона РТ следует демонтировать для обследования в лабораторных условиях и нанести лак на трубку, после чего снова подключить к ВЛ;

после нескольких срабатываний внутренний диаметр трубки из винипласта или фибробакелита РТ увеличивается, вследствие чего изменяется верхняя и нижняя величины тока срабатывания. Поэтому приходится переносить РТ на другие линии или вовсе утилизировать.

По перечисленным причинам эксплуатационный персонал прибегает к некоторым нетрадиционным способам молниезащиты ВЛ, которые приводят к пересмотру молниезащиты подстанций.

Возможными областями применения нетрадиционной молниезащиты ВЛ 35–150 кВ в условиях Крайнего Севера, например в Мурманской области, могут быть:

высокие переходные пролеты через реки, заливы, ущелья и другие преграды по трассе ВЛ;

участки ВЛ в гололедоопасных районах, где применение молниезащитных тросов нецелесообразно;

участки ВЛ с локально повышенной молниепоражаемостью;

двухцепные ВЛ с вертикальной подвеской проводов;

в некоторых районах со сверхвысоким значением удельного объемного сопротивления грунтов.

Главный нетрадиционный способ молниезащиты ВЛ — это применение нелинейных ограничителей перенапряжения (ОПН). Максимальный эффект может быть обеспечен путем установки ОПН на каждой опоре и на каждой фазе ВЛ. Однако из-за достаточно высокой стоимости названных защитных аппаратов такой способ экономически нецелесообразен.

Ряд технико-экономических преимуществ могут дать длинноискровые разрядники (РДИ), которые в определенных случаях позволяют отказаться от молниезащитных тросов и РТ, обеспечивая при этом требуемую величину показателя молниезащиты ВЛ. Это достигается за счет значительного снижения вероятности перехода импульсного перекрытия изоляции в устойчивую дугу тока короткого замыкания. Однако эти защитные аппараты преимущественно освоены для линий 6 и 10 кВ, а для линий 35–150 кВ они находятся на аprobационной стадии.

Наиболее перспективным видом нетрадиционных способов организации молниезащиты ВЛ является применение мультикамерных изоляторов-разрядников (ИРМК) [5–9]. Они могут быть изготовлены в фарфоровом и полимерном вариантах. Наиболее технологичным и экономичным считается вариант полимерного мультикамерного изолятора-разрядника (ПИРМК).

Далее в статье рассмотрим результаты сравнительного анализа упомянутых альтернативных способов молниезащиты ВЛ (подстанций) 35–150 кВ.

В статье под термином «альтернативные методы» молниезащиты понимается такой метод или способ, при котором показатель надежности молниезащиты ВЛ (подстанций) будет не меньше, чем такой показатель по способу или методу, рекомендуемому ПУЭ, и имеющий место в настоящее время.

Как отмечалось выше, нельзя рассматривать молниезащиту ВЛ и подстанций раздельно, обе эти задачи неразрывно связаны между собой и служат для решения одной и той же проблемы передачи и распределения электроэнергии.

Основными альтернативными методами молниезащиты сетей 35–150 кВ являются:

применение каскадных схем молниезащиты [3];

использование мультикамерных изоляторов-разрядников [5–9];

использование благоприятного влияния большого числа ВЛ, отходящих от подстанции;

использование коммутационной способности выключателей;

установка ОПН на ВЛ на опасных участках.

Каскадный принцип молниезащиты предусматривает включение нескольких защитных аппаратов «по ходу молниевых волн». Это обеспечи-

вает последовательное ограничение перенапряжений и дает возможность отказаться от тросов на подходах к подстанциям или существенно сократить их длину, снизить требования к заземлению опор вблизи подстанций. Такой способ особенно важен для районов страны, где большое удельное сопротивление грунтов.

В последние годы в ОАО НПО «Стример» разработан и внедрен в эксплуатацию ряд *длинноискровых защитных аппаратов* от 6 до 220 кВ для улучшения молниезащиты ВЛ, а следовательно, подстанций. Они бывают разных типов: шлейфного типа (РДИШ), модульного типа (РДИМК), изоляторы-разрядники мультикамерные типа ИРМК. Новейшие из последних — полимерные изоляторы-разрядники мультикамерные типа ПИРМК [5–9]. Эти защитные аппараты не только обеспечивают молниезащиту ВЛ, но и улучшают молниезащиту подстанций в несколько раз.

В северных сетях есть ряд подстанций 35–150 кВ, от которых отходит большое количество ВЛ. В таких случаях одним из альтернативных способов отказа от тросов и РТ является использование *благоприятного влияния отходящих ВЛ в числе более четырех*.

Предположим, что по одной из  $n$  линий на подстанцию приходит молниевая волна. При этом остальные ( $n - 1$ ) ВЛ представляют собой эквивалентное волновое сопротивление  $Z_3 = \frac{Z_b}{n-1}$ , где  $Z_3$  — волновое сопротивление одной фазы одной ВЛ. Так, например, если  $n = 6$ ,  $Z_b = 400$  Ом, то  $Z_3 = \frac{400}{6-1} = 80$  Ом. Такое эквивалентное сопротивление подстанций в первом приближении равно динамическому сопротивлению вентильных разрядников или нелинейных ограничителей перенапряжений. То есть большое число ВЛ, отходящих с подстанции, эквивалентно дополнительному защитному аппарату на подстанции. По этой причине длина опасной зоны молниезащитных тросов получается порядка десятков метров, которыми можно пренебречь и отказаться от молниезащитных тросов.

Как известно из [1, 4], допустимое число молниевых отключений ВЛ и выбор молниезащиты по критерию коммутационного ресурса линейных выключателей определяется по формуле

$$N_{\text{доп г}} = N_0 \beta_r \frac{1}{T_{\text{пр}}(2 - K_{\text{АПВ}})} K_B,$$

где  $N_0$  — допустимое без ремонта выключателя количество отключений номинального тока короткого замыкания;  $T_{\text{пр}}$  — средний период планового ремонта выключателей, год;  $\beta_r$  — отношение числа молниевых отключений к общему числу автоматических отключений;  $K_{\text{АПВ}}$  — коэффициент успешности АПВ;  $K_B$  — коэффициент, учитывающий условия эксплуатации выключателей, длину ВЛ, значение тока КЗ в ближайшей к шинам подстанции точке ВЛ и изменение коммутационного ресурса выключателей при удалении точки КЗ от шин ПС.

При отсутствии уточняющих местных инструкций значения  $T_{\text{пр}}$  в соответствии с ПТЭ для масляных, воздушных и элегазовых выключателей принимаются из диапазонов соответственно 6–8, 4–6 и 12 лет.

По опыту эксплуатации сетей 35–150 кВ в РФ для  $\beta_r$  получены средние величины  $\beta_r = 0,09–0,1$ . Коэффициент успешности АПВ ( $K_{\text{АПВ}}$ ) для сетей 35–150 кВ равен  $K_{\text{АПВ}} = 0,7–0,75$ .

Ресурс, расходуемый при одной коммутации из  $N_0$ , равен  $1/N_0$ . В общем случае при точке КЗ, удаленной от шин ПС на расстояние  $l$ , выключатель коммутирует ток  $I_l$ , равный

$$I_l = \frac{U_{\text{экс}}}{\sqrt{3}X_{\text{КЗ}}} = \frac{U_{\text{экс}}}{\sqrt{3}(X_c + X_{\text{л}}l)} < I_0,$$

где  $X_c$  — реактивное сопротивление прямой последовательности системы относительно шин подстанции, Ом. Оно определяется по величине тока КЗ при среднеэксплуатационном рабочем напряжении  $U_{\text{экс}}$  в ближайшей к шинам ПС точке ВЛ со стороны линейного вывода выключателя:

$$X_c = \frac{U_{\text{экс}}}{\sqrt{3}I_{\text{КЗ шин}}};$$

$X_{\text{л}}$  — удельное индуктивное сопротивление ВЛ по прямой последовательности, Ом/км.

Комплекс молниезащиты ВЛ 35–150 кВ, обеспечивающий допустимое число отключений по коммутационному ресурсу выключателя, для ВЛ длиной  $L$ , проходящей в районе с интенсивностью грозовой деятельности  $T_q$ , сводится к определению предельно допустимого значения импульсного сопротивления  $R_{\text{зи}}$ . Это связано



с тем, что в большинстве случаев конструкция опоры и молниезащитный трос выбираются по другим соображениям.

Значения  $R_{zi}$  определяются по справочным данным после перехода от абсолютного допустимого значения молниевых отключений  $N_{\text{доп}}$  к предельному значению удельного числа молниевых отключений  $n_{\text{г пред}}$  на 100 км длины тра- сы ВЛ и 100 грозовых часов по формуле

$$n_{\text{г пред}} = 10^3 \frac{N_{\text{доп}}}{T_q l}.$$

В расчетах варьировались следующие фак- торы:

- а) тип выключателя (то есть,  $I_0$ ,  $I_{\text{пр}}$  и  $N_0$ );
- б) длина ВЛ (5, 10, 20, 30, 50 и 100 км);
- в) ток КЗ ( $I_{\text{КЗ}} = I_0$ ;  $I_{\text{КЗ}} = 0,5I_0$ );
- г) интенсивность грозовой деятельности ( $T_q = 5; 10; 20; 40$  часов);
- д) число изоляторов в гирлянде и их строи- тельная высота;
- е) предельное значение  $R_{zi}$ .

Расчеты показали, что по критерию комму- тационной способности выключателей при фак- тических величинах токов короткого замыкания, равномерном распределении места возникнове-ния КЗ (полагаем, что импульсные перекрытия с дальнейшим переходом в устойчивое КЗ про-исходят только на опорах), длинах ВЛ 35–150 кВ, интенсивности грозовой деятельности, числе изоляторов в гирлянде и предельных значениях импульсного сопротивления опор, характерных для районов Крайнего Севера РФ, в подавляю-щем большинстве случаев молниезащита ВЛ 35–150 кВ обеспечивается без тросов и РТ.

При отказе от молниезащитных тросов и трубчатых разрядников на подходе в ряде слу-чаев несколько ухудшается показатель надеж-ности молниезащиты подстанций. Для компен-сации такого ухудшения можно рекомендовать следующее:

а) установку дополнительного защитного аппарата, например ОПН вблизи линейного разъединителя;

- б) замену вентильных разрядников на ОПН;
- в) применение ПИРМК на 2–3 опорах вбли-зи подстанций.

Установка дополнительного защитного аппарата (ОПН вблизи линейного разъединителя) фактически является развитием каскадных схем. Для удобства эксплуатации дополнительный за-щитный аппарат устанавливается не на линии, а на территории подстанции, причем установка этого аппарата вблизи линейного разъедините-ля (ЛР) одновременно обеспечивает защиту ЛР и выключателя (отделителя), если ВЛ находится в горячем резерве и в случаях повторных ударов молнии при АПВ.

Весьма перспективным защитным аппара-тами в схемах молниезащиты подстанций явля-ются ОПН. Важно, что малые габариты всех ОПН делают их установку в любой точке под-станции более легкой и дают возможность уменьшить размеры устройства. Использование ОПН позволяет существенно повысить надеж-ность молниезащиты подстанций и сократить длину опасной зоны подхода. Наиболее актуаль-но это для районов с высокими значениями  $\rho_{\text{гр}}$ . Исследования показали, что при прочих равных условиях использование ОПН в сетях любого класса напряжения в значительной степени улучшает надежность молниезащиты подстан-ций. Для сетей 35–150 кВ это иллюстрируется данными таблицы.

Можно сказать, что перспективным меро-приятием может быть также установка ОПН одновременно на шинах при подходе.

## Выводы

Выполнен поиск возможностей отказа от молниезащитных тросов и РТ на ВЛ 35–150 кВ. На примере СЭС «Колэнерго» (филиала МРСК

### Улучшение показателя надежности молниезащиты при установке ОПН

Подстанция	$U_{\text{ном}}$ , кВ	Относительная надежность молниезащиты подстанций
Тупиковая	35/110/150	2,0–2,5/2,0–2,3/1,8–2,2
Проходная	35/110/150	2,1–2,7/2,0–2,6/1,9–2,5
Многофидерная	35/110/150	2,2–2,8/2,1–2,7/2,0–2,3



Северо-Запада) показано, что основными средствами молниезащиты остаются молниезащитные тросы и трубчатые разрядники (РТ), обладающие огромными эксплуатационными затратами и неудобствами, но не всегда обеспечивающие достаточную надежность ВЛ и ПС. Поэтому разработаны альтернативные мероприятия по молниезащите ВЛ.

При отказе от молниезащитных тросов и РТ продуктивно использование каскадных схем молниезащиты и ввод в эксплуатацию полимерных мультикамерных изоляторов (ПИРМК) тех же классов напряжения. При большом количестве ВЛ (более четырех) можно также отказаться от мол-

ниезащитных тросов, так как здесь оказывает благоприятное влияние уменьшенное эквивалентное волновое сопротивление параллельных ВЛ, что можно рассматривать как защитный аппарат.

В районах Крайнего Севера можно успешно использовать коммутационную способность выключателей между двумя капитальными ремонтами.

Достаточно перспективно применение ПИРМК, которые выполняют функцию изолятора и защитного аппарата.

Технико-экономические расчеты показали, что практически всегда целесообразен отказ от молниезащитных тросов и РТ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила устройств электроустановок (ПУЭ). 7-е издание, переработанное и дополненное. М., 2011.
2. **Дергаев Ю.М., Ефимов Б.В., Захри И.М.** Расчет числа грозовых отключений ЛЭП в условиях Крайнего Севера // В кн.: Передача и распределение электроэнергии в районах Севера. Апатиты, 1989.
3. **Костенко М.В., Невретдинов Ю.М., Халилов Ф.Х.** Грозозащита электрических сетей в районах с высоким удельным сопротивлением грунта. Л.: Нauка, 1984.
4. **Ефимов Б.В., Невретдинов Ю.М., Данилин А.Н., Халилов Ф.Х., Гумерова Н.И.** Анализ надежности грозозащиты подстанций. Современные проблемы // Новости электротехники. 2009. №4(58). С. 48–51; №5 (59). С. 42–45.
5. **Подпоркин Г.В., Енькин Е.Ю., Калакутский Е.С., Пильшиков В.Е., Сиваев А.Д.** Грозозащита ВЛ 10–35 кВ и выше при помощи мультикамерных разрядников и изоляторов-разрядников // Электричество. 2010. №10. С. 25–27.
6. **Подпоркин Г.В.** Разработка мультикамерных изоляторов-разрядников для ВЛ 220 кВ без грозозащитного тороса // Энергетик. 2010, №12. С. 10–14.
7. **Подпоркин Г.В., Пильшиков В.Е., Енькин Е.Ю.** Разработка полимерных мультикамерных изоляторов-разрядников 35 и 110 кВ. Постановка задачи // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2011. Вып. 4 (29). С. 143–154.
8. **Подпоркин Г.В., Пильшиков В.Е., Енькин Е.Ю.** Разработка полимерных мультикамерных изоляторов-разрядников 35 и 110 кВ // Новое в российской энергетике, 2012. Вып. 2. С. 24–42.
9. **Халилов Ф.Х., Гольдштейн В.Г., Подпоркин Г.В., Степанов В.П.** Электромагнитная совместимость и разработка мероприятий по улучшению защиты от перенапряжений сетей 6–35 кВ. М.: Энергоатомиздат, 2009.
10. Руководство по защите электрических сетей 6–1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений / Под науч. ред. Н.Н. Тиходеева. 2-е издание. СПб.: Изд-во ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1999.

## REFERENCES

1. Pravila ustroystv elektrostanovok [Electrical installation code] (PUE). 7-ye izdaniye, pererabotannoye i dopolnennoye. (rus.)
2. **Dergayev Yu.M., Yefimov B.V., Zakhri I.M.** Raschet chisla grozovykh otklyucheniy LEP v usloviyakh Kraynego Severa [The calculation of the number of lightning blackouts transmission lines in the Far North]. V knige: Peredacha i raspredeleniye elektroenergii v rayonakh Severa. Apatity, 1989. (rus.)
3. **Kostenko M.V., Nevretdinov Yu.M., Khalilov F.Kh.** Grozozashchita elektricheskikh setey v rayonakh s vysokim udelnym soprotivleniyem grunta [Lightning protection of electric grids in areas with high soil resistivity]. Leningrad.: Nauka, 1984. (rus.)
4. **Yefimov B.V., Nevretdinov Yu.M., Danilin A.N., Khalilov F.Kh., Gumerova N.I.** Analiz nadezhnosti grozozashchity podstantsiy [The reliability analysis of lightning protection of substations]. Sovremennyye problemy. Novosti elektrotekhniki. 2009. №4(58). S. 48–51; №5 (59). S. 42–45. (rus.)
5. **Podporkin G.V., Yenkin Ye.Yu., Kalakutskiy Ye.S., Pilshikov V.Ye., Sivayev A.D.** Grozozashchita VL 10–35 kV i vyshe pri pomoshchi multikamernykh razryadnikov i izolyatorov-razryadnikov. [Lighting protection of 10–35 kV overhead powerlines with Smartinsulator glass and smartinsulator composite]. Elektrичество. 2010. №10. S. 25–27. (rus.)



6. **Podporkin G.V.** Razrabortka multikamernykh izolyatorov-razryadnikov dlya VL 220 kV bez grozozashchitnogo torosa [Development of Smartinsulator Glass for 220 kV overhead power lines without lightning protection wire]. *Energetik*. 2010. №12. S. 10–14. (rus.)
7. **Podporkin G.V., Pilshikov V.Ye., Yenkin Ye.Yu.** Razrabortka polimernykh multikamernykh izolyatorov-razryadnikov 35 i 110 kV. Postanovka zadachi [Development of Smartinsulator Composite for 35–110 kV. Formulation of the problem]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya*. 2011. Vyp. 4 (29). S. 143–154. (rus.)
8. **Podporkin G.V., Pilshikov V.Ye., Yenkin Ye.Yu.** Razrabortka polimernykh multikamernykh izolyatorov-razryadnikov 35 i 110 kV [Development of Smartinsulator Composite for 35–110 kV]. *Novoye v rossiyskoy energetike*. 2012. Vyp. 2. S. 24–42. (rus.)
9. **Khalilov F.Kh., Goldshteyn V.G., Podporkin G.V., Stepanov V.P.** Elektromagnitnaya sovmestimost i razrabortka meropriyatiy po uluchsheniyu zashchity ot pere-napryazheniy setey 6–35 kV [Electromagnetic compatibility and development of measures to improve the protection against overvoltage at 6–35 kV power grids]. Moskva: Energoatomizdat, 2009. (rus.)
10. Rukovodstvo po zashchite elektricheskikh setey 6–1150 kV ot grozovykh i vnutrennikh perenapryazheniy [Guidelines on the Protection of 6–1150 kV electric power grids against lightning and surge overvoltages] / Pod nauchnoy red. N.N. Tikhodeyeva. 2-e izdaniye. Sankt-Peterburg: Izd-vo PEIPK Mintopenergo RF, 1999. (rus.)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ХАЛИЛОВ Ферудин Халилович** — доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: eddikot@gmail.com

**КОТЛЯРОВ Эдуард Русланович** — студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: eddikot@gmail.com

## AUTHORS

**KHALILOV Ferudin Kh.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: eddikot@gmail.com

**KOTLYAROV Eduard R.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: eddikot@gmail.com

DOI 10.5862/JEST.219.6

УДК 622.245.54

*Н.И. Николаев, А.В. Шипулин, К.С. Купавых*

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ОСВОЕНИЯ СКВАЖИН**

*N.I. Nikolayev, A.V. Shipulin, K.S. Kupavikh*

## **ENERGY EFFICIENCY IMPROVEMENT OF WELL DEVELOPMENT**

Рассмотрены результаты опытов на экспериментальном стенде, который позволяет имитировать трещины нефтяного пласта различной длины и сечения путем замены трубок длиной 0,33, 0,5, 0,66 и 1 м, диаметром 2, 4 и 6 мм. Проанализированы графики давления в трещине на различных расстояниях от полости скважины при начальных давлениях 5, 10 и 20 атм. Математически определен закон изменения давления в трещинах пласта при формировании импульсного давления на устье скважины. Расчеты показывают возможность эффективной передачи энергии импульсно-волновым способом от устья скважины в систему трещин прискважинной зоны. Обосновано, что технология развития сети трещин в прискважинной зоне пласта за счет гидроударов не требует применения погружного оборудования, используется минимальное количество техники, применяемой на устье при ремонте скважины. Приведены доводы в пользу энергетической эффективности импульсно-волнового воздействия на забой скважины.

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ; ОСВОЕНИЕ СКВАЖИН; ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ; УДАРНАЯ ВОЛНА; КИСЛОТНАЯ ОБРАБОТКА; ВЯЗКАЯ НЕФТЬ.**

The paper describes the results of the experiment stand which imitates the crack in the oil stratum. The experiment stand allows modeling cracks of various length and cross-section by changing tubes having length of 0,33, 0,5, 0,66 and 1 m, with the diameter of 2,4 and 6 mm. The authors analyzed charts of pressure in the crack measured at different distances from the borehole cavity at 5, 10 and 20 atm. The paper provided mathematical description which shows the correlation between pressure changes in the oil stratum crack when forming the impulse pressure at the cellar. The calculations show the improved energy efficiency transmission by using an impulse wave method from the cellar to the system of cracks in the near-well zone. It was validated that the technology of developing the system of cracks in the near-well zone of the stratum due to hydropercussion do not require the usage of submersible equipment; the minimum amount of equipment for well repair is used. The energy efficiency of impulse wave impact on the well face is proved.

**ENERGY EFFICIENCY IMPROVEMENT; DEVELOPMENT OF WELLS; HYDRODYNAMIC TREATMENT; SHOCK WAVE; ACIDIZING; VISCOUS OIL.**

При эксплуатации любого месторождения углеводородов благоприятные условия и высокие коэффициенты нефтеотдачи обусловлены продуктивностью пласта. Традиционные методы вызова притока, основанные на принципе снижения давления в скважине за счет уменьшения плотности жидкости или ее уровня, не всегда дают возможность получения необходимой величины депрессии. Для притока пластового флюида используют такие методы освоения

скважин в осложненных условиях, как кислотная обработка, свабирование, гидроразрыв пласта, а также торпедирование, плазменно-импульсное воздействие и т. д.

При этом особое значение имеет энергоэффективность процесса освоения скважины. Доля энергетической составляющей в себестоимости проведения технологической операции может достигать 60 %. Поэтому при выборе способа обработки призабойной зоны пласта необходимо



особое внимание уделять энергетической и экономической эффективности применяемого метода. Технология гидродинамического воздействия на пласт выгодно отличается от альтернативных подходов именно в плане энергетических затрат. Применение методики не требует высокопроизводительного оборудования и дорогостоящей техники. Первоначальное воздействие возможно увеличить в 4–5 раз при обработке требуемого участка пласта, что значительно сокращает потребности в мощности приводящего агрегата.

Альтернатива вышеперечисленным методам, имеющим как положительные, так и отрицательные качества, предлагается применение комплексного воздействия на продуктивный пласт, которое заключается в комбинировании гидродинамического воздействия на пласт с его кислотной обработкой. При многократно повторяющихся гидроударах в совокупности с нагнетанием кислотных растворов, применяемых в качестве расклинивающей жидкости, постепенно увеличивается глубина и раскрытоść трещин, а следовательно, облегчаются условия проникновения кислотного раствора в слабопроницаемый пласт. Причем эффективность проникновения кислотного раствора возрастает по мере увеличения амплитуды пульсаций и кратности их осуществления [1]. Особенность предлагаемого решения: вместо приложения высокого давления призабойную зону подвергают сериям коротких ударов, при которых жидкость не успевает фильтроваться в образующиеся трещины и увеличивать их длину. Короткие удары способствуют развитию прилегающих трещин, выкрашиванию породы, образованию каверн вокруг призабойной зоны и увеличению ее эффективного радиуса. Раскачка массы скважинной жидкости способствует глубокому проникновению волны движения в пласт, размыву породы и эффективному извлечению загрязнений, закупоривающих трещины пласта.

Волны давления и разрежения, перемещаясь по полости скважины от устья к забою и обратно, создают удары, в том числе в призабойной зоне, и способствуют отрыву адсорбционных отложений от стенок поровых каналов и трещин, импульсной закачке в пласт кислотного раствора. При колебательном движении жидкости закачиваемый рабочий агент не уходит

в какую-либо промоину, а более равномерно распределяется в призабойной зоне вокруг перфорации скважины; кроме того, размывается углеводородная пленка на стенках поровых каналов и трещин, что улучшает контакт рабочего агента с породой пласта, способствует облегченному удалению продуктов химической реакции. При штатной кислотной обработке прискважинной зоны движение жидкости производится только в одном направлении — в пласт. Движение жидкости из пласта в скважину применяют только для удаления продуктов химической реакции. Если при кислотной обработке одновременно применять колебания скважинной жидкости и проводить несколько циклов с одновременной промывкой, эффективность обработки кратно возрастает.

Колебания с частотой менее одного герца имеют малое затухание, поэтому периодические изменения забойного давления передаются в виде волн низкой частоты по простианию пластов и способствуют перераспределению напряжений в массиве, что положительно влияет на нефтеотдачу. Вязкая нефть является неньютоновской жидкостью, и ее вязкость определяется пространственной решеткой, образуемой кристаллами парафинов, которая разрушается при механическом воздействии. Следовательно, при обработке месторождений вязкой нефти колебания столба скважинной жидкости вызывает разрушение пространственной решетки за счет регулярной ее деформации и изменение ее реологических свойств с постепенным уменьшением вязкости.

Так как в реальных условиях не представляется возможным измерить глубину и величину проникающей в пласт ударной волны, был разработан экспериментальный стенд (рис. 1) для физического моделирования технологических операций при обработке пласта.

Порядок проведения эксперимента принят следующий. Сборка модели осуществляется для заданных условий глубины скважины и проницаемости пласта. Трубки, имитирующие капилляры продуктивного пласта, выбирают диаметром 2, 4 или 6 мм, их длина может варьироваться от 0,25 до 5,75 м с минимальным шагом 0,25 м. Затем поочередно подключают манометр к каждой измерительной точке, имитирующей забой скважины, а также между сек-

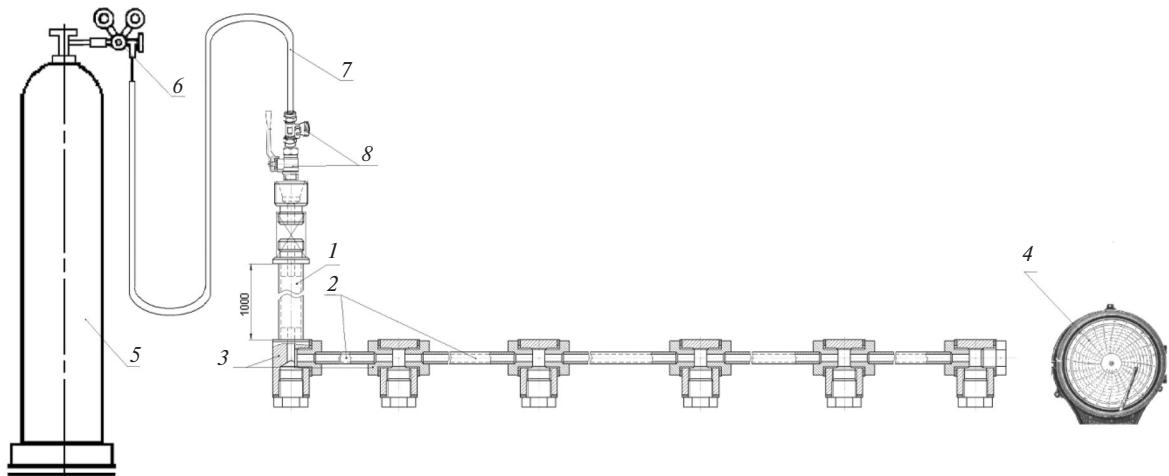


Рис. 1. Схема экспериментального стенда:

1 — трубы с внутренним диаметром 20 мм, которые имитируют скважину, и имеют разную длину: 0,33, 0,5, 0,66 и 1 метр; 2 — трубы малого диаметра (внутренний диаметр 2,4 и 6 мм) с длиной секции 1 м, имитирующие капилляры продуктивного пласта; 3 — соединительные тройники, устанавливаются на искусственном забое и между каждыми (секциями) труб малого диаметра; имеется возможность подключения манометра к каждому тройнику; 4 — скважинный манометр «M/D Totco»; 5 — газовый баллон высокого давления с азотом; 6 — газовый редуктор; 7 — шланг высокого давления внутренним диаметром 16 мм и длиной 2 м; 8 — шаровые краны для подачи ударного импульса и стравливания давления

циями трубок. При каждом подключении модель заполняют водой до искусственного устья во избежание воздушных пробок. Затем подключают шланг высокого давления. С помощью редуктора выставляют давление в 5, 10 или 20 атм., при котором проводят эксперимент, и измеряют импульсное давление гидроудара. В каждой расчетной точке производят не менее трех измерений для каждого заданного на редукторе давления, затем рассчитывают среднее значение измерений. Все измерения фиксируются на диаграмме пишущего манометра. На основании полученных данных строят график замеров давлений в расчетных точках экспериментального макета, при помощи которых можно определить характер распространения перепадов давления по трещинам пласта.

На разработанной физической модели эксперименты были проведены при следующих условиях: глубина скважины — 1 м; общая длина модели пласта — 5 м; диаметр секций — 2, 4 или 6 мм; длина секции — 1 м; давления на редукторе — 5, 10 или 20 атм.

Результаты экспериментов, проведенных по описанной выше методике, представлены в виде графиков, отображенных на рис. 2 *a, б, в*.

На основании полученных экспериментальных данных можно сделать следующие выводы:

1. С уменьшением диаметра капилляра пиковые значения давлений гидроудара увеличиваются до определенного значения, затем импульс затухает, т. е. происходит увеличение импульсного давления по мере удаления от забоя в пласт. Высокое значение импульса давления в трещинах пласта увеличивает проницаемость призабойной зоны, развивая систему трещин.

2. Из графиков видно: на забое практически не наблюдается высоких импульсов давления, что позволяет судить о безопасности гидроударов для целостности обсадной колонны и цементного камня.

3. Графики показывают, что с уменьшением диаметра трубы увеличивается расстояние импульса давления максимального значения от забоя. При диаметре трубы 2 мм максимальное значение давления находится на расстоянии 4 м от искусственного забоя, при диаметре 6 мм — 3 м.

Для подтверждения полученных результатов были проведены эксперименты с трубкой 2 мм на укороченной модели (4 метра). Полученные данные представлены на рисунках 3, *а, б, в*.

Из графиков на рисунках 5, 6 и 7 очевидно, что результаты совпадают и пиковые значения давления гидроудара находятся на удалении 4 м от искусственного забоя. Это позволяет исключить эффект окончания модели.

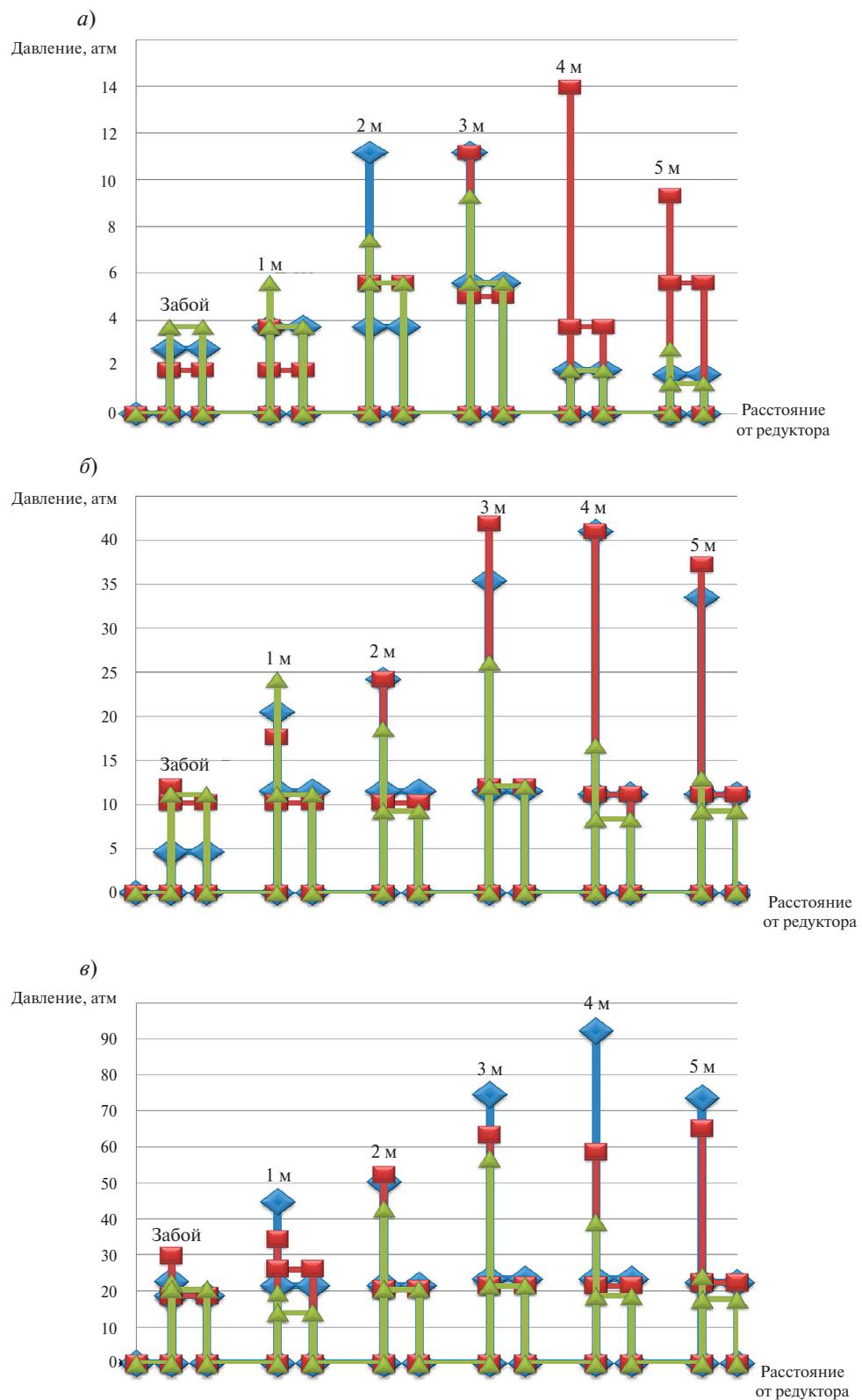


Рис. 2. Характер распространения ударной волны  
при начальных давлениях на редукторе 5 (а), 10 (б) 20 (в) атм.  
при значениях диаметра трубы (— 2 мм; — 2 мм; — 2 мм)

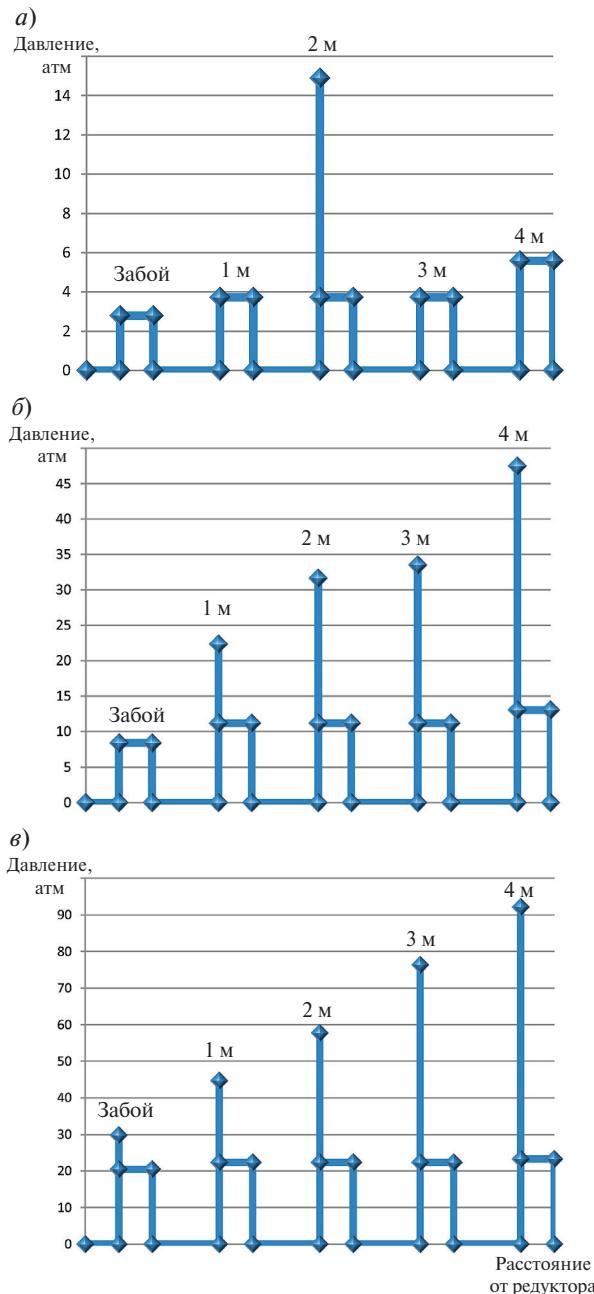


Рис. 3. Характер распространения ударной волны в укороченной модели при начальных давлениях на редукторе 5 (а), 10 (б) 20 (в) атм. (диаметр трубы 2 мм)

Более наглядными и объективными являются графики, полученные при начальном давлении 20 атм., так как при меньших давлениях не всегда можно получить четкие и воспроизводимые при последующих экспериментах данные.

Исходя из полученных данных можно сделать вывод, что уменьшение диаметра капилляра способствует удалению от забоя пикового значения

давления, а при серии ударов размеры капилляров увеличиваются и, соответственно, пик давления приближается к забою. Тем самым система трещин в призабойной зоне становится более развитой, что и является целью вызова притока.

Передача мощности от скважинной жидкости к пласту осуществляется волнами давления, создаваемыми на свободной поверхности жидкости в насосно-компрессорной трябе (НКТ). При такой передаче мощности интенсивность воздействия на пласт определяется не только амплитудой давления, но также частотой изменения давления во времени и формой импульса давления, т. е. законом изменения давления во времени. При некоторых условиях прохождение волны давления по скважинной жидкости создает удар в нижней части НКТ [2, 3]. При такой передаче мощности жидкость, заполняющая скважину, играет роль проводника волн давления (волновод) [4, 5].

При некоторых условиях прохождение волны давления по скважинной жидкости создает удар («резкое» увеличение давления) в призабойной зоне скважины. Пусть  $T > 0$  — период изменения давления  $p_0(t)$  на свободной поверхности флюида:

$$p_0(t \pm T) - p_0(t) = 0. \quad (1)$$

Можно доказать, что гидродинамическое давление обладает периодом  $T$  в любом сечении  $x > 0$  скважины:

$$p(x, t \pm T) - p(x, t) = 0 \text{ при } 0 < x < L.$$

Импульс поверхностного давления за период определяется, как  $i = \int\limits_t^{t+T} p_0 dt$ , для любого сечения  $0 < x < L$  скважины физический смысл имеет осредненное по времени значение давления за время пробега акустической (ударной) волны:

$$\bar{p} = \frac{i}{T} = \frac{c}{T} \int\limits_t^{t+T} p(t) dt. \quad (2)$$

Пусть  $T_0 = L/c$ ;  $L$  — глубина скважины;  $c$  — скорость ударной, или акустической, волны. Если  $T \gg T_0$ , то изменение давления происходит медленно по сравнению с акустическим масштабом времени  $T_0$ . Имеет место квазистатическое изменение давления, как например, применяемое при гидравлическом разрыве пласта. Для



ударного воздействия на пласт необходимо, чтобы период  $T$  изменения давления в устье скважины или в любом сечении столба флюида  $0 < x < L$  был бы сопоставим с  $T_0$ .

Пусть  $T_0 = 9T$ . Число 9 показывает, сколько периодов давления содержится в акустическом масштабе времени. Для медленного (квазистатического) изменения давления  $\vartheta \ll 1$ . Наоборот, для ударного воздействия на пласт необходимо  $\vartheta = 0(1)$ . При  $T \gg T_0$  осредненное давление мало отличается от гидростатического. Давление в устье скважины как функция времени представима рядом Фурье

$$p_0(t) = 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} p_0(\varphi) \cos[m\pi(\tau - \varphi)] d\varphi, \quad (3)$$

где  $\tau = \frac{t}{T}$ .

При одном и том же импульсе давления воздействие на пласт определяется гладкостью изменения давления [6–8]. Для возникновения удара достаточно, чтобы разрывы давления  $p_0(t)$  и его производной  $dp_0/dt$  заполняли конечное или счетное множество точек. Тогда конечные изменения давления или разрывы непрерывности первого рода периодически повторяются при периодическом изменении давления на поверхности флюида. Такие мгновенные изменения давления являются ударами. Известно, что удар — мгновенное наложение неосвобождаемых связей на материальную систему [9, 10]. Возникновение резкого перепада давления обусловлено отражением волн давления от твердого дна скважины или от свободной поверхности в устье скважины, т. е. мгновенным наложением неосвобождаемой связи на волну давления.

Если быстро открыть клапан, соединяющий источник давления и устье скважины, то вниз, к свободной поверхности, будет перемещаться воздушная ударная волна. Достигнув свободной поверхности скважинной жидкости, волна отразится от этой поверхности, как от твердой границы, и вызовет на свободной поверхности перепад давления. При этом вниз, по длине скважины, будет перемещаться ударная волна, вызванная скачкообразным изменением давления на свободной поверхности в устье скважины. Достигнув зумпфа скважины, волна давления отражается и приводит к скачку давления в призабойной зоне. Этот скачок давления через пер-

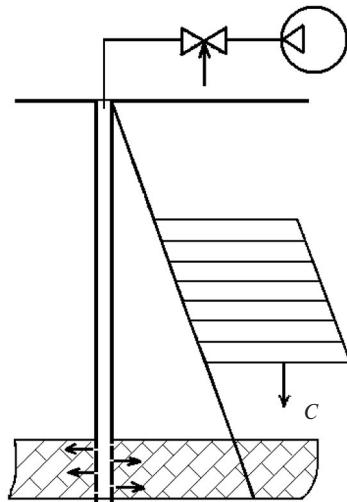


Рис. 4. Технологическая схема передачи давления в скважине

форацию скважины передается в пласт и по трещинам распространяется в массиве породы. Надо иметь ввиду, что по мере продвижения вглубь пласта трещины разветвляются и уменьшаются в сечении.

В ряде случаев скачкообразное (ударное) воздействие приводит к увеличению проницаемости пласта за счет хрупкого разрушения скелета и образованию дополнительных микротрещин в коллекторе. Происходит снижение связности пласта: множество пор увеличивается за счет образования микротрещин. У пласта уменьшается топологическая плотность, скелет пласта постепенно превращается в несвязное множество, и, как следствие, увеличивается проницаемость пласта [11].

Такова мотивация импульсно-волнового воздействия на пласт, выступающего в качестве альтернативы гидроразрыву пласта. Гидроразрыв пласта не изменяет проницаемости (связности) коллектора и приводит лишь к образованию конечного количества макротрещин.

Несмотря на относительно небольшую амплитуду ударов (порядка десятков бар, что несопоставимо с давлениями, применяемыми при гидроразрыве пласта), их периодичность и кратковременность приводят к «быстрой» передаче кинетической энергии ударной волны пласту-коллектору. Необходимо определить форму диаграммы давления или по величине среднего за период давления восстановить  $F$ -коэффициенты давления.

Примем исходные допущения. При рассмотрении передачи гидроудара столб скважинной жидкости предполагается идеальным акустическим волноводом (несжимаемой невязкой жидкостью). Коэффициент Пуассона для воды  $\nu = \frac{1}{2}$ .

$$dp^* = K \frac{dA}{A} = -K \frac{du}{c} = -K \frac{dV}{V}, \quad (4)$$

где  $u = u(x, t)$  — скорость движения скважинной жидкости;  $K$  — модуль объемного сжатия скважинной жидкости, для воды он принят равным  $2 \times 10^9$  Па;  $c$  — скорость звука;  $A$  — площадь сечения.

Уравнения импульсов и неразрывности Сен-Венана образуют гиперболическую систему второго порядка:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + c^2 \frac{\partial \omega}{\partial x} &= 0; \\ \frac{\partial \omega}{\partial t} + u \frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} &= 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $u = u(x, t)$  при  $0 < x < L, t \in T$ ;  $L$  — глубина скважины;  $T$  — множество значений времени;  $d\omega = d(\ln A)$  — «упругая энталпия»;  $c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$  — скорость распространения слабой ударной волны по системе «жидкость — трубопровод».

Линеаризация системы описана в известных источниках и составляет основу теории Аллиеви — Жуковского в теории удара. Пусть  $z$  — это  $u, \omega$ . Тогда линеаризованная система (1) приводится к уравнению колебаний струны

$$\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \quad (6)$$

с апериодическими или периодическими предельными условиями. В первом случае множество  $T = (t: 0 < t < \infty)$ , во втором случае  $T = (t: -\infty < t < \infty)$ . Предельные линейные задачи для линейного уравнения колебаний не представляют интереса. В то же время наибольшее количество иллюстративных примеров известно именно для линеаризованной предельной задачи.

Рассмотрим диффеоморфизмы (гладкие точечные преобразования) уравнений Сен-Венана. Первый диффеоморфизм:

$$u, \omega \rightarrow u, x; \quad u = u(t, \omega), \quad x = x(t, \omega);$$

$$\frac{\partial(u, \omega)}{\partial(u, x)} = \frac{\partial \omega}{\partial x} \neq 0; \quad \frac{\partial(x, t)}{\partial(t, \omega)} = -\frac{\partial \omega}{\partial x} \neq 0.$$

Полулагранжев диффеоморфизм введен С.А. Христиановичем в задаче о неустановившемся движении воды со свободной поверхностью и в газовой динамике [9].

Тогда система уравнений Сен-Венана принимает вид

$$\begin{aligned} u_t - \frac{x_t}{x_\omega} u_\omega + u \frac{u_\omega}{x_\omega} + \frac{c^2}{x_\omega} &= 0; \\ x_t - u - u_\omega &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Второй диффеоморфизм:

$$u, \omega \rightarrow t, x; \quad \left| \frac{\partial(u, \omega)}{\partial(u, x)} \right| \in (0, \infty).$$

Тогда исходная система уравнений (1) приводится к системе линейных уравнений

$$\begin{aligned} \frac{\partial x}{\partial \omega} - u \frac{\partial t}{\partial \omega} + c^2 \frac{\partial t}{\partial u} &= 0; \\ \frac{\partial x}{\partial u} - u \frac{\partial t}{\partial u} + \frac{\partial t}{\partial \omega} &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Предельные условия Коши для системы (1):

$$\begin{aligned} u(x, 0) &= \left( \frac{\partial u}{\partial n} \right)_{t=0} = 0; \\ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)_{x=0} + \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} &= u(L, t) = 0, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\text{где } \varepsilon = \frac{p(0, t)}{\rho c^2}.$$

Перейдем к решению предельной задачи Коши. Для случая равномерного движения волны давления по НКТ общее решение (7) при условии  $u_t = 0, \frac{\partial(u, \omega)}{\partial(t, \omega)} = 0$  (возмущения с одной и той же упругой энталпиией распространяются с постоянной скоростью) имеет вид

$$x = (u \pm c)t + f(\omega), \quad (10)$$

где  $f(\omega)$  — произвольный диффеоморфизм (однозначное дифференцируемое отображение).

Пусть  $x = 0$ ; тогда из предельного условия следует  $f(\omega) = \pm \frac{c\omega}{\dot{\varepsilon}} = 0$  и в силу (10)

$$x = (u \pm c)t \pm \frac{c\omega}{\dot{\varepsilon}}. \quad (11)$$

Пусть  $x = L$ ; тогда  $u = 0$ . В силу (11)

$$\omega = \frac{d\varepsilon}{dt}(T-t), \quad (12)$$

где  $T = L/c$ . Значит, для давления  $p(L, t)$  в зумпфе скважины получается

$$p(L, t) = K\omega = K \frac{d\varepsilon}{dt}(T-t). \quad (13)$$

Например, пусть

$$\varepsilon(t) = E \left| \sin \frac{2\pi t}{T} \right| =$$

$$= \begin{cases} E \sin \frac{2\pi t}{T} & \text{при } 0 < t < \frac{T}{2n}; \\ -E \sin \frac{2\pi t}{T} & \text{при } \frac{T}{2n} < t < \frac{T}{n} \end{cases} \quad \text{и т. д.}$$

где  $E$  — амплитуда колебания числа Эйлера (давления) на поверхности флюида. В силу (13) величина давления в зумпфе скважины меняется следующим образом:

$$p(L, t) =$$

$$= \begin{cases} 2\pi E K (1 - \tau) \cos 2\pi t & \text{при } 0 < t < \frac{T}{2n}; \\ -2\pi E K (1 - \tau) \cos 2\pi t & \text{при } \frac{T}{2n} < t < \frac{T}{n}, \end{cases} \quad (14)$$

где  $\tau = t/T$ .

В моменты времени  $\tau$ , кратные  $(2n)^{-1}$ , величина перепада давления в силу (14) составит

$$\Delta p = \pm 4\pi E K \frac{2n-1}{2n} = 2\pi P_0 (2n-1), \quad (15)$$

где  $P_0$  — амплитудное значение давления на свободной поверхности скважинной жидкости.

Если  $P_0 = 1$  МПа,  $n = 1$ , то перепад давления в зумпфе скважины составит величину 6,3 МПа. При удвоении частоты давление в зумпфе скважины вырастает вдвое и т. д. Несложные оценки показывают, что при скорости распространения акустической волны  $c = 1000$  м, давлении  $P_0$  порядка 1–10 МПа [12–15] деформация  $\omega$  составит  $10^{-2}$ – $10^{-3}$ , т. е. в допустимых пределах упругой деформации стенок.

Математическое решение доказывает, что если ударные волны посыпать от устья скважины и чередовать их с приходящими отраженными волнами, то происходит сложение прямых и отраженных волн, перемещающихся по скважине, и образование волн повышенного давления. Такие волны высокого давления образуются без специального скважинного оборудования и способны оказать решающее воздействие на развитие трещин и в целом на проницаемость при скважинной зоны пласта.

Импульс давления, образующийся на забое скважины, через перфорацию передается в трещины пласта. Трещины являются каналами, по которым волна давления передается вглубь массива аналогично передаче волны к забою в НКТ скважины. Вышеприведенное математическое описание справедливо для процесса передачи давления в трещинах с поправкой на размеры трещинных каналов.

Форма импульсов давления в каналах экспериментального стенда определяется перепадами скорости движения жидкости в трубке и интерференцией прямой и отраженной ударных волн. Фронты импульсов давления, регистрируемых на каждом тройнике стенда, сопровождаются начальными короткими выбросами вследствие сложения отраженных волн согласно (15).

Аналогичные процессы происходят в реальном нефтяном пласте, но трещины пласта постепенно уменьшаются в сечении и не имеют выраженного конца, от которого может отражаться волна. Кроме того, пористый массив пласта способствует затуханию волны давления и передаче ее энергии в пласт. Эта энергия расходуется на деформацию трещин и их развитие, сопровождающееся выкрашиванием фрагментов породы и увеличением эффективного радиуса призабойной зоны.

## Выводы

При импульсно-волновом воздействии на скважину энергетические затраты минимизируются за счет неприменения таких энергоемких технологий, как гидроразрыв пласта, термогазовый способ и т. д. Технология развития сети трещин в прискважинной зоне пласта за счет гидроударов не требует применения погружного оборудования, используется минимальное количество техники (обычно насосный агрегат



и автоцистерна). Расчеты показывают возможность эффективной передачи энергии импульсно-волновым способом от устья скважины в систему трещин прискважинной зоны. Энергетическая эффективность импульсно-волнового воздействия

на забой скважины и систему трещин определяется величиной среднего импульсного давления на устье, а также частотой изменения этого давления и ее отношением к «собственной частоте» столба скважинной жидкости.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гавриленко А.И. Импульсно-реагентный метод воздействия на пласт для месторождений РУП «ПО «Белоруснефть» // Интервал. 2007. № 10. С. 23–28.
2. Патент на изобретение RUS 2266402. Способ возбуждения колебаний скважинной жидкости // Шипулин А.В., Петриченко М.Р., Валеев М.Х., Хуррямов А.М. / 17.11.2003.
3. Уиттекер Е.Т., Ватсон Дж.Н. Современный анализ. Ч.2. М.: ГИФ-МЛ, 1963. С. 233–256.
4. Леонов М.Я., Панасюк В.В. Развитие мельчайших трещин в твердом теле // Прикладная математика и механика. 1959. №5. С. 391–401.
5. Duval G.E. Shock waves in the study of solids // Applied Mechanics Review. 1962. №4. 16 р.
6. Патент РФ 2379488. Способ интенсификации нефтеотдачи пласта и устройство для его осуществления // Бурьян Ю.А., Сорокин В.Н. / 08.08.2007.
7. Патент РФ 2266402. Способ возбуждения колебаний скважинной жидкости // Шипулин А.В., Петриченко М.Р., Валеев М.Х., Хуррямов А.М. / 17.11.2003.
8. Ханукаев А.Н., Миркин В.Г. О распространении волн напряжения при взрыве в твердых породах // Записки Горного института им. Плеханова. 1962. Том 14. №1. С. 3–12.
9. Христианович С.А., Баренблатт Г.И. О модуле скрепления в теории трещин // Известия АН СССР. Механика твердого тела. 1968. №2. С. 70–75.
10. Райзер Ю.П. Высокочастотный разряд высокого давления в потоке газа как процесс медленного горения // Журнал прикладной механики и технической физики. 1968. № 3. С. 3–10.
11. Нигматуллин Р.И., Пыж В.А., Симоненков И.Д. Эффект аномальных колебаний с интенсивными всплесками давления в ударной волне, распространяющихся по водной суспензии бентонитовой глины // Изв. вузов: Нефть и газ. 1983. №11. С. 45–47.
12. Патент РФ 2406816. Способ разработки нефтяной залежи // Хисамов Р.С., Салихов М.М., Рафиков Р.Б., Ащепков Ю.С., Ащепков М.Ю., Сухов А.А. / 18.02.2010.
13. Патент РФ 2406817. Способ разработки нефтяного месторождения // Хисамов Р.С., Файзулин И.Н., Галимов И.Ф., Ащепков Ю.С., Ащепков М.Ю., Сухов А.А. / 18.02.2010.
14. Патент РФ 2297517. Устройство для автоматической декольматации эксплуатационной многослойной гидрогеологической скважины // Сердюк Н.И. / 16.12.2004.
15. Патент РФ 2265718. Способ возбуждения колебаний скважинной жидкости // Шипулин А.В., Петриченко М.Р. / 12.05.2004.

## REFERENCES

1. Gavrilenko A.I. Impulsno-reagentnyi metod vozdeistviya na plast dlja mestorozhdenii RUP «PO «Belorusneft» [Reagent method stimulation for fields RUP «PO «Belorusneft»]. Interval. 2007. № 10. S. 23–28. (rus.)
2. Patent na izobretenie RUS 2266402. Sposob vozobuzhdenija kolebanii skvazhinnoi zhidkosti [A method of excite oscillations wellbore fluid] / Shipulin A.V., Petrichenko M.R., Valeev M.Kh., Hurriamov A.M. 17.11.2003 (rus.)
3. Uitteker E.T., Watson Dzh.N. Kurs sovremenennogo analiza. [A course of modern analysis. Fourt II edition] M.: GIF-ML, 1963. S. 233–256. (rus.)
4. Leonov M.Ia., Panasiuk V.V. Razvitiye mel'chaishikh treshchin v tverdom tele [Development of tiny cracks in solids]. Prikladnaja matematika i mehanika. 1959. №5. S. 391–401. (rus.)
5. Duval G.E. Shock waves in the study of solids. Applied Mechanics Review. 1962. №4. 16 p.
6. Patent RF 2379488. Sposob intensifikatsii neftetozdachi plasts I ustroistvo dlja ego osushchestvlenija [Intensification of petroreturn of a layer method and device for its implementation] / Bur'ian Iu.A., Sorokin V.N. 08.08.2007 (rus.)
7. Patent na izobretenie RUS 2266402. Sposob vozobuzhdenija kolebanii skvazhinnoi zhidkosti [A method of excite oscillations wellbore fluid] / Shipulin A.V., Petrichenko M.R., Valeev M.Kh., Hurriamov A.M. 17.11.2003 (rus.)
8. Khanukaev A.N., Mirkin V.G. O rasprostranenii voln napriazhenii pri vzryve v tverdykh porodakh [On the propagation of stress waves in an explosion in hard rock]. Zapiski Gornogo instituta im. Plekhanova. 1962. Tom 14. №1. S. 3–12 (rus.)
9. Khrustianovich S.A., Barenblatt G.I. O module stseplenija v teorii treshchin [On the modulus clutch in the



theory of cracks]. *Izvestiia AN SSSR, Mekhanika tverdogo tela*. №2. 1968. S. 70–75 (rus.)

10. **Raizer Iu.P.** Vysokochastotnyi razriad vysokogo davleniia v potoke gaza kak protsess medlennogo goreniiia [High-frequency discharge of high pressure in a gas flow as a process of slow burning]. *Zhurnal prikladnoi mekhaniki i tekhnicheskoi fiziki*. 1968. № 3. S. 3–10 (rus.)

11. **Nigmatullin R.I., Pyzh V.A., Simonenkov I.D.** E'ffekt anomal'nykh kolebanii s intensivnymi vspleskami davleniia v udarnoi volne, rasprostranaiushchikhsia po vodnoi syspenzii bentonitovoi gliny [Effect of abnormal oscillations with intense bursts of pressure in the shock wave propagating in an aqueous suspension of bentonite clay]. *Izv.vyzov: Neft' i gaz*. 1983. №11. S.45–47 (rus.)

12. **Patent RF 2406816.** Sposob razrabotki neftianoi zalezhi [Method of developing oil deposit] / Khisamov

R.S., Salikhov M.M., Rafikhov R.B., Ashchepkov Iu.S., Ashchepkov M.Iu., Sukhov A.A. 18.02.2010 (rus.)

13. **Patent RF 2406817.** Sposob razrabotki neftianogo mestorozhdeniia [Method of developing an oil field] / Khisamov R.S., Faizulin I.N., Galimov I.F., Ashchepkov Iu.S., Ashchepkov M.Iu., Sukhov A.A. 18.02.2010/ (rus.)

14. **Patent RF 2297517.** Ustroistvo dlja avtomaticheskoi dekol'matatsii e'kspluatatsionnoi mnogoplastovoi gidrogeologicheskoi skvazhiny [Device for automatic de-colmatation operational multilayer hydrological wells] / Serdiuk N.I. 16.12.2004 (rus.)

15. **Patent RF 2265718.** Sposob vozbuздheniiia kolebanii skvazhinnoi zhidkosti [A method of excite oscillations wellbore fluid] / Shipulin A.V., Petrichenko M.R. 12.05.2004 (rus.)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**НИКОЛАЕВ Николай Иванович** — доктор технических наук профессор Национального минерально-сырьевого университета «Горный». 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2.. E-mail: nikinik@mail.ru

**ШИПУЛИН Александр Владимирович** — кандидат технических наук ведущий научный сотрудник Национального минерально-сырьевого университета «Горный». 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2. E-mail: avshipulin@mail.ru

**КУПАВЫХ Кирилл Сергеевич** — аспирант Национального минерально-сырьевого университета «Горный». 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2.. E-mail: Kypavih@yandex.ru

## AUTHORS

**NIKOLAEV Nikolai I.** — National Mineral Resources University. 2, line 21 V.O., St. Petersburg, Russia, 199106. E-mail: nikinik@mail.ru

**SHIPULIN Aleksandr V.** — National Mineral Resources University. 2, line 21 V.O., St. Petersburg, Russia, 199106. E-mail: avshipulin@mail.ru

**KUPAVIKH Kirill S.** — National Mineral Resources University. 2, line 21 V.O., St. Petersburg, Russia, 199106. E-mail: Kypavih@yandex.ru

DOI 10.5862/JEST.219.7

УДК 621.444.4+621.412

*C.А. Горожанкин, Н.В. Савенков, А.В. Чухаркин*

## **КОМБИНИРОВАННЫЕ ГАЗОТУРБИННЫЕ УСТАНОВКИ С ДВИГАТЕЛЯМИ СТИРЛИНГА**

*S.A. Gorozhankin, N.V. Savenkov, A.V. Chukharkin*

### **COMBINED GAS TURBINE POWER PLANTS WITH STIRLING ENGINES**

Исследованы возможности реализации действительных циклов комбинированных установок, включающих газотурбинные двигатели и двигатели Стирлинга. Рассмотрены варианты принципиальных схем построения таких установок. Проведен анализ термодинамических циклов, найдены зависимости для вычисления их основных параметров. На основе полученных результатов дана количественная оценка степени использования теплоты продуктов сгорания газотурбинного двигателя для работы двигателя Стирлинга. Определены предельные значения его КПД, мощности и КПД комбинированных установок в целом. Выдвинуты предложения по применению таких силовых установок в составе транспортных средств.

**КОМБИНИРОВАННАЯ СИЛОВАЯ УСТАНОВКА; ГАЗОТУРБИННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ; ДВИГАТЕЛЬ СТИРЛИНГА; ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ; КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ; МОЩНОСТЬ.**

The article studies feasibility of real cycles of combined power plants including gas turbine engines and Stirling engines. The authors consider variants of construction concepts for such power plants. The article presents the analysis of thermodynamic cycles and, as a result, provides dependences to calculate their basic parameters. On the research results the authors give the quantitative heat utilization estimates of the combustion products in the gas turbine engine for the Stirling engine. The study identifies the Stirling engine's efficiency limits, power and combined power plant's efficiency in general. The authors put forward proposals for the application and the empowerment of such plants as part of vehicles.

**COMBINED POWER PLANT; GAS TURBINE ENGINE; STIRLING ENGINE; THERMODYNAMIC CYCLES; EFFICIENCY; POWER.**

#### **Формулировка проблемы**

Среди современных транспортных двигателей с внешним подводом теплоты наибольшее распространение получили газотурбинные двигатели (ГТД). Их основные преимущества — высокая удельная мощность, сравнительно незначительная доля выбросов вредных в экологическом отношении ингредиентов, возможность работы на практически любых видах жидких и газообразных топлив, в замкнутых системах. В то же время основной недостаток ГТД — меньший (по сравнению с ДВС и паротурбинными установками) КПД — ограничивает расширение области их применения в составе силовых установок наземного и водного транспорта.

Другим весьма перспективным типом двигателей с внешним подводом теплоты является двигатель Стирлинга (ДС). В настоящее время ведутся широкие исследования возможностей их применения для транспортных средств. Основные достоинства ДС — высокий КПД, возможность работы от любых источников теплоты, на любых топливах, сравнительно высокая экологическая чистота выбросов. Эти преимущества служат серьезным основанием для рассмотрения возможностей более широкого применения этих двигателей.

Представляют практический интерес комбинированные установки, в которых могут быть реализованы основные положительные свойства как ГТД, так и ДС.

**Цели исследования.** Работа посвящена анализу действительных термодинамических циклов и возможностей комбинированных силовых установок, включающих два двигателя — газотурбинный и Стирлинга.

Если рассматривать комбинированную силовую установку (СУ), включающую ГТД и ДС с независимыми друг от друга источниками теплоты, то ее работа принципиально не отличается от работы других гибридных СУ (ДВС — электродвигатель, ДВС — ГТД, ГТД — электродвигатель и т. д.).

Исследователи и разработчики транспортных ДС сталкиваются с определенными трудностями, которые связаны с проблемой обеспечения надежных уплотнений рабочих полостей внутреннего контура при значительных температурах и высоких давлениях [1, 2]. Необходимо отметить, что температуры нагревателей ДС сопоставимы с температурами газов перед турбиной ГТД (1300–1700 К), что требует применения дорогостоящих жаропрочных и жаростойких материалов. К сожалению, лучшие образцы транспортных ДС пока не вышли за рамки опытных и являются по-своему уникальными конструкциями. В то же время достигнуты значительные успехи в создании и конструировании машин Стирлинга со сравнительно низкими температурами нагревателей, в том числе в вариантах холодильных машин и тепловых насосов [3]. Поэтому представляет интерес возможность использования обоих рассматриваемых двигателей — ГТД и ДС в составе комбинированных силовых установок. В качестве аналогов могут служить комбинированные парогазовые установки, в которых теплота отработавших газов газовых турбин используется для получения пара, работающего в дополнительной паровой турбине. Конечная температура газов за последней ступенью газовой турбины является, по существу, исходной для парового котла-utiлизатора, работающего в такой установке. В предлагаемой авторами схеме комбинированной установки (рис. 1, а) газы, покидающие турбину ГТД, подаются в нагреватель ДС, их теплота используется для работы такого двигателя.

В соответствии с приведенной схемой газы, покидающие силовую турбину 5, перед удалением их в атмосферу поступают в нагреватель

двигателя Стирлинга 7. Указанный нагреватель представляет собой рекуперативный теплообменник. Теплоту к рабочему телу (гелий или водород) внутреннего контура ДС целесообразно передавать с помощью промежуточного жидкотермического теплоносителя либо тепловых труб. В этом случае удается обеспечить оптимальные параметры цилиндров, нагревателя, регенератора и охладителя ДС [4].

Рассмотрим идеальные циклы такой установки и циклы составляющих ее двигателей, представленные на рис. 2 в  $T-s$ -координатах. Идея комбинирования заключается в том, чтобы объединить наиболее распространенный цикл ГТД с подводом теплоты при постоянном давлении [5], который является основным, с «надстраиваемым» циклом двигателя Стирлинга. Верхняя часть цикла 1-2-3-4-1 представляет собой цикл газотурбинной части, причем в процессе отвода теплоты 4-1 часть этой отводимой теплоты передается нагревателям многоцилиндрового двигателя Стирлинга в процессе 4-7. Хотя процесс 4-7 является изобарным, при последовательной передаче теплоты нескольким нагревателям ДС его можно представить как несколько изотермических процессов со ступенчатым снижением температур от  $T_4$  до  $T_7$  (на рис. 2 они показаны пунктирными линиями). Температура охладителя ДС —  $T_5$ , причем отвод теплоты осуществляется по изотерме 5-6. Таким образом, температурный перепад для цилиндров ДС последовательно снижается, но на работе многоцилиндровых двигателей при числе цилиндров более трех это практически не сказывается.

Теплота и работа цикла такой комбинированной установки определяется зависимостью

$$l_{\text{ц}} = q_{\text{ц}} = c_p [T_3 - T_2 - T_7 + T_1 - T_5 \ln(T_4/T_7)], \quad (1)$$

где  $c_p$  — изобарная удельная теплоемкость рабочего тела.

Температуры  $T_2$  и  $T_4$  определяются из известных зависимостей для цикла ГТД при заданных значениях  $T_1$  и  $T_3$ . Температура  $T_7$  вычисляется из соотношения  $T_7 = T_4 - \mu(T_4 - T_5)$ , в котором коэффициент  $\mu$  характеризует долю теплоты уходящих газов ГТД, используемую для работы двигателя Стирлинга. Поскольку данная схема комбинированной установки предусматривает, по существу, утилизацию теплоты

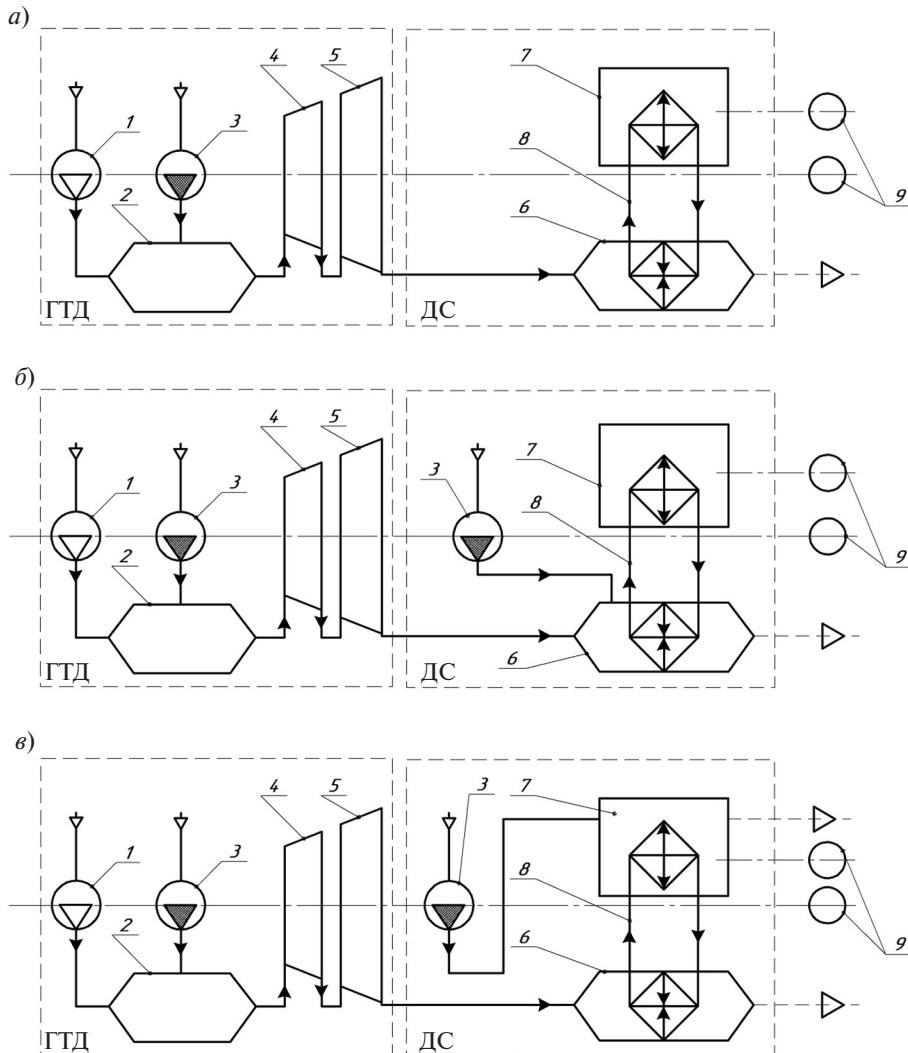


Рис. 1. Схемы вариантов комбинированного двигателя: с утилизацией теплоты отводимых газов (а), с дожиганием за турбиной (б), с утилизацией теплоты отводимых газов и возможностью автономной работы ДС (в):

1 — компрессор ГТД; 2 — камера сгорания ГТД; 3 — топливный насос; 4 — турбина компрессора; 5 — силовая турбина; 6 — нагреватель; 7 — двигатель Стирлинга; 8 — контур промежуточного теплоносителя; 9 — нагрузки двигателей

уходящих газов ГТД, параметр  $\mu$  именуется в дальнейшем коэффициентом утилизации. Очевидно, что полной утилизации  $\mu = 1$ .

КПД такой комбинированной установки находится в соответствии с выражением

$$\eta_t = \frac{l_u}{q_{23}} = \frac{T_3 - T_2 - T_7 + T_1 - T_5 \ln(T_4/T_7)}{T_3 - T_2}. \quad (2)$$

При выводе приведенных зависимостей термический КПД идеального цикла ГТД вычислен в соответствии с выражением

$$\eta_{t_{\text{ГТД}}} = 1 - \frac{1}{\pi^{(k-1)/k}},$$

где  $k$  — показатель адиабаты рабочего тела;  $\pi$  — степень повышения давления в цикле.

В данном случае КПД двигателя Стирлинга определен как КПД регенеративного цикла Карно (в предположении полной внутренней регенерации). Из выражений (1) и (2) следует, что работа цикла ( $L$ ) и КПД комбинированной установки непрерывно возрастают с увеличе-

нием параметра  $\mu$ , как это представлено на графиках (рис. 3).

Из приводимых графических зависимостей следует, что несмотря на сравнительно скромные величины КПД двигателей Стирлинга (это объясняется небольшими соотношениями температур их нагревателей и охладителей), увеличение работы и, соответственно, мощности комбинированной установки при  $\mu \rightarrow 1$  составляет 11–19 % в зависимости от температуры  $T_4$  газа за турбиной. КПД установки при этом возрастает с 0,575 до 0,64–0,68.

С целью обеспечения большего увеличения мощности комбинированной установки рассмотрен и другой вариант схемы ее построения (рис. 1, б). Он предусматривает установку дополнительной камеры сгорания для подвода теплоты путем сжигания топлива в среде газов, покидающих турбину. Поскольку количество свободного кислорода в составе отводимых газов составляет 14–16 % (эта величина определяется коэффициентом избытка воздуха в камере сгорания ГТД), такой процесс практически вполне осуществим аналогично процессам дожигания топлива в форсажных камерах авиационных ГТД. Сжигание дополнительного топлива в такой камере дает возможность обеспечить температуру нагревателя ДС, максимально допустимую из условий жаростойкости и прочности.

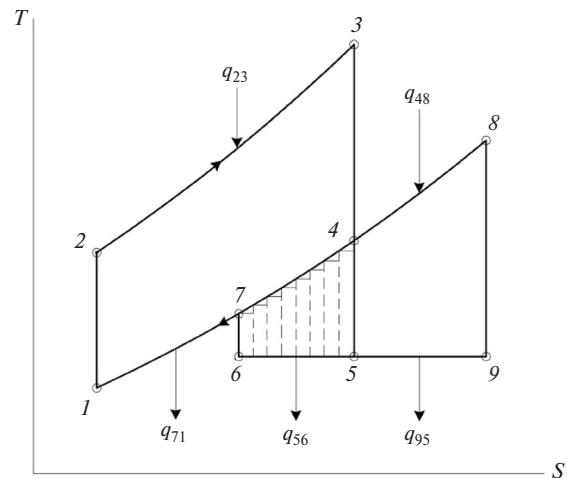


Рис. 2. Термодинамический цикл комбинированной установки

Если давление за последней ступенью турбины ГТД несколько превышает атмосферное, т. е. составляет 0,102–0,05 МПа, то отсутствует необходимость в специальном нагнетателе и подогревателе воздуха, характерных для ДС, работающих на органических топливах. Идеальный цикл такой установки (рис. 2) формируется объединением цикла ГТД 1-2-3-4-1 с «пристраиваемым» циклом двигателя Стирлинга 4-8-9-5-4. В общем случае этот цикл может быть объединен с ранее рассмотренным циклом 7-4-5-6-7,

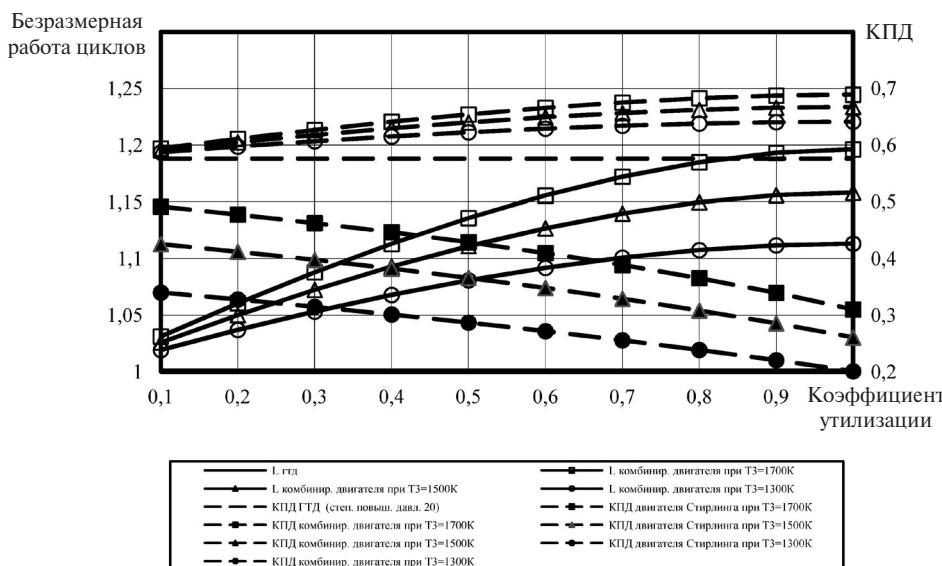


Рис. 3. Работа циклов (отнесена к работе цикла ГТД) и КПД комбинированных установок в зависимости от коэффициента утилизации и параметров исходных циклов. Приняты:  $T_1 = 298\text{ K}$  ( $+25^\circ\text{C}$ ),  $T_5 = 358\text{ K}$  ( $+85^\circ\text{C}$ ),  $\pi = 20$



поэтому подвод теплоты к нагревателям ДС осуществляется в процессе 4-8.

Для цикла 1-2-3-4-8-9-6-7-1 работа определяется как сумма работ базового цикла ГТД, надстраиваемого цикла 7-4-5-6-7 и пристраиваемого цикла 4-7-9-5-4, то есть

$$l_{\text{пп}} = q_{\text{пп}} = \\ = c_p [T_3 - T_2 - T_4 + T_1 + T_8 - T_7 - T_5 \ln(T_8/T_7)]. \quad (3)$$

Отсюда получаем выражение для термического КПД:

$$\eta_t = \frac{l_{\text{пп}}}{q_{23}} = \\ = \frac{T_3 - T_2 - T_4 + T_1 + T_8 - T_7 - T_5 \ln(T_8/T_7)}{T_3 - T_2 + T_8 - T_4}. \quad (4)$$

В этих зависимостях  $T_8$  вычисляется из соотношения  $T_8 = T_4 + v(T_3 - T_4)$ . Коэффициент дополнительного нагрева  $v$  определяет степень подогрева уходящих газов ГТД в дополнительной камере сгорания. При таком сжигании топлива температура газов может быть увеличена до значений, соизмеримых с температурой газа перед первой ступенью турбины ГТД, и даже превышать их ( $v > 1$ ). Очевидно, что работа цикла и мощность при этом возрастают, однако КПД комбинированной установки может быть как выше, так и ниже исходного, поскольку цикл

4-8-9-5-4 является «пристраиваемым» к исходному [6]. На рис. 4 приведены графики для КПД идеальных циклов комбинированных установок в зависимости от коэффициента утилизации  $\mu$  и коэффициента дополнительного нагрева  $v$ . Из них следует вывод, что нагрев при величинах  $v < 0,2-0,4$  приводит к падению КПД комбинированной установки, хотя работа цикла при этом существенно возрастает. Это объясняется сравнительно невысокими конечными температурами  $T_8$  дополнительного цикла 7-8-9-5-7. При значениях  $v > 0,4$  наблюдается медленный рост КПД при интенсивном увеличении работы комбинированного цикла.

Все приведенные расчетные зависимости и результаты получены в предположении реализации идеальных циклов и расчетов цикла Стирлинга как эквивалентного цикла Карно. Для действительных циклов ГТД и ДС значения работы и КПД с учетом внутренних и внешних потерь меньше, но при этом следует учитывать важный фактор, благоприятный для реализации цикла Стирлинга и работы двигателя. В действительных циклах ГТД температура газа за турбиной  $T_4$  значительно выше (на 150–200 К), чем ее расчетные значения для идеальных циклов, что существенно расширяет температурный диапазон работы ДС.

Для количественной оценки возможностей исследуемой установки рассмотрена работа ГТД мощностью 1000 кВт и степенью повышения

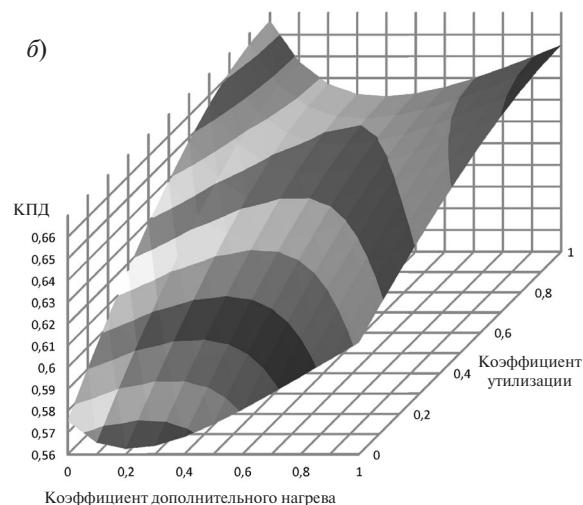
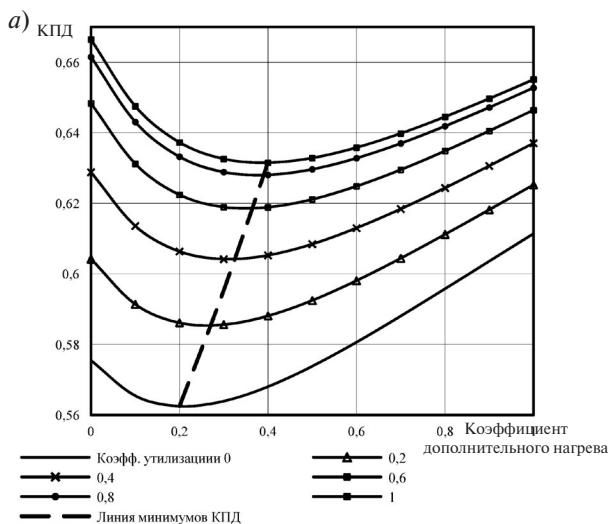


Рис. 4. КПД идеальных циклов комбинированных установок в зависимости от коэффициентов утилизации и дополнительного нагрева при  $T_3 = 1500$  К,  $T_1 = 298$  К(+25 °C),  $T_5 = 358$  К(+85 °C)



давления в компрессоре  $\pi = 20$  с ДС различной мощности. Исследованы варианты: работа ДС только на отводимых газах ГТД (утилизация теплоты); работа установки с дожиганием топлива в дополнительной камере сгорания. При этом принимались различные значения температур газа перед турбиной:  $t_3 = 1027, 1227$  и  $1427$   $^{\circ}\text{C}$  ( $T_3 = 1300, 1500$  и  $1700$  К). Расчеты параметров действительных циклов ГТД по традиционным методикам показали, что температуры  $t_4$  газа за турбиной при этом составляют соответственно  $431, 540$  и  $648$   $^{\circ}\text{C}$ . Температура охладителя ДС принята равной  $85$   $^{\circ}\text{C}$ , что соответствует параметрам систем отвода теплоты и охлаждения двигателей наземного транспорта. Исследования и вычисления параметров двигателей Стирлинга осуществлялись на основе адиабатной модели их циклов методом замкнутой оптимизации [4, 7]. Расчеты проведены с применением программного обеспечения Mathcad14 и C++.

На рис. 5 приведены графические зависимости КПД и мощности двигателей Стирлинга, работающих за счет теплоты отводимых от ГТД газов. Результаты вычислений показали, что при  $t_4 = 431$   $^{\circ}\text{C}$  работа таких двигателей практически невозможна ввиду малой разности температур нагревателя и охладителя. Но уже при  $t_4 = 540$   $^{\circ}\text{C}$  приращение мощности комбинированного двигателя составляет  $\sim 77$  кВт, соответственно КПД возрастает с 0,286 (для ГТД без ДС) до 0,308, как это следует из графиков, приведенных на рис. 5. При температуре газов за турбиной  $t_4 = 648$   $^{\circ}\text{C}$  (это соответствует температуре 1700 К перед турбиной) мощность ДС составляет 159 кВт, что дает увеличение мощности комбинированной установки на 15,9 % без дополнительных затрат топлива. КПД при этом увеличивается до 0,364 при его исходном значении 0,320. Следует отметить, что температура  $T_3 = 1700$  К является практически предельной для современных ГТД, хотя в отдельных авиационных двигателях ее величина (судя по зарубежным источникам) уже превышает 1900 К.

Исследования также показали, что температура охладителя ДС существенно влияет на его мощность и КПД, поскольку отношение температур нагревателя и охладителя сравнительно невелико. С учетом возможности применения предлагаемых комбинированных установок для водного транспорта были выполнены расчеты при температурах охладителя ДС  $+40$   $^{\circ}\text{C}$ , что

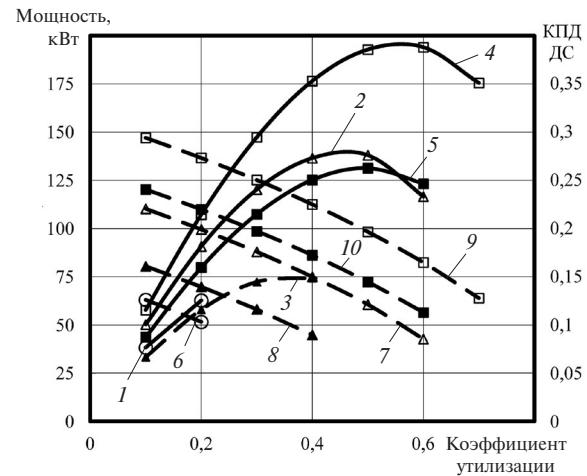


Рис. 5. Мощность (1, 2, 3, 4, 5) и КПД (6, 7, 8, 9, 10) двигателей Стирлинга, работающих на теплоте отводимых газов ГТД, при следующих температурах,  $^{\circ}\text{C}$ , их нагревателя / охладителя:  
431/40 (1, 6); 540/40 (2, 7);  
540/85 (3, 8); 648/40 (4, 9); 648/85 (5, 10)

вполне достижимо при отводе теплоты забортной водой. Оказалось, что для такого варианта отвода теплоты при  $t_4 = 540$   $^{\circ}\text{C}$  приращение мощности комбинированного двигателя составляет 146 кВт, КПД возрастает до 0,328 (см. рис. 5). В предельном варианте из рассмотренных при  $t_4 = 648$   $^{\circ}\text{C}$  мощность ДС достигает 194 кВт, что дает увеличение мощности комбинированной установки почти на 20 %.

Во всех рассмотренных вариантах комбинированных установок КПД ДС при достижении максимальных значений их мощности составляет 0,1–0,2, причем практически во всех случаях графики мощности имеют явные экстремумы, определяющие оптимальные значения коэффициентов утилизации теплоты. Из рис. 6 следует, что их величины лежат в диапазоне 0,4–0,6 в зависимости от температур  $t_4$  и  $t_{\text{охл}}$ .

Для обеспечения передачи теплоты к нагревателям ДС необходим теплообменник. Практика конструирования ГТД с регенерацией [8] показала, что хороший эффект дает размещение трубчатой матрицы на выходе газов из турбины. В этом случае осуществляется передача теплоты к металлическим трубкам при поперечном обтекании трубного пучка. В ГТД с регенерацией теплоты внутри трубок движется и нагревается воздух, сжатый в компрессоре. Для нагревателей ДС такой подвод теплоты

практически неприемлем вследствие высокого давления (до 20 МПа) во внутреннем контуре. Кроме того, внутренний объем нагревателя ДС соизмерим с рабочим объемом его цилиндра [7, 9], поэтому в комбинированной установке такой способ передачи теплоты практически неосуществим. Наиболее приемлема установка промежуточного теплообменного контура с жидкотермическим теплоносителем, как это показано на рис. 1. Это позволяет эффективно передавать теплоту нагревателю ДС при практически неограниченном внутреннем объеме промежуточного теплообменного контура со стороны газового тракта ГТД. С другой стороны этого контура возможно обеспечить необходимые оптимальные внутренние объемы нагревателей ДС. Не следует исключать и вариант передачи теплоты от газов к нагревателям ДС с помощью тепловых труб, если это удается осуществить конструктивно.

Автономную работу такого ДС при выключенном ГТД можно обеспечить путем установки в нем собственной камеры сгорания с подогревателем воздуха, как это выполнено в известных конструкциях [1, 2, 10] (рис. 1, в). При этом режиме работы двигателя возможно увеличить температуру его нагревателей исходя из условий прочности и жаростойкости их деталей, что поз-

воляет повысить мощность в 2,5 раза при его КПД до 0,46.

Расчеты параметров действительных циклов двигателей комбинированной установки показали, что дожигание топлива в дополнительной камере сгорания при  $v > 0,8$ –1 дает возможность повысить мощность установки в 1,5–2 раза с незначительным увеличением КПД, как это следует из зависимостей на рис. 6 для значений коэффициента утилизации 0, 0,2 и 0,4. Из них видно, что, как и для идеальных циклов, при малых значениях коэффициента дополнительного нагрева  $v$  (до 0,4) КПД установки снижается, причем только при  $v \approx 0,7$  этот КПД достигает исходного значения.

В данном случае возможность повышения мощности ДС до величин, соизмеримых с мощностью исходного ГТД, обязательно приведет к увеличению размеров и массы как самого ДС, так и установки в целом. Для практических целей такая конструкция представляется слишком сложной и громоздкой, поскольку в этом случае массогабаритные характеристики комбинированной установки определяются параметрами ДС, а не ГТД. Поэтому для практической реализации наиболее целесообразным остается рассмотренный ранее вариант утилизации теплоты отводимых газов ГТД для работы ДС. Это не

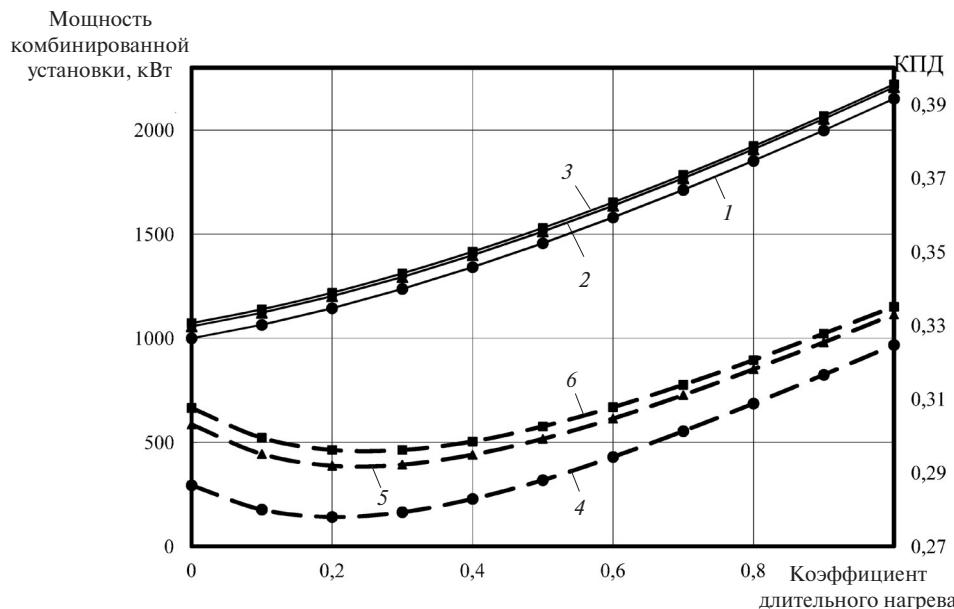


Рис. 6. Мощность (1, 2, 3) и КПД (4, 5, 6) комбинированной установки, использующей сжигание топлива в дополнительной камере сгорания, при коэффициентах утилизации, равных 0 (1, 4); 0,2 (2, 5); 0,4 (3, 6)



требует установки дополнительных камер сгорания и позволяет в то же время повысить как мощность, так и КПД без дополнительной затраты топлива. Для силовых агрегатов водного транспорта такая схема также наиболее приемлема благодаря возможности увеличить мощность в большей степени, чем для наземного транспорта.

### Выводы

1. Использование теплоты уходящих газов ГТД для работы ДС всегда повышает КПД комбинированной силовой установки. Для эффективной работы двигателя Стирлинга температура уходящих газов должна превышать 700 К.

2. Дожигание топлива в продуктах сгорания за турбиной ГТД может как повысить, так и снизить КПД комбинированной установки. Это зависит от степени повышения температуры газов в результате дожигания по отношению к максимальной температуре цикла ГТД.

3. Совместная утилизация теплоты уходящих газов ГТД с дожиганием за турбиной практически всегда увеличивает КПД комбинированной

установки; дожигание с незначительными коэффициентами дополнительного нагрева снижает прирост КПД. Мощность и КПД комбинированной установки в значительной степени определяются температурами в проточной части ГТД.

4. Характеристики комбинированных двигателей в значительной мере зависят от параметров окружающей среды, которые обязательно необходимо учитывать в ходе исследований и конструирования как двигателей Стирлинга, так и установок в целом.

5. Ступенчатый подвод теплоты уходящих газов ГТД к нагревателям многоцилиндровых двигателей Стирлинга и, соответственно, идентичный отвод теплоты в его охладителях обеспечивают наиболее эффективное ее использование при существенном повышении КПД комбинированных двигателей и силовых установок на их базе.

6. Предлагаемые схемы комбинированных двигателей могут быть рекомендованы для применения в силовых установках транспортных средств.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уокер Г. Двигатели Стирлинга / Пер с англ. М.: Машиностроение, 1985. 408 с.
2. Ридер Г., Хупер Г. Двигатели Стирлинга / Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 464 с.
3. Wood G.W., Unger R., Lane N.W. A Stirling-Rankine Fuel-Fired Heat Pump // Proceedings of the 2000 International Compressor Engineering Conference. Purdue University, West Lafayette. July 25–28, 2000. 7 p.
4. Горожанкин С.А. Машины Стирлинга: параметры рабочих процессов. Макеевка: ДонГАСА, 2003. 208 с.
5. Архаров А.М., Афанасьев В.Н. Теплотехника: Учебник для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2011. 792 с.
6. Андрющенко А.И. Основы термодинамики циклов теплоэнергетических установок. М.: Высшая школа, 1985. 319 с.
7. Горожанкин С.А. Определение параметров действительных циклов двигателей Стирлинга на основе их адиабатной модели // «Сучасне промислове та цивільне будівництво». 2006. Т. 2, №4. С. 187–194.
8. Клячкин А.Л. Теория воздушно-реактивных двигателей. М.: Машиностроение, 1969. 512 с.
9. Organ Allan J. Thermodynamics and Gas Dynamics of the Stirling Cycle Machine. Cambridge University Press, 1992. 451 p.
10. Martini W.R. Stirling engine design manual / University of Washington. DOE/NASA/3152–78/1 NASA CR-135382. 04.1978. 370 p.

### REFERENCES

1. Walker G. Dvигатели Стирлинга [Stirling Engines]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1985. 408 p. (rus.)
2. Reader G., Hooper G. Dvигатели Стирлинга [Stirling Engines]. Moscow: Mir, 1986. 464 p. (rus.)
3. Wood G.W., Unger R., Lane N.W. A Stirling-Rankine Fuel-Fired Heat Pump. *Proceedings of the 2000 International Compressor Engineering Conference*. Purdue University, West Lafayette. July 25–28. 2000. 7 p.
4. Gorozhankin S.A. Mashiny Stirlinga: parametry rabochikh protsessov [Stirling Machines: Working Processes' Parameters]. Makeevka: Izd-vo DonGASA, 2003. 208 p.
5. Arkharov A.M., Afanasyev V.N. Teplotekhnika : uchebnik dlya vuzov [Thermotechnics]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2011. 792 p. (rus.)
6. Andryushchenko A.I. Osnovy termodinamiki tsiklov teploenergeticheskikh ustanovok [Thermodynamics' Ba-

sis of Thermal Energy Plant's Cycles]. Moscow: Vyssh. shkola, 1985. 319 s. (rus.)

7. **Gorozhankin S.A.** Opredeleniye parametrov deystvitelnykh tsiklov dvigateley Stirlinga na osnove ikh adiabatnoy modeli [Determination of Stirling Engines' Real Cycle Parameters by it's Adiabatic Model]. *Suchasne promislove ta tsivilne budivnictvo. [Modern Industrial and Civil Engineering]*. 2006. Vol. 2, №4. S. 187–194. (rus.)

8. **Klyachkin A.L.** Teoriya vozdushno-reaktivnykh dvigateley [Theory of Air-reactive Engines]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1969. 512 s. (rus.)

9. **Organ Allan J.** Thermodynamics and Gas Dynamics of the Stirling Cycle Machine. Cambridge University Press, 1992. 451 p.

10. **Martini W.R.** Stirling engine design manual / University of Washington. *DOE/NASA/3152-78/1 NASA CR-135382*. 04.1978. 370 p.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ГОРОЖАНКИН Сергей Андреевич** — доктор технических наук заведующий кафедрой Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 86123, Украина, Донецкая область, Макеевка, ул.Державина, 2. E-mail: gormar52@gmail.com

**САВЕНКОВ Никита Владимирович** — ассистент кафедры Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 86123, Украина, Донецкая область, Макеевка, ул.Державина, 2. E-mail: SavenkovNV@yandex.ru

**ЧУХАРКИН Артем Витальевич** — ассистент кафедры Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 86123, Украина, Донецкая область, Макеевка, ул.Державина, 2. E-mail: piero1978@rambler.ru

## AUTHORS

**GOROZHANKIN Sergei A.** — Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. 2, Derzhavin str., Makivka, Donetsk region, Ukraine, 86123. E-mail: gormar52@gmail.com

**SAVENKOV Nikita V.** — Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. 2, Derzhavin str., Makivka, Donetsk region, Ukraine, 86123. E-mail: SavenkovNV@yandex.ru

**CHUKHARKIN Artiom V.** — Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. 2, Derzhavin str., Makivka, Donetsk region, Ukraine, 86123. E-mail: piero1978@rambler.ru

DOI 10.5862/JEST.219.8

УДК 62-614

А.И. Епихин

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ И ОСОБЕННОСТИ СЖИГАНИЯ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

A.I. Epikhin

## TECHNOLOGICAL LIMITATIONS AND FEATURES OF BURNING COAL-WATER SLURRY FUELS IN SHIP POWER PLANTS

Дан анализ возможностей использования водоугольного топлива (ВУТ) вместо топочного мазута и тяжелого моторного топлива для судовых энергетических установок. Рассмотрены особенности сжигания водоугольного топлива в судовых энергетических установках. Проанализированы особенности технологического процесса, связанные с удалением продуктов сгорания ВУТ. Рассмотрены экологические параметры замены топлива. Использование ВУТ имеет перспективный экономический эффект, поскольку стоимость ВУТ в пересчете на его энергопроизводительность значительно более низкая в сравнении с мазутом и дизельным топливом; кроме того, существенны экологические преимущества.

ВОДОУГОЛЬНОЕ ТОПЛИВО; ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА; ПОЛНОТА ВЫГОРАНИЯ; ЗОЛА; ТОПЛИВНАЯ СИСТЕМА; ФОРСУНКА.

The aim of the article is to analyze the possibilities of using coal-water fuel (CWF) instead of residual fuel oil and heavy fuel for ship power plants. The article is dedicated to reviewing the particular features of coal-water fuel burning in ship power plants instead of classically used fuel oil and diesel. There were analyzed the features of the technological process, related to the removal of combustion products. Moreover, the environmental aspects of the new fuel usage were analyzed. The use of CWF has a promising economic effect, because the cost of fuel in terms of its energy performance is significantly lower in comparison with fuel oil and diesel fuel, and also has significant environmental benefits.

COAL-WATER FUEL; POWER PROPERTIES; COMPLETENESS OF BURNOUT; CINDER; FUEL SYSTEM; INJECTOR.

### Введение

Вопрос применения водоугольного топлива (ВУТ) в судовых энергетических установках имеет двойственный характер, поскольку ВУТ по совокупности свойств потенциально способно заменить собой не только мазут для вспомогательных котлоагрегатов, но и тяжелое моторное топливо для ДВС. При любом применении топлива наиболее важными параметрами являются теплотворная способность и удаление продуктов сгорания. Цель работы — анализ возможностей использования водоугольного топлива вместо топочного ма-

зута и тяжелого моторного топлива для судовых энергетических установок (СЭУ).

### Энергетические характеристики ВУТ в сравнении с флотским мазутом и тяжелым моторным топливом

Анализ экспериментальных данных по лабораторному сжиганию различных видов водоугольного топлива установил, что средний показатель удельной теплоты сгорания для ВУТ в зависимости от массовой доли угля и его гранулометрического состава, находится в пределах 16750.–20300 кДж/кг. Аналогичные показатели

для дизельного топлива существенно выше — порядка 43100 кДж/кг, для флотских мазутов Ф-5 и Ф-12 — в пределах 40200–41050 кДж/кг, для топлива сортов СЛ, СВ, М — в диапазоне 41450–42300 кДж/кг [1–4]. Таким образом, для водоугольных суспензий основной энергетический показатель в два с лишним раза ниже, но при этом существует ряд технико-экономических, экологических и технологических факторов, позволяющих говорить о потенциальной целесообразности их применения вместо традиционно используемых топлив.

### **Вопросы технико-экономической целесообразности замены традиционно использующихся видов судового топлива на ВУТ**

Эти вопросы затрагиваются в рамках многих исследований, но большая их часть носит узко-направленный характер в силу применяемости к одному конкретному агрегату, либо использования одного вида сырья для приготовления ВУТ.

В исследовании [8] проанализирована практика применения ВУТ как в различных видах теплоэнергетического оборудования, так и в двигателях внутреннего сгорания. Выводы, сформулированные авторами по результатам, представляются весьма интересными в контексте настоящей работы, поскольку носят критический характер: ВУТ целесообразно использовать не только как замену топочному мазуту, но и как тяжелое топливо для низкооборотных двигателей внутреннего сгорания, поскольку при этом снимается ряд вопросов, связанных с утилизацией избыточной теплоты сгорания, ввиду конденсации водяных паров непосредственно в двигателе.

Отдельно следует отметить экономический аспект использования ВУТ: несмотря на невысокие энергетические показатели, отношение его стоимости к теплотворной способности в три и более раз выше, чем у распространенных тяжелых моторных топлив и флотских мазутов [5, 13].

С позиций экологии целесообразно также провести сравнительный анализ характеристик ВУТ с аналогичными показателями традиционно использующихся видов топлива, при этом следует рассмотреть не только процесс рабочего

сжигания топлива, но и процессы, связанные с его добычей, производством и транспортированием, оказывающие комплексное влияние на состояние окружающей среды.

Очевидно, что с позиций экологии наименьший вред приносит использование газа, ввиду чего исключаем его из анализа. Дизельное топливо оказывает существенное воздействие на атмосферу, поскольку при его сгорании выделяются сажа, оксид азота, оксид углерода, а также сернистый ангидрид. Процессы добычи, переработки и транспортировки дизельного топлива не оказывают существенного воздействия на окружающую среду.

Мазут как топливо для сжигания является достаточно неблагоприятным для окружающей среды веществом, поскольку при его сжигании выделяются те же вещества, что и в случае дизельного топлива, но в большем количестве, а также многоядерные ароматические углеводороды, такие, как бензапирен и прочие высокомолекулярные углеводороды, представляющие собой сильные канцерогенные вещества [4].

Использование ВУТ позволяет добиться снижения газообразных выбросов в сравнении с мазутом примерно на 25 % (по данным Института Пенсильвании). Снижение выбросов оксида азота в сравнении с мазутом оказывается не менее 30 %; практически исключается выброс серы. Также отсутствуют опасные высокомолекулярные соединения [5, 7].

**Особенности сжигания ВУТ** как нового топлива для энергетических установок в сравнении с известными видами топлив определяются в значительной степени конструкцией существующих форсуночных устройств, которые не обеспечивают диспергирование жидкого топлива на уровень меньше 100 мкм. В случае использования водоугольного топлива с эмульсионной водной фазой, например в капле эмульсии порядка 1–5 мкм, сошедшей с форсуночного устройства, содержится несколько тысяч микрокапель воды. В исследованиях, проведенных с эмульсиями на основе мазута, показано, что в высокотемпературной зоне топочной камеры капля эмульсии взрывается, и происходит вторичное диспергирование топлива, интенсификация процессов тепломассообмена и активизация химических процессов горения за счет ускоренного поступления окислителя из продуктов раз-



ложения микрокапель воды. Этот эффект особенно важен при сжигании ВУТ в тепловых двигателях, так как в этом случае обеспечивается максимальное выгорание топлива при малом времени пребывания в активной зоне горения [9].

На сегодняшний день практически неизвестны исследования, посвященные вопросам изучения особенностей использования водоугольных суспензий в качестве альтернативы традиционным видам топлива в двигателях внутреннего сгорания. Данный научно-практический пробел имеет очевидное объяснение: используемые и широко исследованные виды ВУТ обладают рядом недостатков, определяемых их физико-химическими и технологическим свойствами, которые требуют внесения значительных конструктивных изменений как в рабочую часть ДВС, так и практически во все вспомогательные системы; при этом КПД силовых агрегатов неизбежно снизится [7, 12].

**Использование ВУТ в судовых вспомогательных энергетических установках** в составе которых встречаются котлоагрегаты, работающие на мазуте, ограничено сегодня, в первую очередь, из-за меньшей теплотворной способности в сравнении с мазутом, различия же в остальных характеристиках данных видов топлива не имеют существенного значения ни в техническом, ни в экономическом плане.

Перевод судовых энергетических установок с дизельного на водоугольное топливо требует комплексного решения ряда технических и технологических вопросов, в числе которых:

достижение энергетических свойств ВУТ, аналогичных традиционному топливу;

обеспечение требуемых физических, реологических и седиментационных свойств ВУТ.

Учитывая, что существенное повышение удельной теплотворной способности на практике вряд ли возможно, можно пойти по пути увеличения массового расхода топлива и окислителя при сжигании, что не требует дополнительных исследований.

Обеспечение физических, реологических и седиментационных свойств водоугольных суспензий возможно посредством внесения изменений в состав и технологию его приготовления, что было подтверждено в ряде экспериментов [8, 9, 11, 13].

**Использование ВУТ вместо тяжелого моторного топлива** связано, в первую очередь, с более высокий уровнем зольности ВУТ по сравнению с другими видами топлива, ввиду чего требуется дополнительный анализ технологического процесса удаления продуктов сгорания. Вопрос удаления продуктов сгорания при использовании водоугольных суспензий в ДВС, по мнению ряда исследователей [6], является разрешимым в случае применения более современных видов ВУТ, поскольку при их сгорании практически не остается твердого остатка (золы), ввиду чего вопрос улавливания твердых частиц (сажи, золы) может быть частично или полностью снят без значительных конструктивных изменений в энергетических установках и их вспомогательных системах.

**Проблемы перехода на ВУТ** связаны с необходимостью реализации ряда дополнительных конструктивных и технологических мероприятий, направленных как на внесение изменений в конструкции топливных систем энергетических установок и изменение параметров технологического процесса, так и на оптимизацию структуры и состава водоугольных суспензий с целью обеспечения требуемых физико-химических параметров.

Реализация данных мероприятий требует значительных материальных затрат на соответствующие исследования и конструктивно-технологические разработки. Следует отметить фактическое отсутствие производственной и транспортировочной инфраструктуры для нового вида топлива.

**Перспективы практической реализации** внедрения ВУТ для использования в судовых энергетических установках определяются экономическими и экологическими соображениями, поскольку энергетические показатели ВУТ, приведенные к его стоимости, предполагают валовую экономию в 50–65 % на топливных затратах при более низком уровне выброса вредных веществ [6].

В рамках научного поиска было обнаружено несколько частных решений вышеперечисленных проблем внедрения ВУТ. Наиболее интересно с практической точки зрения в контексте настоящего исследования применение паропневматических форсунок для суспензий, содержащих абразивные включения, разработанных

компанией «Альматеа» [8]. Вопросам усовершенствования реологических и седиментационных свойств водоугольного топлива посвящено немало современных научных трудов, имеющих хорошие с практической точки зрения результаты.

Следует отметить возможность использования новых видов ВУТ, таких, как ультрадисперсное водоугольное топливо, характеризующееся более высокой степенью сгорания, что позволит упростить задачу отвода продуктов сгорания из ДВС ввиду меньшего уровня зольности.

### Выводы

Применение водоугольного топлива вместо традиционно использующихся в судовых энергетических установках мазута и дизельного топлива представляет собой достаточно сложную организационно-техническую задачу, посколь-

ку для этого требуются не только модернизация соответствующих топливных систем и режимов работы СЭУ, но и организация производства нового топлива со всей соответствующей логистической цепочкой. При этом следует отметить перспективный экономический эффект, поскольку стоимость ВУТ в пересчете на его энергопроизводительность значительно более низкая в сравнении с мазутом и дизельным топливом; кроме этого, существенны экологические преимущества. Практическая реализация идеи использования ВУТ взамен традиционных видов судового топлива связана с решением ряда технических и технологических вопросов, основными из которых являются удаление продуктов сгорания и обеспечение диспергирования топлива в камерах сгорания, что при использовании последних разработок потенциально возможно.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грибиниченко М.В. Судовые энергетические установки. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2010.
2. Овсянников М.К., Петухов В.А. Судовые автоматизированные энергетические установки. М., Транспорт, 1989.
3. Зайденваг Б.Е., Трубецкой К.Н., Мурко В.И., Нехороший И.Х. Производство и использование водоугольного топлива. М.: Академия горных наук, 2001.
4. Морозов А.Г., Мосин С.И., Мурко В.И. ВУТ в теплоэнергетике // Энергия: экономика, техника, экология. 2007, № 4, с. 29–33.
5. Делягин Г.Н., Корнилов В.В., Кузнецов Ю.Д., Чернегов Ю.А. Совершенствование водоугольного топлива и перспектива его применения // Приложение к научно-техническому журналу «Экономика топливноэнергетического комплекса России». М., ВНИИОЭНГ, 1993.
6. Волков Н.А. Перспективы промышленного использования и трубопроводного транспортирования водоугольного топлива. М.: Спутник+, 2010.
7. Мурко В.И., Федяев В.А., Хамляйнен В.А. Физико-технические основы водоугольного топлива. Кемерово: «Кузбассвузиздат», 2009.
8. Леонов А.М., Данилов О.С. Обоснование возможности эффективного использования водоугольных суспензий в котлах средней и малой мощности // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) / 2009. Вып. 12, Т. 10. С. 409–416.
9. Приготовление и сжигание водоугольного топлива в различных топочных устройствах / А.И. Цепенюк, С.В. Луценко, Ф.А. Серант, Е.Г. Карпов // Материалы международной конференции по теплоэнергетике и ее устойчивому развитию. г. Улгевик, Республика Сербская, Босния и Герцеговина. 2010. С. 61–66.
10. Теплотехника / Под ред. Луканина В.Н. М.: Высшая школа, 2003.
11. Мурко В.И., Федяев В.И., Дзюба Д.А., Сейтель В.Я., Столяров Н.А. Опыт использования водоугольного топлива // Новости теплоснабжения, 2006. №4(68), с. 31–36.
12. Листратов И.В., Делягин Г.Н., Кондратьев А.С., Сараф Б.А. Опыт промышленного внедрения чистой угольной технологии кипящего слоя на водоугольном топливе // Новости теплоснабжения, 2005, №5(49), с. 26–29.

## REFERENCES

1. **Gribinichenko M.V.** Sudovyye energeticheskiye ustanovki [Vessel's power units]. Vladivostok: Izd-vo DVGTU, 2010. (rus.)
2. **Ovsyannikov M.K., Petukhov V.A.** Sudovyye avtomatizirovannyye energeticheskiye ustanovki [Automatic vessel's power units]. M.: Transport, 1989. (rus.)
3. **Zaydenvarg V.Ye., Trubetskoy K.N., Murko V.I., Nekhoroshiy I.Kh.** Proizvodstvo i ispolzovaniye vodou-golnogo topliva [The production and usage of coal-water flurry fuels]. M.; Akademiya gornykh nauk, 2001. (rus.)
4. **Morozov A.G., Mosin S.I., Murko V.I.** VUT v teploenergetike [CWS in heat supply]. *Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya*. 2007. № 4. S. 29–33. (rus.)
5. **Delyagin G.N., Kornilov V.V., Kuznetsov Yu.D., Chernegov Yu.A.** Sovershenstvovaniye vodougolnogo topliva i perspektiva yego primeneniya [The enhancement of coal-water flurry fuels and the perspectives of its usage]. *Prilozheniya k nauchno-tehnicheskemu zhurnalu «Ekonomika toplivnoenergeticheskogo kompleksa Rossii»*. M.: VNIIOENG, 1993. (rus.)
6. **Volkov N.A.** Perspektivy promyshlennogo ispolzovaniya i truboprovodnogo transportirovaniya vodougolnogo topliva [The perspectives of industrial usage and pipeline transportation of coal-water flurry fuels]. M.: Sputnik+, 2010. (rus.)
7. **Murko V.I., Fedyayev V.A., Khamlyaynen V.A.** Fiziko-tehnicheskiye osnovy vodougolnogo topliva [The physical and technical basics of coal-water flurry fuels]. Kemerovo: «Kuzbassvuzizdat», 2009. (rus.)
8. **Leonov A.M., Danilov O.S.** Obosnovaniye voz-mozhnosti effektivnogo ispolzovaniya vodougolnykh suspenziy v kotlakh sredney i maloy moshchnosti [Rationale opportunities for efficient use of coal-water suspensions in the boilers of medium and low power]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tehnicheskiy zhurnal)* 2009. Vyp. 12, T. 10. (rus.)
9. Prigotovleniye i szhiganiye vodougolnogo topliva v razlichnykh topochnykh ustroystvakh [Preparation and combustion of coal-water fuel in various combustion devices]/ A.I. Tsepenyuk, S.V. Lutsenko, F.A. Serant, Ye.G. Karpov. *Materialy mezhdunarodnoy konferentsii po teploenergetike i yeye ustoychivomu razvitiyu*. g. Uglzhevik, Respublika Serbskaya, Bosniya i Gertsegovina. 2010. S. 61–66. (rus.)
10. Teplotekhnika [Heat-technics] / Pod red. Lukanina V.N. M.: Vysshaya shkola, 2003. (rus.)
11. **Murko V.I., Fedyayev V.I., Dzyuba D.A., Seybel V.Ya., Stolyarov N.A.** Opty ispolzovaniya vodougolnogo topliva [Experience in the use of coal-water fuel]. *Novosti teplosnabzheniya*. 2006. №4(68). S. 31–36. (rus.)
12. **Listratov I.V., Delyagin G.N., Kondratyev A.S., Saraf B.A.** Opty promyshlennogo vnedreniya chistoy uglo-nyoy tekhnologii kipyashchego sloya na vodougolnom toplive [Experience in industrial implementation of clean coal fluidized bed technology for coal-water fuel]. *Novosti teplosnabzheniya*, 2005. №5(49). S. 26–29. (rus.)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**ЕПИХИН Алексей Иванович** — кандидат технических наук доцент Государственного морского университета имени адмирала Ф.Ф. Ушакова. 353918, Россия, Краснодарский край, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93. E-mail: a.epikhin@inbox.ru

## AUTHOR

**EPIKHIN Aleksei I.** — Admiral Ushakov Maritime State University. 93 Linin av., Novorossiysk, Krasnodar reg., Russia, 353918. E-mail: a.epikhin@inbox.ru

DOI 10.5862/JEST.219.9

УДК 620.9

*С.В. Жавроцкий, А.С. Стребков, А.В. Осипов*

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УТИЛИЗАЦИИ ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ ТОПЛИВНОГО ГАЗА В ДВУХСТУПЕНЧАТОМ ДЕТАНДЕРЕ**

*S.V. Zhavrockij, A.S. Strebkov, A.V. Osipov*

### **INPROVING THE EFFICIENCY UTILIZATION OF FUEL GAS EXCESS PRESSURE IN TWO-STAGE EXPANDER**

Выполнена оценка энергетической эффективности использования силового потенциала топливного газа при применении последовательно-параллельной схемы работы цилиндров детандер-генераторного агрегата, работающего в составе двухцилиндровой утилизационной турбодетандерной установки. Показано, что путем переключения с параллельной схемы работы установки на последовательную при определенных условиях достигается дополнительная выработка электрической энергии и, таким образом, более полное использование энергии избыточного давления газа.

ТУРБОДЕТАНДЕРНЫЙ АГРЕГАТ; ПЕРЕМЕННЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ; ДРОССЕЛИРОВАНИЕ; ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ; ТОПЛИВНЫЙ ГАЗ; ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ; ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО-ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ СХЕМА.

The study considers the feasibility of applying the expander-generating units for the electric energy production instead of throttle pressure regulators. The research shows the importance of the influence of the operating parameters of the gas supply system and their changes in the electric energy quantitative estimation produced by the expander-generator unit. Such parameters are gas pressure in the supply pipeline and a gas flow rate through the expander. The study shows that the regulation of the expander-generator unit is provided in varying degrees of throttling the gas flow while reducing gas consumption. Periodic changes of pressure in the main gas pipeline and the gas flow result in the need to use the throttle gas regulator in front of the expander. Consequently, this fact reduces the efficiency of the expander-generator unit installed on gas-distributing stations or gas control point. The proposed series and parallel two-cylinder utilization expander unit provides the ability to limit the throttling process in the regulation of plant operation. As a result, this allows increasing the electric energy production and making a better use of the energy of excess gas pressure. Among the benefits of this study, by switching from a parallel circuit to a series circuit, there are additional electric energy generation and better utilization of energy excess gas pressure which are achieved under certain conditions.

TURBOEXPANDER UNIT; VARIABLE MODE; THROTTLE RESPONSE; ENERGY EFFICIENCY; FUEL GAS; ELECTRIC ENERGY PRODUCTION; SERIES AND PARALLEL CIRCUIT.

#### **Введение**

Система магистрального трубопроводного транспорта топливного газа обладает значительным энергетическим потенциалом, который обусловлен высокими уровнями расхода и давления газа. Соотношение давлений газа в магистральных газопроводах на входе в газо-

распределительные станции (ГРС) и газорегуляторные пункты (ГРП) и на выходе из них, качественно определяющее величину силового потенциала топливного газа, может достигать 5–10. Энергия избыточного давления потока топливного газа диссирируется в клапанах дроссельных регуляторов, установленных в пунктах снижения давления газа, без совершения по-

лезней работы. Альтернативой дроссельным регуляторам давления может служить детандер-генераторный агрегат (ДГА) турбинного типа, в котором процесс расширения газового потока сопровождается производством электроэнергии.

Исследования и разработки детандер-генераторных агрегатов и научно-технические решения, связанные с полезным использованием силового потенциала топливного газа, достаточно отражены в отечественной и зарубежной литературе. В работе [1] речь идет об исследовании термодинамической эффективности использования утилизационных турбодетандерных установок (УТДУ), преобразующих энергию избыточного давления транспортируемого природного газа в электрическую энергию, и полезного эффекта в виде экономии топлива, возникающего при комбинированном производстве электроэнергии традиционными источниками и турбодетандерными агрегатами. Ряд работ посвящен оценке влияния УТДУ на экономичность тепловых электростанций. Исследуется влияние включения детандер-генераторных агрегатов в тепловые схемы КЭС и ТЭЦ [2, 3]. Большое внимание исследователей сконцентрировано на вопросах, связанных с определением наиболее эффективных способов подогрева газа в УТДУ. Подогрев газа производится за счет следующего: теплоты сетевой воды; отборного пара; теплоты отходящих газов; теплоты, вырабатываемой автономным водогрейным котлом; теплоты, получаемой в конденсаторе теплонасосной установки; вторичных тепловых энергетических ресурсов; возобновляемых источников энергии [4–16]. В работах [17–24] приводятся принципиальные схемы детандер-генераторных агрегатов и энергетических установок, тепловые схемы которых включают в себя ДГА.

В упомянутых работах не были затронуты или оказались недостаточно освещенными вопросы оценки энергетической эффективности работы УТДУ в условиях сезонных изменений режимов системы газоснабжения. Между тем количество произведенной ДГА электрической энергии и, как следствие, полнота утилизации силового потенциала топливного газа, а также энергетическая эффективность ДГА в значительной степени зависят от режима работы системы газоснабжения, по которой топливный газ

транспортируется потребителю [25–27]. В условиях изменяющихся расходов газа через ГРС или ГРП и нестабильного давления в питающем магистральном газопроводе режим работы ДГА может значительно отклоняться от оптимального, что сопровождается снижением внутреннего перепада энталпий и выработки электроэнергии. Как показано в [25], работа одноцилиндрового ДГА в составе УТДУ на режимах с относительно малыми расходами газа через проточную часть турбодетандера не обеспечивает максимальной выработки электроэнергии, так как снижение расхода газа влечет за собой неизбежное падение внутреннего перепада энталпий из-за необходимости использовать дросселирование потока газа перед турбодетандером.

Существенное влияние на энергетическую эффективность производства электроэнергии УТДУ оказывает ее конфигурация. Известны различные схемы компоновки ДГА, предусматривающие работу агрегата как по параллельной схеме, так и по последовательной [28–30]. В этих работах не обсуждается эффективность функционирования ДГА на переменных режимах его работы, а следовательно, из поля зрения выпадает вопрос о достижении максимальной выработки электроэнергии ДГА.

В условиях изменения расхода газа через агрегат и наличия периодических изменений уровня давления в питающем магистральном газопроводе, к которому подключен детандер, происходит значительное снижение выработки электроэнергии на переменных режимах работы агрегата. Особенно это актуально в ситуации, когда имеет место сочетание относительно низких расходов газа через детандер и относительно высоких давлений газа на входе в детандер. Причина снижения эффективности ДГА турбинного типа на режимах его работы с малыми расходами газа заключается в необходимости дросселирования потока газа перед детандером, что в известной мере обесценивает саму идею замещения дроссельного регулятора детандер-генераторным агрегатом.

В работе [31] была исследована схема генерации электроэнергии в двухцилиндровой УТДУ с параллельной схемой работы цилиндров. Показано, что на некоторых переменных режимах работы установки удается несколько повысить ее мощность и выработку ею электроэнергии по

сравнению с одноцилиндровой установкой, что достигается за счет редуцирования не всего потока газа, а лишь его меньшей части. Однако при значительном сокращении расхода газа через УТДУ приходится использовать дросселирование по обоим потокам газа, направляемым в цилиндры ДГА, а значит, и параллельная компоновка не позволяет избежать падения суммарной выработки электроэнергии.

Целью нашей работы является проверка гипотезы о целесообразности замещения дроссельного регулятора дополнительным цилиндром турбодетандера. Основания для данной гипотезы дают периодические изменения давления в питающем магистральном газопроводе в сочетании необходимости применять дросселирование на частичных режимах работы ДГА. Дополнительный цилиндр будет работать за время эксплуатации лишь эпизодически, а между тем наличие третьего цилиндра усложнит и удорожит конструкцию установки. Проблема может быть решена, если от параллельной компоновки цилиндров перейти к последовательной. В этом случае малозагруженный по расходу газа цилиндр ДГА, давление перед которым значительно снижено дроссельным регулятором, предвключается последовательно с основным цилиндром таким образом, что весь расход газа (сокращенный от номинального) проходит через оба цилиндра ДГА. Таким образом, в настоящей работе предлагается последовательно-параллельная схема ДГА, которая до известной степени позволяет ограничить применение дросселирования при регулировании мощности установки. Цилиндры ДГА работают по параллельной схеме на режимах, характеризующихся относительно большими расходами газа через установку. Последовательное же включение цилиндров используется в условиях относительно малых расходов, когда имеется достаточно высокое давление газа в питающем газопроводе, чтобы обеспечить этот расход через оба цилиндра ДГА.

### Схема турбодетандерной установки и ее рабочие параметры

На рис. 1 представлена принципиальная схема предлагаемой установки.

При работе УТДУ по параллельной схеме на режимах с большим потреблением газа общий газ, проходящий через ГРС, разделяется на два параллельных потока, каждый из которых после

предварительного подогрева в теплообменниках 3 и 4 поступает в цилиндры 1 и 2 детандера. Дроссельные регуляторы давления газа 5 и 6 поддерживают на заданном уровне давление газа на выходе цилиндров детандера. Для организации параллельной работы цилиндров детандера задвижка 7 открывается, а задвижка 8 закрывается. Таким образом, поток газа с заданным давлением поступает в газопровод сниженного давления 9, следя к потребителю.

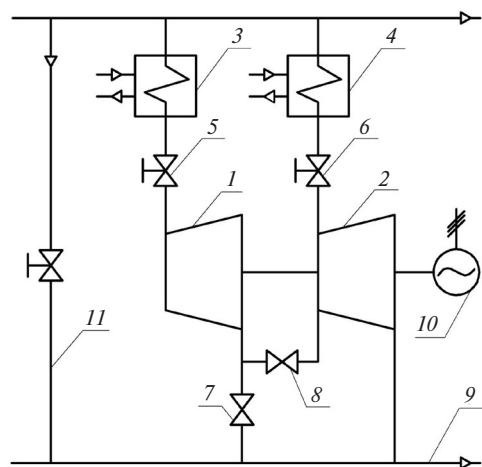


Рис. 1. УТДУ с последовательно-параллельной схемой работы цилиндров:  
1 — регулирующий цилиндр; 2 — основной цилиндр;  
3, 4 — подогреватели газа; 5, 6 — дроссельные регуляторы давления газа; 7, 8 — задвижки;  
9 — газопровод сниженного давления газа; 10 — электрогенератор; 11 — байпасная линия (ГРС)

При последовательной работе цилиндров 1 и 2 детандера на режимах сниженного потребления газа поток топливного газа из газопровода высокого давления, предварительно подогретый в теплообменнике 3, направляется сначала в цилиндр 1, а затем по промежуточному трубопроводу в цилиндр 2 и далее в газопровод сниженного давления 9. Поддержание заданного давления на выходе УТДУ обеспечивается дроссельным регулятором давления 5. Организация последовательной работы цилиндров детандера обеспечивается открытием задвижки 8, закрытием задвижки 7, при этом газопровод с подогревателем 4 закрывается с помощью запорной арматуры (на схеме не показана).

Подогретый газ расширяется в цилиндрах детандера с совершением механической работы, которая в электрогенераторе 10 преобразуется в электрическую энергию, отдаваемую в электри-



ческую сеть. Установка включается параллельно с байпасной линией 11 снижения давления газа.

При проведении расчетов, как и в работе [31], было принято, что номинальному режиму каждого из двух цилиндров ДГА соответствует расход газа, равный 25625 нм<sup>3</sup>/ч. При параллельной схеме работы цилиндр 2 (см. рис. 1) принят базовым, он работает с возможно более полным расходом газа, а цилиндр 1 — регулирующим с минимальным расходом в 40 % от номинального значения. Данное ограничение по расходу газа в цилиндр ДГА обусловлено необходимостью его вентиляции и исключения перегрева элементов конструкции цилиндра. Таким образом, снижение расхода газа через УТДУ производится за счет изменения его пропуска сначала только через регулирующий цилиндр, а затем, по мере дальнейшего снижения расхода, за счет сокращения пропуска газа в базовый цилиндр при постоянном (минимальном) расходе газа в регулирующий цилиндр. При последовательной схеме поток газа поочередно следует в цилиндр 1, затем в цилиндр 2.

Балансовые расчеты переменных режимов работы УТДУ выполнялись на основе модели [25, 32], базирующейся на уравнении Стодолы — Флюгеля для определения относительного расхода газа в цилиндры ДГА и методике определения термодинамических свойств метана. Вычисления относительного расхода газа через турбодетандер на переменных режимах его работы производились по выражению [33]

$$\bar{G} = \sqrt{\frac{T_{1H}}{T_1}} \sqrt{\frac{P_1^2 - P_2^2}{P_{1H}^2 - P_{2H}^2}},$$

где  $\bar{G}$  — относительный расход газа через цилиндр турбодетандера;  $P_{1H}$ ,  $P_{2H}$ ,  $T_{1H}$  — соответственно номинальные начальное и конечное давления и начальная температура;  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $T_1$  — те же параметры на переменных режимах. Для оценки электрической мощности УТДУ использовалось выражение

$$N = G_h \bar{G} \Delta h_0 \eta_{oi} \eta_{em},$$

где  $N$  — электрическая мощность установки, кВт;  $G_h$  — массовый расход газа, кг/с;  $\Delta h_0$  — изоэнтропийный перепад энталпий, кДж/кг;  $\eta_{oi}$  — относительный внутренний КПД;  $\eta_{em}$  — электромеханический КПД. Согласно методике

[32] расчет энталпии и энтропии газа производился в зависимости от его давления и температуры с учетом коэффициента сжимаемости и поправок на отклонение от идеально-газового состояния.

Выражения для определения фактора сжимаемости, энталпии, кДж/кг, и энтропии, кДж/(кг·К), метана соответственно имеют вид

$$z = 1 + A_0;$$

$$h = h_0 + RTA_3;$$

$$s = s_0 - \frac{R}{10^3} \left[ \ln \frac{p}{zp_{ct}} - A_4 \right],$$

где  $p_{ct} = 0,101324$  МПа,  $p$  — в МПа.

Формула для расчета энталпии метана в идеально-газовом состоянии, кДж/кг:

$$h_0 = 572,6 + \frac{R}{10^3} \left[ \sum_{j=0}^{10} \frac{\alpha_j (T^{j+1} - 100^{j+1})}{(j+1)100^j} + \right. \\ \left. + \left( 100\beta_1 (\ln T - \ln 100) + \right. \right. \\ \left. \left. + \sum_{j=2}^6 \beta_j \frac{100^j}{j-1} \left( \frac{1}{100^{j-1}} - \frac{1}{T^{j-1}} \right) \right) + 398,23 \right].$$

Формула для расчета энтропии метана в идеально-газовом состоянии, кДж/(кг·К):

$$s_0 = \frac{R}{10^3} \left[ \left( \alpha_0 (\ln T - \ln 100) + \sum_{j=1}^{10} \frac{\alpha_j}{100^j} \cdot \frac{T^j - 100^j}{j} \right) - \right. \\ \left. - \sum_{j=1}^6 \beta_j \frac{100^j}{j} \left( \frac{1}{T^j} - \frac{1}{100^j} \right) + 17,9779 \right].$$

В этих выражениях коэффициенты  $A_0$ ,  $A_3$  и  $A_4$  выражаются формулами

$$A_0 = \sum_{i=1}^{10} \sum_{j=0}^{S_i} b_{ij} \frac{\omega^i}{\tau^j}; \quad A_3 = \sum_{i=1}^{10} \sum_{j=0}^{S_i} \frac{i+j}{i} b_{ij} \frac{\omega^i}{\tau^j};$$

$$A_4 = \sum_{i=1}^{10} \sum_{j=0}^{S_i} \frac{j-1}{i} b_{ij} \frac{\omega^i}{\tau^j},$$

содержащими приведенные плотности  $\omega$  и температуры  $\tau$ , а также эмпирическими коэффи-



циентами  $b$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  методики [32] с соответствующими индексами:

$$\omega = \frac{\rho}{\rho_{kp}}, \text{ где } \rho_{kp} = 163,5 \text{ кг/м}^3;$$

$$\tau = \frac{T}{T_{kp}}, \text{ где } T_{kp} = 190,77 \text{ К};$$

$$\rho = \frac{p}{zRT}, \text{ где } R = 518,271 \text{ Дж/(кг·К).}$$

Вычисления производились с соблюдением следующих условий: для каждого из цилиндров ДГА номинальные начальное и конечное давления, номинальная начальная температура имели соответственно значения  $P_{1h} = 3,5 \text{ МПа}$ ,  $P_{2h} = 0,5 \text{ МПа}$ ,  $T_{1h} = 391,4 \text{ К}$ ; номинальный внутренний относительный КПД  $\eta_{oi}^h = 0,8$ ; условие полной экологичности работы УТДУ — на выходе установки температура газа на всех переменных режимах составляет  $+5^\circ\text{C}$ .

### Верификация эффективности предложенной схемы УТДУ

На сезонные циклы изменения давления и потребления газа (если еще учесть, что на них накладываются календарные и суточные изменения) действует множество факторов. Чтобы

верифицировать гипотезу наличия полезного эффекта от использования последовательно-параллельной схемы УТДУ, были просчитаны две крайние условные ситуации амплитудно-фазового асинхронизма расходов газа и давления в магистральном газопроводе, который может приводить к появлению случаев, когда амплитуды давления газа в магистральном газопроводе и его расхода могут совпадать или не совпадать по времени.

На рис. 2 показаны графики годового потребления газа потребителями, подключенными к ГРС, снабженной УТДУ, и периодические изменения уровня давления газа в питающем магистральном газопроводе.

Условию «А» соответствует режим работы системы газоснабжения, при котором, с одной стороны, пик потребления газа по времени примерно соответствует появлению максимального давления газа в магистральном газопроводе; с другой стороны, минимальные расходы газа через ГРС соответствуют минимальным давлениям газа в питающем газопроводе, рост и снижение обоих этих параметров происходит более или менее синхронно. Условие «Б» является собой зеркальную противоположность условию «А». В этом случае наблюдается диаметральное расхождение максимумов и минимумов потребления

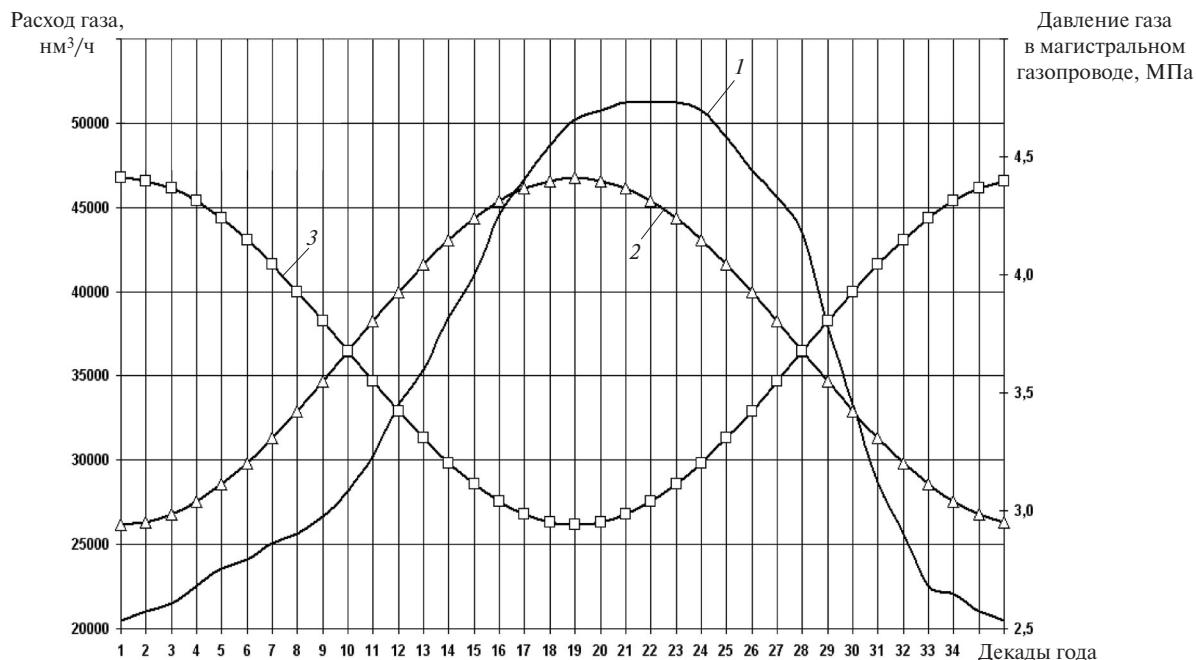


Рис. 2. Расход газа через ГРС (1) в течение года и периодические изменения уровня давления (2 — при условии А; 3 — при условии Б) в магистральном газопроводе

газа и его давления в магистральном питающем газопроводе. На основе данных рис. 1 построены графики выработки электроэнергии УТДУ, представленные на рис. 3 и 4.

В таблице показана выработка электроэнергии УТДУ, работающими по параллельной и последовательно-параллельной схемам, а также прирост выработки в последнем случае.

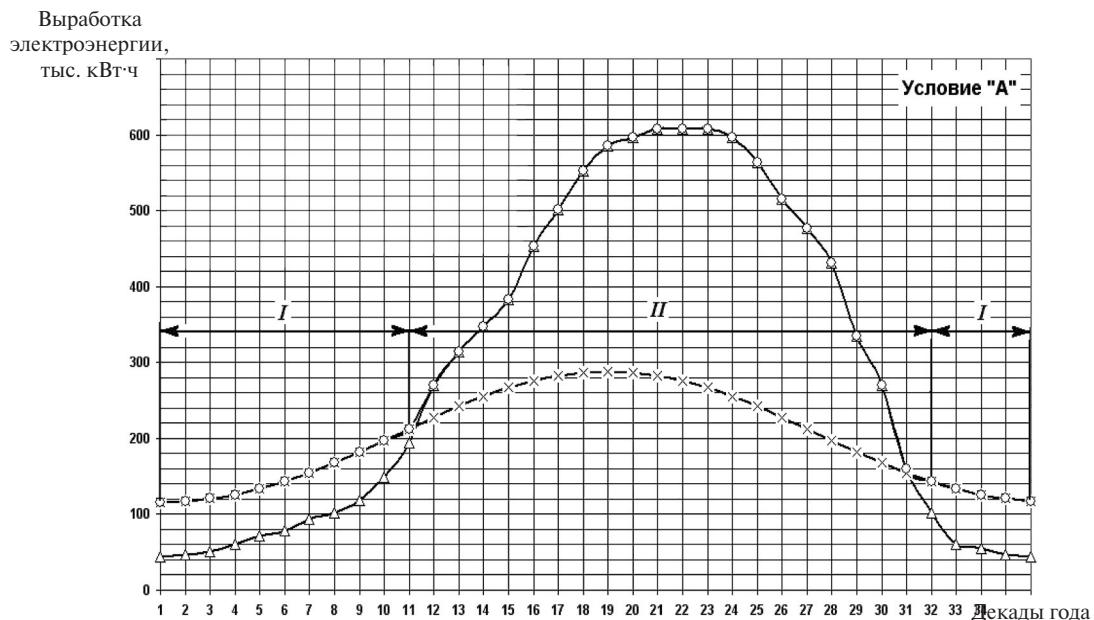


Рис. 3. Выработка электроэнергии УТДУ при их двухцилиндровой компоновке, работающими по параллельной (—Δ—), последовательной (—×—) и последовательно-параллельной (—○—) схемам при условии «А» (I — работа УТДУ по последовательной схеме; II — работа УТДУ по параллельной схеме)

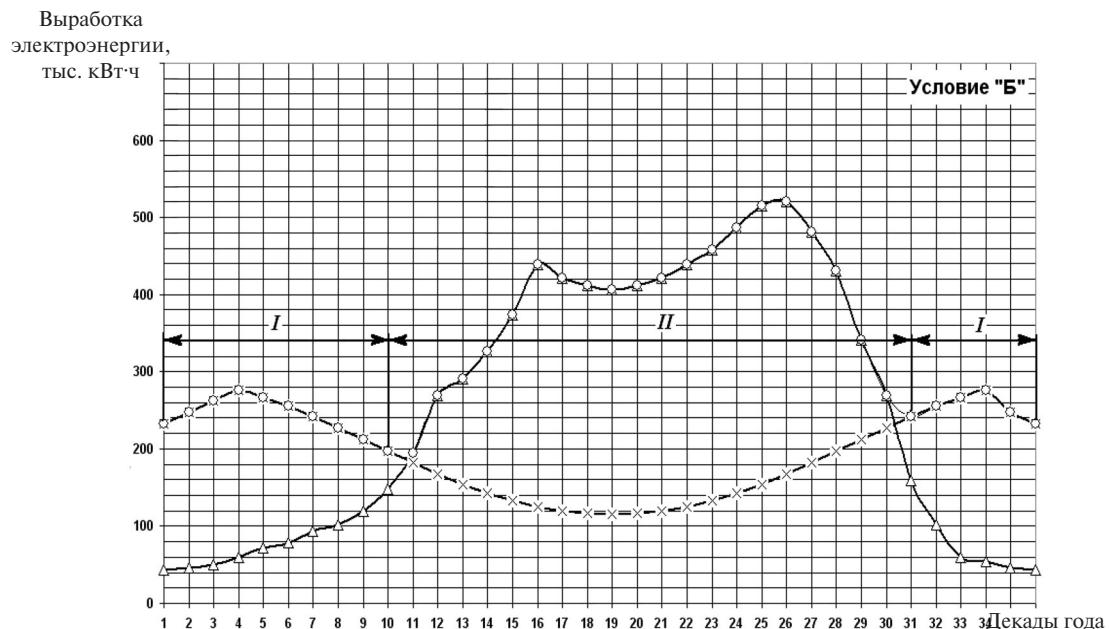


Рис. 4. Выработка электроэнергии УТДУ при их двухцилиндровой компоновке, работающими по параллельной (—Δ—), последовательной (—×—) и последовательно-параллельной (—○—) схемам при условии «Б» (I — работа УТДУ по последовательной схеме; II — работа УТДУ по параллельной схеме)

**Сравнительная выработка электроэнергии УТДУ,  
работающими по параллельной и последовательно-параллельной схемам**

Месяц	Выработка электроэнергии УТДУ, работающей по параллельной схеме, тыс. кВт·ч		Выработка электроэнергии УТДУ, работающей по последовательно-параллельной схеме, тыс. кВт·ч		Прирост выработки электроэнергии, тыс. кВт·ч	
	Условие «А»	Условие «Б»	Условие «А»	Условие «Б»	Условие «А»	Условие «Б»
Январь	141,044	141,044	354,780	742,884	213,736	601,840
Февраль	210,363	210,363	401,272	797,431	190,909	587,068
Март	314,085	314,085	503,333	681,811	189,248	367,726
Апрель	612,864	612,864	679,079	661,005	66,215	48,141
Май	1044,317	992,201	1044,317	992,201	0	0
Июнь	1507,786	1271,015	1507,786	1271,015	0	0
Июль	1789,966	1238,697	1789,966	1238,697	0	0
Август	1810,817	1384,183	1810,817	1384,183	0	0
Сентябрь	1556,052	1516,275	1556,052	1516,275	0	0
Октябрь	1035,297	1041,813	1035,297	1041,813	0	0
Ноябрь	321,247	321,221	435,415	763,898	114,168	442,677
Декабрь	145,467	145,467	363,871	755,554	218,404	610,087
Итого за год	10489,305	9189,228	11481,985	11846,767	992,68	2657,539

Из таблицы, а также рис. 3 и 4 видно, что прирост выработки электроэнергии УТДУ, работающей при условии «А» по последовательно-параллельной схеме в сравнении с чисто параллельной схемой работы составил около 9,5 %, а в сравнении с чисто последовательной — около 60 %. Соответствующие показатели при условии «Б» составляют 28,9 % и 70 %. При этом удельные затраты теплоты на производство электроэнергии в УТДУ, работающей по последовательно-параллельной схеме, практически не изменились по сравнению с аналогичными показателями УТДУ, работающей по параллельной схеме [31], и составили 165,55 и 162,46 гу.т/(кВт·ч) соответственно в условиях «А» и «Б».

Предлагаемая схема основывается на байпасном способе регулирования, характерном для паровых турбин. Так, при параллельной работе «байпас» открыт, т. е. каждый из двух потоков газа минует сопротивление одного из цилиндров и поступает только в один из них. При последо-

вательной работе цилиндров ДГА «байпас» закрывается и относительно небольшой расход газа поочередно следует через оба цилиндра. В последнем случае основная мощность вырабатывается во втором по ходу газа цилиндре, в то время как в первом цилиндре производится дополнительная мощность, которая составляет меньшую часть суммарной мощности ДГА.

Особенность применения байпасной схемы регулирования ДГА состоит в наличии однозначной связи между расходом газа и внутренним перепадом энталпий в турбодетандере, что не позволяет рассматривать их как два относительно независимых параметра, влияющих на мощность агрегата, как это допускается при регулировании мощности паровых турбоагрегатов. Отсюда вытекает задача, которую решает предлагаемая схема: не допустить сильного снижения внутреннего перепада энталпий при уменьшении расхода газа через ДГА. На частичных режимах работы последовательное включение цилин-

дров ДГА позволяет срабатывать больший внутренний перепад энтальпий и соответственно развивать большую мощность.

### Выводы

В условиях изменения расхода газа через установку, что обусловлено сезонными и технологическими особенностями промышленного и коммунального потребления газа, и наличия периодических изменений уровня давления в питающем магистральном газопроводе параллельное включение цилиндров ДГА обеспечивает достаточно высокую выработку электроэнергии на режимах с относительно высокими расходами газа через цилиндры детандера. Последовательное включение цилиндров ДГА позволяет увеличить выработку электроэнергии на режимах работы установки с относительно малыми расходами газа через цилиндры детандера. Таким образом, переключение УТДУ с параллельной схемы работы на последовательно-параллельную позволяет значительно увеличить выработку

электроэнергии на режимах с относительно малыми расходами газа при наличии достаточного давления в питающем магистральном газопроводе.

Обнаруженный значительный полезный эффект в виде дополнительной выработки электроэнергии ДГА и наличия длительного промежутка времени, при котором УТДУ работает по последовательной схеме (около 45 % длительности эксплуатационной кампании как при условии «А», так при условии «Б»), позволяет предвосхитить дальнейшее направление исследования. Необходимо продолжить исследование энергетической эффективности последовательно-параллельной схемы УТДУ в условиях стохастически изменяющихся режимов потребления газа и периодичности изменения уровня давления газа в питающем магистральном газопроводе, что может быть реализовано посредством компьютерного моделирования и вычислительного эксперимента. Перспективен поиск конструктивных решений, позволяющих реализовать предложенную схему УТДУ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трухний А.Д. Термодинамические основы использования утилизационных турбодетандерных установок // Вестник МЭИ. 1999. №5. С. 11–15.
2. Агабабов В.С., Корягин А.В., Агабабов В.В. Изменение удельного расхода условного топлива при включении детандер-генераторного агрегата в тепловую схему конденсационных энергоблоков // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2001. №9–10. С. 53–60.
3. Агабабов В.С. Методика оценки влияния детандер-генераторного агрегата на тепловую экономичность ТЭЦ // Вестник МЭИ. 2002. №5. С. 48–52.
4. Агабабов В.С., Галас И.В., Джураева Е.В., Зройченков Н.А., Корягин А.В. Сравнение различных способов подогрева газа в детандер-генераторном агрегате // Теплоэнергетика. 2003. №11. С. 46–50.
5. Агабабов В.С., Корягин А.В., Архарова А.Ю. Подогрев газа перед детандер-генераторным агрегатом с использованием промежуточного теплоносителя на ТЭС // Энергосбережение и водоподготовка. 2005. №2(34). С. 34–36.
6. Жигулина Е.В., Калинин Н.В. Хромченков В.Г. Эффективность подогрева природного газа при использовании детандер-генераторных агрегатов на тепловых электрических станциях // Новости теплоснабжения. 2010. №2. С. 34–37.
7. Агабабов В.С. Подогрев газа в детандер-генераторном агрегате уходящими дымовыми газами энергетических котлов // Энергосбережение и водоподготовка. 2003. №3. С. 46–47.
8. Агабабов В.С., Корягин А.В., Джураева Е.В. Использование теплонасосной установки для подогрева газа перед детандером // Энергосбережение и водоподготовка. 2004. №1. С. 39–41.
9. Джураева Е.В., Александров А.А. Эксергетический анализ процессов, происходящих в детандер-генераторном агрегате // Теплоэнергетика. 2005. №2. С. 73–77.
10. Корягин А.В., Соловьев Р.В. Детандер-генераторный агрегат с двумя промподогревами газа // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2009. №1–2. С. 47–52.
11. Корягин А.В., Соловьев Р.В. Сравнение схем ДГА с подогревом газа с помощью ТНУ // Труды IV Международной школы-семинара молодых ученых и специалистов «Энергосбережение — теория и практика». М.: Изд-во МЭИ, 2008. С. 277–279.
12. Агабабов В.С., Гаряев А.А. Исследование работы ДГА, установленного в системе топливного газа газоподкачивающего агрегата // Энергосбережение и водоподготовка. 2008. №2(52). С. 39–41.
13. Агабабов В.С., Корягин А.В., Андреев А.Р. Изменение показателей котельных при применении детандер-генераторных агрегатов // Промышленная энергетика. 2004. №7. С. 38–44.
14. Костюченко П.А., Агабабов В.С., Байдакова Ю.О. Повышение эффективности работы бесто-



пливной установки для производства электроэнергии за счет использования ветроэнергетической установки // Энергосбережение и водоподготовка. 2010. №4(66). С. 22–27.

15. **Байдакова Ю.О., Агабабов В.С., Рогова А.А., Ильина И.П.** Бестопливные установки для совместного производства электроэнергии, теплоты и холода // Энергосбережение и водоподготовка. 2012. №4(78). С. 66–69.

16. **Агабабов В.С., Смирнова У.И., Байдакова Ю.О., Рогова А.А.** Повышение термодинамической эффективности работы бестопливной установки для производства электроэнергии путем использования энергии возобновляемых источников // Вестник МЭИ. 2012. №4. С. 5–9.

17. **Патент РФ №17971.** Детандер-генераторный агрегат / Агабабов В.С., Корягин А.В., Утенков В.Ф. Приоритет 28.11.2000.

18. **Патент РФ №34990.** Газораспределительная станция с энергетической установкой / Агабабов В.С., Корягин А.В., Александров А.А., Джураева Е.В. Приоритет 21.08.2003.

19. **Патент РФ №36125.** Детандер-генераторный агрегат / Корягин А.В., Агабабов В.С., Джураева Е.В. Приоритет 13.10.2003.

20. **Патент РФ №36126.** Парогазовая станция с дополнительной энергетической установкой / Корягин А.В., Агабабов В.С., Джураева Е.В. Приоритет 13.10.2003.

21. **Патент РФ №39937.** Детандер-генераторная установка / Агабабов В.С., Корягин А.В., Архаров Ю.М., Архарова А.Ю. Приоритет 08.04.2004.

22. **Патент РФ №43345.** Детандер-генераторная установка / Агабабов В.С., Корягин А.В., Архаров Ю.М., Архарова А.Ю. Приоритет 29.09.2004.

23. **Архаров Ю. М., Агабабов В.С., Архарова А.Ю.** Детандер-генераторная установка // Патент РФ №49199. Приоритет 24.05.2005.

24. **Патент РФ №50604.** Энергетическая установка / Архаров Ю.М., Укличев О.Ю., Костюков И.С., Архарова А.Ю. Приоритет 13.07.2005.

25. **Стребков А.С., Жавроцкий С.В.** Оценка эффективности производства электрической энергии

при использовании силового потенциала топливного газа // Вестник Брян. гос. техн. ун-та. 2013. №4. С. 77–86.

26. **Жавроцкий С.В.** Обеспечение максимальной выработки электроэнергии при использовании силового потенциала топливного газа по результатам моделирования режимов газопотребления цементного завода // Труды IX Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов «Информационные технологии, энергетика и экономика (электроэнергетика и электротехника, теплофизика и энергосбережение, электроника)»: в 3 т. — Смоленск: Универсум, 2012. Т 2. С. 124–128

27. **Стребков А.С., Осипов А.В., Жавроцкий С.В.** Повышение эффективности использования силового потенциала топливного газа при установке детандерных агрегатов перед горелочными устройствами вращающихся цементообжигательных печей // Вестник Брян. гос. техн. ун-та. 2014. №2. С. 69–74.

28. **Патент РФ №43630.** Детандер-генераторная установка / Агабабов В.С., Корягин А.В., Архарова А.Ю., Андреев А.Р., Фролов Р.И., Малафеева Н.В., Гаряев А.А., Соловьева Е.С. Приоритет 06.10.2004.

29. **Патент РФ №46565.** Установка для получения электроэнергии, теплоты и холода / Агабабов В.С., Архарова А.Ю., Малафеева Н.В. Приоритет 03.02.2005.

30. **Патент РФ №85614.** Детандер-генераторный агрегат с двухступенчатым промежуточным подогревом газа / Корягин А.В., Соловьев Р.В. Приоритет 07.04.2009.

31. **Стребков А.С., Осипов А.В., Жавроцкий С.В.** Влияние конфигурации турбодетандерного оборудования на энергоэффективность использования силового потенциала топливного газа // Вестник Брян. гос. техн. ун-та. 2014. №4. С. 109–113.

32. **Сычев В.В., Вассерман А.А., Загорученко В.А., Козлов А.Д., Спиридов Г.А., Цымарный В.А.** Термодинамические свойства метана. М.: Изд-во стандартов, 1979. 348 с.

33. **Сазанов Б.В., Ситас В.И.** Теплоэнергетические системы промышленных предприятий. М.: Энергатомиздат, 1990. 304 с.

## REFERENCES

1. **Trukhniy A.D.** Termodinamicheskiye osnovy ispolzovaniya utilizatsionnykh turbodetandernykh ustanovok. [The thermodynamic basis for the use of recovery turbo-expanders units]. *Vestnik MEI*. 1999. №5., S. 11–15. (rus.)
2. **Agababov V.S., Koryagin A.V., Agababov V.V.** Izmeneniye udelnogo raskhoda uslovnogo topliva pri vkluchenii detander-generatornogo agregata v teplovyyu skhemu kondensatsionnykh energoblokov. [The change in specific consumption of equivalent fuel at inclusion the expander-generator unit in the thermal circuit condensing units]. *Izvestija vuzov. Problemy energetiki*. 2001. №9–10. S. 53–60. (rus.)
3. **Agababov V.S.** Metodika otsenki vliyaniya detander-generatornogo agregata na teplovyyu ekonomichnost TETs. [The methodology of assessing the impact of the expander-generator unit on the thermal efficiency of the CHP]. *Vestnik MEI*. 2002. №5. S. 48–52. (rus.)
4. **Agababov V.S., Galas I.V., Dzhurayeva Ye.V., Zroychenkov N.A., Koryagin A.V.** Sravneniye razlichnykh sposobov podogревa gaza v detander-generatornom agregate.



[Comparison of different methods of heating the gas in the expander-generator unit]. *Teploenergetika*. 2003. №11. S. 46–50. (rus.)

5. **Agababov V.S., Koryagin A.V., Arkharova A.Yu.** Podogrev gaza perek detander-generatornym agregatom s ispolzovaniem promezhutochnogo teplonositelya na TES. [Heated gas to the expander-generator unit with the use of intermediate heat on TPP]. *Energosberezhenie i vodopodgotovka*. 2005. №2(34). S. 34–36. (rus.)

6. **Zhigulina Ye.V., Kalinin N.V. Khromchenkov V.G.** Effektivnost podogreva prirodnogo gaza pri ispolzovanii detander-generatornykh agregatov na teplovых elektricheskikh stantsiyakh. [The efficiency of natural gas heating when using the expander-generator units in thermal power plants]. *Novosti teplosnabzhenija*. 2010. №2. S. 34–37. (rus.)

7. **Agababov V.S.** Podogrev gaza v detander-generatornom agregate ukhodyashchimi dymovymi gazami energeticheskikh kotlov. [Heating the gas in the expander-generator unit by the outgoing flue gases of power boilers]. *Energosberezhenie i vodopodgotovka*. 2003. №3. S. 46–47. (rus.)

8. **Agababov V.S., Koryagin A.V., Dzhurayeva Ye.V.** Ispolzovaniye teplona-sosnoy ustanovki dlya podogreva gaza perek detanderom. [The application of the thermal pump for heating the gas before the expander]. *Energosberezhenie i vodopodgotovka*. 2004. №1. S. 39–41. (rus.)

9. **Dzhurayeva Ye.V., Aleksandrov A.A.** Eksergeticheskiy analiz protsessov, proiskhodyashchikh v detander-generatoronom agregate. [Exergy analysis of processes occurring in the expander-generational unit]. *Teploenergetika*. 2005. №2. S. 73–77. (rus.)

10. **Koryagin A.V., Solovyev R.V.** Detander-generatornyy agregat s dvumya prompodgrevami gaza. [The expander-generator unit with two intermediate gas heating]. *Izvestija vuzov. Problemy energetiki*. 2009. №1–2. S. 47–52. (rus.)

11. **Koryagin A.V., Solovyev R.V.** Sravneniye skhem DGA s podogrevom gaza s pomoshchyu TNU. [The DGA schema comparison with the heating gas through TNU]. *Trudy IV Mezhdunarodnoj shkoly-seminara molodyh uchenyh i specialistov «Jenergosberezhenie — teoriya i praktika»* [Proceeding of the IV International school-seminar of young scientists and specialists «Energy-theory and practice»]. Moscow: MEI Publ., 2008. S. 277–279. (rus.)

12. **Agababov V.S., Garyayev A.A.** Issledovaniye raboty DGA, ustanovlennogo v sisteme toplivnogo gaza gazo-perekachivayushchego agregata. [The study of the DGA operation installed in the fuel gas system of gas compressor unit]. *Energosberezhenie i vodopodgotovka*. 2008. №2(52). S. 39–41. (rus.)

13. **Agababov V.S., Koryagin A.V., Andreyev A.R.** Izmeneniye pokazateley kotelnykh pri primenenii detander-generatornykh agregatov. [Change boilers indicators when using the expander-generator units]. *Promyshlennaja energetika*. 2004. №7. S. 38–44. (rus.)

14. **Kostyuchenko P.A., Agababov V.S., Baydakova Yu.O.** Povysheniye effektivnosti raboty bestoplivnoy ustanovki dlya proizvodstva elektro-energii za schet ispolzovaniya vetroenergeticheskoy ustanovki. [Improving the efficiency of the fuel-free installations for the production of electric energy through the use of a wind power plant]. *Energosberezhenie i vodopodgotovka*. 2010. №4(66). S. 22–27. (rus.)

15. **Baydakova Yu.O., Agababov V.S., Rogova A.A., Ilina I.P.** Bestopliv-nyye ustanovki dlya sovmestnogo proizvodstva elektroenergii, teploty i kholoda. [Fuel-free installations for coproduction of electric energy, heat and cold]. *Energosberezhenie i vodopodgotovka*. 2012. №4(78). S. 66–69. (rus.)

16. **Agababov V.S., Smirnova U.I., Baydakova Yu.O., Rogova A.A.** Povysheniye termodynamicheskoy effektivnosti raboty bestoplivnoy ustanovki dlya proizvodstva elektroenergii putem ispolzovaniya energii vozobnovlyayemykh istochnikov. [Increase the thermodynamic efficiency of the fuel-free installations for the production of electric energy by using renewable energy sources]. *Vestnik MEI*. 2012. №4. S. 5–9. (rus.)

17. **Patent RF №17971.** Detander-generatornyy agregat. [The expander-generator unit]. / Agababov V.S., Koryagin A.V., Utenkov V.F. Prioritet 28.11.2000. (rus.)

18. **Patent RF №34990.** Gazoraspredelitelnaya stantsiya s energeticheskoy ustanovkoy. [Gas distribution station with power unit]. / Agababov V.S., Koryagin A.V., Aleksandrov A.A., Dzhurayeva Ye.V. Prioritet 21.08.2003. (rus.)

19. **Patent RF №36125.** Detander-generatornyy agregat. [The expander-generator unit]. / Koryagin A.V., Agababov V.S., Dzhurayeva Ye.V. Prioritet 13.10.2003. (rus.)

20. **Patent RF №36126.** Parogazovaya stantsiya s dopolnitelnoy energeticheskoy ustanovkoy. [Combined cycle power station with additional power unit]. / Koryagin A.V., Agababov V.S., Dzhurayeva Ye.V. Prioritet 13.10.2003. (rus.)

21. **Patent RF №39937.** Detander-generatornaya ustanovka. [The expander-generator unit]. / Agababov V.S., Koryagin A.V., Arkharov Yu.M., Arkharova A.Yu. Prioritet 08.04.2004. (rus.)

22. **Patent RF №43345.** Detander-generatornaya ustanovka. [The expander-generator unit]. / Agababov V.S., Koryagin A.V., Arkharov Yu.M., Arkharova A.Yu. Prioritet 29.09.2004. (rus.)

23. **Patent RF №49199.** Detander-generatornaya ustanovka. [The expander-generator unit]. / Arkharov Yu.M., Agababov V.S., Arkharova A.Yu. Prioritet 24.05.2005. (rus.)

24. **Patent RF №50604.** Energeticheskaya ustanovka. [The energy unit]. / Arkharov Yu.M., Uklechev O.Yu., Kostyukov I.S., Arkharova A.Yu. Prioritet 13.07.2005. (rus.)

25. **Strebkov A.S., Zhavrotskiy S.V.** Otsenka effektivnosti proizvodstva elektricheskoy energii pri ispolzovaniyu silovogo potentsiala top-livnogo gaza. [Assessment of

the electric energy production efficiency when using power potential of fuel gas]. *Vestnik BSTU*. 2013. №4. S. 77–86. (rus.)

26. **Zhavrotskiy S.V.** Obespecheniye maksimalnoy vyrabotki elektroenergii pri ispolzovaniii silovogo potentsiala toplivnogo gaza po rezul'tatam modelirovaniya rezhimov gazopotrebleniya tsementnogo zavoda. [Maximizing power generation using power potential of fuel gas according to the results of the simulation regimes of gas consumption of a cement plant]. *Trudy IX Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. studentov i aspirantov «Informacionnye tehnologii, jenergetika i ekonomika (jelektrojenergetika i jekonometrika, teplofizika i jenergosberezhenie, jelektronika)»*. [Proceedings of IX International scientific and technical conference of students and postgraduates «Information technology, energy and the economy (electricity and electrical engineering, physics and energy-saving, electronics)»]. Smolensk: Universum. 2012. Vol. 2. S. 124–128. (rus.)

27. **Strebkov A.S., Osipov A.V., Zhavrotskiy S.V.** Povysheniye effektivnosti ispolzovaniya silovogo potentsiala toplivnogo gaza pri ustanovke detandernykh agregatov pered gorelochnymi ustroystvami vrashchayushchikhsya tsementoobzhigatelnykh pechey. [The improving of efficiency for using fuel gas power potential when turboexpander units are installed before the burners rotary kilns]. *Vestnik BSTU*. 2014. №2. S. 69–74. (rus.)

28. **Patent RF №43630.** Detander-generatornaya ustanovka. [The expander-generator unit]. / Agababov V.S.,

Koryagin A.V., Arkharova A.Yu., Andreyev A.R., Frolov R.I., Malafeyeva N.V., Garyayev A.A., Solovyeva Ye.S. Prioritet 06.10.2004. (rus.)

29. **Patent RF №46565.** Ustanovka dlya polucheniya elektroenergii, teploty i kholoda. [Installation for producing electric energy, heat and cold]. / Agababov V.S., Arkharova A.Yu., Malafeyeva N.V. Prioritet 03.02.2005. (rus.)

30. **Patent RF №85614.** Detander-generatornyy agregat s dvukhstupenchatym promezhutochnym podogrevom gaza. [The expander-generator unit with two-stage intermediate heating gas]. / Koryagin A.V., Solovyev R.V. Prioritet 07.04.2009. (rus.)

31. **Strebkov A.S., Osipov A.V., Zhavrotskiy S.V.** Vliyaniye konfiguratsii turbodetandernogo oborudovaniya na energoeffektivnost ispolzovaniya silovogo potentsiala toplivnogo gaza. [The influence of turboexpander equipment configuration on energy efficiency of fuel gas power potential using]. *Vestnik BSTU*. 2014. №4. S. 109–113. (rus.)

32. **Sychev V.V., Vasserman A.A., Zagoruchenko V.A., Kozlov A.D., Spiridonov G.A., Tsymarnyy V.A.** Termodinamicheskiye svoystva metana [Thermodynamic properties of methane]. Moscow: Standards Publ., 1979. 348 s. (rus.)

33. **Sazanov B.V., Sitas V.I.** Teploenergeticheskiye sistemy promyshlennyykh predpriyatiy [Thermal energy systems for industrial enterprises]. Moscow: Energoatomizdat, 1990. 304 s. (rus.)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ЖАВРОЦКИЙ Станислав Викторович** — инженер по эксплуатации энергооборудования ООО «Сервис Плюс». 241019, г. Брянск, ул. Красноармейская, д. 71. E-mail: Kamakura-Edo@yandex.ru

**СТРЕБКОВ Александр Сергеевич** — кандидат технических наук доцент кафедры промышленной теплоэнергетики Брянского государственного технического университета. 241035, г. Брянск, бул. 50-летия Октября, д. 7. E-mail: asstr960@yandex.ru

**ОСИПОВ Александр Вадимович** — кандидат технических наук доцент кафедры тепловых двигателей Брянского государственного технического университета. 241035, Россия, г.Брянск, бул.50-летия Октября, 7. E-mail: avo-turbo@mail.ru

## AUTHORS

**ZHAVROCKIJ Stanislav V.** — ООО «Servis Pljus». 71, Krasnoarmejskaja St., Bryansk, Russia, 241019. E-mail: Kamakura-Edo@yandex.ru

**STREBKOV Aleksandr S.** — Bryansk State Technical University. 7, bul. 50-letija Oktjabrja, Brjansk, Russia, 241035. E-mail: asstr960@yandex.ru

**OSIPOV Aleksandr V.** — Bryansk state technical University. 7, bul.50-letija Oktjabrja, Bryansk, Russia, 241035. E-mail: avo-turbo@mail.ru

DOI 10.5862/JEST.219.10

УДК 532.529:536.24

*Н.Н. Кортиков, М.В. Миронова*

## **ВИРТУАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ОХЛАЖДАЕМЫХ РОТОРОВ ПАРОВЫХ ТУРБИН**

*N.N. Kortikov, M.V. Mironova*

### **VIRTUAL STAND FOR STUDYING THE THERMAL STATE OF STEAM TURBINE COOLED ROTORS**

Отмечено, что развитие паротурбостроения идет по пути создания мощных установок, рассчитанных на работу с высокими начальными параметрами пара, что невозможно без разработки трехмерных термо-газодинамических расчетов высокоеффективных систем охлаждения. В работе с помощью системы ANSYS Fluent 14.0 создан виртуальный стенд для исследования задач сопряженного теплообмена и теплового состояния охлаждаемых роторов с дисками мощных паровых турбин. В стенд интегрирован модуль STEAM (в качестве пользовательской функции UDF), учитывающий свойства водяного пара при повышенных параметрах. Проведено сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными, полученными при тепловых испытаниях системы принудительного парового охлаждения на действующей ТЭС. Даны рекомендации по выбору параметров численной модели, обеспечивающие баланс точности с погрешностью, не превышающей 1 % по температуре металла.

ПАРОВАЯ ТУРБИНА; СОПРЯЖЕННЫЙ ТЕПЛООБМЕН; ВИРТУАЛЬНЫЙ СТЕНД; СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ; ТЕПЛОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ; ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ; РОТОР.

It is noted that steam turbine building is evolving toward the creation of powerful steam turbines with high initial steam parameters, and their creation is not possible without the development of highly efficient cooling systems based on three-dimensional thermo-gas-dynamic calculations. Within this study the virtual test stand, based on the ANSYS Fluent 14.0 system, was created to investigate the conjugate heat transfer and thermal state of rotors and discs with forced cooling systems for powerful steam turbines. The module STEAM (as a user-defined function - UDF) is integrated in the virtual test stand, allowing for the properties of steam at high parameters. The calculated results were compared with the experimental data obtained during heat tests of the forced steam cooling system at the existing thermal power plant. The authors give recommendations for the choice of calculation model parameters that provide the balance of accuracy with an error not exceeding 1% of the metal temperature.

STEAM TURBINE; CONJUGATE HEAT TRANSFER; VIRTUAL STAND; COOLING SYSTEM; THERMAL TESTING; NUMERICAL MODELING; ROTOR.

#### **Введение**

Производство конкурентоспособных паротурбинных установок, рассчитанных на работу с высокими начальными параметрами пара (характерные значения давления и температуры для мощных энергоблоков [1,2] приведены на рис. 1), невозможно без применения современных трехмерных газодинамических и прочностных расчетов.

Опытные исследования высокотемпературных процессов в паровых турбинах — сложная задача, требующая оснащения экспериментальных стендов дорогостоящей измерительной аппаратурой и высокой квалификации исследователей. Из-за технических ограничений, определяемых доступностью или сложностью размещения приборов (датчики), особенно на

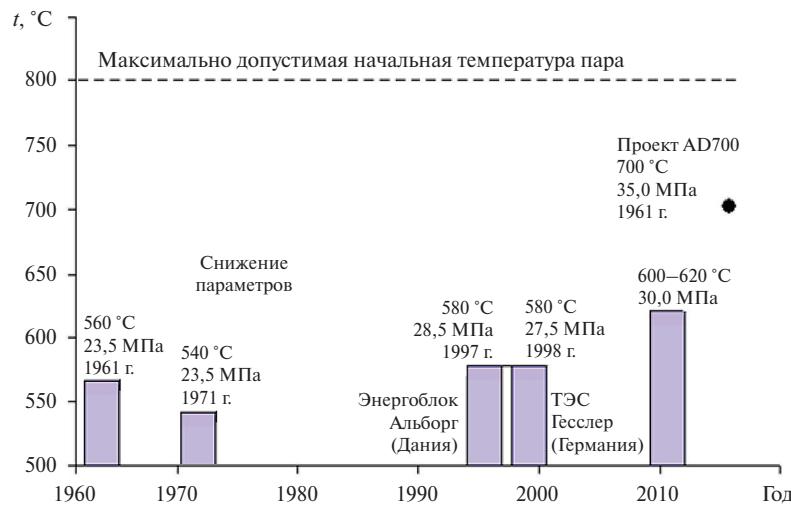


Рис. 1. Динамика мирового развития параметров рабочего тела в паровых турбинах

вращающихся элементах ротора, получаемая информация носит отрывочный характер.

Современные вычислительные комплексы позволяют ставить задачу создания виртуальных стендов для исследования высокотемпературных процессов с переменными теплофизическими свойствами при течении перегретого водяного пара.

Предлагается виртуальный стенд для решения задач течения перегретого водяного пара и сопряженного теплообмена, т. е. определения поля температуры потока водяного пара в элементах проточной части и теплового состояния ротора с дисками, а также диафрагменных уплотнений.

При разработке виртуального стенда для исследования теплового состояния охлаждаемых роторов паровых турбин в качестве прототипа выбрана система принудительного парового охлаждения (СППО), разработанная в ОАО «Силовые машины» и испытанная на действующей тепловой электростанции (ТЭС).

Цель работы — создать на основе системы ANSYS Fluent 14.0 виртуальный стенд для исследования задач сопряженного теплообмена и теплового состояния охлаждаемых роторов с дисками мощных паровых турбин и сопоставить результаты расчета с экспериментальными данными, полученными при тепловых испытаниях системы принудительного парового охлаждения на действующей ТЭС.

## Результаты тепловых испытаний системы охлаждения

В практике эксплуатации паровых турбин на ТЭС применяются различные типы испытаний, в частности режимные, проводимые для проверки и корректировки режимов работы оборудования (в основном — пуск, нагружение и останов), системы автоматического регулирования (снятие статических и динамических характеристик).

Тепловые испытания [3] проводятся в следующих случаях: для проверки гарантий завода-изготовителя и определения фактических характеристик оборудования; для проверки эффективности модернизации или реконструкции проточной части турбины; при отклонении удельного расхода теплоты от нормы более чем на 1 %; для определения отдельных показателей и характеристик турбоагрегата. В зависимости от цели работы разрабатывается программа испытаний, определяются количество и тип измерительных приборов, требуемый класс точности. Эти факторы, в конечном счете, и определяют общий объем испытаний, которые классифицируются соответственно по категориям сложности.

Испытаниям по первой категории сложности (называемые по традиции «балансовыми») подвергают: головные образцы турбин; турбины, прошедшие реконструкцию (модернизацию);



турбины, не имеющие необходимых энергетических характеристик; турбины, сдаваемые в эксплуатацию на зарубежных объектах, если это оговорено контрактом. Проведение таких весьма ответственных испытаний требует обширной программы, большого объема измерений с помощью приборов повышенного класса точности, а также обязательного расчета материального баланса расходов пара и воды, измеренных независимыми методами. Переход на сверхкритические параметры пара сопровождается введением системы принудительного парового охлаждения наиболее горячих и напряженных деталей проточных частей паровых турбин. Организация охлаждения наиболее горячих участков роторов высокого и среднего давления (РВД и РСД) позволяет продлить ресурс и повысить надежность работы паровой турбины.

На рис. 2 представлена схема двухпоточного цилиндра среднего давления (ЦСД) паротурбинной установки в районе первых двух ступеней с проточными частями правого и левого потока и применением СППО, разработанной в ОАО «НПО ЦКТИ» [4].

Охлаждающий пар, представляющий собой смесь паров холодного промперегрева (ХПП) и горячего промперегрева (ГПП), подводится в конструкцию через трубопровод 1, омывает ротор 2 и направляющее кольцо 3 центральной части ЦСД, а затем через зазоры между кольцом и первыми дисками рабочих ступеней возвращается в проточную часть турбины, охлаждая по ходу торцевые поверхности кольца и первых дис-

ков. Дополнительно к диафрагмам вторых ступеней ЦСД подводится пар ХПП, который проходит через направляющие лопатки 4 и ряд отверстий, расположенных в теле диафрагмы 5.

Рассматриваются два варианта работы системы охлаждения (рис. 2, а): в варианте 1 подача охлаждающего пара осуществляется через трубопровод 1; в варианте 2 для охлаждения дополнительно используются струи пара, поступающие через каналы, расположенные в теле диафрагмы 5 второй ступени.

Для оценки эффективности работы системы охлаждения в области центрального паропуска предусмотрена установка двух термопар (см. рис. 2, б). Эти штатные термопары устанавливаются в гильзах и измеряют температуру пара в зазоре между ротором и направляющим кольцом (по одной на правый и левый поток).

Пар, применяемый для охлаждения ротора и прилегающих статорных элементов, подается по отдельным паропроводам, на которых установлены регулирующие устройства, позволяющие проводить настройку СППО.

Испытания СППО РСД были проведены при работе турбины на номинальной нагрузке и температуре пара промперегрева близкой к номинальной. В процессе испытаний выполнялось постепенное синхронное открытие задвижек на линиях подачи пара в систему охлаждения от горячего (ГПП) и холодного (ХПП) источников. Регулировочные задвижки на байпасах ограничительных шайб в коллекторах в начале испытаний полностью закрыты. Степень открытия задвижек на подаче пара контролируется по

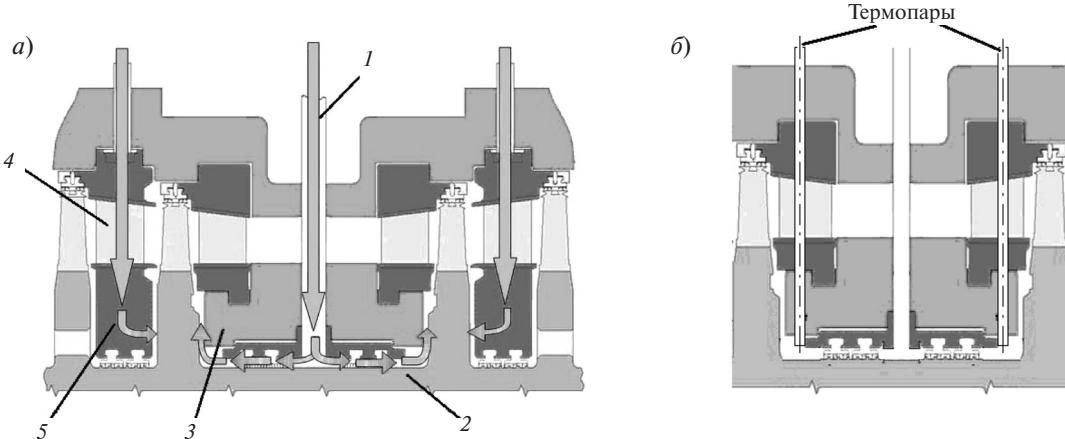


Рис. 2. Схема двухпоточного ЦСД с применением СППО (а) и схема установки термопар (б):  
1 — трубопровод подвода охлаждающего пара; 2 — ротор; 3 — направляющее кольцо; 4 — направляющие лопатки;  
5 — тело диафрагмы

показаниям местных средств измерения давлений и температур пара в подводящих коллекторах СППО РСД и не допускает резкого изменения температур.

С учетом непостоянства нагрузки и температур пара промперегрева в процессе испытаний эффективность системы охлаждения оценивается следующими параметрами: разностью температуры ( $T_{\text{гпп}}$ ) пара промперегрева и температуры пара под направляющим кольцом вблизи ротора в левом ( $T_{\text{рл}}$ ) или в правом ( $T_{\text{рпп}}$ ) потоках ( $\Delta T_{\text{рл}} = T_{\text{гпп}} - T_{\text{рл}}$ ); разностью температур пара  $T_{\text{рл}}$  и  $T_{\text{рпп}}$ ; разностью температуры  $T_{\text{гк}}$  пара в подающем «горячем» коллекторе охлаждения средней части РСД и температуры пара под направляющим кольцом ( $T_{\text{рл}}$  и  $T_{\text{рпп}}$ ). Данные по работе СППО на станции приведены в таблице.

#### Опытные данные по работе СППО

Станционный номер турбины	$T_{\text{гпп}}$	$T_{\text{гк}}$	$T_{\text{рл}}$	$T_{\text{рпп}}$	$\Delta T_{\text{рл}}$	$\Delta T_{\text{рпп}}$
1	549	415	520	524,8	18,5	11,8
2	559	418	533,8	531,8	15,7	19,2
3	559	420	543,5	543,5	16,2	16,0

На рис. 3, *а, б* приведены цифровые индикации приборного отсека, измеряющего температуру перегретого пара, для двух точек измерения, которые показаны на рис. 2, *б*.

При первом включении системы охлаждения было получено достаточно сильное снижение температуры пара в горячем коллекторе подачи пара на среднюю часть РСД, составившее 418 °C (рис. 3, *б*). Включение СППО РСД обеспечивала-

ет снижение температуры пара вблизи ротора под направляющим кольцом в среднем на (16–17) °C. Температура пара, измеряемая вблизи ротора, на 100–120 °C превышает температуру пара, подаваемого на охлаждение. Разность температур пара вблизи ротора левого и правого потоков достигает 10 °C, для турбин со станционными номерами 1 и 2 эта разность противоположна, а в турбине номер 3 отсутствует. СППО РСД не оказывает влияния на осевое усилие валопровода, на параметры пара в отборах турбины, не снижает технико-экономические показатели работы турбины.

#### Постановка задачи.

#### Вычислительные аспекты трехмерного моделирования теплового состояния

Расчетная модель использует геометрические размеры элементов ротора и статора, а также зазоров между ротором и статором, которые вводятся из трехмерных электронных чертежей проточной части СППО ТЭС.

При моделировании теплового состояния влияние основного потока пара в проточной части ЦСД паровой турбины на течение в зазорах учитывается, как ранее это было сделано в работах [5, 6], путем введения дополнительных областей (зоны А, Б на рис. 4, *а, б*). Численные значения для проекций скорости, которые задаются в качестве граничных условий «velocity – inlet» на входе зон А и Б (рис. 4, *а*), определялись на основе рекомендаций [7].

Размеры дополнительных зон определялись на основании независимости результатов численного решения (см. рис. 4, *б*) от геометрических размеров этой области, которая реализуется

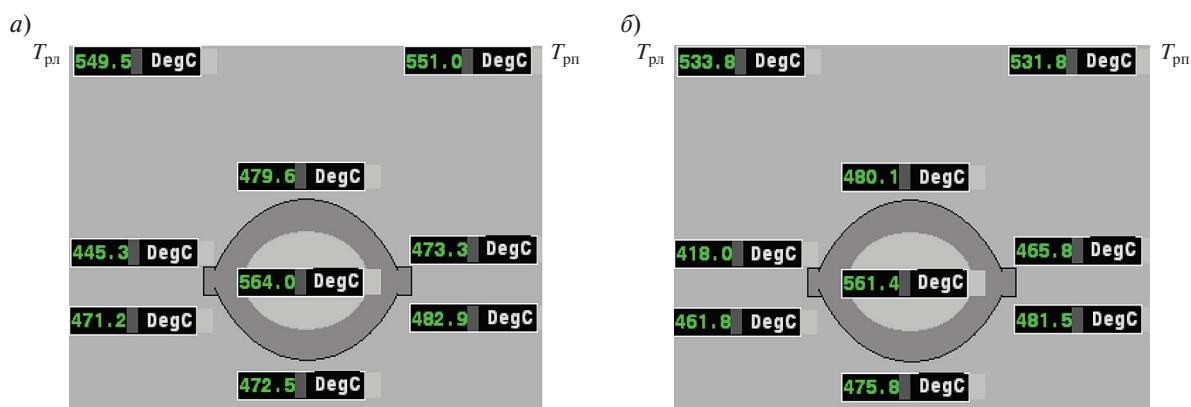


Рис. 3. Показания термопар до (*а*) и после (*б*) включения СППО РСД

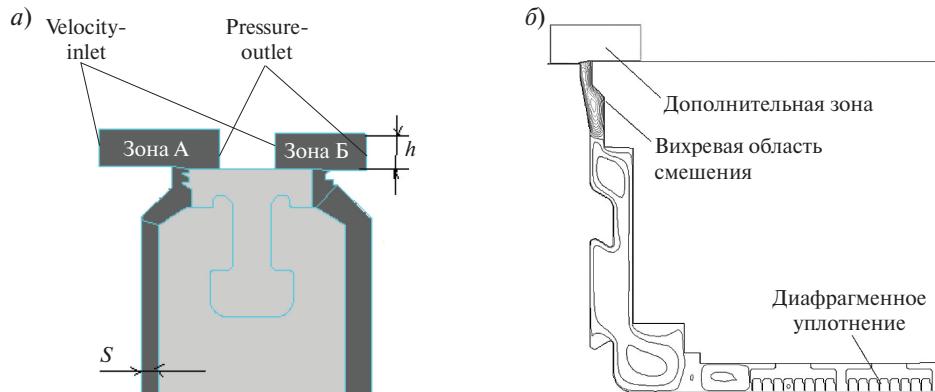


Рис. 4. Типы граничных условий и фрагмент расчетной области в зонах смешения (а); распределение линий тока в районе первой ступени (б)

при  $S/h \geq 0,4$ , где  $S$  — ширина зазора между ротором и статором;  $h$  — высота дополнительной области.

С целью экономии вычислительных ресурсов проточная часть СППО заменена (без потери общности получаемых в дальнейшем результатов) трехмерной моделью в виде сектора, развернутого на  $30^\circ$ . В этом случае в расчетной области прописывается геометрия одного канала для организации струйного обдува, одного разгрузочного отверстия, а также сектора канала паровпуска (рис. 5). Расчетная модель включает условие симметрии по продольной координате, что предполагает уменьшение расчетной области в два раза за счет введения в рассмотрение только одного потока пара.

Постановка задач предполагает, что течение и теплообмен описываются системой стационарных уравнений Навье — Стокса и энергии, осредненных по Рейнольдсу в трехмерной постановке. Решение задачи выполнено в сопряженной постановке, когда совместно решаются уравнения конвективного теплообмена для парового потока и теплопроводности для ротора и дисков, что подразумевает введение на границе сопряжения равенства температур и тепловых потоков (граничные условия четвертого рода). Численная реализация сопряженной постановки предполагает такое построение блоков, чтобы сетки стыковались на их границах [8]. При этом каждый блок должен стыковаться (одной из своих граней) только с одной стороной другого блока.

Решение основных уравнений сохранения строится на основе метода контрольного объема

в пакете ANSYS Fluent 14.0 [9]. Дискретизация пространственных операторов осуществляется по методу конечных объемов (схемы дискретизации второго порядка).

В качестве сеточного генератора применяется пакет ANSYS Gambit 2.4.6. Свойства водяного пара рассчитываются с помощью разработанного модуля STEAM, который интегрирован в пакет ANSYS Fluent 14.0 [10,11] в качестве пользовательской функции UDF (user defined function), учитывающей изменения плотности и теплофизические свойства пара. В качестве модели турбулентности выбрана SST  $k-\omega$  (модель Ментера). Расчетная сетка для газовой и твердотельной областей содержит 1,5 млн узлов. Сходимость итерационной процедуры достигается по прошествии 1700 итераций.

Для вариантов 1 и 2 вращательное число Рейнольдса —  $Re_{\omega,r} = \omega r_d^2 / v = 3,9 \cdot 10^7$ ; число Рейнольдса для области паровпуска —  $Re_{i,1} = 2G_1 / \mu D_{cp} = 1,3 \cdot 10^4$ , где  $r_d$  — радиус диска;  $D_{cp}$  — средний диаметр кольцевого зазора между ротором и статором;  $G_1$  — массовый расход охлаждающего пара. Для варианта 2 третьим режимным параметром является число Рейнольдса для струй (определяем его, как для кольцевой щели)  $Re_{i,2} = 2G_2 / \mu D_{\phi} = 2,0 \cdot 10^4$ , где  $D_{\phi}$  — средний диаметр кольцевой щели;  $G_2$  — массовый расход пара через одну форсунку;  $\mu$ ,  $v$  — динамическая и кинематическая вязкости пара при температуре перегретого пара  $t_n = 565^\circ\text{C}$ .

Результаты трехмерного расчета показывают, что усложнение конструкции СППО за счет



дискретного подвода струй пара через форсунки при  $Re_{i,2} = 4,0 \cdot 10^4$  приводит к искривлению в окружном направлении изотерм на поверхности диафрагмы второй ступени (рис. 5).

Трехмерная картина температурного поля на поверхности диафрагмы отчетливо показывает зоны повышенной окружной неравномерности (3D-эффекты) при включении струйного обдува. Однако охлаждающий пар из отверстия не приобретает свойства струи, способной прямо взаимодействовать с поверхностью диска. В рассматриваемой задаче — применение струйного охлаждения с параметром вдува  $m = 0,12$  — наблюдается эффект прилипания струи (рис. 5, а). Аналогичное поведение пристенной завесы наблюдается при направленном выдуве под углом к плоской пластине [13].

Вторая зона, где проявляются трехмерные эффекты, — это район разгрузочного отверстия второго диска (рис. 5, б). Здесь трехмерные эффекты проявляются слабее — максимальная величина окружной неравномерности не превышает  $12^\circ\text{C}$ . Такое небольшое искривление изотерм можно объяснить тем, что вращение ротора и дисков со скоростью  $n_1 = 3000$  об/мин интенсифицирует процесс турбулентного перемешивания в проточной части и способствует снижению окружной неравномерности температуры.

Дискретность расположения разгрузочных отверстий на втором диске и струйный обдув поверхности первого диска, учитываемые в трехмерном подходе, вызывают увеличение неравномерности температуры по толщине диска и за-

нижение значения температуры металла до  $25^\circ\text{C}$  (рис. 6, а).

Такое понижение (по сравнению с расчетом по [14]) можно объяснить учетом в сопряженной трехмерной постановке дополнительного термического сопротивления теплопроводности тела вращающихся дисков, которое выступает в качестве компенсирующего фактора для падающего на поверхность диска теплового потока.

Результаты численного моделирования трехмерного температурного поля в районе первых ступеней приведены на рис. 6, б. Здесь можно отметить, что температура пара вблизи средней части ротора снижена только на  $20\text{--}30\text{ K}$  по сравнению с периферией диска.

Как отмечалось в [12], это связано с вторичными течениями пара, которые обусловлены интенсивной закруткой потока от вращающегося ротора (см. рис. 4, б). В случае малых расходов охлаждающего пара, когда давления в камере охлаждения недостаточно для организации гарантированного одностороннего течения охладителя, ротор в средней части омывается смесью охлаждающего и горячего процессного пара.

Проведем сопоставление результатов расчета с опытными данными, которые показывают улучшение их соответствия (расхождение уменьшается с 3 до 1 %):

Метод	$t, ^\circ\text{C}$
PTM 108.020.16—83	515
ANSYS Fluent	528
Эксперимент (левый поток)	534
Эксперимент (правый поток)	532

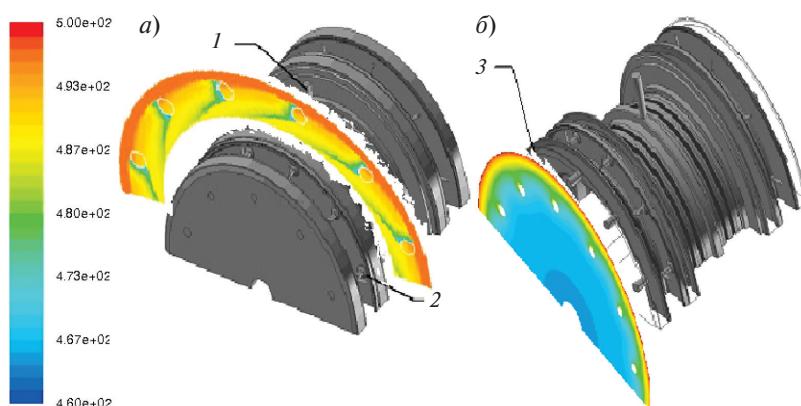


Рис. 5. Расчетная модель и температурные поля в элементах двухпоточного ЦСД для первых двух ступеней (а); проточная часть СППО (б, ротор не показан):

1 — подводящий патрубок, 2 — форсунки, 3 — разгрузочные отверстия

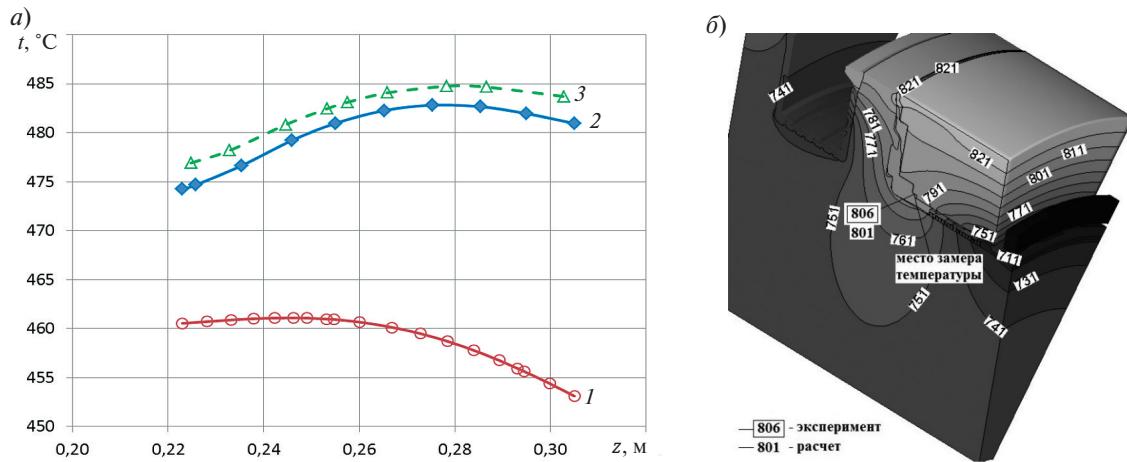


Рис. 6. Изменение температуры по толщине диска первой ступени на среднем диаметре для варианта 2 охлаждения (а) (1 — осесимметрическая несопряженная модель [4, 14]; 2 — осесимметрическая сопряженная модель [10]; 3 — данная работа) и распределение температуры, К, в районе первых ступеней(б)

## Заключение

На основе системы ANSYS Fluent 14.0 создан виртуальный стенд для исследования задач со-пряженного теплообмена и теплового состояния охлаждаемых роторов с дисками мощных паровых турбин. В стенд интегрирован модуль STEAM (в качестве пользовательской функции UDF), учитывающий свойства водяного пара при повышенных параметрах. Даны рекомендации по выбору параметров численной модели, обеспе-

чивающие баланс точности с погрешностью, не превышающей 1 % по температуре металла.

Показано, что снижение температуры пара вблизи средней части ротора за счет внедрения СППО не превышает 20–30°C. Это можно объяснить величиной давления в камере охлаждения, не достаточной для организации гарантированного одностороннего течения охлаждающего пара, а также наличием вторичных течений пара, обусловленных интенсивной закруткой потока от вращающегося ротора.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костюк А.Г., Грибин В.Г., Трухний А.Д. Концепция паровых турбин нового поколения для угольной энергетики России. Часть 1. Экономическое и техническое обоснование концепции // Теплоэнергетика. 2010. № 12. С.23–31.
  2. Mironova V., Kortikov N. Conjugated heat transfer on rotating bodies: Theory and application in turbomachinery // Proceedings of Sixth Baltic Heat Transfer Conference. Tampere. Finland. 2011. 6pp.
  3. Сахаров А.М. Тепловые испытания паровых турбин. М.: Энергоатомиздат, 1990. 238 с.
  4. Хоменок Л.А., Зайцев И.В., Игнатьева Т.А., Ляпунов В.М. Расчетное обоснование эффективности системы охлаждения двухпоточного ротора среднего давления мощных паровых турбин // Надежность и безопасность энергетики. 2012. №3(18). С. 18–24.
  5. Moroz L., Tarasov A. Coupled CFD and thermal steady state analysis of steam turbine secondary flow path // International Joint Power Generation Conference (IJPGC 2003). 2003. IJPGC2003–40058. 6 pp.
  6. Moroz L., Tarasov A. Flow phenomenon in steam turbine disk-stator cavities channeled by balance holes // Proceedings of ASME Turbo Expo 2004: Power for Land, Sea and Air. 2004. GT2004–54228. 9 pp.
  7. Самойлович Г.С. Гидрогазодинамика: Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Турбостроение». 2-е изд. М.: Машиностроение, 1990. 384 с.
  8. Волков К.Н., Емельянов В.Н. Течение и теплообмен в каналах и вращающихся полостях. М.: Физматлит, 2010. 486 с.
  9. User Guide ANSYS Fluent version 14.0. USA. 2011.
  10. Назаров В.В., Кортников Н.Н., Миронова М.В. Расчет теплового состояния охлаждаемых паром высокотемпературных элементов проточной части турбины: Анализ различных подходов // Теплоэнергетика. 2011. № 9. С. 24–29.
  11. Кортников Н.Н., Миронова М.В. Трехмерное моделирование теплового состояния охлаждаемых паром высокотемпературных элементов проточной части турбины // Научно-технические ведомости Санкт-



Петербургского государственного политехнического университета. Серия: Наука и образование. 2011. № 4 (135). С. 215–220.

12. **Luo C., Song L., Li J., Feng Z.** Numerical study of internal flow fields in steam turbine stages with balance holes // Proceedings of ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea and Air. 2010. GT2010–23704. 9 pp.

13. **Кортиков Н.Н., Смирнов Ю.А.** Обобщение опытных данных по эффективности завесного охлаждения при вдуве под углом // Промышленная теплотехника. 1988. Т.10. №1. С. 33–36.

14. **РТМ 108.020.16–83.** Расчет температурных полей роторов и корпусов паровых турбин. М.: Минэнергомаш, 1985. 115 с.

## REFERENCES

1. **Kostyuk A.G., Grbin V.G., Trukhniy A.D.** Kontseptsiya parovykh turbin novogo pokoleniya dlya ugroznoy energetiki Rossii [Concept of steam turbines for a new generation of coal power industry of Russia]. Chast 1. Ekonomicheskoye i tekhnicheskoye obosnovaniye kontseptsii. *Teploenergetika*. 2010. № 12. S. 23–31. (rus.)

2. **Mironova V., Kortikov N.** Conjugated heat transfer on rotating bodies: Theory and application in turbomachinery. *Proceedings of Sixth Baltic Heat Transfer Conference*. Tampere, Finland. 2011. 6pp.

3. **Sakharov A.M.** Teplovyye ispytaniya parovykh turbin [Thermal testing of steam turbines]. M.: Energoatomizdat, 1990. 238 s. (rus.)

4. **Khomenok L.A., Zaytsev I.V., Ignatyeva T.A., Lyapunov V.M.** Raschetnoye obosnovaniye effektivnosti sistemy okhlazhdeniya dvukhpotochnogo rotora srednego davleniya moshchnykh parovykh turbin [Computational evaluation of the effectiveness of the cooling system with dual-rotor powerful medium-pressure steam turbine]. *Nadezhnost i bezopasnost energetiki*. 2012. №3(18). S. 18–24. (rus.)

5. **Moroz L., Tarasov A.** Coupled CFD and thermal steady state analysis of steam turbine secondary flow path. *International Joint Power Generation Conference (IJPGC 2003)*. 2003. IJPGC2003–40058. 6 pp.

6. **Moroz L., Tarasov A.** Flow phenomenon in steam turbine disk-stator cavities channeled by balance holes. *Proceedings of ASME Turbo Expo 2004: Power for Land, Sea and Air*. 2004. GT2004–54228. 9 pp.

7. **Samoylovich G.S.** Gidrogazodinamika: Uchebnik dlya studentov vuzov, obuchayushchikhsya po spetsialnosti «Turbostroyeniye» [Fluid dynamics. Textbook for university students majoring in turbomachinery]. 2-ye izd. M.: Mashinostroyeniye, 1990. 384 s. (rus.)

8. **Volkov K.N., Yemelyanov V.N.** Techeniye i teploobmen v kanalakh i vrashchayushchikhsya polostyakh [Flow and heat transfer in channels and rotating cavities]. M.: Fizmatlit. 2010. 486 s. (rus.)

9. User Guide ANSYS Fluent version 14.0. USA. 2011.

10. **Nazarov V.V., Kortikov N.N., Mironova M.V.** Raschet teplovogo sostoyaniya okhlazhdaiemykh parom vysokotemperaturnykh elementov protochnoy chasti turbiny: Analiz razlichnykh podkhodov [Calculating the Thermal State of Steam\_Cooled High\_Temperature Elements of a Turbine Flow Path: An Analysis of Different Approaches]. *Teploenergetika*. 2011. № 9. S. 24–29. (rus.)

11. **Kortikov N.N., Mironova M.V.** Trekhmernoye modelirovaniye teplovogo sostoyaniya okhlazhdaiemykh parom vysokotemperaturnykh elementov protochnoy chasti turbiny [Three-dimensional simulation of thermal state of high-temperature turbine elements cooled by steam]. *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Nauka i obrazovaniye*. 2011. № 4 (135). S. 215–220. (rus.)

12. **Luo C., Song L., Li J., Feng Z.** Numerical study of internal flow fields in steam turbine stages with balance holes. *Proceedings of ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea and Air*. 2010. GT2010–23704. 9 p.

13. **Kortikov N.N., Smirnov Yu.A.** Obobshcheniye opytnykh dannykh po effektivnosti zavesnogo okhlazhdeniya pri vduve pod uglom [Generalization of experimental data on the effectiveness of Severnogo cooling at the injection angle. Industrial heat engineering]. *Promyshlennaya teplotekhnika*. 1988. Т.10. №1. С. 33–36. (rus.)

14. **РТМ 108.020.16–83.** Raschet temperaturnykh polей rotorov i korpusov parovykh turbin [Calculation of temperature fields of the rotors and casings of steam turbines]. M.: Minenergomash, 1985. 115 s. (rus.)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**КОРТИКОВ Николай Николаевич** — доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: n-kortikov@yandex.ru

**МИРОНОВА Марина Викторовна** — кандидат технических наук начальник расчетной группы отдела теплообменного оборудования ОАО «Силовые машины». 195009, Санкт-Петербург, ул. Ватутина, 3А.. E-mail: mironova\_mv@rambler.ru

## AUTHORS

**KORTIKOV Nikolai N.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: n-kortikov@yandex.ru

**MIRONOVA Marina V.** — OJSC «Power Machines». 3A, Vatutina str., St.Petersburg, Russia, 195009.. E-mail: mironova\_mv@rambler.ru



# ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

DOI 10.5862/JEST.219.11

УДК 621.313

*M.A. Шакиров*

## УНИВЕРСАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ АВТОТРАНСФОРМАТОРА

*M.A. Shakirov*

### UNIVERSAL THEORY OF AUTOTRANSFORMER

Разработаны основы новой теории двухобмоточного автотрансформатора с получением универсальной 4Т-образной схемы замещения. Универсализм проявляется в отображении в схеме всех магнитных потоков как в окне, так и в магнитопроводе автотрансформатора. С ее помощью показано, что в магнитопроводе короткозамкнутого автотрансформатора возникают сверх- и антипотоки (в сравнении с потоком холостого хода), которые могут существенно превышать соответствующие потоки в короткозамкнутых трансформаторах

АВТОТРАНСФОРМАТОР; ПЕРВИЧНАЯ И ВТОРИЧНАЯ ОБМОТКИ; МАГНИТНЫЙ ПОТОК; КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ; СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ; ХОЛОСТОЙ ХОД.

The paper presents the foundations of a new theory of the two-winding autotransformer with obtaining the universal T-shaped equivalent circuit. The Universalism of the circuit is manifested in mapping the magnetic fluxes in the window and in the yoke of the autotransformer. This shows that the magnetic circuit of a short-circuited autotransformer experiences super – and antifluxes compared to the fluxes when idling. It is proved that these fluxes can be substantially higher than the respective fluxes in the short-circuited transformers.

AUTOTRANSFORMER; PRIMARY AND SECONDARY WINDINGS; MAGNETIC FLUX; SHORT CIRCUIT; EQUIVALENT CIRCUIT; IDLING.

#### Введение

При небольших коэффициентах трансформации напряжений в линиях электропередач, применяемых, в частности, для связи высоковольтных сетей смежных напряжений (например, 110 и 220 кВ или 220 и 500 кВ и т. д.), оказывается экономически более выгодным использовать вместо трансформаторов силовые автотрансформаторы. Объясняется это тем, что при одинаковой проходной мощности автотрансформатор имеет меньшие размеры и более высокий КПД по сравнению с трансформатором.

Вместе с тем автотрансформаторам присущ и ряд недостатков, что может привести к потере

их электродинамической устойчивости там, где обычный трансформатор будет более надежным. Для выяснения этих обстоятельств необходимо иметь ясную физическую картину процессов, возникающих в автотрансформаторе в любых условиях его работы, в том числе при коротких замыканиях (КЗ). Однако до настоящего времени теория автотрансформаторов разработана недостаточно. Как любая несостоявшаяся теория, она характеризуется бессистемностью, что проявляется в следующем:

отсутствии схем замещения автотрансформаторов в основных учебниках по теории электрических машин [1, 2];



несогласованности схемных моделей (если они приводятся): в [3] схема замещения построена относительно тока нагрузки, а в [4] — относительно входного тока автотрансформатора;

отсутствии даже упоминания об автотрансформаторах там, где, казалось бы, они должны быть одной из целей рассмотрения наравне с трансформаторами, так как отличаются от них лишь дополнительными электрическими связями [5, 6];

несогласованности в обозначениях чисел витков обмоток и коэффициентов трансформации: каждый из авторов учебников [1—4, 7] использует свои, отличные от других, обозначения этих величин, что наблюдается также в статьях [8, 9];

чрезвычайно слабом представлении о физических процессах в короткозамкнутых автотрансформаторах.

К этому следует добавить, что все рассуждения в существующей литературе по автотрансформаторам основаны на представлении о раздельных потоках рассеяния каждой из обмоток, что в действительности не имеет места, о чем предупреждали многие авторы начиная с [10], а также [11, 12].

Между тем в настоящее время все эти трудности могут быть преодолены, так как стало более ясным понимание распределения магнитных потоков в силовых двухобмоточных трансформаторах в любом режиме их работы, в том числе возникновения сверх- и антипотоков в короткозамкнутом трансформаторе [13—15].

Сверхпотоком КЗ в какой-либо части магнитопровода называется ее поток при установленномся КЗ, если он превышает магнитный поток холостого хода (ХХ) в ней при одном и том же напряжении на зажимах трансформатора в обоих режимах, а антипотоком КЗ — если он оказывается направленным встречно потоку ХХ. Таким образом, при КЗ в разных частях магнитопровода одновременно существуют встречно направленные потоки.

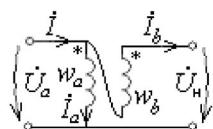


Рис. 1. Электрическая схема повышающего автотрансформатора

Поскольку в автотрансформаторе имеются те же магнитные связи, что и в трансформаторе (рис. 1), то аналогичные потоки при КЗ должны, очевидно, возникать и в нем. Причем с большей силой ввиду существенно меньшего его внутреннего сопротивления, т. е. сопротивления КЗ ( $z_{K3}$ ).

**Цель данной работы** — вывод соотношений для определения сверх- и антипотоков в короткозамкнутом автотрансформаторе, что важно для оценки его электродинамической устойчивости в этом состоянии. Достоверное решение этой проблемы возможно только для автотрансформатора со строгим математическим описанием его геометрии. Поэтому здесь, как и в [14, 15], рассматриваются однофазные двухобмоточные броневые автотрансформаторы с концентрическими броневыми ярмами при обычно принимаемом допущении: в пределах обмоток и канала между ними магнитные линии параллельны осям стержня. Это близко к реальности при условии, когда высота обмоток

$$h_{ob} = h_{okn} = h,$$

где  $h_{okn}$  — высота окна магнитопровода (рис. 2, а). Вначале строятся точные схемы замещения для идеализированного автотрансформатора ( $\mu_{сталь} = \infty$ , активные сопротивления обмоток  $R_a = R_b = 0$ ), после чего они приспосабливаются для реального автотрансформатора с учетом насыщения. Для определенности рассматривается повышающий автотрансформатор.

#### Принцип обозначения величин, характеризующих работу автотрансформатора

Для удобства используется нейтральная по отношению к существующим система обозначений числа витков и коэффициентов трансформации, а также других величин, исключающая путаницу при сравнении и переводе получаемых здесь соотношений на язык обозначений, принятых в различных учебниках. В основу положены индексы  $a$  и  $b$ , совпадающие с обозначениями толщин соответственно внутренней и внешней обмоток (рис. 2). В частности:  $w_a$  — число витков внутренней обмотки толщиной  $a$ ;  $w_b$  — число витков внешней обмотки толщиной  $b$ ;

$$n_b^a = \frac{w_a}{w_b}; \quad n_a^b = \frac{w_b}{w_a}; \quad n_a = \frac{w_a}{w_a + w_b};$$

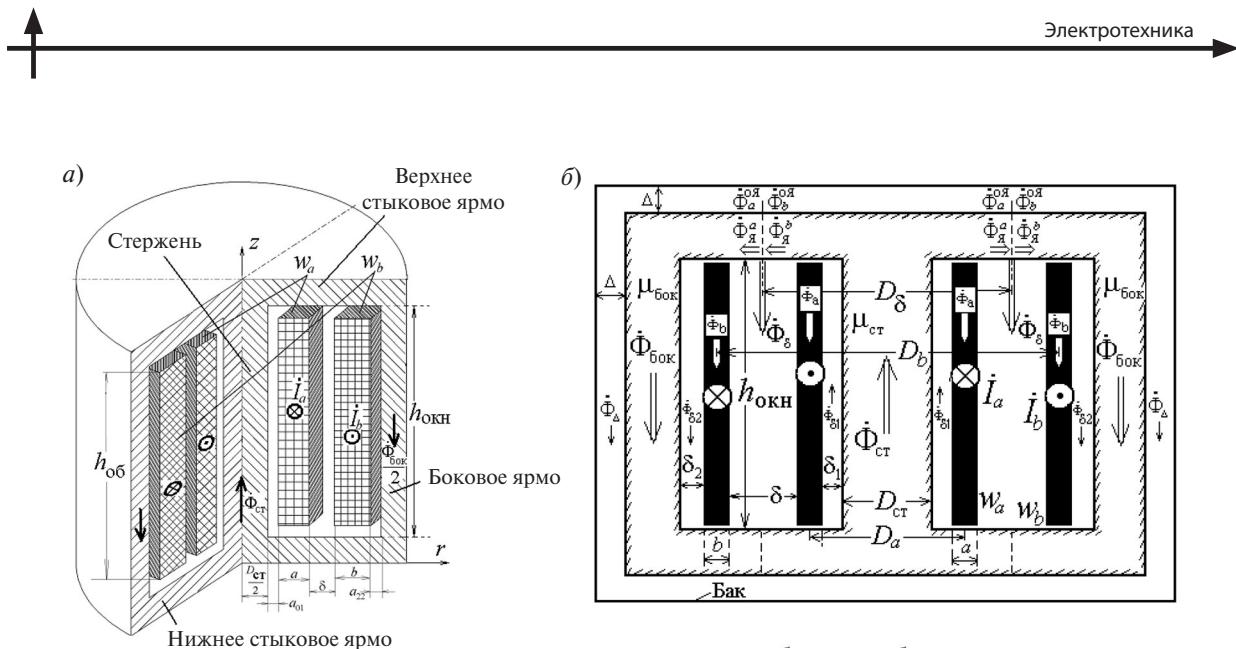


Рис. 2. Магнитная система (а) и расположение обмоток в броневом автотрансформаторе с цилиндрическим боковым ярмом (б)

$$n_b = \frac{w_b}{w_a + w_b}. \quad (1)$$

Удобство состоит в том, что здесь нет выделения первичной обмотки, которой обычно присваивается индекс 1. Любая из обмоток далее может рассматриваться как первичная с последующим присвоением ей индекса 1. Из этих соотношений следует:

$$n_a = \frac{1}{1+n_a^b}; \quad n_a^b = \frac{1}{n_a} - 1; \quad n_b = \frac{1}{1+n_b^a};$$

$$n_b^a = \frac{1}{n_b} - 1; \quad (2)$$

$$n_a = 1 - n_b ; \quad n_b = 1 - n_a ; \quad n_a^b n_a = n_b ;$$

$$n_b^a n_b = n_a . \quad (3).$$

Аналогичный принцип используется для обозначений магнитных потоков и потокосцеплений:

$\dot{\Phi}_{ct}$  — магнитный поток в стержне (индекс «*ст*» от слова «стержень»);

$\dot{\Phi}_{\text{бок}}$  — в боковом ярме (индекс « бок » от слов боковое ярмо);

$\dot{\Phi}_{\text{я}}^a$  — встыковом ярме со стороны обмотки

и  $\dot{\Phi}_я^b$  — в стыковом ярме со стороны обмотки

$w_b$ ,  
 $\dot{\Psi}_a$  — потокосцепление обмотки  $w_a$ ;

$\Psi_b$  – потокосцепление обмотки  $w_b$ .

Магнитные потоки в кольцевых каналах окна автотрансформатора снабжены индексами, совпадающими с соответствующей шириной каналов (рис. 2, б):

$\Phi_{\delta_1}$  — в канале шириной  $\delta_1$  между стержнем и внутренней обмоткой;

$\dot{\Phi}_{\delta 2}$  — в канале шириной  $\delta_2$  между боковым ярмом и внешней обмоткой;

$\dot{\Phi}_\delta$  — в канале шириной  $\delta$  между обмотками;  
 $\dot{\Phi}_a$  — в толще внутренней обмотки шириной  $a$ ;

$\Phi_b$  — в толще внешней обмотки шириной  $b$ . Очевидно, что сумма этих потоков равна потоку в окне:

$$\dot{\Phi}_{\text{exch}} = \dot{\Phi}_{s1} + \dot{\Phi}_a + \dot{\Phi}_s + \dot{\Phi}_b + \dot{\Phi}_{s2}.$$

## Магнитные потоки между трансформатором и баком:

$\dot{\Phi}_a^{\text{оя}}, \dot{\Phi}_b^{\text{оя}}$  — между баком и соответствующими частями стыковых ярем:

$\dot{\Phi}_\Delta$  — в канале между баком и боковым яр-  
мом.

## Магнитные сопротивления кольцевых каналов в окне:

$$R_{\delta 1}^M = \frac{h}{\mu_0 s_{\delta 1}}; \quad R_{\delta 2}^M = \frac{h}{\mu_0 s_{\delta 2}}; \quad R_{\delta}^M = \frac{h}{\mu_0 s_{\delta}};$$

$$R_a^M = \frac{h}{\Pi_0 S}; \quad R_b^M = \frac{h}{\Pi_0 S'}, \quad (4)$$

где нижний индекс в обозначении площади ( $s_k$ ) совпадает с обозначением ширины соответствующего кольцевого канала и его потока (рис. 1, б):

$$s_{\delta 1} = \pi(D_{ct} + \delta_1)\delta_1; \quad (5)$$

$$s_a = s_1 = \pi D_a a; \quad (6)$$

$$s_{\delta} = \pi D_{12} a_{12}; \quad (7)$$

$$s_b = s_2 = \pi D_b b; \quad (8)$$

$$s_{\delta 2} = \pi(D_b + b + \delta_2)\delta_2. \quad (9)$$

Внутренняя индуктивность (индуктивность КЗ) трансформатора:

$L_{K3}^a$  — со стороны внутренней обмотки (индуктивность КЗ, приведенная к обмотке  $w_a$ );

$L_{K3}^b$  — со стороны внешней обмотки (индуктивность КЗ, приведенная к обмотке  $w_b$ ).

### Уравнения для магнитных величин идеализированного автотрансформатора

По конструкции магнитопровода автотрансформатор тождественен трансформатору при одинаковом расположении обмоток. Поэтому при записи связей между магнитными потоками для автотрансформатора можно воспользоваться

соотношениями для соответствующего трансформатора (рис. 2, б) или его развернутой **полной** схемой замещения (рис. 3, а), на которой одновременно с электрическими величинами ( $I_a, I_b, U_a, U_b$ ) и индуктивностями ( $L_a, L_{\delta}, L_b$ ) представлены и магнитные величины, т. е. потокосцепления обмоток ( $\dot{\Psi}_a, \dot{\Psi}_b$ ), магнитные потоки ( $\dot{\Phi}_{ct}, \dot{\Phi}_a, \dot{\Phi}_b$  и т. д.). Явно локализованы в виде четырех поперечных стрелок потоки в магнитопроводе ( $\dot{\Phi}_{ct}, \dot{\Phi}_a, \dot{\Phi}_b, \dot{\Phi}_{bok}$ ), что стало основанием в [14] назвать модель (рис. 2, а) **неприведенной 4Т-образной схемой замещения идеализированного трансформатора**. Смысль индуктивностей раскрыт в табл. 1, где приведены также соотношения для потоков и потокосцеплений  $\Psi_a(t), \Psi_b(t)$ . Эти связи, в отличие от выражений на рис. 3, представлены для мгновенных значений потоков, что удобно при исследовании переходных процессов.

Левую и правую подсхемы на рис. 3, а разделяет идеальный трансформатор, характеризуемый матричным уравнением

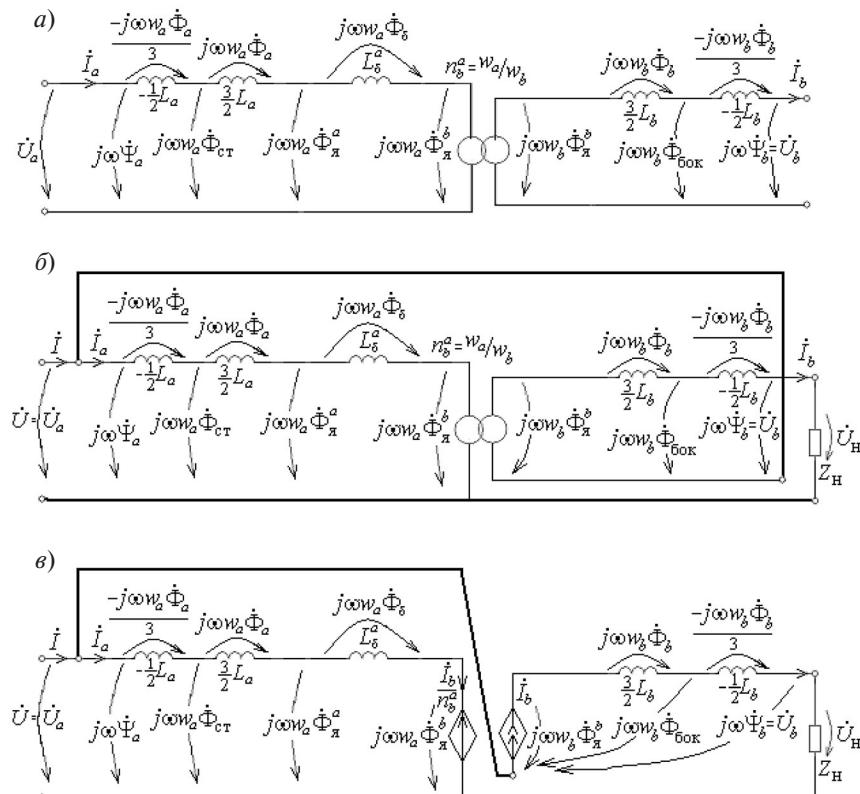


Рис. 3. Неприведенные 4Т-образные схемы замещения идеализированных трансформатора (а) и повышающего автотрансформатора с идеальным элементом ( $n_b^a : 1$ ) (б) и с зависимыми источниками (в)

$$\begin{vmatrix} j\omega w_a \Phi_a^b \\ \dot{I}_a \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} n_b^a & \\ & 1/n_b^a \end{vmatrix} \begin{vmatrix} j\omega w_b \Phi_b^a \\ \dot{I}_b \end{vmatrix} = \\
 = \begin{vmatrix} 1/n_a^b & \\ & n_a^b \end{vmatrix} \begin{vmatrix} j\omega w_b \Phi_b^a \\ \dot{I}_b \end{vmatrix},$$

где квадратная матрица представляет собой проходную матрицу идеального трансформатора, играющего роль конвертора [16]. Все уравнения для потоков можно получить из схемы рис. 3, *a*, используя только второй закон Кирхгофа.

### Переход к 4Т-схемной модели идеализированного автотрансформатора

Для этого достаточно в схеме (рис. 3, *a*) повторить электрические соединения из схемы рис. 1, что и выполнено на рис. 3, *б* для случая повышающего автотрансформатора с нагрузкой  $Z_H$ . Полученная таким образом модель является развернутой полной схемой замещения автотрансформатора. Ее также можно назвать **неприведенной 4Т-образной схемой замещения идеализированного повышающего автотрансформатора**. Для ее расчетов можно перейти к схеме, в кото-

Таблица 1  
Соотношения для индуктивностей, потоков и потокосцеплений  
идеализированного трансформатора ( $\mu_{\text{сталь}} = \infty$ )

Зона окна	Индуктивность	Поток	Потокосцепление обмотки (через элемент индуктивности)	Потокосцепление обмотки (через потоки)
Внутренняя обмотка	$L_a \approx \frac{w_a^2}{3R_a^M}$ $L'_a \approx \frac{w_b^2}{3R_a^M}$ $L'_a = n_a^{b^2} L_a$	$\Phi_a(t) \approx \frac{3}{2} \frac{L_a i_a(t)}{w_a}$ $\Phi_a(t) \approx \frac{3}{2} \frac{L'_a i_b(t)}{w_b}$	$\Psi_a(t) =$ $= w_a \Phi_{\text{ct}}(t) - \frac{L_a i_a(t)}{2}$	$w_a \Phi_{\text{ct}}(t) - \frac{w_a \Phi_a(t)}{3}$
Между обмотками	$L_{\delta}^a = \frac{w_a^2}{R_{\delta}^M}$ $L_{\delta}^b = \frac{w_b^2}{R_{\delta}^M}$ $L_{\delta}^b = n_a^{b^2} L_a$	$\Phi_{\delta}(t) = \frac{L_{\delta}^a i_a(t)}{w_a}$ $\Phi_{\delta}(t) = \frac{L_{\delta}^b i_b(t)}{w_b}$	—	—
Внешняя обмотка	$L_b \approx \frac{w_b^2}{3R_b^M}$ $L'_b \approx \frac{w_a^2}{3R_b^M}$ $L'_b = n_b^{a^2} L_b$	$\Phi_b(t) \approx \frac{3}{2} \frac{L_b i_b(t)}{w_b}$ $\Phi_b(t) \approx \frac{3}{2} \frac{L'_b i_a(t)}{w_a}$	$\Psi_b(t) =$ $= w_b \Phi_{\text{бок}}(t) + \frac{L_b i_b(t)}{2}$	$w_b \Phi_{\text{бок}}(t) + \frac{w_b \Phi_b(t)}{3}$
Окно	$L_{\text{K3}}^a = L_a + L_{\delta}^a + L'_b$ $L_{\text{K3}}^b = L'_a + L_{\delta}^b + L_b$ $L_{\text{K3}}^b = n_a^{b^2} L_{\text{K3}}^a$	$\Phi_{\text{окно}}(t) \approx$ $\approx \left( L_{\delta}^a + \frac{3}{2} (L_a + L'_b) \right) \frac{i_a(t)}{w_a}$ $\Phi_{\text{окно}}(t) \approx$ $\approx \left( L_{\delta}^b + \frac{3}{2} (L'_a + L_b) \right) \frac{i_b(t)}{w_b}$	—	—

рой идеальный трансформатор ( $n_b^a : 1$ ) заменен парой зависимых источников, т. е. источником тока, управляемым током, (ИТУТ)

$$\dot{I}_b = n_b^a \dot{I}_a, \quad (11)$$

и источником напряжения, управляемым напряжением, (ИНУН). Чтобы не вводить новые переменные на схеме, напряжения обозначены через магнитные потоки; поэтому ИНУН представлен уравнением

$$j\omega w_a \dot{\Phi}_a^b = n_b^a j\omega w_b \dot{\Phi}_a^b. \quad (12)$$

Входной ток автотрансформатора выражается через токи трансформатора следующим образом:

$$\dot{I} = \dot{I}_a + \dot{I}_b = \frac{\dot{I}_b}{n_a} = \frac{\dot{I}_a}{n_b}. \quad (13)$$

Элементы правой части схемы (рис. 3, б) могут быть перенесены через идеальный трансформатор ( $n_b^a : 1$ ) в ее левую часть по правилам, изложенным в [17]. В результате получим приведенную 4Т-модель идеализированного повышающего автотрансформатора (см. Приложение).

### Свернутые схемы замещения повышающего идеализированного автотрансформатора

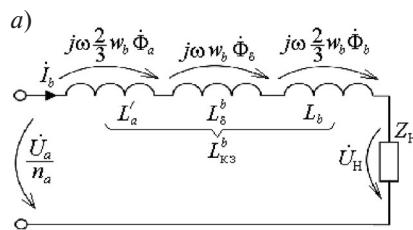
Расчет схем (рис. 3, а, б) является тривиальной процедурой. В частности по любой из них можно составить следующую систему уравнений:

$$+j\omega w_a \dot{\Phi}_a^b + j\omega (L_a + L_\delta^a) \dot{I}_a = \dot{U}_a; \quad (14)$$

$$-j\omega w_b \dot{\Phi}_a^b + j\omega L_b \dot{I}_b + \dot{U}_H = \dot{U}_a; \quad (15)$$

$$\dot{I}_a = n_b^a \dot{I}_b. \quad (16)$$

После подстановки в уравнение (14) правой части (16), умножения его на коэффициент  $n_b^a = w_b / w_a$  и в результате последующего сложения с уравнением (15) получим выражение



$$j\omega (n_a^b L_a + n_a^b L_\delta^a + L_b) \dot{I}_b + \dot{U}_H = \\ = (1 + n_a^b) \dot{U}_a \rightarrow \frac{\dot{U}_a}{n_a},$$

которое с учетом соотношений табл. 1 может быть переписано в виде

$$j\omega (L'_a + L_\delta^b + L_b) \dot{I}_b + \dot{U}_H = \frac{\dot{U}_a}{n_a},$$

или

$$j\omega L_{k3}^b \dot{I}_b + \dot{U}_H = \frac{\dot{U}_a}{n_a}. \quad (17)$$

Этому результату можно поставить в соответствие схему замещения (рис. 4, а), согласующуюся со схемой, приведенной в [3, с. 131]. Из нее следует

$$\dot{I}_b = \frac{\dot{U}_a}{n_a (j\omega L_{k3}^b + Z_H)}. \quad (18)$$

Подставив  $\dot{I}_b$  в уравнение (15), нетрудно получить поток

$$\dot{\Phi}_a^b = \left( \frac{j\omega L_b + Z_H}{n_a (j\omega L_{k3}^b + Z_H)} - 1 \right) \frac{\dot{U}_a}{j\omega w_b}. \quad (19)$$

Если после подстановки  $\dot{I}_b = n_b^a \dot{I}_a$  в уравнение (15) и умножения этого уравнения на  $n_b^a = w_b / w_a$  сложить его с (14), то получим выражение

$$j\omega (L_a + L_\delta^a + n_b^{a2} L_b) \dot{I}_a + n_b^a \dot{U}_H = \\ = (1 + n_b^a) \dot{U}_a \rightarrow \frac{\dot{U}_a}{n_b},$$

которое с учетом соотношений табл. 1 может быть переписано в виде

$$j\omega (L_a + L_\delta^a + L'_b) \dot{I}_a + \dot{U}_H^a = \frac{\dot{U}_a}{n_b},$$

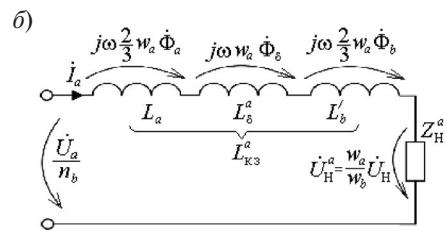


Рис. 4. Упрощенная схема замещения повышающего автотрансформатора относительно тока  $\dot{I}_b$  (а) и тока  $\dot{I}_a$  (б)



или

$$j\omega L_{\text{K3}}^a \dot{I}_a + \dot{U}_H^a = \frac{\dot{U}_a}{n_b}, \quad (20)$$

где  $\dot{U}_H^a$  — напряжение нагрузки, приведенное к внутренней обмотке,

$$\dot{U}_H^a = n_b^a \dot{U}_H = n_b^a Z_H \dot{I}_b = n_b^a Z_H (n_b^a \dot{I}_a) = Z_H^a \dot{I}_a. \quad (21)$$

Здесь введено сопротивление нагрузки, приведенное к внутренней обмотке:

$$Z_H^a = n_b^a Z_H. \quad (22)$$

Этому результату соответствует схема замещения (рис. 4, б). Из нее следует

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a}{n_b (j\omega L_{\text{K3}}^a + Z_H^a)}. \quad (23)$$

Подставив  $\dot{I}_a$  в уравнение (14), получаем поток в виде

$$\dot{\Phi}_a^b = \left( 1 - \frac{j\omega L_a + j\omega L_{\delta}^a}{n_b (j\omega L_{\text{K3}}^a + Z_H^a)} \right) \frac{\dot{U}_a}{j\omega w_a}. \quad (24)$$

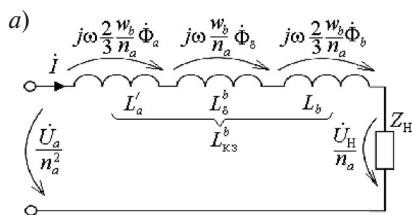
Подставив в выражение  $\dot{I} = \dot{I}_a + \dot{I}_b$  правые части из соотношений для  $\dot{I}_a$  и  $\dot{I}_b$ , в результате несложных преобразований получаем

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_a}{n_a^2 (j\omega L_{\text{K3}}^b + Z_H)}, \quad (25)$$

или

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_a}{n_b^2 (j\omega L_{\text{K3}}^a + Z_H^a)}. \quad (26)$$

Первому из этих соотношений соответствует схема замещения (рис. 5, а), а второму — схема (рис. 5, б).



Используя найденные по этим схемам величины, далее по схемам (рис. 3, б, в) можно найти все потоки в стали и окне автотрансформатора. Например, для потока в толще обмотки  $w_a$  имеем

$$j\omega w_a \dot{\Phi}_a = j\omega \frac{3}{2} L_a \dot{I}_a, \quad (27)$$

откуда

$$\begin{aligned} \dot{\Phi}_a &= \frac{3}{2} L_a \frac{\dot{I}_a}{w_a} = \frac{3}{2} L_a \frac{1}{w_a} \dot{I}_a = \\ &= \frac{3}{2} L_a \frac{1}{w_a} \frac{\dot{U}_a}{n_b (j\omega L_{\text{K3}}^a + Z_H^a)} \end{aligned} \quad (28)$$

и т. д.

### Родственны́ эквивалентные схемы замещения автотрансформатора

Представленные свернутые четыре схемы замещения (рис. 4 и 5) могут быть получены одна из другой в силу того, что, если известна одна из них, то ей можно поставить в соответствие бесконечное множество «родственных» эквивалентных схем. Это утверждение можно представить в виде следующей леммы.

**Лемма.** Пусть в качестве исходной задана схема (рис. 6, а), в которой при действии на входе напряжения  $\dot{U}$  протекают токи  $\dot{I}_m, \dot{I}_n, \dot{I}_0$  и сопротивление  $Z_H$  находится под напряжением  $\dot{U}_H$ . Выберем произвольные два числа  $\eta$  и  $\xi$ , не равные нулю. Назовем **родственной** схему, в которой приложенное напряжение больше в  $\eta$  раз, а все сопротивления увеличены в  $\xi$  раз (рис. 6, б). В родственной схеме все напряжения увеличиваются в  $\eta$  раз, все токи — в  $(\eta/\xi)$  раз, а все мощности — в  $\eta^2/\xi$  раз. Родственная схема эквивалентна исходной в том смысле, что по ней можно простым алгебраическим пересчетом найти все токи, напряжения и мощности исходной схемы.

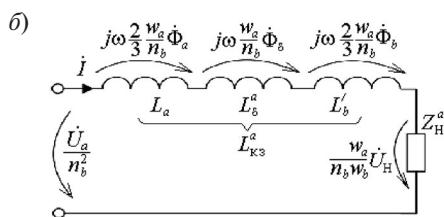


Рис. 5. Упрощенная схема замещения повышающего автотрансформатора относительно тока  $\dot{I}$  с индуктивностью КЗ  $L_{\text{K3}}^b$  (а) и индуктивностью КЗ  $L_{\text{K3}}^a$  (б)

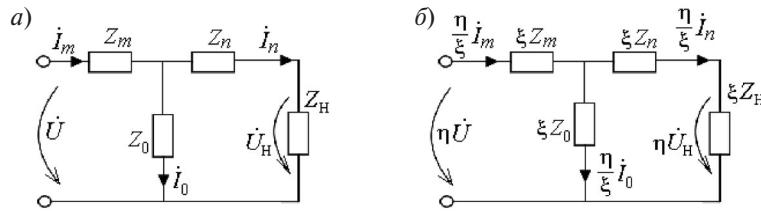


Рис. 6. Преобразование схемы (a) в родственную эквивалентную схему (б)

Все схемы на рис. 4 и рис. 5 родственно эквивалентны. Чтобы показать это, выберем в качестве исходной схему на рис. 4, a. Коэффициенты  $\eta$  и  $\xi$ , превращающие ее в остальные схемы, представлены в табл. 2. Исходной схеме соответствуют, очевидно, коэффициенты  $\eta=1$  и  $\xi=1$ .

Таблица 2

Синтез родственно эквивалентных схем замещения идеализированного автотрансформатора

$\eta$	$\xi$	Родственная схема замещения
1	1	Рис. 4, a
$n_b^a$	$n_b^{a^2}$	Рис. 4, б
$1/n_a$	1	Рис. 5, a
$n_b^a / n_b$	$n_b^{a^2}$	Рис. 5, б
$n_a$	$n_a^2$	Рис. 7, a

На рис. 7, a синтезирована схема, в которой входные напряжение и ток совпадают с соответствующими величинами на входе автотрансформатора. Очевидно, схемы на рис. 4, a и б, а также рис. 7, a эквивалентны по мощностям.

#### Дубликаты схем замещения автотрансформатора

В схеме на рис. 7, a величина  $L_{\text{K3}}^b$  — индуктивность КЗ, приведенная к обмотке с числом витков  $w_b$ . Используя подстановку  $L_{\text{K3}}^b = n_b^{a^2} L_a^a$ , получаем эквивалентную схему (рис. 7, б), в которой  $L_{\text{K3}}^a$  — индуктивность КЗ, приведенная к обмотке с числом витков  $w_a$ . Все напряжения и токи остаются прежними. Очевидно, таким же образом можно получить дубликаты схем (рис. 4 и рис. 5), что весьма важно при сопоставлении схемных моделей автотрансформаторов, приводимых различными авторами. Для этой же

цели полезно на схемах штрихованные величины в выражениях  $L_{\text{K3}}^a$  и  $L_{\text{K3}}^b$  заменять нештрихованными. Согласно табл. 1 можем записать

$$L_{\text{K3}}^a = L_a + L_{\delta}^a + n_b^{a^2} L_b; \quad (29)$$

$$L_{\text{K3}}^b = n_b^{b^2} L_a + L_{\delta}^b + L_b. \quad (30)$$

#### Сравнение свернутых схем замещения со схемами в учебниках

В схеме на рис. 7, б продольную индуктивность можно представить следующим образом:

$$n_b^2 L_{\text{K3}}^a = n_b^2 L_a + n_b^2 L_{\delta}^a + n_b^2 (n_b^{a^2} L_b).$$

Разобьем, как это принято в традиционной теории, индуктивность  $L_{\delta}^b$  между обмотками, относя некоторую ее часть ( $\lambda L_{\delta}^b$ ) к обмотке  $w_a$ , а другую часть  $(1-\lambda)L_{\delta}^b$  — к обмотке  $w_b$ , где  $\lambda$  — любое число, не равное нулю. Тогда можно записать

$$\begin{aligned} n_b^2 L_{\text{K3}}^a &= n_b^2 L_a + \lambda n_b^2 L_{\delta}^a + (1-\lambda) n_b^2 L_{\delta}^a + n_b^2 n_b^{a^2} L_b = \\ &= n_b^2 (L_a + \lambda L_{\delta}^a) + (1-\lambda) n_b^2 n_b^{a^2} L_{\delta}^a + n_b^2 n_b^{a^2} L_b. \end{aligned}$$

Обозначив

$$L_{\alpha} = (L_a + \lambda L_{\delta}^a), \quad (31)$$

$$L_s = (1-\lambda) L_{\delta}^a + L_b \quad (32)$$

и учтя, что

$$n_b n_b^a = n_a, \quad n_b = 1 - n_a,$$

продольную индуктивность в схеме на рис. 7, б перепишем в виде

$$n_b^2 L_{\text{K3}}^a = (1 - n_a)^2 L_{\alpha} + n_a^2 L_s. \quad (33)$$

Этот результат показывает, что схема на рис. 7, б совпадает со схемой, представленной в [7, стр. 79, рис. 3—4, к], если в ней переобозначить  $k' = n_a$ . Тот факт, что этот вывод не зависит от выбора числа  $\lambda$ , подчеркивает бессмысленность разбиения индуктивности  $L_{\delta}^b$  между обмотками,

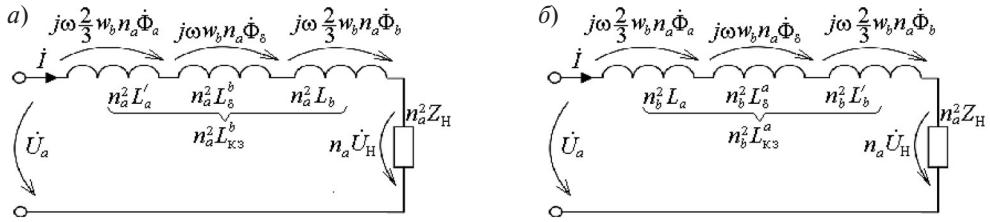


Рис. 7. Упрощенная схема замещения повышающего автотрансформатора относительно входных величин тока  $\dot{I}, \dot{U}_a$  с индуктивностью КЗ  $n_a^2 L_{\text{K3}}^b$  (а) и ее дубликат с индуктивностью КЗ  $n_b^2 L_{\text{K3}}^a$  (б)

а вместе с этим и слабую обоснованность традиционной теории автотрансформаторов.

Схема на рис. 7, б совпадает также со схемой замещения для повышающего автотрансформатора, приведенной в учебнике [4, с. 224], в котором продольное сопротивление представлено формулой под номером (11-23):

$$Z_3 = Z_k k^2 = (Z_{\text{п}} + Z / k_A^2) k^2 = \\ = k^2 Z_{\text{п}} + (k / k_A)^2 Z. \quad (34)$$

Выполнив переобозначения

$$k_A = n_b^a, \quad k = n_a, \quad Z_{\text{п}} = j\omega L_s, \quad Z = j\omega L_{\alpha}, \\ Z_k = j\omega L_{\text{K3}}^b,$$

ее можно переписать в виде

$$Z_3 = j\omega n_a^2 L_{\text{K3}}^b = j\omega \left( n_a^2 L_s + (n_a / n_b^a)^2 L_{\alpha} \right),$$

или

$$Z_3 = j\omega n_a^2 n_b^b L_{\text{K3}}^a = j\omega \left( n_a^2 L_s + (n_a n_b^b)^2 L_{\alpha} \right),$$

или

$$Z_3 = j\omega (n_a n_b^b)^2 L_{\text{K3}}^a = j\omega \left( n_a^2 L_s + n_b^2 L_{\alpha} \right),$$

или

$$Z_3 = j\omega n_b^2 L_{\text{K3}}^a = j\omega \left( n_a^2 L_s + (1 - n_A)^2 L_{\alpha} \right), \quad (35)$$

что отличается от уравнения (33) лишь множителем  $j\omega$  и подтверждает тождественность схем замещения авторов работ [7] и [4]. Данный пример подтверждает сложность и разнобой в обозначениях, применяемых различными авторами учебников. Совпадение схем замещения на рис. 7, б со схемами в учебниках свидетельствует о достоверности последних только для идеализированного автотрансформатора. Вместе с тем схемы на рис. 7 информативнее учебных, поскольку позволяют одновременно с электри-

ческим величинами определять потоки в окне автотрансформатора.

### Режим холостого хода идеализированного автотрансформатора

В режиме ХХ сопротивление нагрузки  $Z_H = \infty$ , и согласно любой схеме замещения

$$I_a^{\text{XX}} = I_b^{\text{XX}} = \dot{I}^{\text{XX}} = 0.$$

Поэтому и потоки в окне будут нулевыми:

$$\dot{\Phi}_a^{\text{XX}} = \dot{\Phi}_{\delta}^{\text{XX}} = \dot{\Phi}_b^{\text{XX}} = 0; \dot{\Phi}_{\text{окн}}^{\text{XX}} = 0.$$

С учетом этого по схемам замещения на рис. 3, б, в убеждаемся, что все потоки ХХ в магнитопроводе одинаковы:

$$\dot{\Phi}_{\text{XX}} = \dot{\Phi}_{\text{CT}}^{\text{XX}} = \dot{\Phi}_a^{\text{XX}} = \dot{\Phi}_{\delta}^{\text{XX}} = \dot{\Phi}_b^{\text{XX}} = \dot{\Phi}_{\text{бок}}^{\text{XX}} = \frac{\dot{U}_a}{j\omega w_a}. \quad (36)$$

Для напряжений по этим схемам имеем

$$\dot{U}_b^{\text{XX}} = n_a^b \dot{U}_a = \frac{\dot{U}_a}{n_a^b} = \frac{w_b}{w_a} \dot{U}_a; \quad (37)$$

$$\dot{U}_H^{\text{XX}} = \dot{U}_a + \dot{U}_b^{\text{XX}} = \frac{\dot{U}_a}{n_a} = \frac{\dot{U}_a}{1 - n_b}. \quad (38)$$

Можно также записать

$$\dot{U}_H^{\text{XX}} = \frac{\dot{U}_b^{\text{XX}}}{n_a^b n_a} = \frac{\dot{U}_b^{\text{XX}}}{n_b}. \quad (39)$$

### Режим короткого замыкания

Анализ установившегося режима КЗ автотрансформатора при номинальном напряжении  $\dot{U}_a$  на входе важен как для понимания физических основ его работы при перегрузках, так и для выявления сверх- и антипотоков в магнитопроводе при  $Z_H = 0$ . В этом случае для токов КЗ согласно (23), (18) и (25) можно написать

$$\dot{I}_a^{K3} = \frac{1}{n_b} \frac{\dot{U}_a}{j\omega L_{K3}^a}; \quad \dot{I}_b^{K3} = n_b^a \dot{I}_a^{K3} = \frac{1}{n_a} \frac{\dot{U}_a}{j\omega L_{K3}^b};$$

$$\dot{I}^{K3} = \frac{\dot{U}_a}{n_a^2 j\omega L_{K3}^b}. \quad (40)$$

Непосредственно из схем рис. 3, б, в следует

$$j\omega w_a \dot{\Phi}_a^{K3} = j\omega \frac{3}{2} L_a \dot{I}_a^{K3},$$

откуда для потока в толще обмотки  $w_a$  получаем

$$\dot{\Phi}_a^{K3} = \frac{3}{2} L_a \frac{\dot{I}_a^{K3}}{w_a} = \frac{3}{2} L_a \frac{\dot{U}_a}{n_b j\omega L_{K3}^a w_a} =$$

$$= 3 \frac{1}{n_b} \frac{L_a}{2L_{K3}^a} \frac{\dot{U}_a}{j\omega w_a} = 3 \frac{1}{n_b} \frac{L_a}{2L_{K3}^a} \dot{\Phi}_{xx},$$

или в относительных единицах

$$\underline{\dot{\Phi}}_a^{K3} = \frac{\dot{\Phi}_a^{K3}}{\dot{\Phi}_{xx}} = \frac{3}{n_b} \frac{L_a}{2L_{K3}^a}. \quad (41)$$

Найдем аналогичное соотношение для потока в стержне  $\dot{\Phi}_{ct}^{K3}$ . Пользуясь вторым законом Кирхгофа по схемам на рис. 3, б, в, имеем

$$-j\omega \frac{1}{2} L_a \dot{I}_a^{K3} + j\omega w_a \dot{\Phi}_{ct}^{K3} = \dot{U}_a,$$

или

$$j\omega w_a \dot{\Phi}_{ct}^{K3} = \dot{U}_a + j\omega \frac{1}{2} L_a \dot{I}_a^{K3} =$$

$$= \dot{U}_a + j\omega \frac{1}{2} L_a \frac{1}{n_b} \frac{\dot{U}_a}{j\omega L_{K3}^a}.$$

После сокращений и деления обеих частей равенства на  $j\omega w_a$  получаем

$$\dot{\Phi}_{ct}^{K3} = \left( 1 + \frac{1}{n_b} \frac{L_a}{2L_{K3}^a} \right) \frac{\dot{U}_a}{j\omega w_a} = \left( 1 + \frac{1}{n_b} \frac{L_a}{2L_{K3}^a} \right) \dot{\Phi}_{xx}.$$

Таким образом,

$$\underline{\dot{\Phi}}_{ct}^{K3} = \frac{\dot{\Phi}_{ct}^{K3}}{\dot{\Phi}_{xx}} = \left( 1 + \frac{1}{n_b} \frac{L_a}{2L_{K3}^a} \right). \quad (42)$$

Чтобы найти поток КЗ  $\dot{\Phi}_{ya}^{bK3}$ , воспользуемся его общим выражением (19), положив сопротивление нагрузки равным нулю:

$$\dot{\Phi}_{ya}^{bK3} = \left( \frac{j\omega L_b}{n_a j\omega L_{K3}^b} - 1 \right) \frac{\dot{U}_a}{j\omega w_b} = \left( \frac{L_b}{n_a L_{K3}^b} - 1 \right) \frac{\dot{U}_a}{j\omega w_a n_a^b} =$$

$$= \left( \frac{L_b}{n_a L_{K3}^b} - 1 \right) \frac{1}{n_a^b} \dot{\Phi}_{xx},$$

откуда

$$\underline{\dot{\Phi}}_{ya}^{bK3} = \frac{\dot{\Phi}_{ya}^{bK3}}{\dot{\Phi}_{xx}} = \frac{1}{n_a^b} \left( \frac{1}{n_a} \frac{L_b}{L_{K3}^b} - 1 \right) = \left( \frac{1}{n_b} \frac{L'_b}{L_{K3}^a} - n_a^a \right). \quad (43)$$

Аналогичным образом нетрудно получить и другие потоки автотрансформатора при КЗ (табл. 3).

Как и следовало ожидать, при КЗ имеет место следующее равенство для действующих значений потоков:

$$\Phi_{okh}^{K3} = \Phi_{ct}^{K3} + \Phi_{bok}^{K3}. \quad (44)$$

Для расчета потоков КЗ по формулам табл. 3 необходим предварительный расчет отношения индуктивностей к индуктивности КЗ, что нетрудно сделать, воспользовавшись соотношениями табл. 1 и формулами (1), (3)–(5). Например,

$$\frac{L_a}{L_{K3}^a} = \frac{L'_a}{L_{K3}^b} = \frac{w_a^M / 3R_a}{\frac{w_a^2}{3R_a^M} + \frac{w_a^2}{R_\delta^M} + \frac{w_a^2}{3R_b^M}} =$$

$$= \frac{s_a}{s_a + 3s_\delta + s_b} = \frac{aD_a}{aD_a + 3aD_\delta + bD_b}.$$

Если принять  $D_a \approx D_\delta \approx D_b$ , то после сокращений получаем приближенное выражение

$$\frac{L_a}{L_{K3}^a} = \frac{L'_a}{L_{K3}^b} = \frac{a}{a + 3a + b}.$$

Аналогично получаются приближенные выражения для отношений остальных индуктивностей (табл. 4).

**Замечание 1.** В случае бесконечно тонких обмоток ( $a = 0, b = 0$ ) имеем

$$L_a / L_{K3}^a = 0, L_\delta / L_{K3}^a = 1, L_b / L_{K3}^a = 0,$$

и из табл. 3 следует, что в этом случае магнитные потоки при КЗ будут такими:

$$\dot{\Phi}_{ct}^{K3} = \dot{\Phi}_{ya}^{bK3} = \dot{\Phi}_{xx};$$

$$\dot{\Phi}_{bok}^{K3} = \dot{\Phi}_{ya}^{bK3} = -n_b^a \dot{\Phi}_{xx};$$

$$\dot{\Phi}_a^{K3} = \dot{\Phi}_b^{K3} = 0;$$

Таблица 3  
Магнитные потоки в идеализированном автотрансформаторе в режиме КЗ

Область (участок) автотрансформатора	Поток $k$ -го участка, отнесенный к потоку ХХ $\dot{\Phi}_k^{k3} = \frac{\dot{\Phi}_k^{k3}}{\dot{\Phi}_{xx}}$	Примечание
Стержень	$\dot{\Phi}_{ct}^{k3} = 1 + \frac{1}{n_b} \frac{L_a}{2L_{k3}^a}$	$\dot{\Phi}_{ct}^{k3}$ — сверхпоток, так как $\dot{\Phi}_{ct}^{k3} > \dot{\Phi}_{xx}$
Левый участок стыкового ярма	$\dot{\Phi}_a^{aK3} = 1 - \frac{1}{n_b} \frac{L_a}{L_{k3}^a}$	—
Правый участок стыкового ярма	$\dot{\Phi}_a^{bK3} = \frac{1}{n_b} \frac{L'_b}{L_{k3}^a} - n_b^a$	—
Боковое ярмо	$\dot{\Phi}_{бок}^{k3} = - \left( n_b^a + \frac{1}{n_b} \frac{L'_b}{2L_{k3}^a} \right)$	$\dot{\Phi}_{бок}^{k3}$ — антипоток, (так как направлен встречно потоку в стержне $\dot{\Phi}_{ct}^{k3}$ )
Внутренняя обмотка	$\dot{\Phi}_a^{k3} = \frac{\dot{\Phi}_a^{k3}}{\dot{\Phi}_{xx}} = \frac{3}{n_b} \frac{L_a}{2L_{k3}^a}$	—
Коридор между обмотками	$\dot{\Phi}_\delta^{k3} = \frac{\dot{\Phi}_\delta^{k3}}{\dot{\Phi}_{xx}} = \frac{L_\delta^a}{n_b L_{k3}^a}$	—
Внешняя обмотка	$\dot{\Phi}_b^{k3} = \frac{\dot{\Phi}_b^{k3}}{\dot{\Phi}_{xx}} = \frac{3}{n_b} \frac{L'_b}{2L_{k3}^a}$	—
Окно	$\dot{\Phi}_{окн}^{k3} = \frac{\dot{\Phi}_{окн}^{k3}}{\dot{\Phi}_{xx}} = \frac{1}{n_b} \left( 1 + \frac{L_a + L'_b}{2L_{k3}^a} \right)$	Поток в окне больше сверхпотока в стержне: $\dot{\Phi}_{окн}^{k3} > \dot{\Phi}_{ct}^{k3} > \dot{\Phi}_{xx}$

Таблица 4  
Отношения индуктивностей при  $h_{об} = h_{окн}$

Относительная величина	Формула	Приближенная формула
$\frac{L_a}{L_{k3}^a} = \frac{L'_a}{L_{k3}^a}$	$\frac{aD_a}{aD_a + 3\delta D_\delta + bD_b}$	$\frac{a}{a + 3\delta + b}$
$\frac{L_\delta^a}{L_{k3}^a} = \frac{L_\delta^b}{L_{k3}^a}$	$\frac{3\delta D_\delta}{aD_a + 3\delta D_\delta + bD_b}$	$\frac{3\delta}{a + 3\delta + b}$
$\frac{L'_b}{L_{k3}^a} = \frac{L_b}{L_{k3}^a}$	$\frac{bD_b}{aD_a + 3\delta D_\delta + bD_b}$	$\frac{b}{a + 3\delta + b}$

$$\dot{\Phi}_{\delta}^{K3} = \dot{\Phi}_{OKH}^{K3} = \frac{1}{n_b} \dot{\Phi}_{xx} = (1 + n_b^a) \dot{\Phi}_{xx} .$$

Из этих формул следует, что даже в случае тонких обмоток в боковом ярме при КЗ внешней обмотки возникает внушительный антипоток, существенно (при больших  $n_b^a = (w_a + w_b) / w_b$ ) превышающий поток ХХ ( $\dot{\Phi}_{xx}$ ) со стороны обмотки  $w_a$ . Это объясняется тем, что последовательная обмотка ( $w_b$ ) при КЗ, как и первичная ( $w_a$ ) обмотка, оказывается включенной непосредственно на входное напряжение  $\dot{U}_a$ , что приводит к появлению в боковом ярме потока  $\dot{\Phi}_{бок}^{K3} = \dot{\Phi}_{xx}^b$ , где  $\dot{\Phi}_{xx}^b$  — поток ХХ со стороны обмотки  $w_b$ , равный

$$\dot{\Phi}_{xx}^b = \frac{\dot{U}_a}{j\omega w_b} = \frac{\dot{U}_a}{j\omega w_a} \frac{w_a}{w_b} = \dot{\Phi}_{xx} n_b^a .$$

В соответствии с (44) оба потока (со стороны стержня и бокового ярма) устремляются в межобмоточное пространство, создавая тем самым сверхпоток в окне между обмотками —  $\dot{\Phi}_{\delta}^{K3} = (1 + n_b^a) \dot{\Phi}_{xx}$ . Учет конечной толщины обмоток еще более усиливает эти эффекты.

**Пример.** Рассмотрим идеализированный превышающий автотрансформатор AT1, построенный на базе трансформатора Тр1 [18], со следующими данными:  $w_a = 535$ ,  $w_b = 161$ ,  $a = 10$  мм,  $b = 3$  мм,  $\delta \approx 0$ ,  $h_{об} = h_{окн}$ . Из этих данных следует

$$n_b^a = \frac{w_a}{w_b} = \frac{535}{161} = 3,32;$$

$$n_b = \frac{w_b}{w_a + w_b} = \frac{161}{535 + 161} = 0,231 ;$$

$$\frac{1}{n_b} = \frac{1}{0,23} = 4,32 .$$

В режиме ХХ

$$\dot{U}_b^{xx} = \frac{\dot{U}_a}{n_b^a} = \frac{\dot{U}_a}{3,32} = 0,3 \dot{U}_a ;$$

$$\dot{U}_H^{xx} = \frac{\dot{U}_a}{1 - n_b} = \frac{\dot{U}_a}{1 - 0,231} = 1,3 \dot{U}_a .$$

Для расчета режима КЗ определяем следующие величины:

$$\frac{L_a}{L_{K3}^a} \approx \frac{a}{(a + 3\delta + b)} = \frac{10}{10 + 3 \cdot 0 + 3} = 0,77 ;$$

$$\frac{L'_b}{L_{K3}^a} \approx \frac{b}{a + 3\delta + b} = \frac{3}{10 + 3 \cdot 0 + 3} = 0,23 ;$$

$$\frac{L_{\delta}}{L_{K3}^a} \approx \frac{3\delta}{a + 3\delta + b} = 0 .$$

Расчеты потоков представлены во второй колонке табл. 5 для обмоток заданной толщины. Как видно, во всех рассматриваемых участках магнитопровода и окна, за исключением промежутка между обмотками (в силу его отсутствия, т. к.  $\delta = 0$ ), при КЗ имеет место значительное превышение магнитного потока ХХ. Антипотоки возникли и в участках стыковых ярем с заходом во внутреннюю обмотку. Превышение этих потоков над потоком ХХ дает основание называть их антисверхпотоками.

Во второй колонке табл. 5 приведены экспериментальные данные, найденные с помощью измерительных витков, намотанных на стержень и боковое ярмо AT1. Поток в окне получен суммированием значений потоков в стержне и боковом ярме. Погрешность расчета и эксперимента не превышает 17 %.

В третьей колонке табл. 5 представлены результаты расчета потоков для случая тонких обмоток. Их сравнение с данными первой колонки показывает, что в общем случае значения потоков при КЗ весьма существенно зависят от геометрии магнитопровода и обмоток.

#### 4Т-образная схемная модель реального автотрансформатора

В отличие от идеализированного, в реальном автотрансформаторе имеют место потери в меди обмоток и стали магнитопровода с конечной магнитной проницаемостью. Их можно учесть приближенно путем наращивания полученных выше схем замещения идеализированного автотрансформатора (см. рис. 3) активными сопротивлениями  $R_a, R_b$  обмоток, а также поперечными ветвями для учета активных и реактивных потерь в стали, включая участки между баком и частями магнитопровода, как показано пунктиром на схеме (рис. 8, a), образованной из модели на рис. 3, б. В ней нелинейные индуктивности и включенные параллельно с ними активные проводимости соответствуют следующим элементам:

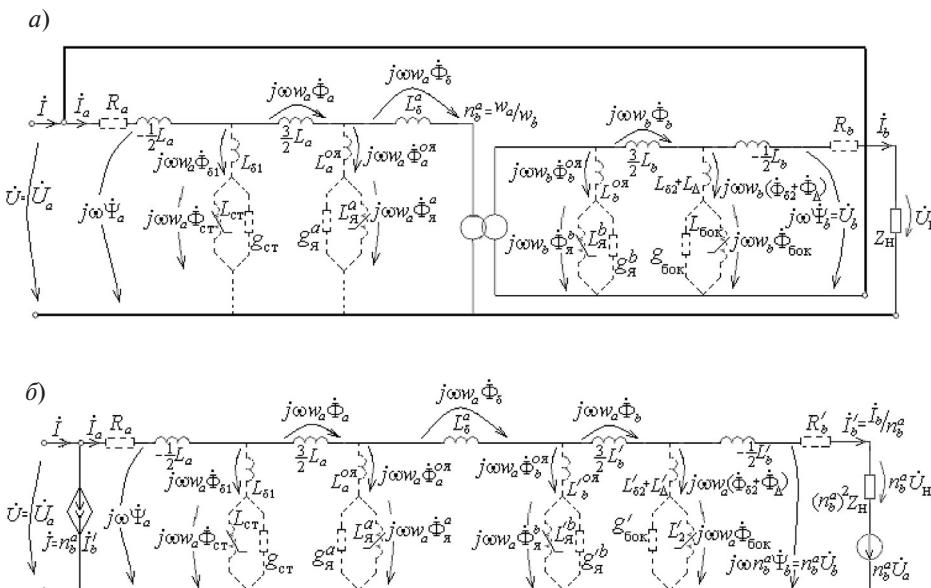
$L_{я}^a, g_{я}^a$  — части стыкового ярма, примыкающей к стержню;



Таблица 5

## Магнитные потоки в идеализированном автотрансформаторе Ат1 в режиме К3

Область (участок) автотрансформатора Ат1	Поток $k$ -го участка, отнесенный к потоку ХХ, $\underline{\dot{\Phi}}_k^{k3} = \frac{\dot{\Phi}_k^{k3}}{\dot{\Phi}_{xx}},$ в случае обмоток конечной толщины ( $a = 10$ мм, $b = 3$ мм, $\delta = 0$ )	Эксперимент	Поток $k$ -го участка, отнесенный к потоку ХХ, $\underline{\dot{\Phi}}_k^{k3} = \frac{\dot{\Phi}_k^{k3}}{\dot{\Phi}_{xx}},$ в случае тонких обмоток ( $a = b = 0$ , $\delta \neq 0$ )
Стержень	$\underline{\dot{\Phi}}_{ct}^{k3} = 1 + 4,32 \frac{0,77}{2} = 2,66$	2,77	1
Левый участок стыкового ярма	$\underline{\dot{\Phi}}_a^{k3} = 1 - 4,32 \cdot 0,77 = -2,32$	—	1
Правый участок стыкового ярма	$\underline{\dot{\Phi}}_b^{k3} = 4,32 \cdot 0,23 - 3,32 = -2,32$	—	-3,32
Боковое ярмо	$\underline{\dot{\Phi}}_{бок}^{k3} = -\left(3,32 + 4,32 \frac{0,23}{2}\right) = -3,82$	-3,03	-3,32
Внутренняя обмотка	$\underline{\dot{\Phi}}_a^{k3} = 3 \cdot 4,32 \cdot \frac{0,77}{2} = 4,99$	—	0
Коридор между обмотками	$\underline{\dot{\Phi}}_{\delta}^{k3} = 0$	—	4,32
Внешняя обмотка	$\underline{\dot{\Phi}}_b^{k3} = \frac{3}{0,231} \frac{0,23}{2} = 1,49$	—	0
Окно	$\underline{\dot{\Phi}}_{окн}^{k3} = 4,32 \left(1 + \frac{0,77 + 0,23}{2}\right) = 6,48$	5,8	4,32

Рис. 8. Эвристическая схема замещения реального автотрансформатора (а) и его модель после приведения вторичной обмотки  $w_b$  к первичной  $w_a$  (б)

$L_{\mathfrak{y}}^b$ ,  $g_{\mathfrak{y}}^b$  ( $L_{\mathfrak{y}}'^b$ ,  $g_{\mathfrak{y}}'^b$ ) — части стыкового ярма, примыкающей к боковому ярму;

$L_{ct}, g_{ct}$  — стержню;

$L_{\text{бок}}, g_{\text{бок}}$  ( $L'_{\text{бок}}, g'_{\text{бок}}$ ) — боковому ярму.

Последовательно присоединенные к ним линейные индуктивности

$$L_{\delta 1} = \frac{\mu_0 s_{\delta 1}}{h} w_a^2, \quad L_a^{\text{oy}} = \frac{\mu_0 s_a^{\text{oy}}}{l_a^{\text{oy}}} w_a^2,$$

$$L_b^{o\mathfrak{R}} = \frac{\mu_0 s_b^{o\mathfrak{R}}}{l_b^{o\mathfrak{R}}} w_b^2, \quad L_{\delta 2} = \frac{\mu_0 s_{\delta 2}}{h} w_b^2, \quad L_{\Delta} = \frac{\mu_0 s_{\Delta}}{h} w_b^2$$

введены для учета магнитных потоков  $\dot{\Phi}_{\delta 1}$ ,  $\dot{\Phi}_a^{\text{оя}}$ ,  $\dot{\Phi}_b^{\text{оя}}$ ,  $\dot{\Phi}_{\delta 2}$ ,  $\dot{\Phi}_\Delta$  (см. рис. 2), возникающих вследствие конечной магнитной проницаемости стали или ее насыщения (смысл значений площадей  $s_a^{\text{оя}}$ ,  $s_b^{\text{оя}}$  и длин  $l_a^{\text{оя}}$ ,  $l_b^{\text{оя}}$  очевиден из рассмотрения потоков  $\dot{\Phi}_a^{\text{оя}}$ ,  $\dot{\Phi}_b^{\text{оя}}$ ). Штрихами отмечены величины в схеме рис. 8, б, приведенные к обмотке  $w_a$ .

Примечание. Добавление поперечных ветвей основано на известном из теории магнитных цепей положении, согласно которому ферромагнитному сердечнику катушки (с числом витков  $w$ ), в котором протекает поток  $\dot{\Phi}_k$ , на схеме замещения катушки соответствует активная проводимость  $g_k$  и нелинейная индуктивная проводимость  $b_k$ , удовлетворяющие соотношениям

$$g_k = \frac{P_{Fe_k}}{(\omega \Phi_L)^2}; \quad b_k = \frac{1}{\omega L_k(\Phi_k)}, \quad (73)$$

где  $P_{Fe_k}$  — активные потери в сердечнике (здесь в  $k$ -м участке магнитопровода) и  $L_k(\Phi_k) = \frac{w^2}{R_k^M(\Phi_k)}$  — нелинейная индуктивность;  $R_k^M(\Phi_k)$  — нелинейное магнитное сопротивление стали на  $k$ -м участке магнитопровода.

Поперечная ветвь, состоящая из элементов  $L_1, g_1, L_{\delta 1}$ , нарушает пропорцию между напряже-

ниями на продольных индуктивностях ( $-L_a/2$ ) и ( $3L_a/2$ ), имевшую место в исходных схемах (см. рис. 3). Поэтому на рис. 8, *a* явное представление напряжения на индуктивности ( $-L_a/2$ ) через поток  $\Phi_a/3$  устранено. По аналогичной причине устранено представление через поток  $\dot{\Phi}_b/3$  напряжения на индуктивности ( $-L_b/2$ ) и на индуктивности  $-L'_b/2$ . Несмотря на *полуэвристический* характер полученной 4Т-образной схемы (рис. 8, *a*), уравнения, составленные по второму закону Кирхгофа для напряжений, показанных на схеме стрелками, в точности соответствуют соотношениям для магнитных потоков (см. рис. 2).

Приведенная 4Т-образная схема замещения реального автотрансформатора (рис. 8, б), построена на базе приведенной схемы для идеализированного автотрансформатора (см. рис. 10 в Приложении).

Эта же схема с выделенным общим током намагничивания  $I_0$  показана на рис. 9. В принципе ее среднюю часть можно преобразовать в эквивалентную звезду или треугольник. Из нее могут быть выведены Т-, П- и Г-образные схемные модели.

## Заключение

Изложенная работа имеет практическую направленность в свете весьма печальной статистики о росте повреждений и выходе из строя автотрансформаторов в аварийных ситуациях [21]. Из нее следует, что принимаемые до сих пор попытки повысить электродинамическую стойкость автотрансформаторов путем устранения дефектов производственного характера, т. е. улучшением механических характеристик обмоток или изоляции и применением новых, нетрадиционных материалов, недостаточны. Необходимы шаги по усовершенствованию теории автотрансформаторов в силу отсутствия в тра-

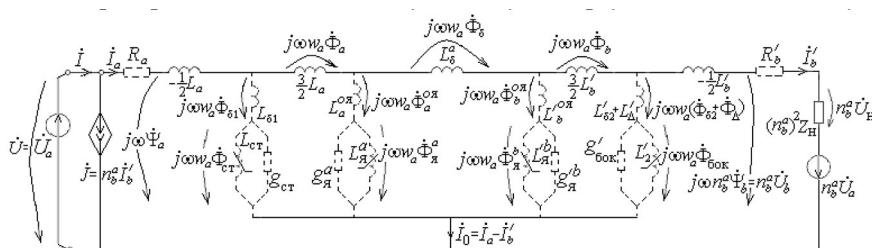


Рис. 9. Приведенная 4Т-схема замещения с общим током намагничивания



диционной теории адекватных схем замещения, способных отобразить реальные физические процессы в аварийных ситуациях.

Предложенная 4Т-схема замещения чрезвычайно наглядна, однако степень ее приемлемости для описания изменений потоков в переходных процессах требует тщательной проверки путем сравнения с результатами расчета по другим схемным моделям автотрансформатора, которые могут быть получены на

основе 2Т-схем замещения трансформаторов [19] или по еще более точным *магнитоэлектрическим схемам их замещения* [20]. В целом достоверность разработанной теории подтверждается практическим совпадением экспериментальных измерений магнитных потоков в стали опытного образца автотрансформатора с результатами их расчетов на основе 4Т-образной схемы замещения в режиме установившегося КЗ автотрансформатора.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Приведенная 4Т-схема замещения идеализированного повышающего автотрансформатора

Левая и правая части неприведенной схемы замещения (рис. 3, б) разделены конвертором в виде идеального трансформатора ( $n_b^a = w_a / w_b$ ). Эту схему можно преобразовать, перенеся по очереди элементы правой части ( $3L_b / 2$ ,  $-L_b / 2$  и  $Z_H$ ) через конвертор в левую часть. Общие принципы переноса элементов схем через  $2 \times 2$ -полюсники сформулированы в [17]. В нашем случае достаточно знать следующее правило:

при переносе продольной индуктивности или сопротивления через идеальный трансформатор справа налево они умножаются на  $n_b^a$ ; при этом напряжения на них «увеличиваются» в  $n_b^a$  раз при «уменьшении» тока во столько же раз (мощность, выделяемая на этих элементах после переноса остается без изменений); место, где располагались продольные элементы закорачивается.

На рис. 10, а показаны первые два этапа реализации этого правила для элементов схемы, изображенной на рис. 3, б.

Сначала перенесена индуктивность  $3L_b / 2$ , которая после умножения на  $n_b^a$  превратилась в новую индуктивность

$$n_b^a \frac{3}{2} L_b \rightarrow \frac{3}{2} L'_b$$

с напряжением на ней

$$j\omega w_b \dot{\Phi}_b n_b^a = j\omega (w_b n_b^a) \dot{\Phi}_b \rightarrow j\omega w_a \dot{\Phi}_b,$$

при этом поперечное напряжение за ней превратилось в следующее:

$$j\omega w_b \dot{\Phi}_{бок} n_b^a = j\omega (w_b n_b^a) \dot{\Phi}_{бок} \rightarrow j\omega w_a \dot{\Phi}_{бок}.$$

На втором этапе перенесена индуктивность  $-L_b / 2$ , в результате чего образовалась схема на рис. 10, а. Здесь же удобства ради для осуществления следующего этапа сопротивление нагрузки  $Z_H$  пред-

ставлено в виде продольной ветви. Пунктиром показано напряжение за нагрузкой, совпадающее с входным напряжением автотрансформатора  $\dot{U}_a$ .

Третий этап после переноса  $Z_H$  через конвертор представлен на рис. 10, б. В результате заданное напряжение  $\dot{U}_a$  оказывается приложенным непосредственно к правым зажимам идеального трансформатора, что, очевидно, делает известным и напряжение слева от него, которое схема воспринимает как ЭДС, равную  $n_b^a \dot{U}_a$ . Поэтому схему на рис. 10, б можно также изобразить с дополнительной ЭДС справа, как показано на схеме рис. 10, в, в которой зависимый источник тока  $\dot{I}_b$ , имитирующий правую ветвь идеального трансформатора, перемещен в начало схемы.

На схеме рис. 10, в наглядно представлены все те же электрические и магнитные величины, что и на исходной схеме рис. 3, б с четырьмя магнитными потоками в стали. Поэтому она может быть названа **приведенной 4Т-образной схемой замещения идеализированного повышающего автотрансформатора**. Мощность, потребляемая в нагрузке  $n_b^a Z_H$ , равна мощности, потребляемой нагрузкой  $Z_H$  в исходной цепи (рис. 3, б, в).

Для расчета тока  $\dot{I}_a$  схему на рис. 10, в можно упростить, отбросив зависимый источник тока (рис. 11). Далее тривиальным объединением всех индуктивностей, а также суммированием ЭДС

$$\dot{U}_a + n_b^a \dot{U}_a = (1 + n_b^a) \dot{U}_a = \frac{\dot{U}_a}{n_b}$$

получаем свернутую схему замещения (см. рис. 4, б), в которой также можно увидеть магнитные потоки  $\dot{\Phi}_a^a$  и  $\dot{\Phi}_a^b$ . Для этого в ней следует провести поперечные стрелки от центральной индуктивности  $L_a^a$ . Очевидно, левая стрелка будет соответствовать напряжению  $j\omega w_a \dot{\Phi}_a^a + n_b^a \dot{U}_a$ , а правая — напряжению  $j\omega w_a \dot{\Phi}_a^b + n_b^a \dot{U}_a$ .

В отличие от схемы рис. 4, б схема замещения на рис. 11 «физичнее». Во-первых, тем, что в ней отображаются все магнитные потоки. А во-вторых,

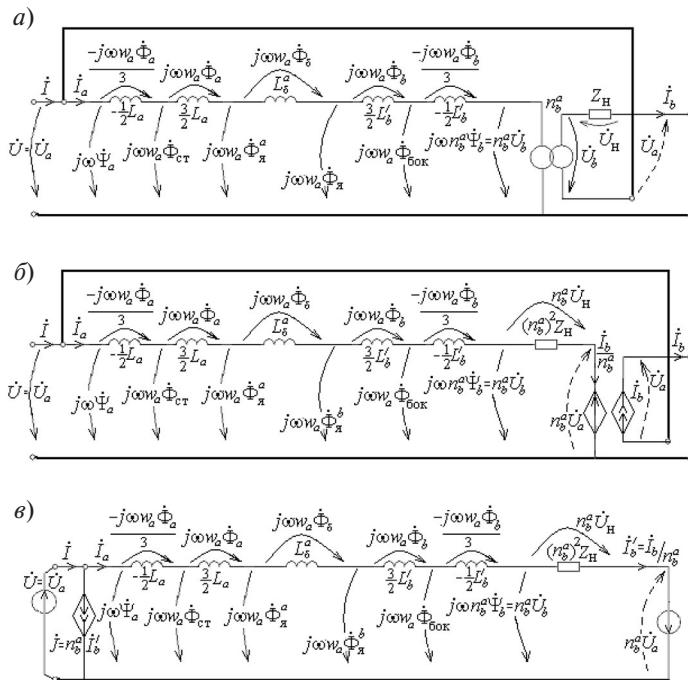


Рис. 10. Схема замещения идеализированного автотрансформатора после переноса через конвертор справа налево индуктивных элементов (а) и сопротивления нагрузки (б), а также замены ИНУН независимой ЭДС (в)

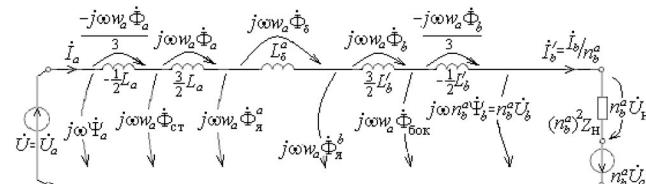


Рис. 11. Приведенная развернутая схема автотрансформатора относительно тока  $\dot{I}_a$

прямой демонстрацией преимущества автотрансформатора, состоящего в передаче мощности в нагрузку двумя путями, электромагнитным и электрическим. Электромагнитная (или трансформаторная) мощность передается от левого источника ЭДС с напряжением  $\dot{U} = \dot{U}_a$ . Она равна

$$\dot{S}_{\text{эм}} = \dot{U}_a \dot{I}_a^* = \dot{U} \dot{I}_a^*,$$

а электрическая — от правого источника ЭДС с напряжением  $n_b^2 \dot{U}_a$ . Она равна

$$\dot{S}_3 = (n_b^2 \dot{U}_a) \dot{I}_a^* = \dot{U} (n_b^2 \dot{I}_a^*) = \dot{U} \dot{I}_b^*.$$

В сумме они образуют мощность, подводимую к входным зажимам автотрансформатора:

$$\dot{S} = \dot{S}_{\text{эм}} + \dot{S}_3 = \dot{U} \dot{I}_a^* + \dot{U} \dot{I}_b^* = \dot{U} (\dot{I}_a^* + \dot{I}_b^*) = \dot{U} \dot{I}^*.$$

Из схемы на рис. 11 следует, что мощность, потребляемая нагрузкой, равна

$$\dot{S}_H = (n_b^2 \dot{U}_b - n_b^2 \dot{U}_a) \dot{I}_a^* = (\dot{U}_b - \dot{U}_a) (n_b^2 \dot{I}_a^*) = \dot{U}_b \dot{I}_a^*.$$

Если положить все индуктивности равными нулю, то  $\dot{S} = \dot{S}_H$ , чем и обусловлено название  $\dot{S}$  как проходной мощности.

Преобразуем схему (рис. 10, в) с помощью леммы, задавшись коэффициентами  $\eta = n_b$  и  $\xi = n_b^2$ . В этом случае согласно лемме токи изменятся в  $\eta/\xi = 1/n_b$  раз:

$$\begin{aligned} I &\rightarrow \frac{\dot{I}}{n_b}; & J &\rightarrow \frac{\dot{J}}{n_b} = \frac{\dot{I}_b}{n_b}; & \dot{I}_a &\rightarrow \frac{\dot{I}_a}{n_b} = \dot{I}; \\ \dot{I}' &\rightarrow \frac{\dot{I}_b}{n_b} = \frac{\dot{I}_b}{n_b n_b} = \frac{\dot{I}_b}{n_a}. \end{aligned}$$



Рис. 12. 4T-образная схема замещения идеального автотрансформатора, родственно-эквивалентная схеме на рис. 11

И родственно эквивалентная схема примет вид (рис. 12). В ней все индуктивности увеличены в  $\xi = n_b^2$  раз. Аналогичным образом изменено сопротивление нагрузки:

$$n_b^a Z_H \rightarrow n_b^2 n_b^a Z_H = (n_b n_b^a)^2 Z_H = n_a^2 Z_H.$$

Все напряжения увеличены в  $\eta = n_b$  раз. В частности, для напряжения на нагрузке имеем

$$n_b^a \dot{U}_H \rightarrow n_b n_b^a \dot{U}_H = (n_b n_b^a) \dot{U}_H = n_a \dot{U}_H.$$

Аналогично для напряжения на правом источнике ЭДС запишем

$$n_b^a \dot{U}_a \rightarrow n_b n_b^a \dot{U}_a = (n_b n_b^a) \dot{U}_a = n_a \dot{U}_a.$$

Точно также преобразовано поперечное напряжение:

$$j\omega n_a^b \dot{\Psi}_b \rightarrow j\omega n_b n_b^a \dot{\Psi}_b = j\omega (n_b n_b^a) \dot{\Psi}_b = j\omega n_a \dot{\Psi}_b = n_a \dot{U}_b.$$

Для определения тока  $\dot{I}$  схему можно упростить, отбросив источник тока и объединив в ней источники ЭДС:

$$n_b \dot{U}_a + n_a \dot{U}_a = (n_b + n_a) \dot{U}_a = \dot{U}_a.$$

После чего схема на рис. 12 почти совпадет со схемой на рис. 7, б. Для полного совпадения следует при записи напряжений на индуктивностях учесть, что

$$w_a n_b = w_b n_a.$$

Все схемы на рис. 10–12 эквивалентны по мощности, потребляемой в нагрузке.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1974. 840 с.
2. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. М.: Энергия, 928 с.
3. Петров Г.Н. Электрические машины. Ч. 1: Трансформаторы. М.: Энергия, 1974. 240 стр.
4. Важнов А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1968. 708 с.
5. Сергеенков Б.Н., Киселев В.М., Акимова Н.А. Электрические машины: Трансформаторы / Под ред. И.П. Копылова. М.: Высшая школа, 1989. 352 с.
6. Лейтес Л.В., Пинцов А.М. Схемы замещения многообмоточных трансформаторов. М.: Энергия, 1974. 192 с.
7. Васютинский С.Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов. Л.: Энергия, 1970. 432 с.
8. Конов Ю.С. Насыщение магнитопроводов трансформаторов и автотрансформаторов при коротком замыкании // Электротехническая промышленность. Сер.: Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы. 1976. Вып. 11 (67).
9. Григоров И.Б. Потоки в магнитопроводах мощных силовых трансформаторов и автотрансформаторов с учетом потока рассеяния // Электротехника. 1975. №4. С. 20–25.
10. Boyajian A. Resolution of transformer reactances into primary and secondary reactances // AIEE Trans. Jun. 1925. P. 805–810.
11. Cherry E.C. The duality between interlinking electric and magnetic circuits and the formulation of transformer equivalent circuits // Proceedings of the Physical Society. Vol. (B) 62, Feb. 1949. P. 101–111.
12. Blume L.F., Boyajian A., Gammill G., Lenox T.C. Minne S. Montsinger M.V. Transformer Engineering: A treatise on the Theory, Operation and Application of Transformer. New York: Wiley, 1951. 239 с.
13. Александров Г.Н., Шакиров М.А. Трансформаторы и реакторы: новые идеи и принципы. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. 204 с.
14. Шакиров М.А. Вектор Пойнгинга и новая теория трансформаторов. Часть 1 // Электричество. 2014. № 9. С. 52–59.
15. Шакиров М.А. Вектор Пойнгинга и новая теория трансформаторов. Часть 2 // Электричество. 2014. № 10. С. 53–65.
16. Практикум по ТОЭ / Под ред. М.А. Шакирова. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2006. 252 с.
17. Шакиров М.А. Перенос элементов электрической цепи через 2x2-полюсники // Электричество, 2006, № 11. С. 45–53.
18. Шакиров М.А., Андрющук В.В., Дуань Лион. Аномальные магнитные потоки в двухобмоточном трансформаторе при коротком замыкании // Электричество. 2010. № 3. С. 55–63.
19. Шакиров М.А. 2T-образные схемы замещения трансформаторов // Электричество. 2010. № 5. С. 19–36.



20. **Шакиров М.А.** Анализ неравномерности распределения магнитных нагрузок и потерь в трансформаторах на основе магнитоэлектрических схем замещения // Электричество. 2005. № 11. С. 15–27.

21. **Левицкая Е.И., Лурье А.И., Панибратец А.Н.** Проблема электродинамической стойкости трансформаторов при коротких замыканиях // Электротехника. 2001. №9. С. 47–54.

## REFERENCES

1. **Voldek A.I.** Elektricheskiye mashiny [Electrical machinery.] L.: Energiya, 1974. 840 s. (rus.)
2. **Ivanov-Smolenskiy A.V.** Elektricheskiye mashiny. [Electrical machinery.] M.: Energiya, 1980. 928 str. (rus.)
3. **Petrov G.N.** Elektricheskiye mashiny. Ch1. Transformatory. [Electrical machinery. Part. 1. Transformatory.] M.: Energiya, 1974. 240 s. (rus.)
4. **Vazhnov A.I.** Elektricheskiye mashiny. [Electrical machinery]. L.: Energiya, 1968. 708 s. (rus.)
5. **Sergeyev B.N., Kiselev V.M., Akimova N.A.** Elektricheskiye mashiny: Transformatory [Electrical Machines: Transformers.] Pod red. I.P. Kopylova. M.: Vyssh. shk., 1989, 352 s. (rus.)
6. **Leytes L.V., Pintsov A.M.** Skhemy zameshcheniya mnogoobmotochnykh transformatorov. [Equivalent circuit multiwinding transformers.] M.: Energiya, 1974, 192 s. (rus.)
7. **Vasyutinskiy S.B.** Voprosy teorii i rascheta transformatorov [Theory and calculation of transformers.] L.: Energiya, 1970. 432 s. (rus.)
8. **Konov Yu.S.** Nasylshcheniye magnitoprovodov transformatorov i avtotransformatorov pri korotkom замыкании. Saturation of magnetic transformers and autotransformers short-circuit. *Elektrotehnicheskaya promyshlennost. Ser.: Apparaty vysokogo napryazheniya, transformatory, silovyye kondensatory* [Electrical industry. Ser.: Washer voltage transformers, power capacitors]. 1976. Vyp.11 (67). (rus.)
9. **Grigorov I.B.** Potoki v magnitoprovodakh moshchnykh silovykh transformatorov i avtotransformatorov s uchetom potoka rasseyaniya. [Flows in the magnetic powerful power transformers and autotransformers with the leakage flux. *Elektrotehnika*. 1975. №4. S. 20–25. (rus.)
10. **Boyajian A.** Resolution of transformer reactances into primary and secondary reactances *AIEE Trans.* Jun. 1925. P. 805–810.
11. **Cherry E.C.** The duality between interlinkend electric and magnetic circuits and the formulation of transformer equivalent circuits. *Proceedings of the Physical Society*. Feb. 1949. Vol. (B) 62. P. 101–111.
12. **Blume L.F., Boyajian A., Gamilly G., Lenox T.C. Minnec S. Montsinger M.V.** Transformer Engineering: A treatise on the Theory, Operation and Application of Transformer. New York: Wiley, 1951, 239 s.
13. **Aleksandrov G.N., Shakirov M.A.** Transformatory i reaktory: novyye idei i printsipy [Transformatory and reactors, new ideas and principles]. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2006. 204 s. (rus.)
14. **Shakirov M.A.** Vektor Poyntinga i novaya teoriya transformatorov. Chast 1. [Poynting vector and the new theory of transformers. Part 1. *Elektrichestvo*. 2014. № 9. S. 52–59. (rus.)
15. **Shakirov M.A.** Vektor Poyntinga i novaya teoriya transformatorov. Chast 2. [Poynting vector and the new theory of transformers. Part 2]. *Elektrichestvo*. 2014. № 10. S. 53–65. (rus.)
16. **Praktikum po TOE** [Workshop on SOC] / Pod red. M.A. Shakirova. SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2006. 252 s. (rus.)
17. **Shakirov M.A.** Perenos elementov elektricheskoy tsepi cherez 2kh2-polyusniki [Transferring the circuit elements through the 2x2-poles]. *Elektrichestvo*. 2006. № 11. S. 45–53. (rus.)
18. **Shakirov M.A., Andrushchuk V.V., Duan Liyun.** Anomalnyye magnitnyye potoki v dvukhobmotochnom transformatore pri korotkom замыкании [Anomalous magnetic fluxes in the two-winding transformer short-circuit]. *Elektrichestvo*. 2010. № 3. S. 55–63. (rus.)
19. **Shakirov M.A.** 2T-obraznyye skhemy zameshcheniya transformatorov [2T-shaped equivalent circuit transformers]. *Elektrichestvo*. 2010. № 5. S. 19–36. (rus.)
20. **Shakirov M.A.** Analiz neravnomernosti raspredeleniya magnitnykh nagruzok i poter v transformatorakh na osnove magnitoelektricheskikh skhem zameshcheniya [Analysis of the uneven distribution of magnetic loads and losses in transformers based on magnetoelectric equivalent circuits]. *Elektrichestvo*. 2005. № 11. S. 15–27. (rus.)
21. **Levitskaya Ye.I., Lurye A.I., Panibratets A.N.** Problema elektrodinamicheskoy stoykosti transformatorov pri \ korotkikh замыканий [Problem withstand transformers during short circuits.]. *Elektrotehnika*. 2001. №9. S. 47–54. (rus.)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**ШАКИРОВ Мансур Акмелович** — доктор технических наук, Заслуженный работник высшей школы РФ, действительный член Нью-Йоркской Академии наук и Академии электротехнических наук РФ профессор кафедры теоретической электротехники и электромеханики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: manshak@mail.ru

## AUTHOR

**SHAKIROV Mansur A.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: manshak@mail.ru

DOI 10.5862/JEST.219.12

УДК 621.317.733:621.317.33

Г.И. Передельский, Ю.В. Диценко

## СВОЙСТВА ЧАСТОТНО-НЕЗАВИСИМЫХ ДВУХПОЛЮСНИКОВ

*G.I. Peredelsky, Yu.V. Didenko*

### PROPERTIES OF FREQUENCY-INDEPENDENT TWO-TERMINAL NETWORKS

Рассмотрено интересное свойство частотно-независимых двухполюсников, образованных двумя параллельными ветвями, каждая из которых содержит одиничный резистор и диссипативный двухполюсник с разнородными реактивными элементами, а именно: после окончания переходного процесса частотно-независимый двухполюсник оказывает постоянное резистивное сопротивление электрическому току в случае воздействия очередного питающего импульсного сигнала с напряжением, изменяющимся во времени по закону степенных функций, при выполнении не всех условий частотной независимости, а определенной их части. При анализе частного варианта частотно-независимого двухполюсника использован путь, избавляющий от необходимости решать алгебраические уравнения и тем самым упрощающий проводимые тождественные преобразования. Приведен пример использования частотно-независимого двухполюсника и его свойств в импульсных четырехплечих мостовых цепях. Эти мостовые цепи позволяют заземлять оба входящих в них многоэлементных двухполюсника: уравновешивающий двухполюсник с переменными регулируемыми параметрами и двухполюсник объекта измерения с искомыми параметрами. При этом появляется возможность исключить две составляющие погрешности — из-за паразитной емкости относительно «земли» незаземленного многоэлементного двухполюсника и из-за за счет нестабильности этой паразитной емкости.

ЧАСТОТНО-НЕЗАВИСИМЫЙ ДВУХПОЛЮСНИК; УСЛОВИЯ ЧАСТОТНОЙ НЕЗАВИСИМОСТИ; ИМПУЛЬСНОЕ ПИТАНИЕ; ЧЕТЫРЕХПЛЕЧАЯ МОСТОВАЯ ЦЕПЬ; ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ.

The paper considers the property of frequency-independent two-terminal networks (FITTN) formed by two parallel branches, each of which contains a single resistor and a dissipative two-terminal network with heterogeneous reactive elements. This property implies that after the transient process the frequency-independent two-terminal network has the constant resistance to the electric current in the case of the influence of the next feeding pulse signal with tension change as long as its duration under the law of exponential functions of time when fulfilling only a certain part of conditions of frequency independence (CFI). When fulfilling all conditions of frequency independence, FITTN has the constant resistance to the electric current at any forms of the feeding tension, and also during the transient process. The analysis of a special option of the frequency-independent two-terminal network uses the way which relieves the need to solve algebraic equations and hereby simplifies identical transformations. The article describes the use of FITTN in the pulse four-arm bridge circuits. Such bridges contain single resistors in three arms, and the fourth arm is formed by the frequency-independent two-terminal network. These bridge circuits allow grounding both multi-element two-terminal networks: the counterbalancing two-terminal network with variable adjustable parameters and the two-terminal network which is an object of measurement with the required parameters. This raises the possibility to exclude two components of the error: component due to the parasitic capacitance with respect to «ground» of the ungrounded multi-element two-terminal network and component due to the instability of this parasitic capacitance.

FREQUENCY-INDEPENDENT TWO-TERMINAL NETWORK; CONDITIONS OF FREQUENCY INDEPENDENCE; PULSED POWER; FOUR-ARM BRIDGE CIRCUIT; MEASUREMENT ERROR.

#### Введение

В теории линейных электрических цепей зарубежные и отечественные исследователи [1–3] выделяют группу диссипативных электрических

цепей, обладающих свойством независимости входного сопротивления от частоты. Это частотно-независимые цепи, или электрические цепи постоянного входного сопротивления. К ним, в частности, относятся дополняющие цепи и со-



глосованно нагруженные на резистивное сопротивление четырехполюсники [1–3], которые находят применение в устройствах связи, системах управления, регулирования и контроля, информационных системах, научных исследованиях. Частотно-независимые цепи традиционно используются в качестве фильтров постоянного входного сопротивления, амплитудных и фазовых корректоров, моделей электрических длинных линий.

Среди структур частотно-независимых цепей известными являются, в частности, рассмотренные в [4] частотно-независимые двухполюсники (ЧНД), состоящие из двух параллельно включенных ветвей. Каждая ветвь содержит последовательно соединенные одиночный резистор  $R$  и многоэлементный диссипативный двухполюсник. Сопротивление такого двухполюсника в первой ветви —  $Z_1$ , во второй —  $Z_2$ , причем это обратные двухполюсники, их сопротивления удовлетворяют условию [1]

$$Z_1 Z_2 - R^2 = 0. \quad (1)$$

Посредством известных схемных преобразований к подобному виду можно привести и другие частотно-независимые двухполюсники. Например, в [4] также рассмотрены структуры, полученные на основе ЧНД указанной выше конфигурации. Одна из них образована путем соединения накоротко эквипотенциальных точек, а другая — за счет объединения в электрической цепи последовательно или параллельно включенных резистивных элементов.

В [5] рассмотрено новое свойство частотно-независимых двухполюсников, а именно: после окончания переходного процесса в случае воздействия очередного питающего импульсного сигнала, напряжение которого изменяется во времени по закону степенных функций, двухполюсник оказывает резистивное сопротивление электрическому току, равное одному и тому же значению  $R$ , при выполнении даже не всех, а определенной части условий частотной независимости (УЧН). При выполнении же всех УЧН частотно-независимый двухполюсник оказывает электрическому току сопротивление  $R$  при любых формах питающего напряжения, а также во время переходного процесса.

Приведенное свойство обосновано для ЧНД, которые содержат в каждом из двух имеющихся обратных двухполюсников резистивные и только

однородные реактивные элементы [5]. Это позволило получить с использованием таких ЧНД мостовые цепи с раздельным уравновешиванием нетрадиционной конфигурации, а именно — с одиночными резисторами в трех плечах четырехплечей мостовой цепи [5]. С их помощью определяются параметры резистивно-емкостных и резистивно-индуктивных двухполюсников объекта измерения. Но часть электрических схем замещения объектов измерения и датчиков отображаются  $R-L-C$ -цепями. Это побуждает исследовать актуальную задачу определения параметров диссипативных цепей с разнородными реактивными элементами.

**Цель нашей работы** — обосновать для ЧНД с обратными  $R-L-C$ -двуихполюсниками исследованное в [5] свойство, а также рассмотреть пример практического использования такого частотно-независимого двухполюсника и его свойства в мостовой электрической цепи.

### Теоретическая часть

На рис. 1 изображен частный вариант ЧНД. Каждая из его ветвей содержит последовательно соединенные одиночный резистор с сопротивлением  $R$  и многоэлементную диссипативную двухполюсную цепь с разнородными реактивными элементами. В первой ветви такая цепь образована резистивным сопротивлением  $r_1$ , последовательно с которым включены соединенные параллельно индуктивность  $L$ , резистивное сопротивление  $r_2$  и емкость  $C$ . Вторая ветвь  $R-L-C$ -двуихполюсника состоит из резистивного сопротивления  $R_1$ , параллельно которому включены соединенные последовательно емкость  $C$ , резистивное сопротивление  $R_2$  и индуктивность  $L$ . УЧН рассматриваемого ЧНД описываются соотношениями:

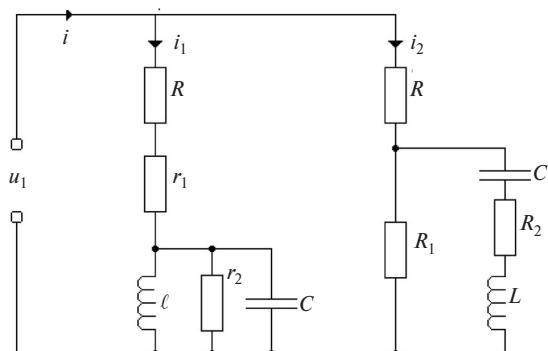


Рис. 1. Частотно-независимый двухполюсник

$$\begin{aligned} R_1 r_1 - R^2 &= 0; \quad \ell - R^2 C = 0; \\ R_2 r_2 - R^2 &= 0; \quad L - R^2 c = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

На ЧНД воздействуют последовательности импульсов, напряжения которых изменяются во времени по закону степенных функций:

$$u_1 = U_1 \left( \frac{t}{t_u} \right)^h, \quad (3)$$

где  $u_1$  — мгновенное значение питающего напряжения;  $U_1$  — его амплитудное значение;  $t$  — текущее время,  $t_u$  — длительность импульса;  $h = 0, 1, 2, \dots$  — целочисленные показатели степени. Очередность поступления этих последовательностей соответствует числам натурального ряда. Таким образом, в начале на исследуемый двухполюсник (рис. 1) подается последовательность импульсов прямоугольной формы ( $h = 0$ ), во вторую очередь воздействует последовательность импульсов линейно изменяющейся формы ( $h = 1$ ), затем поступают квадратичные ( $h = 2$ ) и кубичные ( $h = 3$ ) импульсы.

При воздействии очередного импульса прямоугольной формы сила электрического тока  $i$ , протекающего через рассматриваемый двухполюсник, описывается известным обобщенным выражением [5]

$$i = i_1 + i_2 =$$

$$= U_1 \left[ \frac{V_0}{v_0} + \sum_{i=1}^2 \frac{X(g_i)}{g_i x'(g_i)} e^{g_i t} + \frac{W_0}{w_0} + \sum_{i=1}^2 \frac{Y(q_i)}{q_i y'(q_i)} e^{q_i t} \right], \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} X(g) &= V_0 + gV_1 + g^2V_2; \\ x(g) &= v_0 + gv_1 + g^2v_2; \\ Y(q) &= W_0 + qW_1 + q^2W_2; \\ y(q) &= w_0 + qw_1 + q^2w_2; \end{aligned} \quad (5)$$

$g_i$  и  $q_i$  — корни соответственно уравнений  $x(g) = 0$  и  $y(q) = 0$ ;  $V_i, v_i, W_i, w_i$  — обобщенные коэффициенты, зависящие от параметров частотно-независимого двухполюсника. Для ЧНД на рис. 1 эти коэффициенты равны

$$\begin{aligned} V_0 &= r_2; \quad V_1 = \ell; \quad V_2 = \ell c r_2; \\ v_0 &= r_2(R + r_1); \quad v_1 = \ell(R + r_1 + r_2); \\ v_2 &= \ell c r_2(R + r_1). \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} W_0 &= 1; \quad W_1 = C(R_1 + R_2); \quad W_2 = LC; \\ w_0 &= R + R_1; \quad w_1 = C[R(R_1 + R_2) + R_1 R_2]; \\ w_2 &= LC(R + R_1). \end{aligned} \quad (7)$$

Экспоненциальные слагаемые в (4) затухают практически до нуля после окончания переходного процесса. Поэтому результатом воздействия на частотно-независимый двухполюсник очередного импульса прямоугольной формы является протекающий через него электрический ток, сила которого при выполнении первого из условий частотной независимости (2) и с учетом выражений для коэффициентов (6) и (7) после окончания переходного процесса равна

$$i_{t \rightarrow \infty} = i_1 + i_2 = U_1 \left( \frac{1}{R + r_1} + \frac{1}{R + R_1} \right) = \frac{U_1}{R}. \quad (8)$$

Откликом исследуемого двухполюсника на воздействие очередного импульса линейно изменяющегося напряжения после окончания переходного процесса служит протекающий через него электрический ток, сила которого описывается выражением

$$i_{t \rightarrow \infty} = \frac{U_1}{t_u} \left[ \frac{t}{R} - \sum_{i=1}^2 \frac{X(g_i)}{g_i^2 x'(g_i)} - \sum_{i=1}^2 \frac{Y(q_i)}{q_i^2 y'(q_i)} \right]. \quad (9)$$

Для тождественного преобразования этого выражения используем следующий путь. Каждое слагаемое в выражениях для  $X(g_i)$  и  $Y(q_i)$  (см. (5)), преобразуя (9), разделим на соответствующий знаменатель. Затем выделим фрагменты формул в виде сумм, содержащих корни уравнений  $x(g) = 0$ ,  $y(q) = 0$  и производные от этих уравнений, и заменим их на приведенные в [6] эквивалентные формулы, не содержащие корней уравнений. Такой путь упрощает тождественные преобразования, избавляет от необходимости решать алгебраические уравнения и подставлять их корни в выражение (9). В качестве примера приведем преобразование второго слагаемого в (9):

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^2 \frac{X(g_i)}{g_i^2 x'(g_i)} &= V_0 \sum_{i=1}^2 \frac{1}{g_i^2 x'(g_i)} + V_1 \sum_{i=1}^2 \frac{1}{g_i x'(g_i)} + \\ &+ V_2 \sum_{i=1}^2 \frac{1}{x'(g_i)} = V_0 S_{12} + V_1 S_{11} + V_2 S_{10}. \end{aligned} \quad (10)$$



Аналогично преобразуется третье слагаемое в (9):

$$\sum_{i=1}^2 \frac{Y(q_i)}{q_i^2 y'(q_i)} = W_0 S_{22} + W_1 S_{21} + W_2 S_{20}.$$

Содержащиеся в этих формулах сомножители  $S_{10}$  и  $S_{20}$  согласно [7] равны нулю:

$S_{10} = \sum_{i=1}^2 \frac{1}{x'(g_i)} = 0$ ,  $S_{20} = \sum_{i=1}^2 \frac{1}{y'(q_i)} = 0$ . В результате сила электрического тока, протекающего через двухполюсник, определяется выражением

$$i_{t \rightarrow \infty} = \frac{U_1}{t_u} \left[ \frac{t}{R} - (V_0 S_{12} + V_1 S_{11} + W_0 S_{22} + W_1 S_{21}) \right]. \quad (11)$$

Эквивалентные формулы для сомножителей  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$  и  $S_{22}$  находятся из таблиц, приведенных в [6], и имеют вид

$$S_{11} = \sum_{i=1}^2 \frac{1}{g_i x'(g_i)} = -\frac{1}{v_0}; \quad S_{12} = \sum_{i=1}^2 \frac{1}{g_i^2 x'(g_i)} = \frac{v_1}{v_0^2};$$

$$S_{21} = \sum_{i=1}^2 \frac{1}{q_i y'(q_i)} = -\frac{1}{w_0}; \quad S_{22} = \sum_{i=1}^2 \frac{1}{q_i^2 y'(q_i)} = \frac{w_1}{w_0^2}. \quad (12)$$

Затем вместо  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$ ,  $S_{22}$  подставим в (11) их выражения (12), в которых обобщенные коэффициенты в свою очередь определяются через параметры электрической цепи по формулам (6) и (7). Наряду с этим обеспечим выполнение первого и второго условий частотной независимости (2). Такие тождественные преобразования выражения (11) приводят к следующей формуле для силы электрического тока, протекающего через частотно-независимый двухполюсник, изображенный на рис. 1:

$$i_{t \rightarrow \infty} = \frac{U_1}{t_u} \left( \frac{t}{R} - D_1 \right) = \frac{U_1 t}{t_u R}, \quad (13)$$

$$\text{где } D_1 = \frac{\ell}{(R+r_1)^2} - \frac{CR_1^2}{(R+R_1)^2}.$$

При подаче очередного импульса квадратичной формы на исследуемый двухполюсник сила протекающего через него электрического тока после окончания переходного процесса описывается выражением

$$i_{t \rightarrow \infty} = \frac{2U_1}{t_u^2} \left[ \frac{t^2}{2R} - t(V_0 S_{12} + V_1 S_{11} + W_0 S_{22} + W_1 S_{21}) - \right.$$

$$\left. - (V_0 S_{13} + V_1 S_{12} + V_2 S_{11} + W_0 S_{23} + W_1 S_{22} + W_2 S_{21}) \right], \quad (14)$$

где сомножители  $S_{13}$  и  $S_{23}$  известны из [6]:

$$S_{13} = -\frac{v_1^2 - v_0 v_2}{v_0^3}; \quad S_{23} = -\frac{w_1^2 - w_0 w_2}{w_0^3}. \quad (15)$$

Отклик ЧНД, изображенного на рис. 1, на воздействие очередного импульса кубической формы после окончания переходного процесса имеет вид

$$i_{t \rightarrow \infty} = \frac{6U_1}{t_u^3} \left[ \frac{t^3}{6R} - \frac{t^2}{2} (V_0 S_{12} + V_1 S_{11} + W_0 S_{22} + W_1 S_{21}) - \right.$$

$$- t(V_0 S_{13} + V_1 S_{12} + V_2 S_{11} + W_0 S_{23} + W_1 S_{22} + W_2 S_{21}) -$$

$$\left. - (V_0 S_{14} + V_1 S_{13} + V_2 S_{12} + V_3 S_{11} + W_0 S_{24} + W_1 S_{23} + W_2 S_{22} + W_3 S_{21} + \right.$$

$$\left. + W_2 S_{22} + W_3 S_{21}) \right]. \quad (16)$$

Здесь  $V_3 = 0$  и  $W_3 = 0$ , а  $S_{14}$  и  $S_{24}$ , определяемые согласно [6], равны

$$S_{14} = \frac{v_1^3 - 2v_0 v_1 v_2}{v_0^4}; \quad S_{24} = \frac{w_1^3 - 2w_0 w_1 w_2}{w_0^4}. \quad (17)$$

Затем выполним подстановку в (14) и (16) сомножителей (12), (15) и (17), выраженных согласно (6) и (7) через параметры исследуемого двухполюсника. Проводя дальнейшие тождественные преобразования выражений (14) и (16) с учетом выполнения только первых трех из условий частотной независимости (2) и при выполнении всех УЧН, получим, что сила электрического тока, протекающего через рассматриваемый двухполюсник, в этих приведенных двух случаях описывается выражениями

$$i_{t \rightarrow \infty} = \frac{2U_1}{t_u^2} \left[ \frac{t^2}{2R} - tD_1 - D_2 \right] = \frac{U_1 t^2}{t_u^2 R}; \quad (18)$$

$$i_{t \rightarrow \infty} = \frac{6U_1}{t_u^3} \left[ \frac{t^3}{6R} - \frac{t^2}{2} D_1 - tD_2 - D_3 \right] = \frac{U_1 t^3}{t_u^3 R}, \quad (19)$$

где

$$D_2 = -\frac{\ell^2 (R+r_1+r_2)}{r_2 (R+r_1)^3} +$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{C^2 R_l^2 \left[ R(R_1 + R_2) + R_l R_2 \right]}{(R + R_1)^3}; \\
 D_3 = & \ell^2 \frac{\ell(R + r_1 + r_2)^2 - cr_2^2(R + r_1)^2}{r_2^2(R + r_1)^4} + \\
 & + C^2 R_l^2 \frac{L(R + R_l)^2 - C \left[ R(R_1 + R_2) + R_l R_2 \right]^2}{(R + R_1)^4}.
 \end{aligned}$$

Таким образом, согласно полученным выражениям (8), (13), (18) и (19) после окончания переходного процесса в результате воздействия на рассматриваемый ЧНД очередного импульса, напряжение которого изменяется во времени по закону степенных функций (3), и при выполнении части условий частотной независимости (2) его эквивалентное сопротивление частотно-независимо и равно значению сопротивления одиночного резистора  $R$ .

Выбор приведенного пути анализа оправдан тем, что в ином случае придется иметь дело с большим и очень большим количеством слагаемых в математическом описании электрической цепи. В качестве примера запишем в виде слагаемых первую сумму из квадратных скобок в (9):

$$\begin{aligned}
 & \sum_{i=1}^2 \frac{X(g_i)}{g_i^2 x'(g_i)} = \\
 & = \frac{V_0 + g_1 V_1 + g_1^2 V_2}{g_1^2(v_1 + 2g_1 v_2)} + \frac{V_0 + g_2 V_1 + g_2^2 V_2}{g_2^2(v_1 + 2g_2 v_2)}, \quad (20)
 \end{aligned}$$

где  $g_1$  и  $g_2$  — первый и второй корни уравнения  $x(g) = 0$ . После приведения к общему знаменателю общее число слагаемых равно 16 (из них 12 в числителе и 4 в знаменателе). При выбранном пути анализа остается только три слагаемых с учетом (10),  $S_{10} = 0$  и (12) для знаменателей  $S_{11}$  и  $S_{12}$  — два в числителе и одно в знаменателе:

$$\sum_{i=1}^2 \frac{X(g_i)}{g_i^2 x'(g_i)} = \frac{V_0 v_1 - V_1 v_0}{v_0^2}.$$

Аналогично соотношение по числу слагаемых и для второй суммы в квадратных скобках в (9). Степень упрощения связана с тем, что в ис-

ходное выражение (9) входили корни уравнений  $x(g) = 0$ ,  $y(g) = 0$ , а формулы для корней приводили к увеличению числа слагаемых.

Приведенное положение относится к электрической цепи, в математическое описание которой входят полиномы второй степени. Для цепи с большим числом элементов и, допустим, с полиномами третьей степени в сумме, аналогичной (20), после приведения к общему знаменателю общее количество слагаемых равно 135 (108 в числителе и 27 в знаменателе). При полиномах четвертой степени общее число таких слагаемых равно 1536 (1280 в числителе и 256 в знаменателе). Таким образом, число обсуждаемых слагаемых быстро возрастает и становится очень большим. Это приводит к возрастанию трудовых и временных затрат и усложнению программ для ЭВМ.

На выбранном пути анализа количество слагаемых с возрастанием степени полиномов тоже увеличивается, но гораздо медленнее, чем в приведенных выше примерах. Например, число слагаемых в  $S_i$  по формулам (12), (15) достигает десяти при полиномах не третьей или четвертой степени, а девятой.

Упрощение при выбранном пути анализа определяется еще двумя обстоятельствами. Первое из них связано с тем, что обобщенные коэффициенты (6), (7) с возрастанием степени полиномов быстро становятся все более громоздкими, с большим числом слагаемых из нескольких сомножителей каждое. Второе обстоятельство заключается в том, что в общем виде уравнения выше четвертой степени, как известно, в принципе не решаются [8]. Известны приближенные и приближенные численные решения уравнений высоких степеней, но они больше подходят для конкретных вычислений и в меньшей мере для математического анализа. Использованный здесь путь анализа не требует решения уравнений и подстановки их корней в формулу для преобразования операторного изображения функции к оригиналу. Приближенные методы решения тоже усложняются с возрастанием степени уравнения.

Просто решаются алгебраические уравнения первой и второй степени, более сложны в решении в общем виде уравнения третьей и четвертой степени, а уравнения выше четвертой степени, как уже было отмечено, в общем виде не решаются.



ются. Операторный метод анализа использует уравнения высоких степеней и их решения; уравнения привносят свой недостаток в этот метод анализа. Тогда можно сформулировать задачу так: не решаются в общем виде уравнения ... и не надо их решать, а следует получать результаты анализа, не решая уравнения. Этому в некоторой степени отвечает использованный здесь путь анализа. Если он в полной мере и не соответствует приведенному положению, то делает шаг в этом направлении.

### Использование частотно-независимых двухполюсников и их свойства в импульсных мостах

Рассматриваемое свойство частотно-независимых двухполюсников нашло применение в импульсных четырехплечих мостовых цепях [5, 6]. Как известно [9], импульсные мосты обладают комплексом достоинств, среди которых можно, в частности, выделить возможность измерять параметры многоэлементных двухполюсников, обеспечивая при этом зависимое раздельное уравновешивание. Кроме того, импульсные мосты обладают сравнительно высокой чувствительностью, пропорциональной амплитуде питающего сигнала; в них мала температурная погрешность от подогрева элементов протекающим током [9].

Один из недостатков мостовых цепей — нередко встречающееся отсутствие возможности заземлять оба имеющихся в них многоэлементных двухполюсника. Для решения практических задач предпочтительнее иметь мосты со всеми заземленными многоэлементными двухполюсниками. Незаземленный двухполюсник имеет паразитную емкость относительно земли, которая вызывает дополнительную погрешность измерения. Кроме того, как известно, эта паразитная емкость нестабильна, существенно изменяется с течением времени и особенно с изменением температуры.

В частном случае, при незаземленном двухполюснике с регулируемыми уравновешивающими элементами и использовании в качестве этих элементов матрицы однотипных элементов, управляемых ключей и схемы управления, необходимо использовать дополнительные развязывающие элементы — трансформаторы или оптронные пары и согласующие схемы. Изме-

нение значения уравновешивающего параметра осуществляется здесь замыканием и размыканием ключей под действием сигналов с заземленной электронной схемы управления. Если же уравновешивающий элемент заземлен, то не требуется использовать дополнительные развязывающие элементы и согласующие схемы. Также в частном случае, при незаземленном двухполюснике объекта измерения и использовании датчика с линией связи, на последней находятся сигналы помех и вызывают соответствующую составляющую погрешности измерения, так как в этом случае линия связи тоже не заземлена. Незаземленная линия связи также имеет паразитную емкость относительно земли. Датчик или датчик совместно с линией связи представляют собой многоэлементную схему заземления. Если же объект измерения заземлен, то сигналы помех и соответствующая составляющая погрешности измерения меньше, так как линия связи заземлена.

Следует учитывать, что имеется ряд мостов (например, мосты Максвелла, Хея, Андерсона), в которых принципиально невозможно заземлить оба имеющихся многоэлементных двухполюсника [10]. В мостовых цепях с использованием ЧНД появляется возможность исключить составляющую погрешности измерения от паразитной емкости незаземленного многоэлементного двухполюсника относительно «земли», а также составляющую погрешности от нестабильности этой паразитной емкости.

В исследуемом варианте импульсные четырехплечие мосты содержат одиночные резисторы в трех плечах  $R_0$ ,  $R_{01}$  и  $R_{02}$ , значения сопротивлений которых известны и постоянны, а четвертое плечо образовано ЧНД. Рассмотрим такую мостовую цепь с частным вариантом частотно-независимого двухполюсника (рис. 2). Здесь  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $L$  и  $C$  составляют объект измерения (ОИ) с исковыми параметрами, элементы с переменными регулируемыми параметрами  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $l$  и  $c$  образуют уравновешивающий двухполюсник (УД); значение сопротивления резисторов  $R$  известно и постоянно. Поскольку при выполнении всех условий частотной независимости сопротивление ЧНД приводится к резистивному сопротивлению  $R$ , то для уравновешивания рассматриваемого моста необходимо выполнить предварительно условие

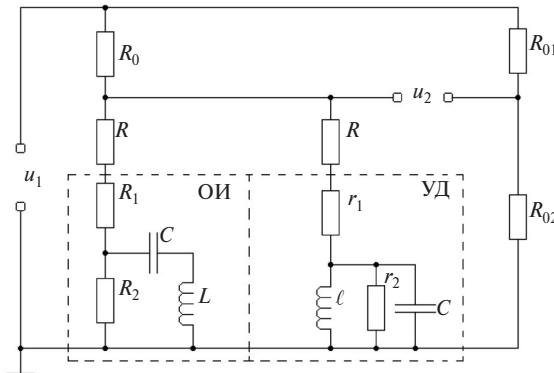


Рис. 2. Четырехплечая электрическая мостовая цепь

$$A_0 = RR_{01} - R_0R_{02} = 0. \quad (21)$$

Питание мостовой цепи, изображенной на рис. 2, следует осуществлять последовательностями импульсных сигналов с изменением их напряжения по закону степенных функций (3).

Обобщенное математическое описание напряжения  $u_2$  в измерительной диагонали исследуемого моста (напряжение неравновесия) известно [5] и имеет вид

$$u_2 = \frac{U_1 h!}{t_1^h} \underbrace{\int_0^t \int_0^t \dots \int_0^t}_{h} \left\{ \int_0^t \left[ \frac{A_1 B_1}{f(0)} + \sum_{i=1}^k \frac{F(p_i)}{p_i f'(p_i)} e^{p_i t} \right] dt \right\} \dots dt; \quad (22)$$

$$F(p) = A_1 B_1 + p(A_1 B_2 + A_2 B_3) + p^2(A_1 B_4 + A_2 B_5 + A_3 B_6) +$$

$$+ p^3(A_1 B_7 + A_2 B_8 + A_3 B_9 + A_4 B_{10}) + p^4(A_1 B_{11} + A_2 B_{12} + A_3 B_{13} + A_4 B_{14}); \quad (23)$$

$$f(p) = a_0 + p a_1 + p^2 a_2 + p^3 a_3 + p^4 a_4, \quad (24)$$

где  $A_i$  — условия равновесия четырех плеч мостовой цепи;  $B_i, a_i$  — коэффициенты, определяющиеся параметрами мостовой цепи;  $p_i$  — корни уравнения  $f(p) = 0$ ;  $k$  — их количество.

Дальнейшие рассуждения целесообразно вести, полагая, что условие (21) уже выполнено. Математические выражения условий равновесия мостовой цепи, изображенной на рис. 2, записутся в виде

$$A_1 = r_1(R_1 + R_2) - R^2 = 0;$$

$$A_2 = \ell(R_1 + R_2) + CR_1R_2r_1 - R^2CR_2 = 0;$$

$$A_3 = R_1(r_1 + r_2) - R^2 = 0;$$

$$A_4 = L(R_1 + R_2) + cR_1R_2r_1 - R^2cR_2 = 0. \quad (25)$$

Формулы для обобщенных коэффициентов  $B_i$  и  $a_i$ , выраженных через параметры моста, громоздки. В них можно выделить повторяющиеся фрагменты:

$$\gamma_1 = R_{01} + R_{02}; \quad \gamma_2 = R + R_1; \quad \gamma_3 = R + r_1;$$

$$\gamma_4 = R + R_1 + R_2; \quad \gamma_5 = R + R_0 + r_1;$$

$$\gamma_6 = R + r_1 + r_2; \quad \delta_1 = R_0\gamma_3 + \gamma_4\gamma_5;$$

$$\delta_2 = R_0\gamma_3 + \gamma_2\gamma_5; \quad \delta_3 = \gamma_4(R_0 + \gamma_6) + R_0\gamma_6;$$

$$\delta_4 = \gamma_2(R_0 + \gamma_6) + R_0\gamma_6; \quad \delta_5 = LC + \ell c.$$

С их учетом выражения для этих коэффициентов имеют несложную форму записи:

$$B_1 = B_3 = R_{01}r_2; \quad B_2 = \ell R_{01}; \quad B_4 = R_{01}r_2\delta_5;$$

$$B_5 = 0; \quad B_6 = C\ell R_{01}R_2; \quad B_7 = LC\ell R_{01};$$

$$B_8 = 0; \quad B_9 = 0; \quad B_{10} = C\ell R_{01}r_2;$$

$$B_{11} = LC\ell c R_{01}r_2; \quad B_{12} = 0; \quad B_{13} = 0;$$

$$B_{14} = 0; \quad a_0 = \gamma_1\delta_1r_2;$$

$$a_1 = \gamma_1(CR_2r_2\delta_2 + \ell\delta_3);$$

$$a_2 = \gamma_1(\delta_1r_2\delta_5 + C\ell R_2\delta_4);$$

$$a_3 = C\ell\gamma_1(L\delta_3 + cR_2r_2\delta_2), \quad a_4 = LC\ell c\gamma_1\delta_1r_2.$$

Вначале на мостовую цепь подается последовательность импульсных сигналов прямоугольной формы. При воздействии очередного такого импульса в измерительной диагонали моста после окончания переходного процесса устанавливается напряжение неравновесия, неизменяющееся в течение интервала времени от окончания переходного процесса до окончания питающего импульса и имеющее плоскую вершину. Напряжение этой вершины приводится к нулю регулировкой переменного сопротивления  $r_1$  уравновешивающего резистора, в результате чего выполняется первое из условий равновесия моста (25) —  $A_1$ .

Затем на генераторную диагональ подается последовательность импульсов линейно изменяющейся формы. При воздействии очередного импульса на выходе мостовой цепи после окончания переходного процесса устанавливается напряжение с плоской вершиной, которое при-



водится к нулю регулировкой переменной индуктивности  $\ell$  уравновешивающей катушки. Этим обеспечивается выполнение второго условия равновесия (25) —  $A_2$ . При этом условие  $A_1$  не нарушается, поскольку оно не зависит от индуктивности  $\ell$ .

Далее на генераторную диагональ мостовой цепи поступают импульсы квадратичной формы и, в последнюю очередь, — импульсы кубичной формы. В измерительной диагонали моста при воздействии очередного импульса устанавливается сигнал неравновесия. Этот сигнал после окончания переходного процесса имеет плоскую вершину. Напряжение такой вершины приводится к нулю при воздействии очередного квадратичного импульса регулировкой переменного сопротивления  $r_2$  уравновешивающего резистора. В результате выполняется третье условие равновесия —  $A_3$ , при этом сохраняется выполнение условий  $A_1$  и  $A_2$  в (25), так как они не зависят от переменного параметра  $r_2$ .

Напряжение плоской вершины при воздействии на мостовую цепь очередного импульса кубичной формы приводится к нулю выполнением четвертого условия равновесия (25) —  $A_4$ , что обеспечивается регулировкой переменной емкости  $c$  уравновешивающего конденсатора. Эта емкость влияет только на четвертое условие равновесия и поэтому выполнение условия  $A_4$  не нарушает выполнение условий  $A_1$ ,  $A_2$  и  $A_3$ .

В рассматриваемом варианте моста реализовано заземление двух многоэлементных двухполюсников (по существу, заземление всех имеющихся здесь многоэлементных двухполюсников): объекта измерения и уравновешивающего двухполюсника. Приведенная мостовая цепь обладает свойством раздельного зависимого уравновешивания, производимого в определенной последовательности:  $r_1 — \ell — r_2 — c$ . Условия равновесия совпадают с условиями частотной независимости ЧНД при выполнении условия (21) [4]. Четыре искомых параметра двухполюсника объекта измерения ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $L$  и  $C$ ) находятся из четырех условий равновесия (25) мостовой цепи после завершения ее уравновешивания. В этом состоянии сопротивление многоэлементного двухполюсника в первой ветви моста (см. рис. 2) является резистивным и равно значению  $R$  вне зависимости от значений параметров двухполюсника объекта измерения и параметров

элементов уравновешивания. Тогда нагрузка питающего мост генератора тоже резистивная, а это предпочтительный вариант, ибо такая нагрузка не добавляет искажения формы питающих импульсов. Искажения вызывают емкости и индуктивности нагрузки.

Имеющийся вариант нагрузки  $R_h$  для питающего мост генератора импульсов не только не вызывает искажения формы питающих импульсов, но и не приводит к нестабильности их амплитуды. Это объясняется тем, что из четырех сопротивлений, образующих сопротивление  $R_h$ , три —  $R_0$ ,  $R_{01}$  и  $R_{02}$  — являются постоянными (рис. 2), а четвертое сопротивление в состоянии равновесия моста имеет одно и то же (неизменное) значение, равное  $R$ . Тогда сопротивление нагрузки является постоянным ( $R_h = \text{const}$ ) и не приводит к нестабильности амплитуды питающих мост импульсов. Наличие выходного сопротивления питающего генератора при нестабильности  $R_h$  приводит к нестабильности амплитуды питающих импульсов.

## Выводы

В статье обосновано свойство ЧНД с диссипативными обратными двухполюсниками, содержащими разнородные реактивные элементы, оказывать электрическому току резистивное сопротивление, равное  $R$ , при выполнении не всех, а определенной части УЧН. Обоснован целесообразный путь анализа подобных ЧНД и приведен пример такого анализа. Кроме того, дан пример практического использования рассмотренных ЧНД в четырехплечих мостовых цепях нетрадиционной конфигурации, в которых заземлены многоэлементные двухполюсник объекта измерения с искомыми параметрами и уравновешивающий двухполюсник с переменными регулируемыми параметрами. В таких мостах появляется возможность исключить составляющие погрешности измерения от паразитной емкости многоэлементного двухполюсника относительно «земли» и от нестабильности этой емкости. В состоянии равновесия мостовые цепи рассматриваемой конфигурации — наилучший вариант нагрузки для питающего генератора. На их основе можно строить входные узлы устройств сбора и первичной обработки информации систем автоматики, управления, регулирования и диагностирования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Балабанян Н.** Синтез электрических цепей. М.—Л.: Госэнергоиздат, 1961. 416 с.
2. **Бессонов Л.А.** Линейные электрические цепи. Новые разделы курса теоретических основ электротехники. М.: Высшая школа, 1983. 336 с.
3. **Нейман Л.Р., Демирчян К.С.** Теоретические основы электротехники. Л.: Энергоиздат, 1981. Т. 1. 536 с.
4. **Передельский Г.И., Диденко Ю.В., Афонин Е.Л.** Частотно-независимые двухполюсники на основе четырехплечих мостовых цепей // Электричество. 1998. №1. С. 71–76.
5. **Peredel'skii G.I.** A property of potentially frequency-independent two-terminal networks // Electrical Technology Russia. 2000. № 4. P. 67–76.
6. **Передельский Г.И., Нечаев И.А., Афонин Е.Л.** Анализ сложных измерительных цепей операторным методом // Сборник трудов 8-й международной научно-технической конференции «Спутниковые системы связи и навигации». Красноярск: Издательство КГТУ, 1997. С. 180–187.
7. **Фаддеев Д.К., Соминский И.С.** Сборник задач по высшей алгебре. М.: Наука, 1968. 304 с.
8. **Окунев Л.Я.** Высшая алгебра. М.: Учпедгиз, 1958. 336 с.
9. **Передельский Г.И.** Мостовые цепи с импульсным питанием. М.: Энергоатомиздат, 1988. 199 с.
10. **Нижний С.М.** Мосты переменного тока. М.—Л.: Энергия, 1966. 128 с.

## REFERENCES

1. **Balabanyan N.** Sintez elektricheskikh tsepey. [Synthesis of electrical circuits.] Moscow — Leningrad: Gosenergoizdat, 1961. 416 s. (rus.)
2. **Bessonov L.A.** Lineynyye elektricheskiye tsepi. Novyye razdely kursa teoreticheskikh osnov elektrotehniki. [Linear electric circuits. New sections of the course theoretical foundations of electrical engineering.] Moscow: Vysshay shkola, 1983. 336 sp. (rus.)
3. **Neyman L.R., Demirchyan K.S.** Teoreticheskiye osnovy elektrotehniki. [Theoretical foundations of electrical engineering.] Leningrad: Energoizdat, 1981. Т. 1. 536 p. (rus.)
4. **Peredelskiy G.I., Didenko Yu.V., Afonin Ye.L.** Chastotno-nezavisimyye dvukhpoliusniki na osnove chetyrekhplechikh mostovykh tsepey. [Frequency-independent two-terminal networks based on four — arms bridge circuits]. *Electrichestvo*. 1998. №1, S. 71–76. (rus.)
5. **Peredel'skii G.I.** A property of potentially frequency-independent two-terminal networks. *Electrical Technology Russia*. 2000. №4, P. 67–76.
6. **Peredelskiy G.I., Nechayev I.A., Afonin Ye.L.** Analiz slozhnykh izmeritelnykh tsepey operatornym metodom [Analysis of complex measuring circuits of the operator method]/ *Sbornik trudov 8-y mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Sputnikovyye sistemy svyazi i navigatsii»*. [Proceedings of the 8th international scientific—technical conference «Satellite communication systems and navigation».] Krasnoyarsk: Publishing house of Krasnoyarsk state technological University. 1997. S. 180–187/ (rus.)
7. **Faddeev D.K., Sominskii I.S.** Sbornik zadach po vysshey algebre/ [Collection of problems in higher algebra.] Moscow: Nauka, 1968. 304 s. (rus.)
8. **Okunev L.Ya.** Vysshaya algebra. [Higher algebra.] Moscow: Uchpedgiz, 1958. 336 s. (rus.)
9. **Peredelskiy G.I.** Mostovyye tsepi s impulsnym pitaniyem/ [Bridge circuit with pulsed power.] Moscow: Energoatomizdat, 1988. 199 s. (rus.)
10. **Nizhniy S.M.** Mosty peremennogo toka. [Bridges of alternating current.] Moscow — Leningrad: Energia, 1966. 128 s. (rus.)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ПЕРЕДЕЛЬСКИЙ Геннадий Иванович** — доктор технических наук профессор Юго-Западного государственного университета. 305040, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.. E-mail: didenco.1965@mail.ru

**ДИДЕНКО Юрий Владимирович** — старший начальник смены электростанции ТЭЦ-4 ООО «Курская теплосетевая компания». 305000, г. Курск, ул. Нижняя Набережная, 9. E-mail: didenco.1965@mail.ru

## AUTHORS

**PEREDELSKY Gennadii I.** — Southwest State University. 94, 50 let Oktyabrya, Kursk, Russia, 305040. E-mail: didenco.1965@mail.ru

**DIDENKO Yurii V.** — The limited liability company «Kursk heat distribution company». 9, Nizhnya Naberzhnaya St., Kursk, Russia, 305000. E-mail: didenco.1965@mail.ru

DOI 10.5862/JEST.219.13

УДК 621.317.75

А.М. Гатауллин, В.Л. Матухин, И.И. Низамов

## МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ НАПРЯЖЕНИЕМ 35 кВ

A.M. Gataullin, V.L. Matukhin, N.I. Nizamov

### NONDESTRUCTIVE TESTING METHOD OF POLYMER 35 KV COMPOSITE INSULATORS

Полимерные композитные изоляторы с кремнийорганической защитной оболочкой (ПКИ) на номинал действующего напряжения 35 кВ получают все более широкое распространение, замещая фарфоровые и стеклянные изоляторы. С самого начала на этапе производства ПКИ образуются характерные дефекты, которые приводят к их разрушению и, как следствие, к аварийным режимам работы электроэнергетической системы, причем разрушение ускоряется водой и последующим загрязнением поверхности. В представленной работе для контроля состояния ПКИ предложен метод неразрушающего контроля на основе анализа характеристик частичных разрядов. Метод позволяет на ранних стадиях развития разрушения изоляторов обнаруживать внутренние дефекты, воду и загрязнение поверхности изоляторов.

ЧАСТИЧНЫЕ РАЗРЯДЫ; НЕРАЗРУШАЮЩИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ; ДИСТАНЦИОННЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯТОРОВ; ДИАГНОСТИКА ВЫСОКОВОЛЫТНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ; МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯТОРОВ.

Recently the polymer composite insulators covered with the silicone protective shell (PCI) of the nominal voltage of 35 kV have become more widespread, instead of porcelain and glass insulators. As early as at the stage of production, PCIs form specific defects that lead to their destruction and as a consequence to the emergency modes of the power system. In order to control PCI, the present study proposes a nondestructive method of testing based on an analysis of partial discharges. The method is effective for detecting the internal defects and for detecting the defects which arise due to moistening insulator shells.

PARTIAL DISCHARGES; NON-DESTRUCTIVE METHODS OF CONTROL; REMOTE CONTROL INSULATORS METHOD; HIGH VOLTAGE ELECTRICAL EQUIPMENT DIAGNOSTICS; MONITORING OF INSULATORS.

#### Введение

В последнее время полимерные композитные изоляторы с кремнийорганической защитной оболочкой (ПКИ) на номинал действующего напряжения 35–500 кВ получают все более широкое распространение, замещая фарфоровые и стеклянные изоляторы. С самого начала на этапе производства ПКИ образуются характерные дефекты, которые приводят к их разрушению и, как следствие, к аварийным режимам (короткие замыкания) электроэнергетической системы. Конструкционно ПКИ состоит из металлических оконцевателей, ребер, стеклопла-

стикового изоляционного стержня и кремнийорганической защитной оболочки. Одним из характерных последствий развития дефектов является пробой ПКИ: прохождение электрической дуги сквозь стеклопластиковый стержень, границу раздела «стеклопластиковый стержень — защитная оболочка» или границу раздела «ребро — защитная оболочка» без выхода или с выходом на поверхность, сопровождающееся разрушением изоляционного элемента. Пробой изолятора развивается постепенно и часто является следствием эрозии (разрушения) поверхности защитной оболочки под воздействием влаги, которая, как правило, выявляется на по-



следней стадии разрушения ПКИ, например методом контроля электромагнитного излучения в инфракрасной (ИК) или ультрафиолетовой (УФ) области спектра с поверхности ПКИ [1]. Для уменьшения разрушительного воздействия влаги защитную оболочку ПКИ на этапе производства покрывают специальным гидрофобным составом [2]. Защитная оболочка при увлажнении покрывается каплями воды, которая испаряется, при этом на поверхности изолятора оседает пыль, частицы других загрязнителей, что является причиной ухудшения электрической прочности ПКИ, приводит к потерям электроэнергии за счет поверхностных разрядов. Поэтому методом визуального осмотра выявляют сильнозагрязненные изоляторы и чистят их поверхность. Влагу и загрязнители на поверхности защитной оболочки и внутри ПКИ можно причислить к одному из характерных дефектов ПКИ. Очевидно, что обнаружение влаги на начальной стадии эрозии — актуальная проблема, так как это трудно осуществить методом визуального осмотра и методами регистрации ИК или УФ излучений, которые эффективны в основном на последних стадиях развития разрушения ПКИ. В представленной работе для контроля состояния ПКИ предложен метод регистрации частичных разрядов (ЧР), рекомендуемый отечественными [3] и зарубежными стандартами [4] и активно развивающийся в последнее время [5], в том числе для диагностики полимерной изоляции электромагнитным методом [6]. Однако контроль влаги и загрязнений на ранних стадиях их образования на поверхности композитных изоляторов методом регистрации ЧР пока не был предложен.

### Теоретический анализ

Конструкция ПКИ (рис. 1) такова, что на так называемых «юбках» защитной оболочки (ЮЗО) с большей вероятностью по отношению к другим участкам изолятора могут быть сосредоточены незаметные для человеческого глаза капли влаги, которые способствуют загрязнению изолятора. Сухой чистый изолятор вследствие особенностей производства ПКИ может содержать внутренние воздушные дефекты, или каверны (дефект типа 1), размером порядка десятков—сотен микрон, на которых возникают относительно небольшие по величине внутренние ЧР. Вода, которая попадает внутрь ПКИ, приводит к по-

явлению поверхностных частичных разрядов (ПЧР) и ускоряет его разрушение; ПЧР также способствуют нагреву и разрушению изолятора. Назовем влагу и загрязнения на поверхности ПКИ дефектом типа 2. Оба типа дефектов предлагаются контролировать методом ЧР.

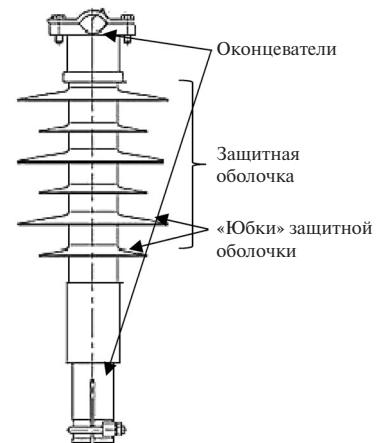


Рис. 1. Один из типичных ПКИ класса напряжения

Молекулы воды под воздействием внешне-го переменного электрического поля, обусловленного действующем напряжением, переориентируются и выравнивают поле, способствуют локальному нагреву и разрушению поверхности изолятора. Перепады температуры также способствуют разрушению изолятора. Очевидно, что дефекты типов 1 и 2 могут развиваться в процессе эксплуатации изолятора. Дефекты типа 1 и типа 2 приводят к появлению соответствующих ЧР типа 1 и типа 2. На следующем этапе влага и загрязнители попадают внутрь ПКИ, окончательно разрушая его. Метод ЧР предполагает анализ статистических распределений ЧР, в том числе в системах мониторинга состояния высоковольтной изоляции по характеристикам ЧР [7]. В связи с наличием дефектов двух типов важно разработать метод их распознавания на основе подходящей для этого теоретической модели. По мнению авторов, характер статистического распределения ЧР хорошо объясняется моделью многослойной изоляции ПКИ (рис. 2).

Величина ЧР зависит от емкости дефекта. При этом между емкостями дефектов и оставшейся части изоляции выполняется следующее соотношение:



$$C_3 \gg C_2 \gg C_1. \quad (1)$$

Емкостью  $C_1$  для ПКИ можно пренебречь, так как она обычно не дает вклад в распределение ЧР по фазе действующего напряжения. Величины так называемого кажущегося заряда (заряд, действие которого в разрядный промежуток приводит к тем же эффектам, что и реальный заряд), предполагаемые отечественными и зарубежными стандартами, могут быть сопоставлены в соответствии с соотношением между емкостями:

$$q_3 \gg q_2. \quad (2)$$

Измерение кажущегося заряда эквивалентно измерению разности потенциалов, так как эти величины взаимосвязаны соотношением

$$q = CU, \quad (3)$$

где  $C$  — электрическая емкость дефекта,  $U$  — разность потенциалов между напряжением зажигания и гашения ЧР.

Чем больше величина электрической емкости, тем меньше вероятность пробоя этой емкости. Чем больше величина приложенного действующего напряжения, тем чаще будут перезаряжаться электрические емкости. Истинный заряд на дефекте определить практически невозможно, так как неизвестны паразитные емкости и емкость оставшейся части изоляции. Поэтому рационально регистрировать разность потенциалов, причем в одном месте, а кажущийся заряд можно рассчитывать, умножая разность потенциалов на коэффициент пересчета, определяемый предварительно с помощью процедуры калибровки, или сравнивать ЧР ПКИ с ЧР модельной системы, например «поверхность — игла». Система «поверхность — игла» удобна тем, что для нее можно с точностью до 5 % рассчитать величину напряженности  $E_{\text{лок}}$  локального поля у катода, обусловленного неоднородностями разрядного промежутка, который связан с величиной напряженности  $E_{\text{cp}}$  среднего поля, обусловленного действующим напряжением и расстоянием между электродами [8]:

$$E_{\text{лок}} = \frac{2hE_{\text{cp}}}{r \ln \left( 1 + \frac{4h}{r} \right)}, \quad (4)$$

где  $h$  — расстояние между катодом (игла) и плоскостью;  $r$  — радиус катода.

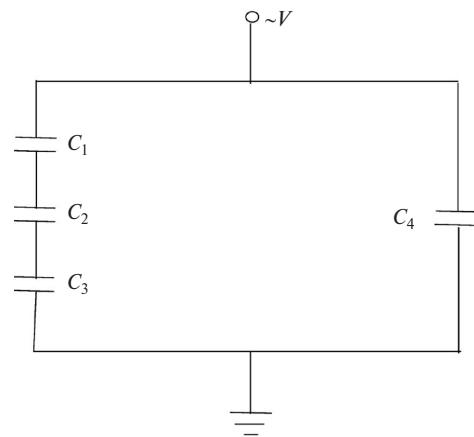


Рис. 2. Модель многослойной изоляции ПКИ:  $C_1$  — электрическая емкость неповрежденной изоляции;  $C_2$  — электрическая емкость, обусловленная внутренними воздушными кавернами;  $C_3$  — электрическая емкость, обусловленная увлажнением ЮЗО;  $C_4$  — электрическая емкость части изоляции, не содержащей дефекты

Формула (4) справедлива и для воздушных каверн в толще ПКИ. Независимо от объекта испытания (ПКИ или система «поверхность — игла») ЧР будут появляться, когда действующее напряжение становится выше напряжения зажигания короны. При этом в результате пробоя изоляционного промежутка будет наблюдаться провал суммарного напряжения. Согласно теории многослойной изоляции ожидается, что интенсивность и число типичных для объекта испытания (ОИ) ЧР будет увеличиваться с ростом действующего напряжения, а исчезновение ЧР будет наблюдаться при величине действующего напряжения ниже напряжения гашения короны. Для системы «поверхность — игла» и для сухого ПКИ, скорее всего, будет наблюдаться статистическое распределение ЧР типа 1, характерное для однородного разрядного промежутка. Для увлажненного ПКИ ожидается наложение статистических распределений ЧР типа 1 и типа 2.

### Методика эксперимента

Для измерения ЧР была собрана лабораторная установка (рис. 3) с двумя ОИ — системой электродов «поверхность — игла» и ПКИ. Измерения проводились прибором R-400 производства ООО «Димрус» [9], при этом регистрировались и сопоставлялись статистические

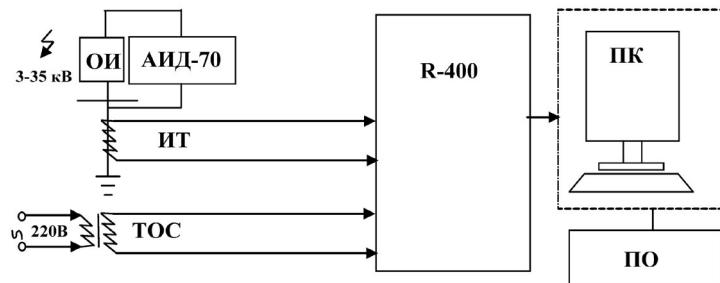


Рис. 3. Блок-схема лабораторной установки:

ОИ — объект испытания (система «поверхность — игла» и ПКИ); ИТ — измерительный импульсный трансформатор; ТОС — трансформатор опорного сигнала; регистратор ЧР R-400; АИД-70 — блок высокого напряжения; ПК — персональный компьютер; ПО — программное обеспечение прибора R-400

распределения ЧР в ПКИ и модельной системе «поверхность — игла». На катод системы «поверхность — игла» радиусом  $r = 10$  мкм подавалось постоянное и переменное напряжение в диапазоне действующего напряжения 3–8 кВ, при этом расстояние от катода до плоскости было  $h = 10$  мм. Таким образом, согласно (4) напряженность  $E_{\text{лок}}$  локального электрического поля у катода превышала среднее значение  $E_{\text{ср}}$  напряженности электрического поля в разрядном промежутке в 241 раз. На один из оконце-

вательей ПКИ как в сухом, так и в увлажненном состоянии подавалось переменное и постоянное напряжение в диапазоне 7–20 кВ.

Трансформатор опорного напряжения, входящий в состав прибора R-400, применялся для калибровки амплитуды регистрируемых сигналов ЧР и для построения распределения сигналов ЧР по фазе действующего напряжения частотой 50 Гц — так называемых амплитудно-фазовых диаграмм (АФД) [10] с интервалом по фазовому углу 15 градусов, которые в свою очередь необходимы для отделения явления «короны» от ЧР и ПЧР. Сопоставлялись распределения ЧР для всех трех объектов испытания: системы «поверхность — игла», сухого и увлажненного ПКИ.

### Результаты и их обсуждение

Статистическое распределение ЧР в неоднородных разрядных промежутках (рис. 4) (к ним можно отнести увлажненные ПКИ) в соответствии с теорией отклоняются от статистического распределения ЧР в однородных разрядных промежутках (к которым можно отнести модельную систему «поверхность — игла» (рис. 5) и сухой ПКИ), что объясняется наличием воды на юбках ПКИ, она и вызывает на статистической зависимости характерный выброс. Типичные для каждого типа дефекта ЧР четко наблюдаются при постоянном напряжении (рис. 6). Можно сделать вывод, что вода на увлажненных ПКИ проявляется как при постоянном, так и при переменном напряжении. Различное количество одинаковых по амплитуде и форме ЧР для системы «поверхность — игла» и сухого ПКИ при переменном действующем напряжении объясняется различным количеством характерных



Рис. 4. Статистические распределение ЧР типов 1 и 2 (увлажненный ПКИ, переменное напряжение 35 кВ; развертка по горизонтали: амплитуда в [1 В] = [10<sup>4</sup> пКл]; развертка по вертикали: число ЧР)

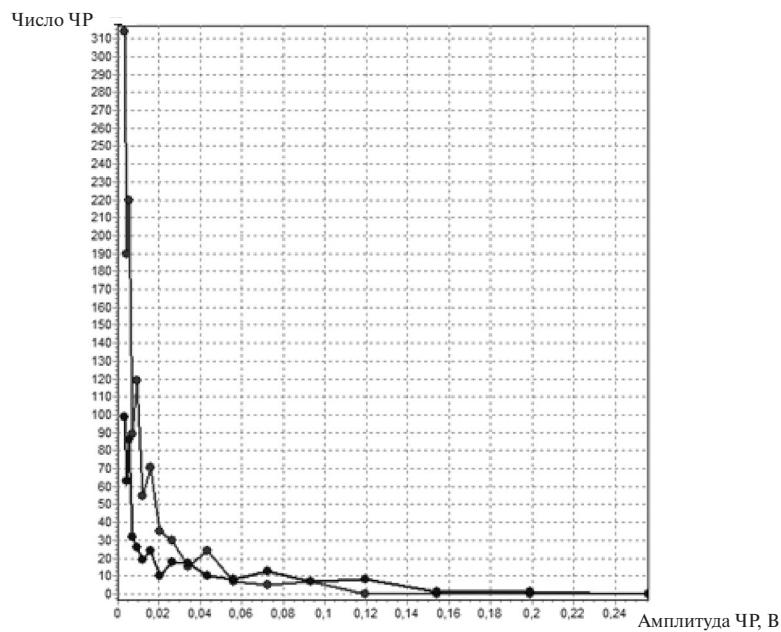


Рис. 5. Статистическое распределение модельных CR типа 1 («поверхность — игла»; переменное напряжение 7 кВ; предпробойная ситуация. Разворотка по горизонтали — амплитуда в [1 В] =  $[10^4$  пКл]; развертка по вертикали — количество CR)

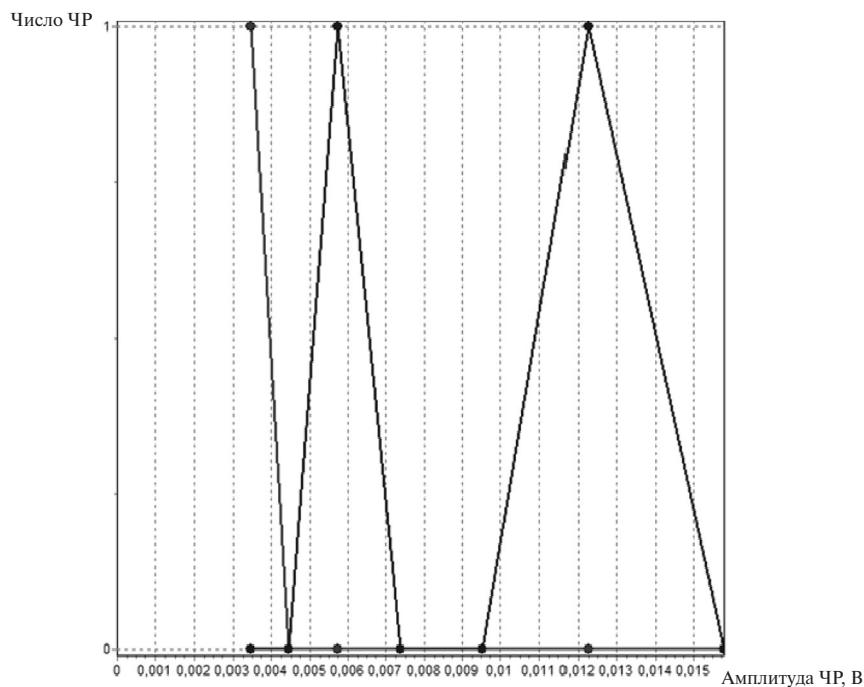


Рис. 6. CR, характерные для дефектов типа 1 и типа 2; увлажненный ПКИ, постоянное напряжение 35 кВ (плюс — на верхнем оконцевателе относительно земли). Снизу-вверх: отрицательные, положительные импульсы. Разворотка по горизонтали: амплитуда в [1 В] =  $[10^4$  пКл], развертка по вертикали: количество CR)



внутренних дефектов и различной величиной приложенного напряжения, при этом статистическое распределение ЧР в обоих случаях имеет схожий характер, что обусловлено наличием дефектов с одинаковой степенью неоднородности напряженности  $E_{\text{лок}}/E_{\text{ср}}$  электрического поля.

Наличие воды на юбках изолятора однозначно выявляется как при переменном напряжении, так и при постоянном, причем чем больше воды на юбках изолятора, тем больше характерных для увлажненной юбки изолятора проявляется на статистическом распределении ЧР.

### Заключение

Разработан эффективный метод неразрушающего контроля полимерных композитных изоляторов напряжением 35 кВ по характеристикам частичных разрядов. Метод позволяет на ранних

стадиях увлажнения, загрязнения и, соответственно, разрушения изоляторов обнаруживать внутренние дефекты с характерными для них величинами ЧР в диапазоне 30–120 пКл и дефекты, обусловленные появлением влаги на поверхности ПКИ и дальнейшим ее проникновением внутрь изолятора с характерными для них величинами ЧР 1200 пКл и выше. С помощью системы «поверхность — игла» смоделированы внутренние ЧР, с точностью 5 % определена степень неоднородности напряженности электрического поля, обусловленного такими дефектами:  $\frac{E_{\text{лок}}}{E_{\text{ср}}} = 241$ , что позволяет косвенно оценить минимальный размер внутренних дефектов (каверны) порядка 20 мкм. Сравнение статистических распределений ЧР увлажненного и сухого ПКИ однозначно позволяет определить наличие влаги и загрязнений на ПКИ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гайворонский А.С. Опыт эксплуатации и диагностика подвесных полимерных изоляторов // Энергетик. 2010. № 10. С. 37–39.
2. Гатауллин А.М., Губаев Д.Ф. [и др.]. Наноматериалы и нанотехнологии в энергетике. Казань: КГЭУ, 2014.
3. МЭК 60270. Методы высоковольтных испытаний — измерение частичных разрядов. Международный стандарт / Пер. с англ. М., 2000.
4. ГОСТ 20074–83. Электрооборудование установок. Методы измерения частичных разрядов. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1983. 24 с.
5. Гатауллин А.М., Крупнов А., Матухин В.Л. Моделирование, регистрация и обработка сигналов частичных разрядов с применением современных программно-аппаратных средств. Казань: КГЭУ, 2012.
6. Гатауллин А.М. Регистрация и обработка сиг-
- налов частичных разрядов // Приборы и техника эксперимента. 2014. № 4. С. 55–60.
7. Гатауллин А.М., Матухин В.Л., Наумов Б.А. Система мониторинга и диагностирования (СМИД) высоковольтного электрооборудования на основе анализа статистических параметров частичных разрядов // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2013. № 7–8. С. 19–26.
8. Mason J.H. Breakdown of solid dielectrics in divergent fields // Proc. IEEE. 1955. Vol. 102. P. 254–263.
9. Описание прибора R-400: ООО «Димрус». <http://dimrus.ru/manuals/r400.pdf>
10. Гатауллин А.М., Матухин В.Л., Наумов Б.А. Метод количественного учета характеристик сигналов частичных разрядов. // Материалы международной научно-практической конференции, Казань: Изд-во КВКИУ, 2011. С. 45–46.

### REFERENCES

1. Gayvoronskiy A.S. Opyt ekspluatatsii i diagnostika podvesnykh polimernykh izolyatorov [Experience of operation and diagnosis of suspension polymer insulators]. *Energetik*. 2010. № 10. S. 37–39. (rus.)
2. Gataullin A.M., Gubayev D.F. [i dr.]. Nanomaterialy i nanotekhnologii v energetike [Nanomaterials and nanotechnology in the energy sector]. Kazan: KGEU, 2014. (rus.)
3. МЭК 60270. Metody vysokovoltnykh ispytaniy — izmereniye chasticchnykh razryadov. Mezhdunarodnyy standart [The methods of high-voltage tests-measurement of partial discharges. International standard]. per. s angl. M., 2000. (rus.)
4. ГОСТ 20074–83. Elektrooborudovaniye ustavok. Metody izmereniya chasticchnykh razryadov [Electrical installations. Methods for measuring partial discharges]. M.: Gosudarstvennyy komitet SSSR po standartam, 1983. 24 s. (rus.)
5. Gataullin A.M., Krupnov.A., Matukhin V.L. Modelirovaniye, registratsiya i obrabotka signalov chasticchnykh razryadov s primeneniem sovremennykh programmno-apparatnykh sredstv [Modeling, registration and process-



ing of signals PD using modern software and hardware]. Kazan: KGEU, 2012. (rus.)

6. **Gataullin A.M.** Registratsiya i obrabotka signalov chasticnykh razryadov [Registration and processing of signals PD]. *Pribory i tekhnika eksperimenta*. 2014. № 4. S. 55–60. (rus.)

7. **Gataullin A.M., Matukhin V.L., Naumov B.A.** Sistema monitoringa i diagnostirovaniya (SMID) vysokovoltnogo elektrooborudovaniya na osnove analiza statisticheskikh parametrov chasticnykh razryadov [System monitoring and diagnostics (CFM) of high-voltage electrical equipment based on the analysis of statistical parameters PD]. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki*. 2013. № 7–8. S. 19–26. (rus.)

8. **Mason J.H.** Breakdown of solid dielectrics in divergent fields [Breakdown of solid dielectrics in divergent fields] // Proc. IEEE. 1955. Vol. 102. P. 254–263.

9. Opisaniye pribora R-400 OOO «Dimrus» [OOO «Dimrus» device description R-400]: <http://dimrus.ru/manuals/r400.pdf>. (rus.)

10. **Gataullin A.M., Matukhin V.L., Naumov B.A.** Metod kolichestvennogo ucheta kharakteristik signalov chasticnykh razryadov [The method of quantifying the characteristics of partial discharge signals]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Kazan: Izd-vo KVKIU, 2011. S. 45–46. (rus.)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ГАТАУЛЛИН Айрат Мухамедович** — кандидат технических наук доцент Казанского государственного энергетического университета. 420066, Казань, ул. Красносельская, 51. E-mail: gataullinam@mail.ru

**МАТУХИН Вадим Леонидович** — доктор технических наук профессор, заведующий кафедрой Казанского государственного энергетического университета. 420066, Казань, ул. Красносельская, 51. E-mail: matukhinvl@mail.ru

**НИЗАМОВ Ильдар Ильдусович** — аспирант Казанского государственного энергетического университета. 420066, Казань, ул. Красносельская, 51. E-mail: ildarn444@gmail.com

## AUTHORS

**GATAULLIN Airat M.** — Kazan State Power Engineering University. 51, Krasnoselskaya St., Kazan, Russia, 420066. E-mail: gataullinam@mail.ru

**MATUKHIN Vadim L.** — Kazan State Power Engineering University. 51, Krasnoselskaya St., Kazan, Russia, 420066. E-mail: matukhinvl@mail.ru

**NIZAMOV Il'dar I.** — Kazan State Power Engineering University. 51, Krasnoselskaya St., Kazan, Russia, 420066. E-mail: ildarn444@gmail.com



DOI 10.5862/JEST.219.14  
УДК 669.1.017:669.018.44  
:669:018.28:669.018.891:539.25

*A.V. Ptashnik*

## **МЕТОД КОЛИЧЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА СТРУКТУРЫ СПЛАВОВ С ДИСПЕРСНЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ**

*A.V. Ptashnik*

### **METHOD OF THE QUANTITATIVE ANALYSIS OF STRUCTURE OF ALLOYS WITH DISPERSE INCLUSIONS USING ELECTRON MICROSCOPY**

Разработан и обоснован метод количественного анализа структуры многофазных сплавов с дисперсными включениями. Метод основан на совместном использовании растровой электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа. Выявлены экспериментальные особенности метода. Установлены параметры для контролируемой настройки автоматической программы при его использовании. Сформулированы требования к подготовке шлифов и интерпретации результатов анализа структуры сплавов. Разработанным методом выполнено количественное исследование изменения структуры жаропрочных сплавов на Fe—Cr—Ni-основе при длительной высокотемпературной выдержке. Показана достоверность и высокая точность метода.

**ЛИТЫЕ ЖАРОПРОЧНЫЕ СПЛАВЫ; МИКРОСТРУКТУРА; ФАЗОВЫЙ СОСТАВ; ЭЛЕКТРОННАЯ МИКРОСКОПИЯ; КАРБИДНОЕ УПРОЧНЕНИЕ; ДИСПЕРСНЫЕ ФАЗЫ.**

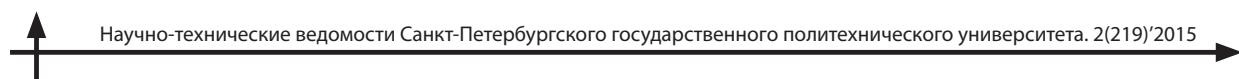
The paper is devoted to the developed and validated method of the quantitative analysis for the structure of multiphase alloys with disperse inclusions. The method is based on sharing raster electron microscopy and X-ray spectral microanalysis. There have been revealed experimental features of the method. The paper presents the parameters which have been established to control setting up the automated program during the use of the method. There have been formulated requirements to prepare a metallographic sample and to interpret results of the alloy structure analysis. The developed method has been applied for the quantitative research into the change of the structure of Fe-Cr-Ni heat resistant alloys at lasting high-temperature endurance. The paper confirms reliability and high precision of the method.

**CAST HEAT RESISTANT ALLOYS; MICROSTRUCTURE; PHASE COMPOSITION; ELECTRON MICROSCOPY; CARBIDE HARDENING; DISPERSE PHASES.**

#### **Введение**

Для изготовления высокотемпературных установок в нефтехимической промышленности используются жаропрочные жаростойкие спла-

вы на Fe—Cr—Ni-основе [1—3]. Сплавы имеют сложный химический состав и содержат (% масс.): 0,3—0,6 C, 15—30 Cr, 20—45 Ni, а также добавки Si, Mo, W, Mn, Ti, Nb, редкоземельных элементов (РЗЭ), остальное — Fe. Структура



сплавов состоит из пересыщенного твердого раствора  $\gamma$ -Fe–Ni–Cr и карбидов на основе хрома и ниобия —  $\text{Cr}_m\text{C}_n$  и  $\text{Nb}_m\text{C}_n$  [4–7]. При высокотемпературной эксплуатации структура сплавов, в том числе ее карбидная составляющая, претерпевает непрерывную трансформацию [8–16]. Скорость этих изменений (количественное соотношение, морфология и распределение упрочняющих карбидных фаз в структуре) определяют эксплуатационную надежность сплавов. Для прогнозирования работоспособности таких сплавов сложного химического состава, имеющих многофазную структуру, необходима количественная оценка структурных изменений, протекающих в них при длительной эксплуатации, особенно в экстремальных условиях. Решение этой задачи возможно с использованием достоверных количественных методик определения объемной доли, формы, характера распределения, количественного соотношения и элементного состава дисперсных фаз (микро- и наноразмерных) в структуре многокомпонентных сплавов.

Цель настоящего исследования — разработка методики достоверной количественной оценки трансформации дисперсных фаз в структуре многофазных сплавов при эксплуатации на основе электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа.

### Материал и методика эксперимента

Для отработки методики количественного фазового анализа сплавов с дисперсным упрочнением в качестве модельного использовали жаропрочный жаростойкий сплав 0,45C–26Cr–35Ni–2Si–2Nb, применяемый для изготовления деталей установок высокотемпературного пиролиза углеводородного сырья. Приведем фактический химический состав исследованного сплава, % масс.:

C.....	0,48
Si.....	1,86
Mn.....	0,91
Cr.....	25,4
Ni.....	35,3
Nb.....	1,72
W.....	0,63
Mo.....	0,23
V.....	0,26
Ti.....	0,14
РЭ.....	≤ 0,5
Fe.....	ост.

Сплав выплавляли в индукционной печи, отливки изготавливали статическим литьем, используя песчаные формы. Из литых заготовок толщиной 40 мм изготавливали образцы размером 10×10×15 мм. Образцы подвергали термической обработке по следующему режиму: выдержка при 1150 °C длительностью 2, 10, 50, 100 или 500 ч с последующим охлаждением с печью или в воде. Термическую обработку проводили в электрической печи с точностью измерения температуры образца ± 2 °C.

Исследование структуры сплава, рентгеноспектральный микроанализ (PCMA) распределения элементов в матрице и состава фаз проводили с использованием растрового электронного микроскопа (РЭМ) TESCAN VEGA 2 LM, оснащенного рентгеновским энергодисперсионным спектрометром INCA X-Max-50. Точность определения концентрации химических элементов составляла для Fe, Cr, Ni, Si, Nb, Mo, W, Ti — 3 % (отн.), для C — 20 % (отн.). Изображения структур, полученные при проведении PCMA на РЭМ, использовали также для количественного и морфологического анализа дисперсных включений фаз в сплаве. Для этого применяли программы VegaTC и Inca Feature, которые обеспечивают полный цикл работы с изображениями структур, в том числе статистическую обработку результатов оценки таких параметров структуры, как размер, относительный объем в сплаве, форма частиц, тип их кристаллической решетки. Для обеспечения достоверности результатов анализ структуры по каждому параметру проводили на не менее пяти полях шлифа размером 400×400 мкм. Изготовление и подготовку шлифов выполняли на оборудовании фирмы «Buehler» согласно ASTM E 3–95.

### Результаты экспериментальных исследований

Предлагаемая методика основана на совместном использовании методов растровой электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа.

#### Получение электронного изображения структуры сплава и определение локального элементного состава фаз

Для количественного анализа структуры сплава используются изображения, получаемые с помощью растрового электронного микроскопа

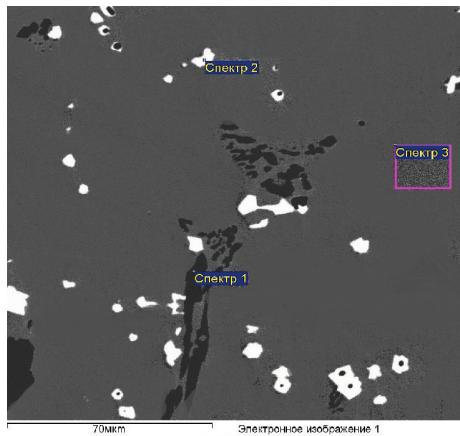


Рис. 1. Структура сплава 0,45C–26Cr–35Ni–2Si–2Nb в литом состоянии, полученная в режиме обратноотраженных электронов

в режиме обратно отраженных электронов. Накопление электронного изображения происходит при взаимодействии электронного пучка с поверхностью шлифа исследуемого объекта. Возникающий контраст изображения в основном определяется значением коэффициента отражения электронов, который в свою очередь зависит от среднего атомного номера облучаемого участка образца (режим Z-контраста). Вследствие этого области, обогащенные элементами с большим атомным номером, на полученном изображении выглядят ярче, а области, обогащенные элементами с более низким атомным номером, — темнее. Изображение, получаемое с помощью Z-контраста, позволяет выявлять структуру исследуемого объекта, не прибегая к каким-либо другим методам.

Облучение поверхности образца ускоренными электронами в растровом электронном микроскопе не только вызывает образование

отраженных и вторичных электронов, но и сопровождается генерацией характеристического рентгеновского излучения. Анализ спектра этого излучения позволяет определить элементный состав структурных составляющих, в частности отдельных дисперсных включений.

Таким образом, получение изображения структуры с дисперсными включениями различных фаз в режиме Z-контраста и анализ элементного состава близких по контрасту частиц позволяют идентифицировать их тип, а также определить количество и морфологию каждого типа.

На рис. 1 показана структура литого сплава 0,45C–26Cr–35Ni–2Si–2Nb. На электронном изображении в режиме Z-контраста, полученном с помощью РЭМ, на фоне матричного твердого раствора наблюдаются дисперсные частицы двух типов, различающихся по яркости: белые и темные. Элементный состав дисперсных фаз и матрицы, полученный с помощью РСМА, представлен в таблице. Частицы двух типов в структуре сплава по контрасту в сравнении с аустенитной матрицей (спектр 3) идентифицированы как карбиды хрома (более темные, спектр 1) и карбиды ниобия (более светлые спектр 2).

Накопление большого количества экспериментальных данных об элементном составе дисперсных частиц в структуре сплава показывает, что частицы одного контраста имеют идентичный химический состав и относятся к одному типу фаз.

#### *Определение доли площади, занимаемой частицами каждого типа*

Следующим этапом количественного анализа структуры сплава было определение суммарной доли площади, занимаемой каждым типом

#### **Химический состав фаз в структуре литого сплава 0,45C–26Cr–35Ni–2Si–2Nb и их идентификация**

Номер спектра	Содержание, % (масс.) химических элементов									Идентификация типа фазы
	C	Fe	Cr	Ni	Si	Nb	Mo	W	Ti	
1	8,96	8,70	78,65	1,90	0,04	0,00	0,53	1,24	0,00	Карбид хрома
2	10,76	0,78	1,62	0,66	0,13	84,26	0,10	0,07	1,62	Карбид ниобия
3	н.о.	37,67	23,27	35,28	1,95	0,53	0,34	0,95	0,01	Аустенитная матрица

Примечание: н.о. — содержание элемента не определялось.



частиц (фаз). Для этого необходимо полуточновое изображение участка поверхности образца (см. рис. 1) трансформировать в *n*-тоновое изображение. Для решения такой задачи используется стандартная опция — «площадь объекта» в панели инструментов программы VegaTC электронного микроскопа TESCAN VEGA 2 LM (рис. 2).

В пределах получаемого изображения структуры сплава выделяется количество пороговых значений интенсивности сигнала, соответствующее количеству типов определяемых дисперсных фаз. После этого участки изображения, имеющие интенсивность сигнала в пределах заданных пороговых значений, выделяются каким-либо цветом. Для достоверной идентификации фаз необходимо проводить тонкую настройку пороговых значений интенсивности сигнала таким образом, чтобы все дисперсные частицы в структуре сплава, наблюдаемые на полуточновом изображении, полностью окрашивались в соответствующий цвет при выделении на *n*-тоновом изображении, а участки матрицы, близкие по контрасту к выделяемым частицам, не окрашивались. Переход от полуточнового к многотоновому изображению структуры позволяет количественно определить долю площади кадра, занимаемую частицами дисперсной фазы определенного типа (рис. 3). Тщательная настройка пороговых значений интенсивности сигнала позволяет разделить частицы, отличающиеся по среднему атомному номеру на 0,05, что обеспечивает высокую точность и достоверность получаемых результатов анализа структуры сплава.

При анализе дисперсных фаз в структуре жаропрочного жаростойкого сплава важно оценить не только их относительное содержание, но и морфологию частиц. Для этого после элементного анализа частиц, разделения их на типы и проверки на возможность перевода в *n*-тоновое изображение проводится более подробное исследование с использованием программно-аппаратного пакета Inca Feature. Данные программного пакета могут быть использованы для количественной оценки морфологических особенностей частиц дисперсных фаз (средний диаметр, округлость, площадь, объемная доля каждой фракции и др.).

Программа Inca Feature имеет строгий алгоритм (рис. 4).

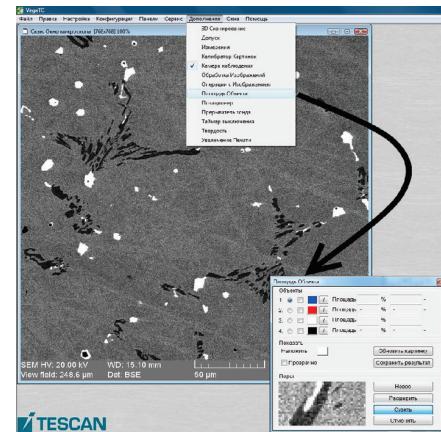


Рис. 2. Полуточновое изображение структуры литого сплава 0,45С–26Cr–35Ni–2Si–2Nb и вид панели инструментов программы VegaTC и выпадающего окна со стандартной опцией «Площадь объекта»

Пошаговое выполнение настроек в соответствии с алгоритмом программы дает возможность учесть все особенности структуры отдельно взятого образца сплава или автоматизировать процесс при выполнении анализа структуры партии идентичных образцов. Алгоритмом предусмотрено выполнение следующей последовательности операций при настройке программы (рис. 5–13):

задается имя проекта и описание образца (рис. 5);

выбирается представительный участок сканирования (план участка) и задается увеличение полей сканирования, что позволяет проводить подробный анализ на представительных участках без потери разрешения (рис. 6);

проводится настройка системы поиска частиц (см. рис. 7–11): устанавливаются пороговые значения уровней яркости электронномикроскопического изображения частиц (рис. 8–9) и параметры для анализа спектра EDS (рис. 10);

после детальной настройки происходит запуск программы (рис. 12);

после запуска программы происходит автоматическое разделение указанного изначально участка сканирования на поля заданного увеличения (рис. 13).

В процессе анализа структуры сплава электронный зонд сканирует участок поверхности в рамках контура каждой выделенной частицы.

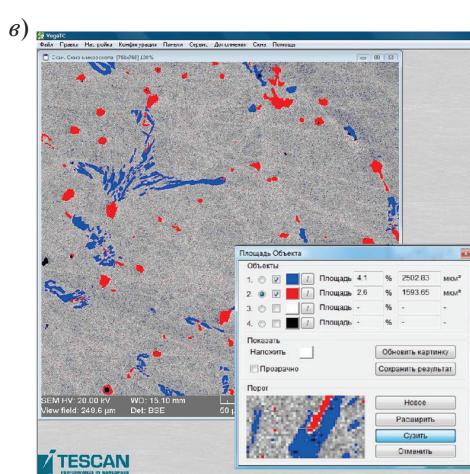
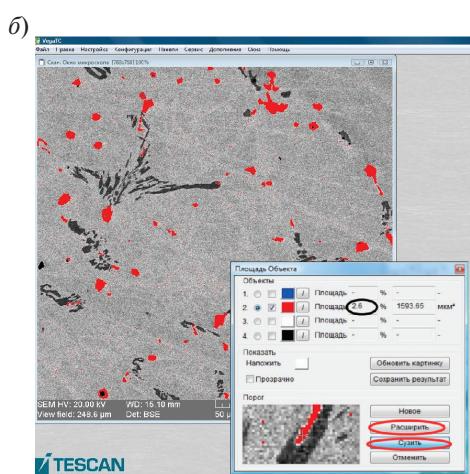
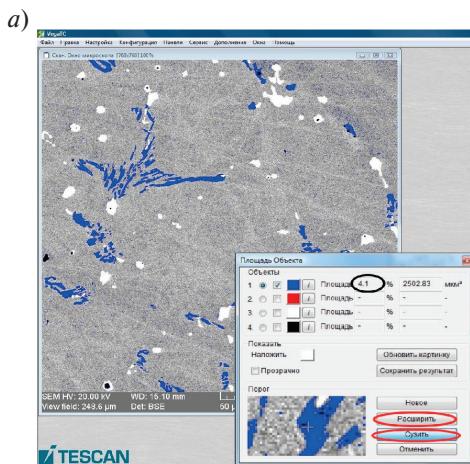


Рис. 3. Трехтоновое изображение структуры литого сплава 0,45C–26Cr–35Ni–2Si–2Nb (в) после перехода от полуточнового с целью определения суммарной доли площади, занимаемой карбидами каждого типа. Карбиды хрома выделены синим цветом (а), карбиды ниобия — красным (б)



Рис. 4. Алгоритм программы Inca Feature

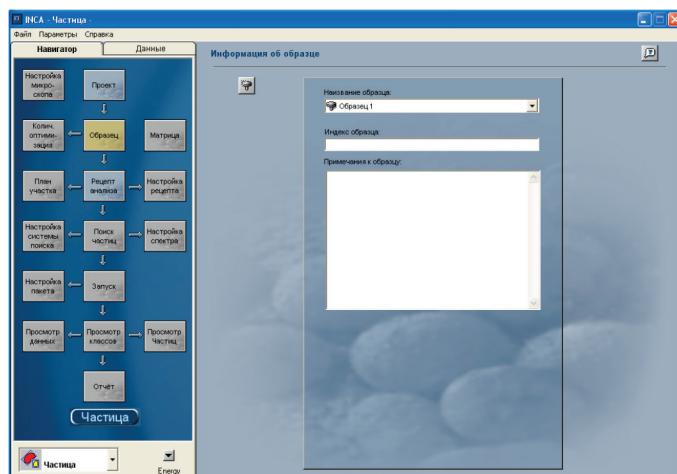


Рис. 5. Изображение окна «Образец» программы Inca Feature

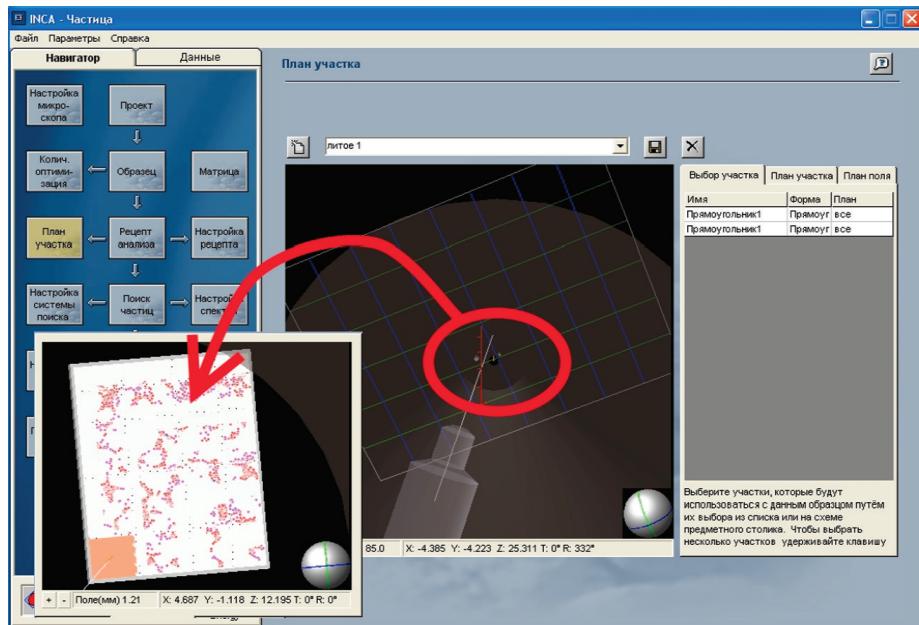


Рис. 6. Изображение окна «План участка» программы Inca Feature

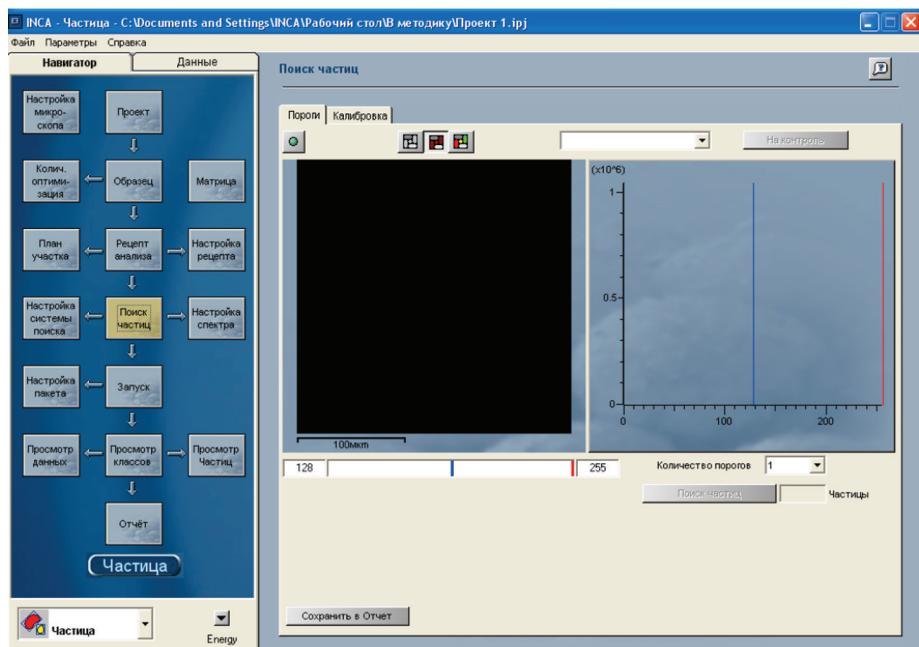


Рис. 7. Изображение окна «Поиск частиц» программы Inca Feature

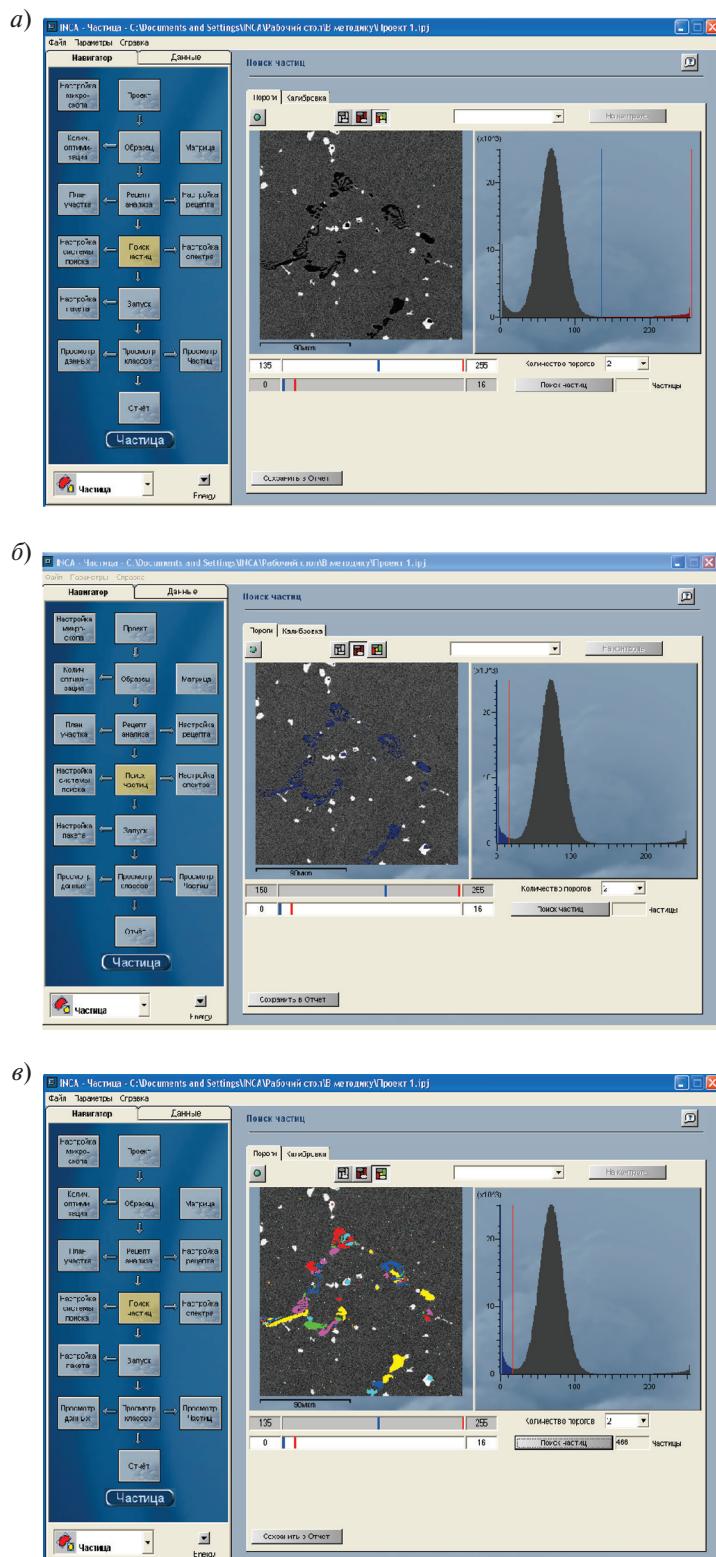


Рис. 8. Изображение окна «Поиск частиц» программы Inca Feature на примере анализа карбидов хрома в структуре литого сплава 0,45C–26Cr–35Ni–2Si–2Nb: *а* — полутоновое; *б* — двухтоновое (карбиды хрома окрашены синим цветом); *в* — многоцветная проверка правильности выделения карбидов хрома при заданном диапазоне уровней яркости

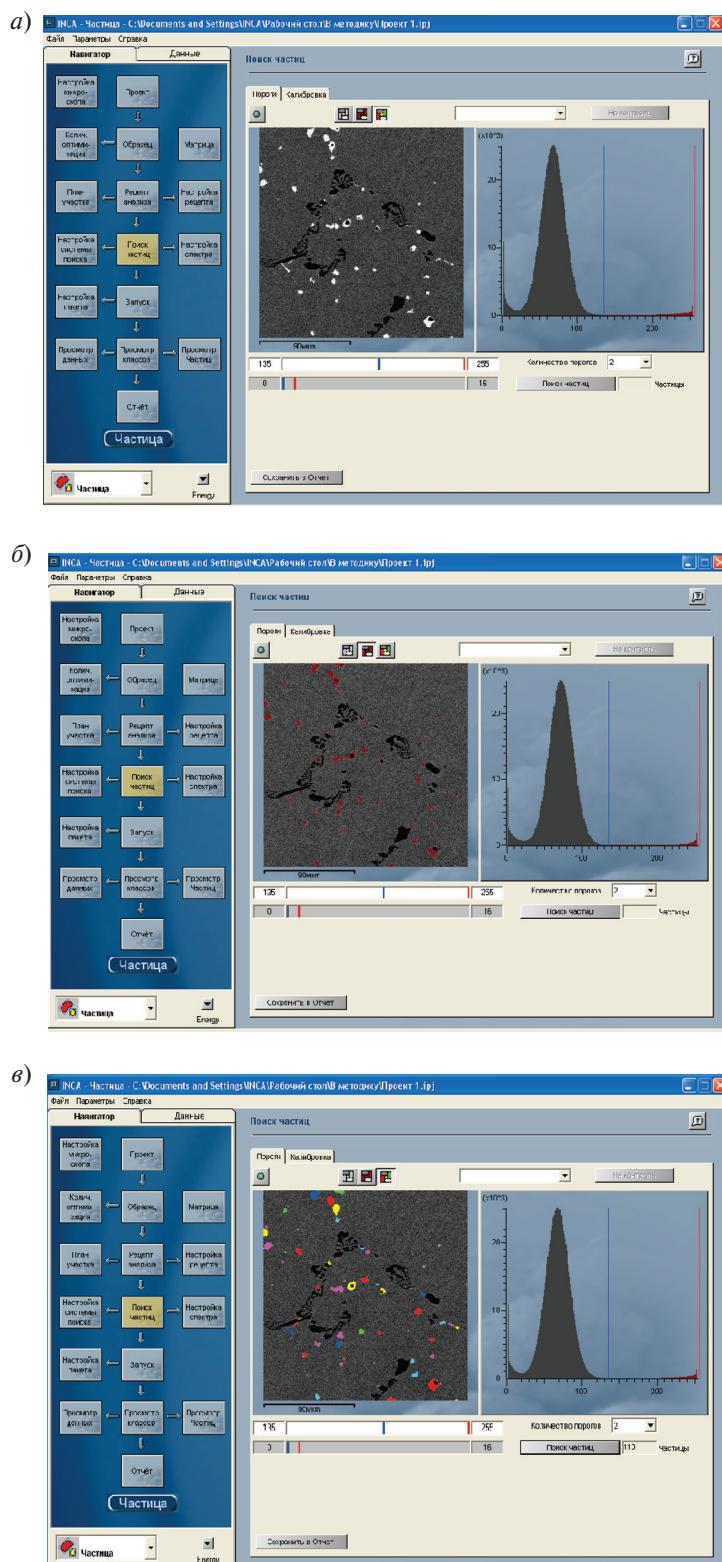


Рис. 9. Изображение окна «Поиск частиц» программы Inca Feature на примере анализа карбидов ниобия в структуре литого сплава 0.45C–26Cr–35Ni–2Si–2Nb: *a* — полутононое; *b* — двухтоновое (карбиды ниобия окрашены красным цветом); *c* — многоцветная проверка правильности выделения карбидов ниобия при заданном диапазоне уровней яркости

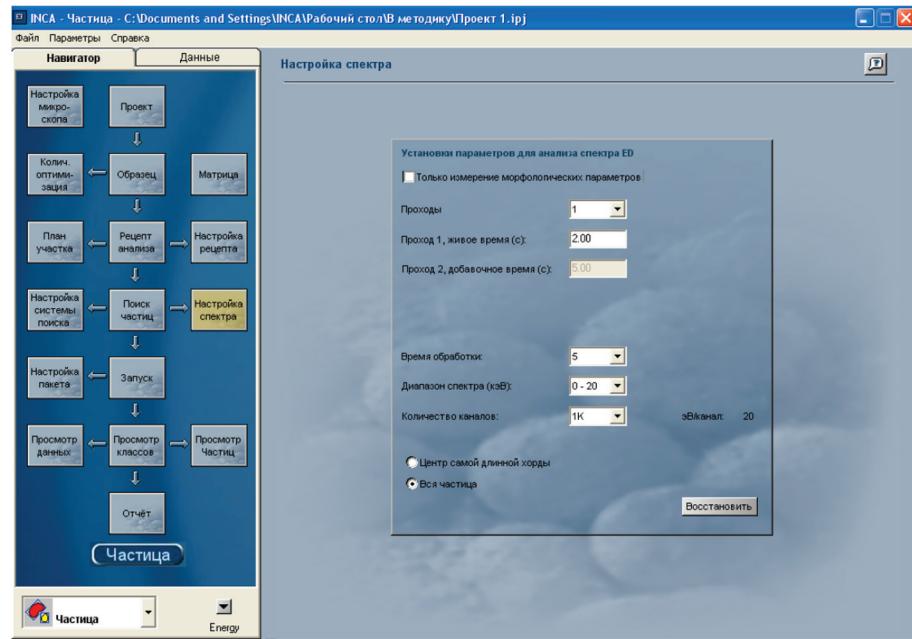


Рис. 10. Изображение окна «Настройка спектра» программы Inca Feature

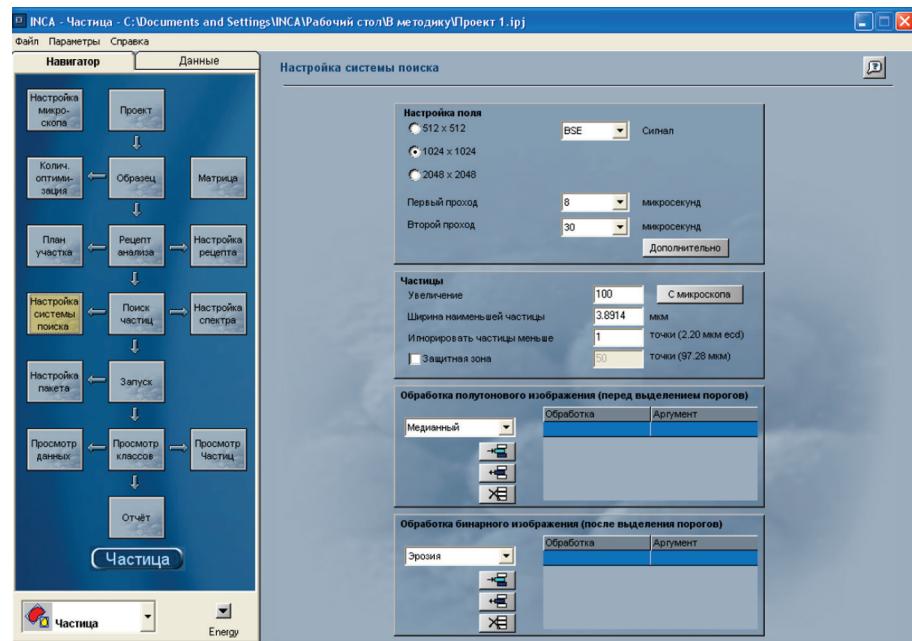
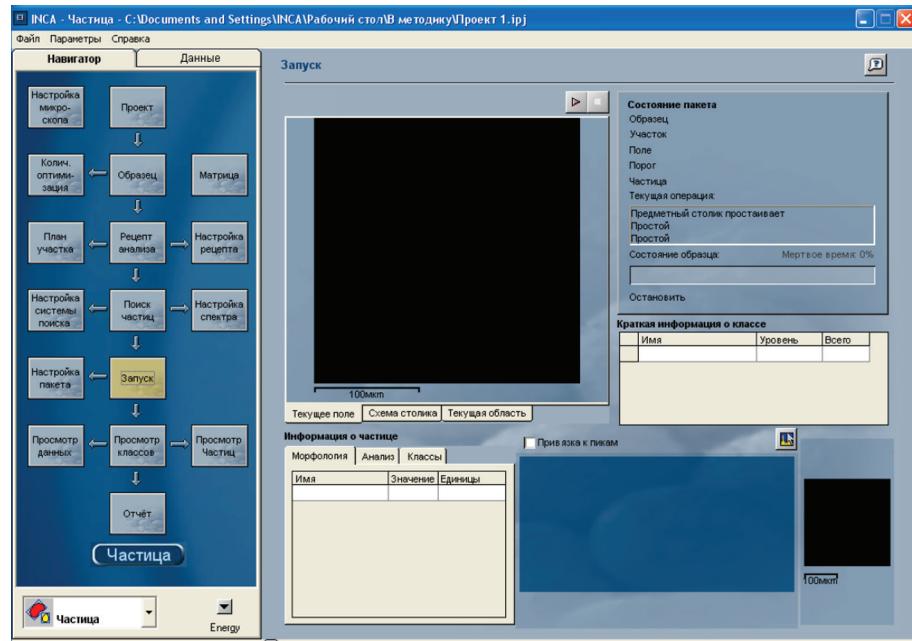


Рис. 11. Изображение окна «Настройка системы поиска» программы Inca Feature



a)



б)

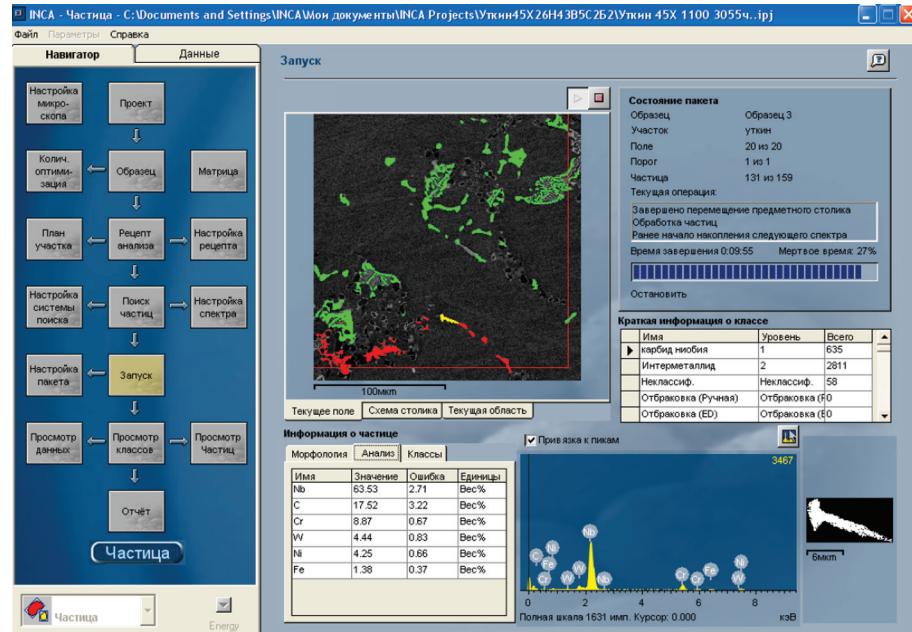


Рис. 12. Изображение окна запуска программы Inca Feature: а — до запуска; б — во время работы (анализ структуры литого сплава 0,45C–26Cr–35Ni–2Si–2Nb)

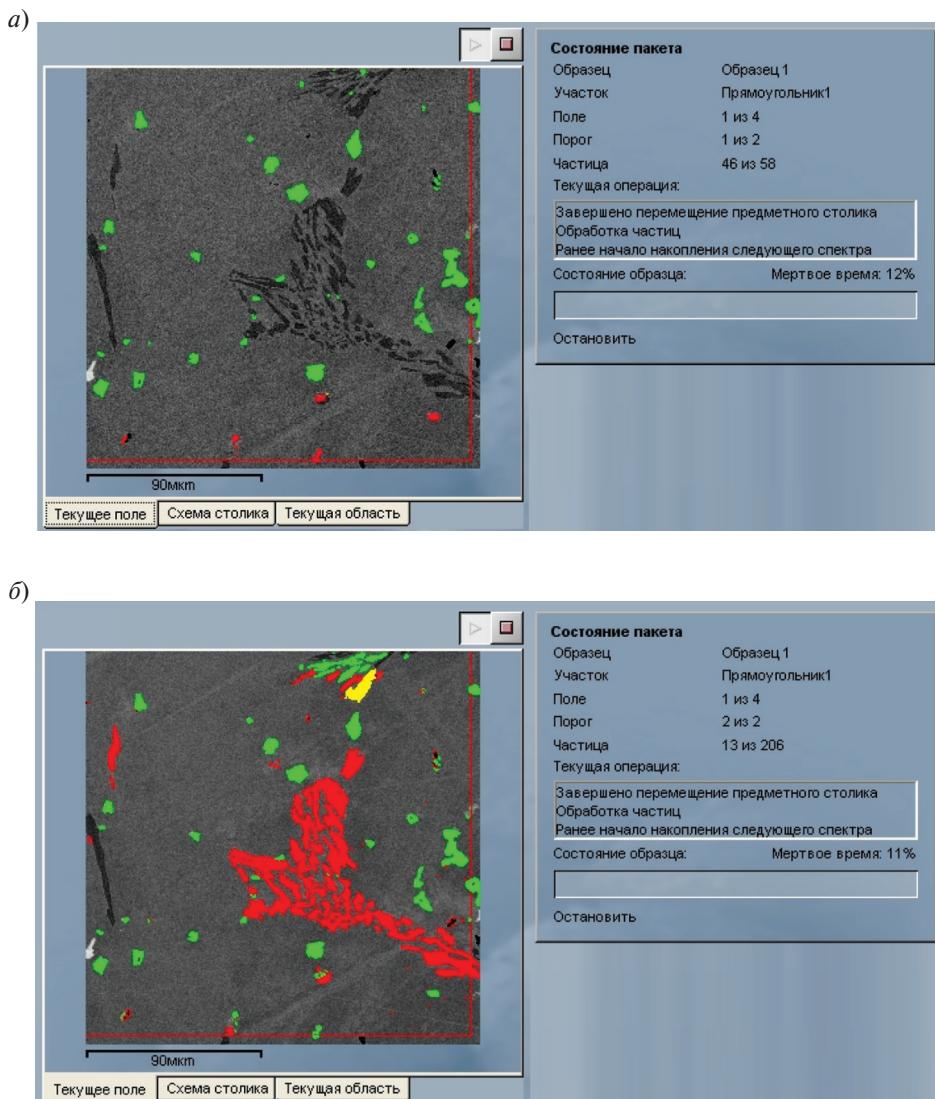


Рис. 13. Пример работы программы Inca Feature после настройки:

- а — сканирование частиц 1-го порога яркости/контрастности 1-го поля заданного участка;  
 б — сканирование частиц 2-го порога яркости/контрастности 1-го поля заданного участка  
 структуры литого сплава 0,45С—26Cr—35Ni—2Si—2Nb

При этом определение элементного состава происходит только в области выделенной частицы. Результаты сканирования заносятся в базу данных, где для каждой частицы фиксируются химический состав, морфологические параметры (длина, ширина, площадь, окружность и т. д.) и характеристический спектр. Экспериментальные базы данных позволяют проводить сортировку и строить распределение частиц по составу, размеру и морфологическим признакам, а также определять объемную долю

частиц каждого типа. Автоматизированное управление зондом и столом перемещения образца позволяет проанализировать большое количество полей при достаточно большом увеличении (от сотен до нескольких тысяч крат). Это обеспечивает представительность результатов количественного анализа структуры и их достоверность на основе баланса вещества в соответствии с общим химическим составом сплава и рентгеноспектральным микроанализом состава различных фаз.



## Особенности методики

**Подготовка шлифа.** На точность определения типов частиц (фаз) большое влияние оказывает качество подготовки шлифа. Царапины на поверхности шлифа могут приводить к большому разбросу оценки площади, занимаемой конкретной фазой при ограниченном ее количестве (< 10 % об.), поскольку изменения интенсивности сигнала матрицы в зоне царапин могут попадать в выделенные диапазоны анализа структуры и эти области будут идентифицированы как дисперсная фаза (рис. 14, а). Однако важно отметить, что излишне тщательная подготовка шлифа, приводящая к полному удалению наклепанного слоя с поверхности образца сплава, приводит к появлению ориентационного контраста за счет дифракции обратно отраженных электронов (рис. 14, б). При этом участки матрицы с различной ориентировкой кристаллитов будут различаться по интенсивности регистрируемого сигнала, что затрудняет установку пороговых значений интенсивности.

**Выбор увеличения и количества полей для анализа структуры сплава.** Значительное влияние на точность получаемых результатов оказывает выбранное увеличение изображения. Необходимо выбрать размер поля (увеличение), определяющий одновременно как представительность количественного анализа структуры сплава, так и возможность разрешения частиц малого размера.

Так, например, литой сплав 0,45C–26Cr–35Ni–2Si–2Nb имеет структуру, состоящую из ячеек с характерным размером порядка 100 мкм,

разделенных выделениями карбидов хрома по границам. Карбиды ниобия располагаются как по границам, так и в теле ячеек. При длительных высокотемпературных выдержках ячеистая структура сплава сохраняет основные характерные особенности, однако количество и морфология дисперсных упрочняющих фаз изменяются [8–14]. При этом изменения происходят как в теле зерна, так и вокруг первичных карбидов. Соответственно, представительность анализируемого участка структуры будет зависеть от количества ячеек и количества частиц в поле анализа. С другой стороны, увеличение размеров анализируемого участка (меньшее увеличение) приводит к снижению разрешения и невозможности достоверно измерить площадь частиц малого размера. Многочисленные эксперименты с последующей статистической обработкой полученных результатов позволили установить, что для выполнения количественного анализа структуры сплава 0,45C–26Cr–35Ni–2Si–2Nb оптимальный размер исследуемого участка составляет ~ 400×400 мкм. Такой участок структуры сплава содержит не менее пяти ячеек и несколько сотен частиц дисперсных фаз. При использовании для анализа структуры сплава участка указанного размера погрешность определения площади частицы размером 1–2 мкм не превышает 25 %, а для более крупных частиц – значительно меньше. Так, для частиц размером 10 мкм она составляет 3 % и, учитывая, что в исходной литой структуре сплава преобладают частицы размером 3–5 мкм и крупнее, поле размером 400×400 мкм обеспечивает высокую

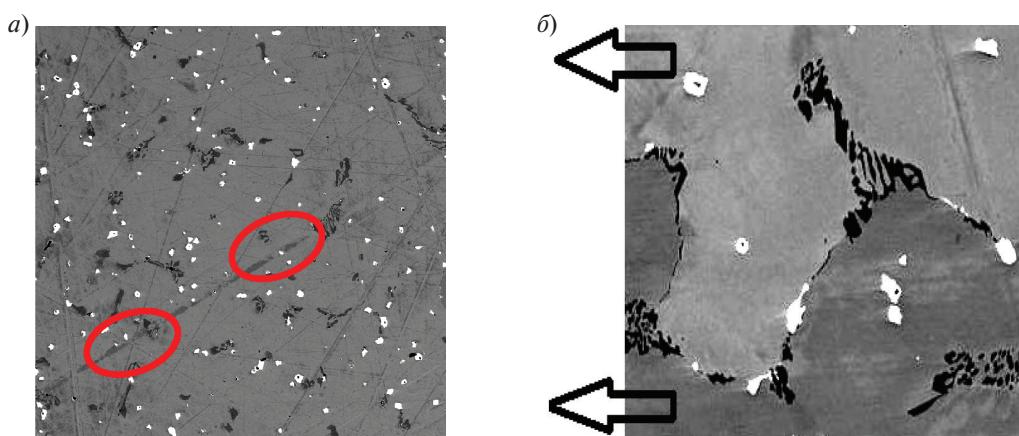


Рис. 14. Зоны царапин на поверхности шлифа (а) и зоны матричного  $\gamma$ -твердого раствора с разным ориентационным контрастом (показаны стрелками) (б) в структуре литого сплава 0,45C–26Cr–35Ni–2Si–2Nb



точность определения суммарной площади, занимаемой частицами (фазами) того или иного типа. При этом увеличение количества полей до 10–20 повышает представительность получаемых экспериментальных результатов.

**Скорость развертки.** Для получения достоверных результатов при анализе структуры сплава необходимо правильно выбрать скорость сканирования исследуемого участка. Критериями оптимизации являются снижение уровня шума, непосредственно влияющего на качество получаемого изображения, и время накопления изображения. Экспериментально установлено, что скорость развертки должна быть больше 150 мкс/пикс; тогда накопление одного кадра происходит за примерно 3 мин.

### Заключение

Предложен метод количественного металлографического анализа дисперсных включений в многофазных сплавах, основанный на

совместном использовании экспериментальных данных рентгеноспектрального микроанализа и цифровой обработки электронно-микроскопических изображений структуры. Учет выявленных особенностей и экспериментально обоснованных необходимых ограничений при настройке и применении предлагаемой методики количественного анализа структуры сплавов с дисперсными включениями различных фаз обеспечивает ее достаточную точность. Так, например, методика позволяет определить долю суммарной площади, занимаемой частицами дисперсных фаз каждого типа, отличающимися по среднему атомному номеру не менее чем на 0,05. При этом погрешность определения составляет менее 10 %. По представительности метод не уступает оптической металлографии и обеспечивает возможность получения количественной оценки размеров, химического состава и морфологии дисперсных включений фаз в структуре сплавов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Garbiak M., Jasinski W., Piekarski B. Materials for Reformer Furnace Tubes. History of Evolution // Archives Of Foundry Engineering. 2011. Vol. 11. Spesial Issue 2. P. 47–52.
3. Oscar A. Quintana Ponce. Structural and Magnetic Studies of an Ex-service Cast Austenitic Steel Tube Used in Hydrogen Reformers: Thesis ... for the degree of Doctor of Philosophy in Materials Engineering in the Graduate College of the University of Illinois at Chicago. Chicago, Illinois, 2012. 176 p.
4. 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 45Х26Н33С2Б2 // Металловедение и термическая обработка металлов. 2013. № 4 (694). С. 42–47.
5. Орыщенко А.С., Кондратьев С.Ю., Анастасиади Г.П., Фукс М.Д., Петров С.Н. Особенности структурных изменений в жаропрочном сплаве 45Х26Н33С2Б2 при температурах эксплуатации. Сообщение 1: Литое состояние // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия: Наука и образование. 2012. № 142. С. 155–163.
6. Кондратьев С.Ю., Анастасиади Г.П., Орыщенко А.С., Фукс М.Д. Структурная нестабильность и работоспособность жаропрочных сплавов на Fe–Cr–Ni-основе // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. № 10. С. 31–39.
7. Фукс М.Д., Орыщенко А.С., Кондратьев С.Ю., Анастасиади Г.П. Длительная прочность литого жаропрочного сплава 45Х26Н33С2Б2 // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия: Наука и образование. 2012. № 159. С. 92–96.
8. Kenik E.A., Maziasz P.J., Swindeman R.W., Cervenka J., May D. Structure and phase stability in cast modified-HP austenite after long-term ageing // Scripta materialia. 2003. Vol. 49. № 2. P. 117–122.
9. Рудской А.И., Орыщенко А.С., Кондратьев С.Ю., Анастасиади Г.П., Фукс М.Д. Механизм и кинетика фазовых превращений в жаропрочном сплаве 45Х26Н33С2Б2 при длительных высокотемпературных выдержках. Часть 1 // Металловедение и термическая обработка металлов. 2014. № 1(703). С. 3–8.
10. Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Анастасиади Г.П., Орыщенко А.С., Фукс М.Д. Механизм и кинетика фазовых превращений в жаропрочном сплаве 45Х26Н33С2Б2 при длительных высокотемпературных выдержках. Часть 2 // Металловедение и термическая обработка металлов. 2014. № 3(705). С. 12–19.
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

0.45C–26Cr–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., Петров С.Н. Трансформация структуры жаропрочного сплава 0,45C 26Cr 33Ni 2Si 2Nb при длительной высокотемпературной выдержке // Металловедение и термическая обработка металлов. 2013. № 10(700). С. 7–14.
  13. Орыщенко А.С., Кондратьев С.Ю., Анастасиади Г.П., Фукс М.Д., Петров С.Н. Особенности структурных изменений в жаропрочном сплаве 45Х26Н33С2Б2 при температурах эксплуатации. Сообщение 2: Влияние высокотемпературной выдержки // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия: Наука и образование. 2012. № 147-1. С. 217–228.
  14. Рудской А.И., Анастасиади Г.П., Орыщенко А.С., Кондратьев С.Ю., Фукс М.Д. Особенности струк-

## REFERENCES

1. **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.
  2. **Garbiak M., Jasinski W., Piekarski B.** Materials for Reformer Furnace Tubes. History of Evolution. *Archives Of Foundry Engineering*. 2011. Vol. 11. Spesial Issue 2. P. 47–52.
  3. **Oscar A. Quintana Ponce.** Structural and Magnetic Studies of an Ex-service Cast Austenitic Steel Tube Used in Hydrogen Reformers: Thesis ... for the degree of Doctor of Philosophy in Materials Engineering in the Graduate College of the University of Illinois at Chicago. Chicago, Illinois, 2012. 176 p.
  4. **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 [Special Features of Structure and Long-Term Strength of Cast Refractory Alloy 45Kh26N33S2B2]. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*. 2013. № 4 (694). S. 42–47. (rus.)
  5. **Oryshchenko A.S., Kondratyev S.Yu., Anastasiadi G.P., Fuks M.D., Petrov S.N.** Osobennosti strukturykh izmeneniy v zharoprochnom splave 45Kh26N33S2B2 pri temperaturnykh ekspluatatsii. Soobshcheniye 1: Litoye sostoyaniye [Features of structural changes in a heat resisting alloy 45H26N-33S2B2 at operation temperatures. Message 1: Cast state]. *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGPU*. Seriya: Nauka i obrazovaniye. 2012. № 1(142). S. 155–163. (rus.)
  6. **Kondratyev S.Yu., Anastasiadi G.P., Oryshchenko A.S., Fuks M.D.** Strukturnaya nestabilnost i rabotosposobnost zharoprochnykh splavov na Fe-Cr-Ni-osnove [Structural instability and operability of heat resisting alloys on Fe-Cr-Ni-based]. *Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyenii*. 2012. № 10. S. 31–39. (rus.)
  7. **Fuks M.D., Oryshchenko A.S., Kondratyev S.Yu., Anastasiadi G.P.** Dlitelnaya prochnost litogo zharoprochnogo splava 45Kh26N33S2B2 [Long durability of a cast heat resisting alloy 45H26N33S2B2]. *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGPU. Seriya: Nauka i obrazovaniye*. 2012. № 4(159). S. 92–96. (rus.)
  8. **Kenik E.A., Maziasz P.J., Swindeman R.W., Cervenka J., May D.** Structure and phase stability in cast modified-HP austenite after long-term ageing. *Scripta materialia*. 2003. Vol. 49. № 2. P. 117–122.
  9. **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 dlitelnikh vysokotemperaturnykh vyderzhkakh. Chast 1 [Mechanisms and Kinetics of Phase Transformations in Refractory Alloy 45Kh26N33S2B2 in Long-Term High-Temperature Holds. Part 1]. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*. 2014. № 1 (703). S. 3–8. (rus.)
  10. **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 dlitelnikh vysokotemperaturnykh vyderzhkakh. Chast 2 [Mechanisms and Kinetics of Phase Transformations in Refractory Alloy 45Kh26N33S2B2 in Long-Term High-Temperature Holds. Part 2]. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*. 2014. № 3 (705). S. 12–19. (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 dlitelnikh vysokotemperaturnykh vyderzhkakh zharoprochnogo splava 0.45C-26Cr-33Ni-2Si-2Nb [Effect of Electron Factor (Number of Electron Holes) on Kinetics of Nucleation, Growth, and Dissolu-

tion of Phases during Long-Term High-Temperature Holdings of 0.45C-26Cr-33Ni-2Si-2Nb Superalloy]. *Fizika metallov i metallovedeniye*. 2014. T. 115. № 1. S. 3–13.

12. 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 [Transformation of the Structure of Refractory Alloy 0.45C-26Cr-33Ni-2Si-2Nb During a Long-Term High-Temperature Hold]. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*. 2013. № 10 (700). S. 7–14.

13. 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 [Features of structural changes in a heat resisting alloy 45H26N33S2B2 at operation temperatures. Message 2: Influence of high-temperature endurance]. *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGPU. Seriya: Nauka i obrazovaniye*. 2012. № 2(147). T. 1. S. 217–228.

14. 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 [Features of structural changes in a heat resisting alloy 45H26N33S2B2 at operation temperatures. Message 3: Mechanism and kinetics of phase transformations]. *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGPU. Seriya: Nauka i obrazovaniye*. 2012. № 3(154). T. 2. S. 143–150. (rus.)

15. Anastasiadi G.P., Kondratyev S.Yu., Oryshchenko A.S., Petrov S.N., Fuks M.D. Vliyaniye tsiklov «nagrev okhlazhdeniye» na dlitelnuyu prochnost litogo zharoprochnogo splava 45Kh26N33S2B2 [Influence of the cycles «heating-cooling» on the long durability of a cast heat resisting alloy 45H26N33S2B2]. *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2013. № 1(166). S. 113–120. (rus.)

16. Anastasiadi G.P., Kondratyev S.Yu., Oryshchenko A.S., Fuks M.D. Vliyaniye skorosti okhlazhdeniya pri tekhnologicheskem termotsiklirovaniyu na dlitelnuyu prochnost litogo zharoprochnogo splava 45Kh26N33S2B2 [Influence of speed of cooling at technological thermocycling on the long durability of a cast heat resisting alloy 45H26N-33S2B2]. *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2013. № 2(171). S. 109–119. (rus.)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**ПТАШНИК Алина Вадимовна** — инженер ГНЦ РФ ФГУП «ЦНИИ конструкционных материалов «Прометей». 191015, ул. Шпалерная, 49, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: alina\_pv@mail.ru

## AUTHOR

**PTASHNIK Alina V.** — FSUE Central Research Institute of Structural Materials «Prometey». 191015, Shpalernaya Str. 49, St. Petersburg, Russia. E-mail: alina\_pv@mail.ru



DOI 10.5862/JEST.219.15

УДК 661.665

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

## РАЗРАБОТКА НАУЧНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ ПЛАЗМЕННОГО СИНТЕЗА НАНОБОРИДА ТИТАНА

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

## DEVELOPMENT OF SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL FOUNDATIONS FOR PLASMA SYNTHESIS OF TITANIUM NANOBORIDE

Разработаны научные и технологические основы плазменного синтеза диборида титана, включая термодинамические и кинетические условия боридообразования при взаимодействии титана и его диоксида с продуктами газификации бора в потоке азотно-водородной плазмы и его закономерности для двух вариантов, реализуемых с использованием порошковых шихт «титан — бор» и «диоксид титана — бор». Для этих технологических вариантов получены математические модели, описывающие зависимости содержания в продуктах синтеза диборида титана и свободного бора от основных параметров. Исследован и предложен вероятный механизм образования диборида титана по схеме «пар — расплав — кристалл», предполагающий конденсацию паров титана в виде аэрозоля, борирование нанокапель расплава бороводородами и кристаллизацию расплава «титан — бор». Проведена комплексная физико-химическая аттестация диборида титана, включающая изучение кристаллической структуры, фазового и химического составов, дисперсности, морфологии и окисленности частиц. Проанализированы технологические перспективы применения нанопорошка диборида титана в качестве основного компонента смачиваемого покрытия углеродсодержащих катодов с улучшенными физико-механическими и защитными свойствами.

ДИБОРИД ТИТАНА; ПЛАЗМЕННЫЙ СИНТЕЗ; МОДЕЛИРОВАНИЕ; БОРИДООБРАЗОВАНИЕ; БОР; ПОРОШКООБРАЗНОЕ СЫРЬЕ; ДИСПЕРСНОСТЬ.

The scientific and technological foundations of plasma synthesis of titanium diboride, including thermodynamic and kinetic conditions of boride formation during the interaction of titanium and titanium dioxide with the products of boron gasification in the stream of nitrogen - hydrogen plasma and its laws for the two options using titanium powder mix - boron and titanium dioxide - boron. Within the study of technological options the authors obtained mathematical models describing the dependence of the amount of titanium diboride and boron in synthesis products on the basic parameters. The authors examined and proposed a plausible mechanism of titanium diboride formation with the scheme "vapor - melt - crystal", involving the condensation of titanium vapors in the form of aerosol, boriding of melt nanodroplets with borohydride and titanium - boron melt crystallization. There was conducted the complex physical and chemical certification of titanium diboride, which includes the study of the crystal structure, phase and chemical composition, dispersion, morphology and particle oxidation. The authors analyzed technological prospects to apply titanium diboride nanopowder as the main component of a wettable coating for carbon cathodes with improved physical - mechanical and barrier properties.

TITANIUM DIBORIDE; PLASMA SYNTHESIS; SIMULATION; FORMATION OF BORIDE; BORON; POWDERY RAW MATERIALS; DISPERSION.

### Введение

Диборид титана  $TiB_2$  — синтетический сверхтвёрдый тугоплавкий жаропрочный износостойкий материал, востребованный для производства

керметов, огнеупоров, защитных покрытий различного назначения [1, 2]. Сравнительно новое и значительное по объему направление его применения — в электролитическом производстве алюминия в качестве компонента смачиваемого

покрытия катодов электролизеров, защищающего их от разрушающего воздействия криолитоглиноземного расплава [3, 4]. Для получения такого покрытия готовится водная суспензия, содержащая 68–70 % твердого вещества (90 % —  $TiB_2$ , 10 % —  $Al_2O_3$ ). Физическая и химическая связь между коллоидными частицами  $Al_2O_3$  и частицами  $TiB_2$  в суспензии приводит к образованию вязкоэластичного желеподобного состояния материала. Такой материал не выделяет воду и ведет себя после сушки как твердый. Суспензию наносят распылением или окрашиванием с промежуточной сушкой воздухом после нанесения каждого слоя. Общая продолжительность сушки составляет 24 часа. Покрытие толщиной 1,0–2,0 мм обеспечивает смачивание катода алюминием, имеет высокое сопротивление внедрению натрия, одновременно сочетает достаточную твердость, прочность на изгиб, износостойкость, сцепление с основой, способствует снижению катодного падения напряжения и повышению катодного выхода алюминия по току.

В зарубежной практике алюминиевого производства материалы для защитных катодных покрытий алюминиевых электролизеров поставляются фирмой «МОЛТЕК» и имеют торговые марки ТИНОР А, ТИНОР М и утолщенный ТИНОР. При толщине покрытия 1 мм расход  $TiB_2$  составляет 2,3 кг/м<sup>2</sup> поверхности катода [5, 6], что свидетельствует о необходимости дальнейшего развития технологической базы его производства. Основными способами получения  $TiB_2$  для смачиваемых катодных покрытий являются самораспространяющийся высокотемпературный и печной синтезы [7]. Однако эти способы при относительной простоте технологического решения малопроизводительны и позволяют получать  $TiB_2$  в виде достаточно крупного порошка с частицами размерного диапазона 5–10 мкм. Есть основания предполагать, что введение  $TiB_2$  в состав суспензии в виде более тонкого порошка с размером частиц, меньшим или сопоставимым с размером частиц  $Al_2O_3$  (0,1–1 мкм), будет способствовать повышению физико-механических и защитных свойств покрытия.

**Цель настоящего исследования** — разработка научных и технологических основ плазменного синтеза диборида титана, его физико-химическая аттестация, определение основных техно-

логических показателей предлагаемого способа получения.

### Реактор для синтеза диборида титана и его характеристики

Для синтеза диборида титана использовался промышленный плазмотронический комплекс, основа которого — трехструйный прямоточный вертикальный плазменный реактор мощностью 150 кВт [8]. Данный комплекс, наряду с реактором, включает усовершенствованные авторами конструкции плазмотронов, камеры смешения, дозатора для малосыпучего высокодисперсного сырья, рукавного фильтра непрерывного действия, системы электро-, газо- и водоснабжения и вентиляции. Для генерации плазменного потока используются три электродуговых плазмотрона ЭДП-104А мощностью 50 кВт каждый, установленные в камере смешения под углом 30° к оси реактора. Порошкообразное и газообразное сырье подается с помощью водоохлаждаемой фурмы в зону соударения плазменных струй. При этом формируется реакционная смесь заданного состава, осуществляются синтез и формирование нанодисперсных продуктов. По уровню характеристик реактор может быть отнесен к современному электротермическому оборудованию. Основные характеристики реактора следующие:

Мощность.....	150, кВт
Тип реактора.....	Трехструйный, прямоточный, вертикальный,
Тип плазмотрона	
и его мощность.....	ЭДП-104А, 50, кВт
Плазмообразующий газ .....	Азот
Масса нагреваемого газа.....	32,5, кг/ч
Внутренний диаметр.....	0,054, м
Объем реактора .....	0,001, м <sup>3</sup>
Футеровка канала реактора .....	Диоксид циркония
Температура плазменного потока .....	5400 ( $L^* = 0$ ) – 2200 ( $L = 12$ ), К
Температура футеровки.....	1549 ( $L = 0$ ) – 770 ( $L = 12$ ), К
Удельная электрическая мощность.....	2142, МВт/м <sup>3</sup>
Ресурс работы	
анода .....	3125 час.
катода.....	112 час.
Загрязнение диборида титана продуктами эрозии:	
анода .....	Cu — 0.0000954 %
катода.....	W — 0.0000002 %

\* $L$  — отношение длины реактора к его внутреннему диаметру

## Выбор сырья для синтеза диборида титана

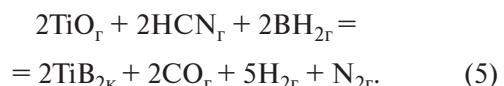
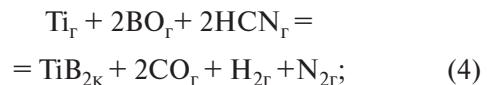
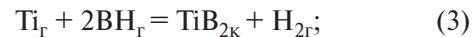
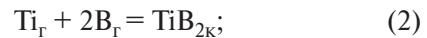
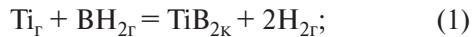
Для выбора титансодержащего сырья проведено моделирование взаимодействия плазменного и сырьевого потоков.

В связи с доступностью порошков титана, его диоксида, бора, углеводородного сырья (метан) и плазмообразующего газа (азот) объектами термодинамического моделирования были системы  $\text{B}-\text{H}-\text{N}$ ,  $\text{Ti}-\text{O}-\text{C}-\text{B}-\text{H}-\text{N}$ ,  $\text{Ti}-\text{B}-\text{H}-\text{N}$ . Необходимые для анализа составы газообразных и конденсированных продуктов рассчитывались «константным» методом, основанным на совместном решении уравнений, описывающих следующее: закон действующих масс; материальный баланс; суммарное число молей газовой смеси; существование конденсированной фазы; закон Дальтона. Расчеты выполнялись с использованием программы для компьютерного моделирования высокотемпературных сложных химических равновесий «PLASMA», имеющей встроенную базу данных продуктов взаимодействия для оксио-, борио-, карбио- и нитридообразующих систем. При расчетах рассматривалась область температур 1000–6000 К при общем давлении в системе 0,1 МПа.

Результаты расчета равновесных составов системы  $\text{B}-\text{H}-\text{N}$  представлены на рис. 1, *a*, *b*. Можно видеть, что в исследуемой системе имеет место «газификация» бора, усиливающаяся с разбавлением системы водородом. Газификация бора обусловлена высокой термодинамической стабильностью в области температур 2650–3250 К бороводорода состава  $\text{BH}_2$ . При соотношении  $\text{B}:\text{H} = 1:6$  степень превращения бора в  $\text{BH}_2$  достигает 1. Конденсация бора из газовой фазы термодинамически возможна при температуре ниже 2650 К. Таким образом, следует признать целесообразным разбавление системы водородом и прогнозировать влияние концентрации его в газовой фазе на полноту протекания процессов бориообразования в условиях плазменного потока. Квазиравновесные составы системы  $\text{B}-\text{H}-\text{N}$  (рис. 1, *в*, *г*) характеризуются значительным расширением температурной области устойчивости бороводорода  $\text{BH}_2$ , соответствующей 2150–3250 К.

В бориообразующих системах диборид титана может быть получен при всех рассматриваемых соотношениях компонентов в интервале температур 3500–2300 К. Термодинамически

возможно протекание следующих газофазных химических реакций бориообразования:



Степень превращения титана в диборид по реакции (1) может составлять 0,85. Стопроцентное превращение титана в диборид достигается при стехиометрическом соотношении компонентов в интервале температур 3200–2450 К (рис. 1, *д*, *е*). Если в системах имеет место избыток бора и углерода, в условиях равновесия в конденсированной фазе наряду с диборидом при температуре ниже 2800 К могут присутствовать нитрид бора и свободный углерод, концентрация которых зависит от соотношений  $\text{B}/\text{Ti}$  и  $\text{C}/\text{O}$ . При температуре 2300 К и ниже становятся термодинамически возможными процессы нитридообразования:



Образование нитрида титана возможно наряду с диборидом, но при более высоких температурах и недостатке бора в системе.

Прогнозирование условий эффективной переработки бор- и титансодержащего сырья проведено с использованием усовершенствованной математической модели взаимодействия плазменного и сырьевого потоков, которая учитывает влияние сырья и искусственной теплоизоляции канала на интенсивность теплообмена газа-теплоносителя со стенками, [7]. В основе модели — совместное решение уравнений движения частиц сырья, межкомпонентного теплообмена и теплообмена плазменного потока со стенками реактора.

Отличительные особенности реализуемого варианта модели: теплообмен плазменного потока со стенками канала реактора определяют по расчетной зависимости, полученной авторами для реальных условий образования борида титана в плазменном реакторе, не учитываемых известными уравнениями (7); промышленный

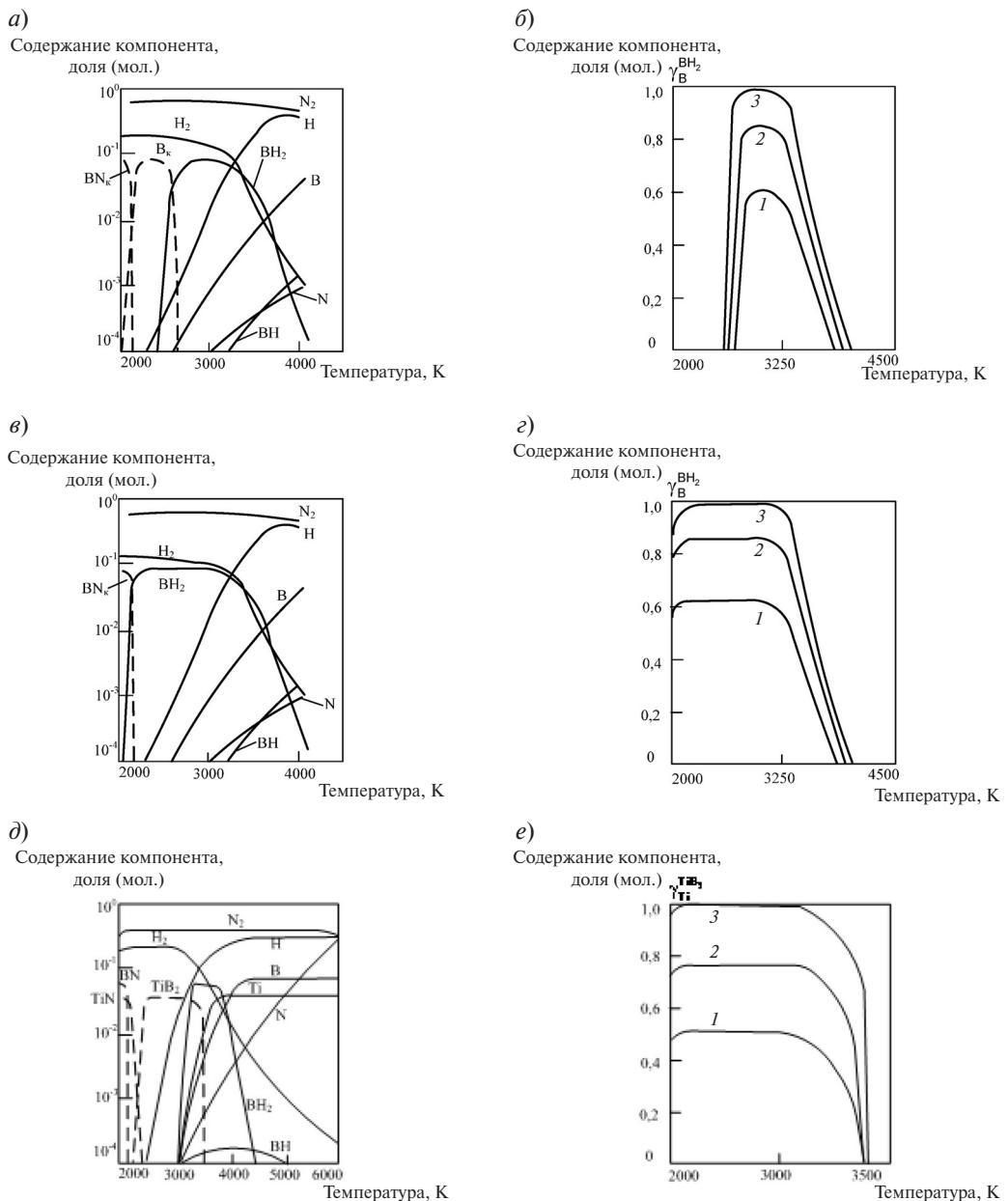


Рис. 1. Результаты термодинамических расчетов систем B—H—N, Ti—B—H—N:

- равновесные составы газовой и конденсированной фаз в зависимости от температуры при соотношении B:H:N = 1:6:20;
- равновесная зависимость степени превращения B в BH<sub>2</sub> от соотношения B:H (1:2 (1); 1:4 (2); 1:6 (3)) и температуры;
- квазиравновесные составы газовой и конденсированной фаз в зависимости от температуры при соотношении B:H:N = 1:6:20;
- квазиравновесная зависимость степени превращения B в BH<sub>2</sub> от соотношения B:H (1:2 (1); 1:4 (2); 1:6 (3)) и температуры;
- равновесные составы газовой и конденсированной фаз в зависимости от температуры при соотношении Ti:B:H:N = 1:2:12:20;
- зависимость степени превращения Ti в TiB<sub>2</sub> от соотношения Ti:B (1:1,5 (1); 1:1,75 (2); 1:2 (3)) и температуры



уровень мощности реактора — 150 кВт; трехструйный вариант камеры смешения с углом наклона плазменных струй 30°, обеспечивающий вынужденную турбулизацию плазменного потока; футеровка канала реактора толщиной 0,005 м из диоксида циркония, снижающая теплоотдачу от плазменного потока на 20%; введение в плазменный поток разнообразного по фазовому составу, дисперсности и теплофизическим свойствам высокодисперсного сырья (титан, оксид титана, бор); расходная массовая концентрация высокодисперсного сырья 0,12 кг/кг, близкая к максимальной и снижающая теплоотдачу от плазменного потока на 15 %. Уравнение имеет вид

$$St = (0,672 \pm 0,155) R_{f,x}^{-0,425 \pm 0,081} Pr_{f,x}^{-0,05}, \quad (7)$$

где  $St$ ,  $Re$ ,  $Pr$  — числа Стентона, Рейнольдса, Прандтля;  $x$  и  $f$  — индексы, соответствующие среднемассовой температуре потока и осевой координате.

Степень плазменного испарения бор- и титанодержащего дисперсного сырья определяется такими факторами, как энергетические и гидродинамические характеристики плазменного потока, крупность частиц и их теплофизические свойства, массовая расходная концентрация. Исследования проводились для следующего режима работы трехструйного реактора: массовый расход плазмообразующего газа (азота) —  $9 \cdot 10^{-3}$  кг/с, подведенная к камере смешения мощность — 75 кВт. Результаты исследования приведены на рис. 2.

При использовании в качестве сырья порошка металлического титана достаточно оптимальное сочетание теплофизических характеристик, в первую очередь — коэффициента теплопроводности, теплоты плавления и испарения, обуславливает возможность переработки с приемлемой (0,10–0,14 кг/кг) для технологического процесса расходной концентрацией частиц крупностью 5–10 мкм. При этом тепловой КПД потока для частиц крупностью 5 мкм достигает 0,20. Установленные закономерности не зависят от начальной скорости частиц при изменении ее в пределах 1–3 м/с. Рабочие параметры реактора обеспечивают полное испарение частиц диоксида титана крупностью от 3 до 5 мкм, причем взаимодействие частиц с потоком происходит в условиях сопоставимых

скоростей, составляющих для частиц размером 3 мкм 32–60 м/с, а для 5 мкм — 28–55 м/с за время соответственно  $15 \cdot 10^{-5}$ – $18 \cdot 10^{-5}$  и  $54 \cdot 10^{-5}$ – $85 \cdot 10^{-5}$  с. Следует отметить, что увеличение до определенного уровня массовой расходной концентрации диоксида не влияет на степень его испарения. Максимальная расходная концентрация, при которой возможна полная переработка  $TiO_2$ , составляет 0,12 кг/кг для частиц крупностью 5 мкм и 0,14 кг/кг для 3 мкм. При этом оптимальная загрузка реактора позволяет увеличить долю энергии, переданную частицам, т. е. тепловой КПД потока (например, для частиц 5 мкм с 0,075 до 0,20). Изменение скорости подачи порошка  $TiO_2$  с 1 до 3 м/с практически не приводит к изменению гидродинамической установки в потоке, а следовательно, не оказывает влияние на межкомпонентный теплообмен. Полное испарение частиц бора крупностью 2–3 мкм при массовой расходной концентрации 0,077 кг/кг достигается при экстремальных энергетических характеристиках плазменного потока, соответствующих начальной температуре 5400 К.

### Плазменный синтез и характеристики дигорида титана

По результатам моделирования взаимодействия сырьевого и плазменного потоков осуществлен выбор порошкообразного сырья и газов — восстановителя и теплоносителя. Их характеристики приведены в табл. 1.

Дисперсный состав порошкообразного сырья представлен на рис. 3. Порошок титана при обследовании массива из 985 частиц характеризуется размерным диапазоном 0,5–4 мкм, средним размером частиц 2,0 мкм (рис. 3 а) и следующим распределением их по фракциям: 0,5–2 мкм — 48,2 %, 4 мкм — 51,8 %. Порошок диоксида титана имеет средний размер частиц 0,5 мкм (рис. 3, б), а 770 исследованных частиц укладываются в размерный диапазон 0,2–1,0 мкм, причем доля частиц фракции 0,5 мкм составляет 48,7 %, а фракции 0,5–1,0 мкм — 51,3 %. Порошок бора является самым высокодисперсным из используемого сырья (рис. 3, в): для 760 частиц установлен размерный диапазон 50–250 нм, средний размер — 112 нм и распределение по фракциям 50–125 нм — 53,2%; 125–250 нм — 46,8 %

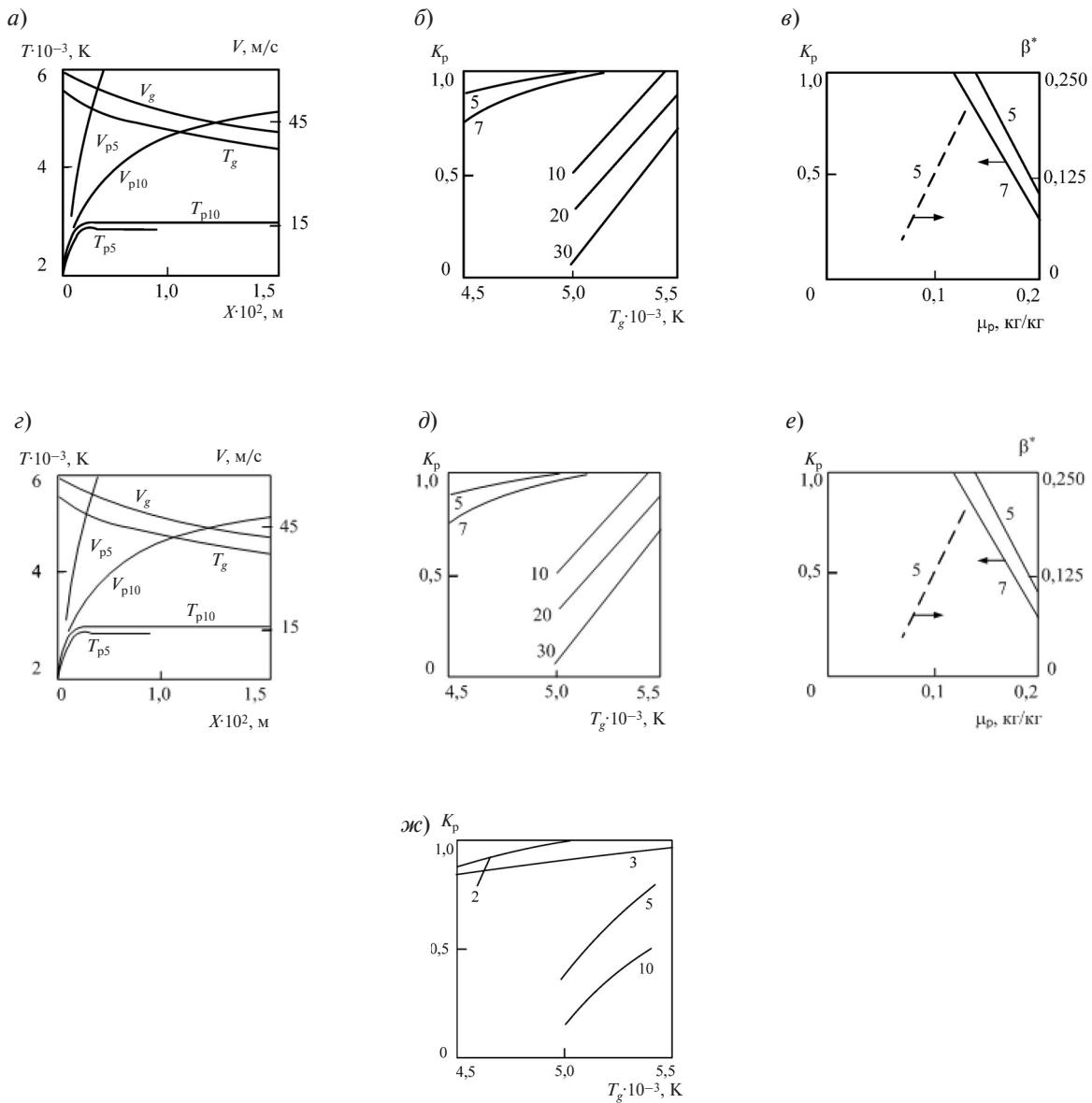


Рис. 2. Гидродинамические и энергетические режимы переработки порошкового сырья титана, диоксида титана и бора (размеры частиц — 2, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 30 мкм — указаны на рисунке):  
 а, г — изменение среднемассовых температур и скоростей плазменного потока ( $T_g$ ,  $V_g$ ) и частиц порошка ( $T_p$ ,  $V_p$ ) (а — титан; г — диоксид титана) по длине реактора;  
 б, д, ж — влияние начальной температуры  $T_g$  плазменного потока на степень  $K_p$  испарения частиц порошка (б — титан; д — диоксид титана; ж — бор);  
 в, е — влияние массовой расходной концентрации  $\mu_p$  на степень  $K_p$  испарения частиц порошка (в — титан; е — диоксид титана)



Таблица 1

## Основные характеристики порошкообразного сырья и технологических газов

Порошкообразное сырье и технологические газы	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
Бор аморфный Б99	99,0	–1
Метан (природный газ)	93,6 (этан — 3,0; пропан — 2,18; бутан — 1,18)	–
Технический водород (ГОСТ 3022–80, изм.)	99,8	–
Технический азот (ГОСТ 9293–74, изм.)	99,5 (содержание кислорода — не более 0,5)	–

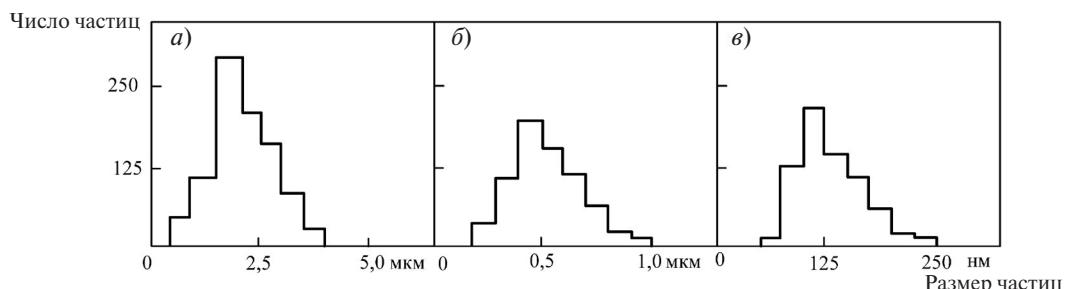


Рис. 3. Дисперсный состав порошкообразного сырья: порошки титана (а), его диоксида (б), бора (в)

Процесс синтеза диборида титана исследовался при мощности дугового разряда 80–150 кВт и расходе плазмообразующего газа  $(4,6–9,0) \times 10^{-3}$  кг/с, что соответствует начальной температуре плазменного потока 5400–5500 К. Массовая расходная концентрация составляла 0,10 кг порошка на кг плазмообразующего газа. Закалка продуктов синтеза осуществлялась азотом, подаваемым через закалочное кольцо, установленное на выходе из реактора. Температура закалки регулировалась изменением длины реактора. Расход за-каливающего газа составлял  $(1,0–2,0) \cdot 10^{-3}$  кг/с.

Твердые продукты синтеза исследовались методами рентгеновского, химического, масс-спектрометрического, электронно-микроскопического, термогравиметрического анализов и методом БЭТ. Для решения различных задач исследования анализировались образцы, отобранные из плазменного потока металлическим водоохлаждаемым зондом для предотвращения контакта с воздухом, а также образцы нанопорошков из системы улавливания, отобранные

после разгерметизации фильтров. Газообразные продукты и продукты термодесорбции исследовались хроматографическим методом.

Исследовались два технологических варианта с использованием шихт различных составов: 1 —  $(\text{Ti} + \text{B} + \text{H}_2)$ , 2 —  $(\text{TiO}_2 + \text{CH}_4 + \text{B})$ . При этом оптимизировалось содержание в продуктах синтеза диборида титана. Получены следующие уравнения, описывающие зависимость содержания диборида титана от основных технологических факторов:

$$[\text{TiB}_2 \text{ (1)}] = -412,41 + 0,09489 T_0 + 2,196[\text{B}] + 0,1597\{\text{H}_2\} - 0,00061 T_0[\text{B}]; \quad (8)$$

$$[\text{TiB}_2 \text{ (2)}] = 4,59 + 0,0156 T_0 + 0,00213 T_3 - 0,0688\{\text{CH}_4\} - 0,214[\text{B}] \cdot \{\text{H}_2\} \quad (9)$$

где  $T_0$  — начальная температура плазменного потока (5000–5400 К);  $T_3$  — температура закалки (2600–2800 К); [B] — содержание бора в шихте (100–120 % от стехиометрически необходимого);



$\{\text{CH}_4\}$  — количество восстановителя (метан) (100–120 % от стехиометрически необходимого);  $\{\text{H}_2\}$  — концентрация водорода в плазмообразующем газе (0–0,25 % об.).

Основные параметры синтеза и характеристики диборида титана представлены в табл. 2. Сопоставление двух вариантов синтеза позволяет считать более перспективным борирование титанового порошка. Нанопорошок диборида

титана представлен агрегатами шаровидной формы размером 120–200 нм, образованными сообществом округлых частиц достаточного широкого размерного диапазона — от 10 до 60 нм (рис. 4). Округлая форма наночастиц диборида титана указывает на возможность их образования по механизму «пар — расплав — кристалл» предположительно при взаимодействии «титанового» аэрозоля с бороводородами.

Таблица 2

## Основные параметры синтеза и характеристики диборида титана

Параметры синтеза и характеристики диборида титана	Технологические варианты синтеза	
	1 — $\text{Ti} + \text{B} + \text{H}_2$	2 — $\text{TiO}_2 + \text{B} + \text{CH}_4$
Состав газа — теплоносителя, % об.:		
азот		74,0
водород		25,0
природный газ (метан)		1,0
Крупность титансодержащего сырья, мкм	0,5–4,0	0,2–1,0
Крупность борсодержащего сырья, мкм		0,25–0,40
Количество бора в порошкообразной шихте, % от стехиометрического		100–120
Количество восстановителя (метан), % от стехиометрического	—	100–120
Начальная температура плазменного потока, К		5400
Температура закалки, К		2600–2800
Химический состав, %:		
$\text{TiB}_2$	92,0–93,0	90,05–91,30
свободный бор	1,30–1,15	1,91–1,04
титан свободный	1,91–1,45	—
углерод свободный	—	1,42–0,92
кислород	2,29–1,83	3,72–3,52
азот	2,05–1,92	2,26–2,11
летучие	0,45–0,65	0,64–1,11
Удельная поверхность, $\text{m}^2/\text{кг}$	46000–48000	35000–37000
Форма частиц		округлая
Оксисленность порошков $\times 10^7$ , кг $\text{O}_2/\text{м}^2$ удельной поверхности	3,82–4,98	9,51–10,63
Производительность по сырью, кг/ч		3,6
Производительность по $\text{TiB}_2$ , кг/ч	3,42	2,35
Интенсивность, кг/ч· $\text{м}^3$	1556	1070

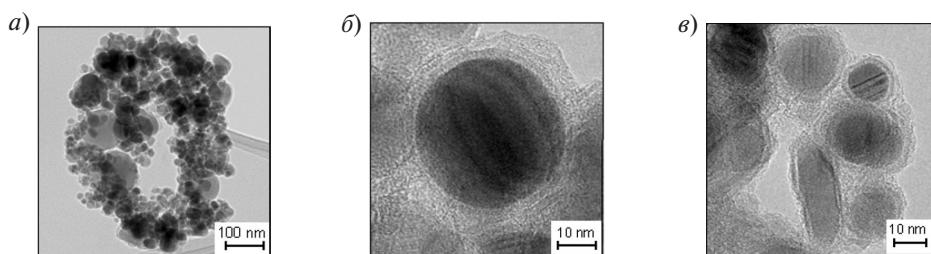


Рис. 4. Микрофотографии нанопорошка диборида титана (а — ансамбль частиц и агрегатов; б — морфологическая картина агрегата; в — отдельные частицы)



Предполагается, что по фазовому и химическому составам, уровню дисперсности, основным технологическим показателем предлагаемый способ получения диборида титана является конкурентоспособным и может занять лидирующее положение в производстве диборида для защитных смачиваемых алюминием катодных и гальванических композиционных покрытий [8, 9].

### Выводы

Установлена возможность получения диборида титана в наносостоянии из порошковых шихт «титан — бор» и «диоксид титана — бор» в условиях плазменных азотно-водородного

и азотно-углеводородного потоков. Выявлен и обсужден механизм процессов боридообразования. Сопоставление двух вариантов синтеза позволяет выбрать в качестве более перспективного борирование титанового порошка. По фазовому и химическому составу, дисперсности диборида титана предлагаемый способ его получения является конкурентоспособным и может занять лидирующее положение в производстве этого материала для защитных смачиваемых алюминием катодных и гальванических композиционных покрытий.

Данная работа является проектной частью государственного задания Минобрнауки России № 11.1531/2014/К.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Серебрякова Т.И., Неронов В.А., Пешев П.Д. Высокотемпературные бориды. М.: Металлургия, Челябинское отделение, 1991. 368 с.
2. Косолапова Т.Я. Свойства, получение и применение тугоплавких соединений: справочник. М.: Металлургия, 1986. 928 с.
3. Галевский Г.В., Кулагин Н.М., Минцис М.Я., Сиразутдинов Г.А. Металлургия алюминия. Технология. Электроснабжение. Автоматизация: Учебное пособие для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Флинта, Наука, 2008. 528 с.
4. Serlire M., Oye H.A. Cathodes in Aluminum Electrolysis. Dusseldorf: Aluminum Verlag, 2010. 698 p.
5. Чанг Х., де Нора В., Секхар Дж.А. Материалы, используемые в производстве алюминия методом Эру—Холла / Пер. с англ. П. Полякова. Красноярск: Изд-во КГУ, 1998.
6. Патент 2498880 РФ, МПК C04B35/58. Способ получения порошка диборида титана для материала смачиваемого катода алюминиевого электролизера / В.В. Иванов, С.Ю. Васильев, В.К. Лауриновичуте, А.А. Черноусов, И.А. Блохина; ФГАОУ ВПО Сибирский федеральный университет. 2012134603/02, заявл. 13.08.2012, опубл. 20.11.2013. 8 с
7. Ширяева Л.С., Ноздрин И.В., Галевский Г.В., Руднева В.В. Исследование плазменного синтеза нанокарбida хрома // Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии / СибГИУ. Москва — Новокузнецк. 2012. № 29. С. 94—101.
8. Ноздрин И.В., Галевский Г.В., Руднева В.В. Особенности свойств композиционного материала никель — нанодисперсный диборид хрома // Заготовительные производства в машиностроении. 2011. № 9. С. 46—48.
9. Руднева В.В., Галевский Г.В. Термоокислительная устойчивость нанопорошков тугоплавких карбидов и боридов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2007. №4. С. 20—24.

### REFERENCES

1. Serebryakova T.I., Neronov V.A., Peshev P.D. Vysokotemperaturnyye boridy [Hightemperature borides]. M.: Metallurgiya, Chelyabinskoye otdeleniye, 1991. 368 s. (rus.)
2. Kosolapova T.Ya. Svoystva, polucheniye i primeniye tugoplavkih soyedineniy: spravochnik [Properties, production and application of refractory compounds: a handbook]. M. : Metallurgiya, 1986. 928 s. (rus.)
3. Galevskiy G.V., Kulagin N.M., Mintsis M.Ya., Sirazutdinov G.A. Metallurgiya alyuminiya. Tekhnologiya. Elektrosnabzheniye. Avtomatizatsiya: uchebnoye posobiye dlya vuzov [Metallurgy aluminum. The Technology. Power supply. Automation: a manual for universities].3-ye izd., pererab. i dop. M.: Flinta, Nauka, 2008. 528 s. (rus.)
4. Serlire M., Oye H.A. Cathodes in Aluminum Electrolysis. Dusseldorf: Aluminum Verlag, 2010. 698 p.
5. Chang Kh., de Nora V., Sekkhar Dzh. A. Materialy, ispolzuyemye v proizvodstve alyuminiiya metodom Eru Kholla. [The materials used in the production of aluminum by Eru - Hall] / Per. s angl. P. Polyakova. Krasnoyarsk, Izd-vo KGV, 1998.
6. Patent 2498880 RF, MPK C04B35/58. Sposob polucheniya poroshka diborida titana dlya materiala smachivayemogo katoda alyuminiyevogo elektrolizera [A method for producing a powder of titanium dibonde for material the alluminium-wettable cathade electrolyzer] / V.V. Ivanov, S.Yu. Vasilyev, V.K. Laurinavichyute, A.A. Chernousov,

I.A. Blokhina; «Sibirskiy federalnyy universitet. 2012134603/02, zayavl. 13.08.2012, opubl. 20.11.2013. 8 s. (rus.)

7. **Shiryayeva L.S., Nozdrin I.V., Galevskiy G.V., Rudneva V.V.** Issledovaniye plazmennogo sinteza nanokarbida khroma [Investigation of plasma synthesis nanokarbide chromium]. *Vestnik gorno-metallurgicheskoy sektsii RAEN*. Otdeleniye metallurgii / SibGIU. Moskva — Novokuznetsk. 2012. № 29. S. 94–101. (rus.)

8. **Nozdrin I. V., Galevskiy G.V., Rudneva V.V.** Osnovnye svoystva kompozitsionnogo materiala nikel-nano-

dispersnnyy diborid khroma [Features properties of the composite material of nickel-nanodisperse diboride chromium]. *Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyenii*. 2011. № 9. S. 46–48. (rus.)

9. **Rudneva V.V., Galevskiy G.V.** Termookislitel'naya ustoychivost' nanoporoshkov tugoplavkikh karbidov i boridov [Thermal and oxidative stability of nanopowders of refractory carbides and borides]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya*. 2007. № 4. S. 20–24. (rus.)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ГАЛЕВСКИЙ Геннадий Владиславович** — доктор технических наук заведующий кафедрой Сибирского государственного индустриального университета. 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42.. E-mail: kafcmet@sibsiu.ru

**РУДНЕВА Виктория Владимировна** — доктор технических наук профессор Сибирского государственного индустриального университета. 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42.. E-mail: kafcmet@mail.ru

**ЕФИМОВА Ксения Александровна** — аспирант Сибирского государственного индустриального университета. 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42.. E-mail: efimovaksenia@mail.ru

## AUTHORS

**GALEVSKY Gennadii V.** — Siberian State Industrial University. 42, Kirov St, Novokuznetsk, Russia, 654007. E-mail: kafcmet@sibsiu.ru

**RUDNEVA Viktoriiia V.** — Siberian State Industrial University. 42, Kirov St, Novokuznetsk, Russia, 654007. E-mail: kafcmet@mail.ru

**EFIMOVA Kseniia A.** — Siberian State Industrial University. 42, Kirov St, Novokuznetsk, Russia, 654007. E-mail: efimovaksenia@mail.ru



DOI 10.5862/JEST.219.16

УДК 621.88.084.4

А.Я. Башкарёв, А.В. Кущенко

## ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ И СВОЙСТВА ТОНКОСЛОЙНЫХ ПОЛИАМИДНЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ СОЗДАНИИ СОЕДИНЕНИЙ С НАТЯГОМ

Al.B. Bashkarev, A.K. Kushchenko

## DEFORMATION CHARACTERISTICS AND PROPERTIES OF THIN-LAYER POLYAMIDE COATINGS IN COMPRESSION CONNECTIONS

Соединения с натягом в узлах машин подвергаются разрушению в результате фреттинг-коррозии. Одним из способов борьбы с этим может стать применение полимерных покрытий. В работе исследовались деформативные характеристики тонкослойных полиамидных покрытий на стальной подложке. Установлены величины статического и мгновенного модуля упругости, коэффициент Пуассона, величина функции ползучести и ее зависимость от гидростатического давления.

СОЕДИНЕНИЯ С НАТЯГОМ; ПОЛИАМИДНЫЕ ПОКРЫТИЯ; МОДУЛЬ УПРУГОСТИ; КОЭФФИЦИЕНТ ПУАССОНА; ФУНКЦИЯ ПОЛЗУЧЕСТИ.

Compression connections in machine units may be destroyed as a result of fretting corrosion. One way to combat this can be the use of polymeric polyamide coatings. The technology applying such coatings and their working conditions in compounds with interference have many features. We investigated values of static and instantaneous moduli of elasticity, Poisson's ratio, the value of creep function and its dependence on hydrostatic pressure for polyamide coatings on a steel substrate. Instantaneous modulus of elasticity for polyamide coating PA-6 is almost three orders of magnitude greater than its static value, and Poisson's ratio is 0.5. Creep function of polyamide coatings decreases with increasing hydrostatic pressure.

COMPRESSION CONNECTIONS; POLYAMIDE COATINGS; ELASTICITY MODULUS; POISSON'S RATIO; CREEP FUNCTION.

Расчет напряженного состояния конструкций и деталей машин, изготовленных из полимерных материалов, проводится по методикам, базирующимся на основных положениях теории упругости. При этом фактор времени и скорость изменения нагрузки практически не рассматриваются. Применительно к металлам такие методики дают весьма достоверные результаты.

В широкой инженерной практике они же используются и для расчетов изделий из полимерных материалов, при этом зависимость их деформации от времени обычно учитывается «условными» модулями деформации, значения которых зависят от времени действия нагрузки. Однако такой подход во многих случаях оказывается нерезультативным. Многие конструкции

онные полимерные материалы, относящиеся к эластомерам, например полиамиды, имеют коэффициент Пуассона, близкий к 0,5 [1]. С точки зрения классической теории упругости эти материалы являются практически несжимаемыми. На самом деле они достаточно легко деформируются за счет пластических деформаций, происходящих без изменения объема. Если деформация происходит без перемещения материала, т. е. пластических сдвигов, то в случае полимеров она может происходить только благодаря изменению межмолекулярных расстояний, что требует значительных усилий, соизмеримых с усилиями деформации металлических надмолекулярных структур. При этом такую деформацию можно считать почти идеально упругой.

Таким образом, эластомеры деформируются одновременно как за счет перераспределения своего объема, так и вследствие изменения межмолекулярных и межатомных расстояний и расстояний между надмолекулярными образованиями. Как правило, при использовании стандартных методик и образцов величина последних оказывается на несколько порядков меньше. Поэтому при расчете модуля деформации учитываются только те деформации, которые происходят во времени при перераспределении материала.

Для условий, при которых полимеры не могут перераспределять свой объем, такие характеристики физико-механических свойств оказываются для расчетов бесполезными. В частности, это относится к тонкослойным полимерным покрытиям. Существующие адгезионные связи между полимерами и металлическими подложками исключают возможность протекания так называемых эластичных деформаций. Поэтому для расчетов их напряженного состояния деформационные характеристики необходимо определять по специальным методикам, исключающим перераспределение полимера. Особенно это важно для композитов, когда в полимерную матрицу вводятся различные наполнители.

В данной статье предлагается такая методика. С ее помощью получен ряд физико-механических характеристик некоторых марок полиамидов, применение которых может быть перспективно в виде тонкослойных покрытий.

Среди полиамидных материалов наименьший модуль упругости имеют смолы ПА-54,

ПА-66/6. По некоторым данным [2] его нижний предел может доходить до 400 МПа. Однако деформативные свойства полиамидов существенно зависят от технологии их переработки, поскольку ее режимы определяют их надмолекулярные структуры, степень термодеструкции и т. д.

Процесс нанесения тонкослойных покрытий из полиамидов с точки зрения термо-временного воздействия на материал имеет свою специфику [3]. Как правило, здесь используются более высокие температуры, чем, например, при изготовлении деталей методами литья, но продолжительность теплового воздействия оказывается значительно меньшей. Большое влияние оказывают также кислород воздуха и структурообразующее воздействие металлической подложки.

Таким образом, проводить измерение и исследование деформативных характеристик полиамидов применительно к тонкослойным покрытиям целесообразно только на образцах, сформированных на металлической основе при идентичных технологических режимах.

В связи с этим была использована методика, согласно которой значения коэффициентов Пуассона и квазистатического модуля упругости устанавливались по результатам испытания на металлополимерных образцах, изображенных на рис. 1. Полиамидное покрытие наносилось на их торцы, которыми они после его оплавления соединялись. После остывания и удаления наплывов отверженного полимера образцы нагружались по схеме, также изображенной на рис. 1.

Наличие адгезионных связей и малая величина бокового зазора  $S_0$  исключали возможность перемещения «запертого» материала в поперечном направлении, поэтому деформация слоя при нагружении образцов происходила за счет изменения объема материала. Устранилось влияние торцевого трения, которое имеет место при испытании на сжатие монолитных образцов [1, 2]. Деформация полимерного слоя под действующей нагрузкой измерялась с помощью инструментального микроскопа. Абсолютная погрешность измерения деформации составляла 0,6 мкм.

Методика экспериментальных исследований базировалась на следующих теоретических обоснованиях.



Перемещения упругого слоя, прочно соединенного с жесткими штампами под действием сжимающей силы  $P_1$ , могут быть найдены решением осесимметричной задачи методами теории упругости [4, 5]. Для этого используется бигармоническая функция перемещений  $\psi = \psi(r, z)$ , удовлетворяющая граничным условиям задачи и условию

$$\nabla^2 \nabla^2 \psi = 0. \quad (1)$$

При этом подходе искомые величины напряжений и перемещений, выраженные через бигармоническую функцию  $\psi$ , определяются следующими соотношениями:

$$2Gu = \frac{\partial^2 \psi}{\partial r \partial z}; \quad (2)$$

$$Gw = 2(1-\mu) \nabla^2 \psi - \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2}; \quad (3)$$

$$\sigma_z = \frac{\partial}{\partial z} \left[ (2-\mu) \nabla^2 \psi - \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right], \quad (4)$$

где  $u$  — радиальные перемещения;  $w$  — осевые перемещения;  $\sigma_z$  — нормальные напряжения сжатия;  $\nabla^2$  — оператор Лапласа;  $G$  — модуль сдвига материала покрытия;  $\mu$  — коэффициент Пуассона.

Условие равновесия полимерного слоя под действием сжимающей нагрузки  $P_1$  имеет вид

$$P_1 = \int_0^R \int_0^{2\pi} r \sigma_z dr d\theta, \quad (5)$$

где  $r$  — радиальная координата,  $\theta$  — угловая координата.

Если функцию перемещений  $\psi$  принять в виде суммы полиномов Лежандра третьей степени [4]

$$\psi = a(2z^3 - 3r^2 z) + b(r^2 z + z^3), \quad (6)$$

и выполнить необходимые преобразования с учетом того, что при  $r = R$ ,  $u = 0$ , то выражение для расчета величины модуля упругости полиамида может быть записано так:

$$E = \frac{P_1}{\pi R^2} \frac{(1-2\mu)(1+\mu)h}{(1-\mu)S}. \quad (7)$$

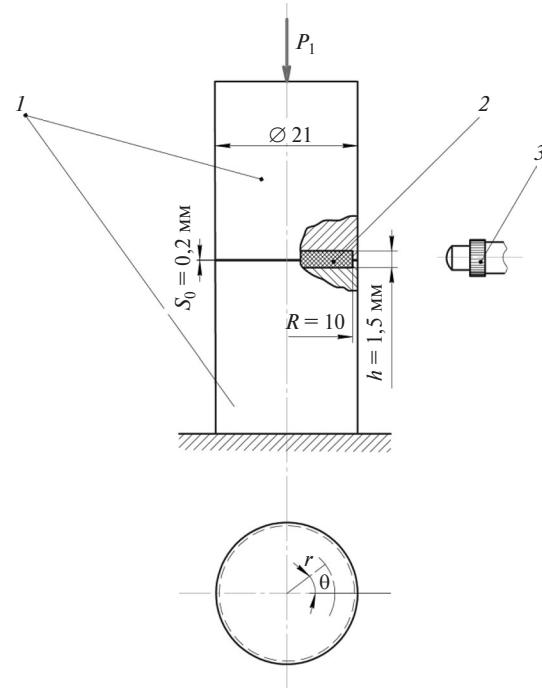


Рис. 1. Испытание полимерного слоя на сжатие:  
1 — стальные штампы; 2 — полимерный слой; 3 — микроскоп

Таким образом, величина модуля упругости  $E$  выражается через толщину слоя полиамида  $h$ , размер образцов  $R$ , продольное сближение образцов  $S$  и коэффициент Пуассона  $\mu$ .

Для определения значений коэффициента Пуассона были проведены испытания металлокомпозитных образцов при простом сдвиге (рис. 2).

В этом случае касательные напряжения, возникающие в полимерном слое под действием сдвигающей нагрузки  $P_2$ , рассчитываются по формуле

$$\tau = \frac{P_2}{F_{cd}} = G \gamma = \frac{E}{2(1+\mu)} \frac{l}{H}, \quad (8)$$

где  $l$  — смещение одной поверхности полимерного слоя толщиной  $H$  относительно другой;  $F_{cd}$  — площадь сдвига полимерного покрытия.

Отсюда

$$E = \frac{2P_2 H (1+\mu)}{l F_{cd}}. \quad (9)$$

Покрытия в образцах для испытаний на сжатие и сдвиг были получены с помощью одной

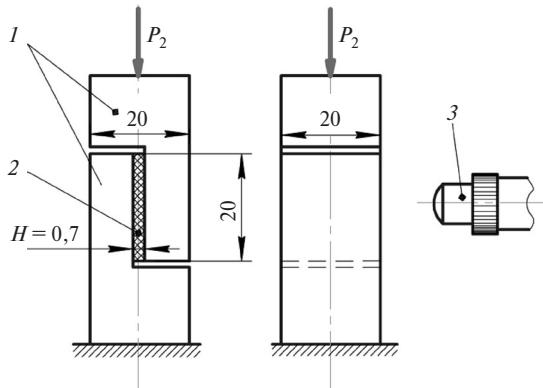


Рис. 2. Испытание полимерного слоя на сдвиг:  
1 — стальные пластины; 2 — слой полимера;  
3 — измерительный микроскоп

и той же полимерной композиции при идентичной технологии нанесения. Поэтому здесь спрашивливо приравнять правые и левые части выражений (5) и (6), то есть

$$\frac{P_1 F_{\text{сд}} l h}{P_2 \pi R^2 S H} (1 - 2\mu) = 2(1 - \mu). \quad (10)$$

Тогда выражение для коэффициента Пуассона может быть записано в виде

$$\mu = \frac{a - 2}{2(a - 1)}, \quad (11)$$

$$\text{где } a = \frac{P_1 F_{\text{сд}} \gamma}{\pi R^2 P_2 \epsilon}; \quad \epsilon = \frac{S}{h}.$$

После подстановки выражения (11) для коэффициента Пуассона в (9) можно определить величину модуля упругости материала покрытия.

В соответствии с разработанной методикой были определены значения модуля упругости и коэффициента Пуассона для покрытий на ос-

нове полиамидных смол ПА-66/6, ПА-68 и поликапроамида применительно к условиям их работы в тонкослойных покрытиях соединений с натягом.

При измерении модуля упругости полимерных материалов особое значение имеет время действия нагрузки. В проведенных опытах деформация измерялась через 5 минут после приложения или очередного изменения нагрузки. Таким образом, был установлен квазистатический модуль деформации, который удобен для сравнительной оценки свойств полимеров.

Полученные значения характеристик представлены в таблице.

При работе в соединениях с натягом полимерное покрытие находится в сложном напряженном состоянии, которое определяется контактным давлением со стороны металлических деталей и касательными напряжениями от сдвигающей осевой нагрузки и приложенного внешнего момента. Это создает особенности, требующие проверки деформативных характеристик покрытия в этих условиях.

Было проведено исследование деформативных свойств полиамидных покрытий на специальных кольцевых образцах, изображенных на рис. 3. Образец состоит из полого рабочего цилиндра 1, находящегося между двумя ограничивающими цилиндрами — наружным 2 и внутренним 3. Цилиндры с помощью полиамидного слоя 4 соединяются с пластиной 5.

Подготовка образцов к испытаниям проводилась следующим способом. На торец рабочего цилиндра 1 погружением его в нагретом состоянии в мелкодисперсный порошок наносился полимерный слой. После отверждения он протачивался под наружный и внутренний диаметры цилиндра 1, на который после этого по-

#### Значения модуля упругости и коэффициента Пуассона полиамидных покрытий

Материал покрытия	Модуль упругости $E$ , МПа		Коэффициент Пуассона $\mu$	
	Среднее значение	Доверительный интервал $\alpha = 0,95$	Среднее значение	Доверительный интервал $\alpha = 0,95$
Полиамид ПА-66/6	530	49	0,490	0,003
Полиамид ПА-68	1245	84	0,493	0,004
Поликапроамид	1425	68	0,493	0,003

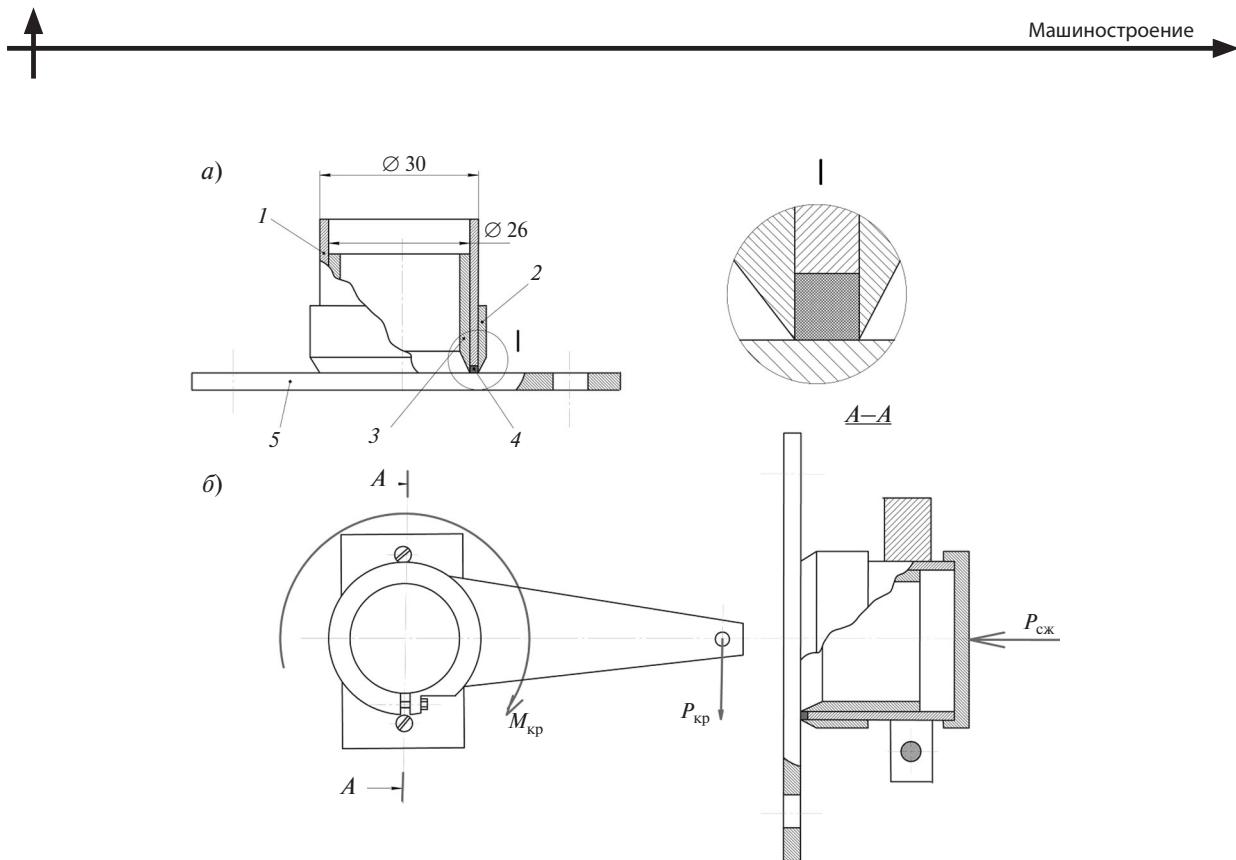


Рис. 3. Исследование деформации полимерного покрытия при нагружении кольцевого слоя крутящим моментом и осевой силой (а — общий вид образца; б — нагружение образца):

1 — рабочий цилиндр; 2 — наружный ограничивающий цилиндр; 3 — внутренний ограничивающий цилиндр; 4 — полимерный слой; 5 — стальная пластина

скользящей посадке надевались цилиндры 2 и 3. Предварительно обезжиренная пластина 5 нагревалась до температуры 300 °С. Цилиндры устанавливались на нее полимерным слоем, который, оплавляясь за счет ее тепла, после охлаждения соединялся с нею силами адгезии. Специальным калибрующим упором при установке цилиндров обеспечивалась постоянная толщина слоя — 1,0 мм.

Нагружение подготовленного к испытаниям образца осуществлялось по схеме, изображенной на рис. 3, б. Нагружающее устройство создавало между пластиной 5 и рабочим цилиндром 1 постоянный крутящий момент  $M_{kp}$ , который передавался через полимерный слой. Одновременно к образцу прикладывалась сжимающая нагрузка  $P_{cж}$ , создающая в адгезионном соединении нормальные напряжения. Таким образом, полимерное покрытие находилось под воздействием сжимающего давления и сдвигающей нагрузки. Устройство позволяло вести запись во времени угловой деформации поли-

мерного слоя. Наружный 2 и внутренний 3 цилиндры исключали возможность перемещения в радиальном направлении.

Использование кольцевой формы образцов и описанной методики их нагружения позволило довольно просто создавать достаточно большие напряжения сравнительно малыми статическими нагрузками. В результате удавалось в течение нескольких часов стабильно сохранять задаваемое напряженное состояние полимерного слоя и записывать его деформации. Кольцевая форма нагружаемого полимерного слоя практически полностью исключала влияние концентраторов напряжений [6], что по сравнению с другими формами приближает величину наибольших напряжений к их расчетным значениям, а при толщине стенки кольца менее 0,1 диаметра можно с достаточной точностью допустить прямолинейный закон распределения их по радиусу. Использование данной методики основывается на том, что значение коэффициента Пуассона полимерных материалов установлено в ранее проведенных опытах.



Теоретически перемещения упругого слоя, прочно соединенного с жесткими штампами под действием равнодействующей силы  $Q$ , могут быть найдены, как и в предыдущем случае, с учетом граничных условий:

$$\text{при } r = R_1 \text{ и } r = R_2, u = 0.$$

После проведения преобразований с учетом того, что при заданной схеме нагружения нормальные напряжения сжатия не зависят от координаты  $r$ , получаем

$$\sigma_r = \frac{Q\mu}{\pi(R_2^2 - R_1^2)(1-\mu)}; \quad (12)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_r; \quad (13)$$

$$\sigma_z = \frac{Q}{\pi(R_2^2 - R_1^2)}. \quad (14)$$

Максимальные касательные напряжения  $\tau_{z\theta}$ , возникающие при действии крутящего момента, равны

$$\tau_{z\theta}(R_2) = \frac{2M_{kp}R_2}{\pi(R_2^4 - R_1^4)}.$$

При одновременном действии сжимающей силы и крутящего момента девиатор напряжений имеет вид

$$S_{ij} = \begin{vmatrix} \frac{\sigma_r(2\mu-1)}{3\mu} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sigma_r(2\mu-1)}{3\mu} & 0 \\ 0 & \tau_{r\theta} & \frac{2\sigma_r(1-2\mu)}{3\mu} \end{vmatrix}. \quad (15)$$

Девиатор перемещений с учетом того, что полимер работает без возможности бокового расширения, равен

$$e_{ij} = \begin{vmatrix} \frac{2}{3}\epsilon_r & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{3}\epsilon_r & \epsilon_{0z} \\ 0 & \epsilon_{z\theta} & -\frac{1}{3}\epsilon_r \end{vmatrix}. \quad (16)$$

Следовательно, при условии линейной вязкоупругости для заданной схемы нагружения справедлива зависимость

$$\epsilon_{z\theta} = \frac{\tau_{z\theta}}{2G} \left[ 1 + \int_0^{t_p} K_c(t) dt \right], \quad (17)$$

где  $t_p$  — заданный момент времени;  $K_c(t)$  — функция скорости ползучести.

Шаровой тензор напряженного состояния полимерного слоя:

$$\tilde{\sigma} = \frac{1}{3}\sigma_r \frac{1+\mu}{1-\mu}. \quad (18)$$

Поскольку  $\mu \approx 0,5$ , то с учетом (12):

$$\tilde{\sigma} = \sigma_r = \frac{Q}{\pi(R_2^2 - R_1^2)}. \quad (19)$$

Функцию скорости ползучести  $K_c(t)$  согласно рекомендациям, приведенным в [4], целесообразно искать в виде

$$K_c(t) = \frac{e^{-\beta t}}{t} \sum_1^{\infty} \frac{[A\Gamma(\alpha)]^n}{\Gamma(\alpha n)} t^{\alpha n}, \quad (20)$$

где  $A$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  — постоянные, зависящие от физико-механических свойств материала;  $\Gamma(\alpha)$  — гамма-функция Эйлера [11].

При выполнении экспериментальных исследований использовалась полиамидная смола ПА-66/6, которая, как было отмечено выше, имеет наименее низкий модуль упругости. Предварительно была установлена ее адгезионная прочность, а затем диапазон касательных напряжений  $\tau_{z\theta}$ , при котором имеет место линейная область деформирования полимерного слоя, т. е. когда кривые податливости  $\epsilon_{z\theta}/\tau_{z\theta}$  совпадают. Опыты показали, что при  $\tau_{z\theta} < 0,3[\tau]$  это условие всегда выполняется.

Результаты проведенных исследований при различных значениях сжимающей нагрузки показали, что мгновенный модуль упругости полиамидного слоя в диапазоне до 100 МПа практически не зависит от величины гидростатического давления.

Для слоя из полиамидной смолы ПА-66/6 мгновенный модуль сдвига оказался равен  $G = 6,0 \cdot 10^4$  МПа, а так как  $E = 2G(1+\mu)$ , то при  $\mu = 0,49$  имеем  $E = 1,8 \cdot 10^5$  МПа.

В процессе дальнейших экспериментальных исследований проводилось измерение угловой деформации полимерного слоя во времени при действии крутящего момента.



Одна из полученных таким образом кривых приведена на рис. 4. Для определения мгновенного модуля сдвига  $G_0$ , постоянных  $A$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  эти же кривые строились в логарифмических координатах, что давало возможность определить их значения, сравнивая экспериментальные и теоретические кривые по методике, предложенной Б.А. Колтуновым [8].

По результатам экспериментов можно сделать вывод, что ползучесть покрытия с увеличением давления заметно уменьшается. Таким образом, функция ползучести  $K_c(t)$  для него зависит от величины гидростатического давления.

Параметры функции  $K_c(t)$  при отсутствии давления:

$$A = 0,0117; \quad \alpha = 0,075; \quad \beta = 0,05.$$

Используя эти значения, можно рассчитать деформацию материала при любой продолжительности действия нагрузки.

Сравнение мгновенного модуля упругости с определенным ранее квазистатическим модулем упругости смолы ПА-66/6 показывает, что значение первого из них почти на три порядка больше. Таким образом, полиамидное покрытие при динамических нагрузках будет деформироваться как, например, слой бронзы того же размера. Причем это относится к самому податливому полиамиду. Деформация смолы ПА-68 и поликапроамида, как показали измерения, в 2,5–3 раза меньше. Следовательно, покрытие из этих материалов по своим мгновенным деформационным качествам приближается к стальным.

Особого внимания заслуживает характер изменения деформации покрытий при постоянных или длительных нагрузках. Как отмечалось выше, этот процесс существенно зависит от величины гидростатического давления, которое в наиболее нагруженной контактной зоне сопрягаемых деталей достигает у тонкослойного полиамидного

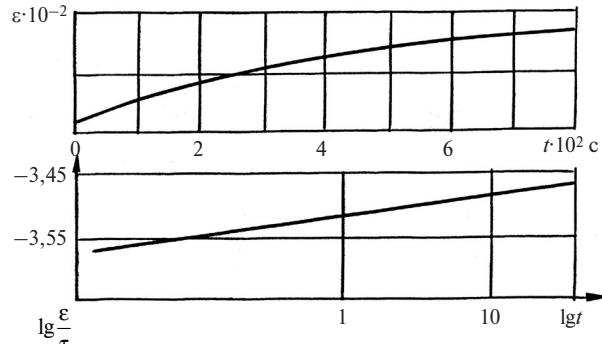


Рис. 4. Деформация полиамидного покрытия во времени

покрытия величины, близкой к значениям максимальных контактных давлений [9, 10]. Рассматриваемое свойство полиамидных материалов подтверждает их перспективность для работы в тяжелонагруженных узлах, например в соединениях деталей с натягом.

## Выводы

Разработанная методика измерений позволила установить значения величины модуля упругости и коэффициента Пуассона для полимерных материалов, наиболее перспективных для использования в виде тонкослойных покрытий при ремонте соединений с натягом в узлах строительных машин.

Экспериментально подтверждено, что значения коэффициента Пуассона для полиамидного слоя, работающего в условиях соединения с натягом, близки к 0,5.

Мгновенный модуль упругости полиамидов почти на три порядка больше их квазистатических значений.

Функция ползучести для полиамидов уменьшается с ростом гидростатического давления.

Характер изменения деформации полиамидных покрытий при постоянных или длительных нагрузках подтверждает их перспективность для работы в тяжелонагруженных узлах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брехова В.Д. Исследование коэффициента Пуассона при сжатии некоторых кристаллических полимеров под нагрузкой // Механика полимеров. 1965. №4. С. 43–46.
2. Шамов И.В. Исследование коэффициента Пуассона полиэтилена ПНД при малых деформациях и длительном пребывании под нагрузкой // Механика полимеров. 1965. №3, С. 52–56.
3. Нелсон У.Е. Технология пластмасс на основе полиамидов. М.:Химия, 1979. 255 с.
4. Тимошенко С.Я., Гудьяр Дж. Теория упругости. М.: Наука, 1975. 576 с.



5. Казакевич Г.С., Рудской А.И. Механика сплошных сред. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. 263 с.
6. Фрейдин А.С. Прочность и долговечность kleевых соединений. М.: Химия, 1971. 272 с.
7. Билик М.М., Слюдикова Н.Н. Антифрикционные свойства некоторых полимерных материалов в монолите и тонкослойном покрытии // Сб.: Полимеры в промышленности. Гомель, 1968. С. 26–32.
8. Колтунов М.А. Ползучесть и релаксация. М.: Высшая школа, 1976. 277 с.
9. Панасюк В.В., Теплый М.И. Определение контактных напряжений при внутреннем соприкосновении цилиндрических тел // Прикладная механика. 1971. Т. VII. Вып. 4. С. 3–8.
10. Милов А.Б. О вычислении контактной жесткости цилиндрических соединений // Проблемы прочности. 1973. №1. С. 70–72.

## REFERENCES

1. Brekhova V.D. Issledovaniye koeffitsiyenta Puassona pri szhatii nekotorykh kristallicheskikh polimerov pod nagruzkoj. [Studies of the Poisson compressive some crystalline polymers under load]. *Mekhanika polimerov*. 1965. №4. S. 43–46. (rus.)
2. Shamov I.V. Issledovaniye koeffitsiyenta Puassona polietilena PND pri malykh deformatsiyakh i dlitelnom prebyvaniu pod nagruzkoj. [Studies of the Poisson polyethylene HDPE with small deformation and long stay under the load]. *Mekhanika polimerov*. 1965. №3. S. 52–56. (rus.)
3. Nelson U.Ye. Tekhnologiya plastmass na osnove poliamidov. [Technology based plastics polyamides]. М.: Khimiya, 1979. 255 s. (rus.)
4. Timoshenko S.Ya., Gudyar Dzh. Teoriya uprugosti. [The theory of elasticity]. М.: Nauka, 1975. 576 s. (rus.)
5. Kazakevich G.S., Rudskoy A.I. Mekhanika sploshnykh sred. [Continuum Mechanics], SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2003. 263 s. (rus.)
6. Freydin A.S. Prochnost i dolgovechnost kleyevykh soyedineniy. [The strength and durability of adhesive joints]. М.: Khimiya, 1971. 272 s. (rus.)
7. Bilik M.M., Slyudikova N.N. Antifriktsionnyye svoystva nekotorykh polimernykh materialov v monolite i tonkosloynom pokrytii. [Anti-friction properties of some polymer materials in the monolith, and thin-film coating]. Sb.: *Polimery v promyshlennosti*. Gomel, 1968, S. 26–32. (rus.)
8. Koltunov M.A. Polzuchest i relaksatsiya. [Creep and relaxation]. М.: Vysshaya shkola, 1976. 277 s. (rus.)
9. Panasyuk V.V., Teplyy M.I. Opredeleniye kontaktnykh napryazheniy pri vnutrenнем soprikozenii tsilindricheskikh tel. [Determination of contact stress at the inner contact cylindrical bodies]. *Prikladnaya mekhanika*. 1971. Т. VII. Вып. 4. С. 3–8. (rus.)
10. Milov A.B. O vychislenii kontaktnoy zhestkosti tsilindricheskikh soyedineniy. [The computation of the contact stiffness of cylindrical connections]. *Problemy prochnosti*. 1973. №1. S. 70–72. (rus.)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**БАШКАРЁВ Альберт Яковлевич** — доктор технических наук профессор, советник при ректорате Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: bashkarev@spbstu.ru

**КУШЧЕНКО Александра Владимировна** — аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: aleksandra.kushchenko@rambler.ru

## AUTHORS

**BASHKAREV Albert Ya.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: bashkarev@spbstu.ru

**KUSHCHENKO Aleksandra K.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: aleksandra.kushchenko@rambler.ru



DOI 10.5862/JEST.219.17

УДК 621.73.011

*К.С. Арсентьев, С.Н. Кункин,  
А.В. Мамутов, В.С. Мамутов*

## ДИАГРАММЫ ПРЕДЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ТОНКОЛИСТОВОГО МЕТАЛЛА ПРИ ФОРМОВКЕ ПОДВИЖНЫМИ СРЕДАМИ

*X.S. Arsentyeva, S.N. Kunkin,  
A.V. Mamutov, V.S. Mamutov*

### FORMING LIMIT DIAGRAM FOR THIN SHEET METAL AT METAL FORMING BY MOVABLE MEDIA

Разработана расчетно-экспериментальная методика получения диаграммы предельных деформаций тонколистового металла для процессов формовки подвижными средами. Суть методики заключается в разрушении образцов давлением полиуретана при вариации размеров эллиптических матриц для создания требуемого деформированного состояния. Измеряется толщина образца вблизи зоны разрушения или шейкообразования и вычисляется деформация по толщине. Соотношения между главными деформациями определяются конечно-элементным расчетом на основе известной кривой деформационного упрочнения материала. Простота измерений, отсутствие сетки на поверхности образца являются достоинствами предлагаемой методики. Получены точки диаграммы предельных деформаций тонколистовой стали 12Х18Н10Т.

ЛИСТОВАЯ ФОРМОВКА ПОДВИЖНЫМИ СРЕДАМИ; ДИАГРАММА ПРЕДЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ; РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА; РАЗРУШЕНИЕ ОБРАЗЦОВ ПОЛИУРЕТАНОМ; ИЗМЕРЕНИЕ ТОЛЩИННОЙ ДЕФОРМАЦИИ; КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ РАСЧЕТ СООТНОШЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ.

The authors developed a combined numerical-experimental technique to obtain a Forming Limit Diagram of thin sheet metal for metal forming by movable media. The technique is based on deforming sheet samples until failure by pressure of polyurethane into a variety of elliptical dies. The required strain state is defined by the proportion of the elliptical die window. Through-thickness strain of the sample near a zone of failure or necking was measured, and major in-plane strains were obtained by finite-element simulation based on the familiar metal properties. Simplicity of measurements and absence of a grid on the surface of the sample are the advantages of the suggested technique. Points of the Forming Limit Diagram for the specific thin sheet stainless steel were obtained.

METAL FORMING BY MOBILE MEDIA; FORMING LIMIT DIAGRAM; COMBINED NUMERICAL-EXPERIMENTAL TECHNIQUE; DESTRUCTION OF SAMPLES BY PRESSURE OF POLYURETHANE; SAMPLE THICKNESS MEASUREMENT; FINITE ELEMENT CALCULATION OF RELATIONSHIPS BETWEEN THE DEFORMATIONS.

#### Введение

Современный уровень развития вычислительной техники и конечно-элементных (КЭ) комплексов, их доступность для инженерных расчетов при проектировании процессов листовой штамповки позволяют с высокой точностью

прогнозировать параметры напряженно-деформированного состояния заготовки. Применение таких универсальных КЭ комплексов, как *LS-DYNA*®, дает возможность определять все компоненты тензора деформаций в любой точке заготовки и для любого момента деформирования [1]. Это позволяет решать одну из важных

задач проектирования процесса листовой формовки — прогнозирование разрушения заготовки с помощью диаграммы предельных деформаций (*Forming Limit Diagram — FLD*) [2]. В процессах формовки исходно твердыми подвижными средами (например, полиуретаном), в отличие от штамповки жидкостью, существует особенность разрушения листовой заготовки. Она связана с некоторой избыточной энергией нагружающей системы (упругая энергия подвижной среды, технологической оснастки и пресса). До начала пластической неустойчивости, не обязательно связанной с началом шейкообразования, идет процесс квазистатического деформирования, а затем заготовка разгоняется до высоких скоростей, и разрушение происходит при скоростях деформаций, достигающих  $d\varepsilon/dt = (1-5) \times 10^3 \text{ с}^{-1}$  [3]. В большинстве работ по исследованию *FLD*, например [4], отмечается, что при динамическом нагружении диаграмма предельных деформаций лежит ниже по сравнению со случаем статических испытаний. Корректно для компьютерных расчетов процессов штамповки подвижными средами использовать *FLD*, соответствующую данному технологическому процессу. Поэтому **целью настоящей работы** было создание методики получения диаграммы предельных деформаций тонколистового металла для процессов формовки подвижными средами.

### Выбор и обоснование метода получения диаграммы предельных деформаций

С. Келер (Stuart P. Keeler) впервые предложил эмпирический критерий разрушения, базирующийся на измерении двух главных деформаций в плоскости листа в момент, предшествующий разрушению [5]. Келер построил кривую предельных деформаций для ряда углеродистых сталей при обеих положительных деформациях. Под началом разрушения в данном случае понимается потеря устойчивости листа при растяжении, или, иными словами, момент начала видимого шейкообразования. Позднее Г. Гудвин (Gorton M. Goodwin) получил аналогичную кривую для случая, когда одна из деформаций отрицательна [6]. В настоящее время различают диаграммы предельных деформаций для вариантов, когда деформации измеряются в начале шейкообразования и когда измерение осуществляется при нарушении сплошности материала [2].

Существует достаточно много способов получения диаграмм предельных деформаций. Все они сводятся к тому, чтобы достичь разрушения листового материала при различных предсказуемых или измеримых деформированных состояниях. Наиболее распространены методы Наказимы (K. Nakazima, Nakazima Test) [7], Марсииака (Z. Marciniaik, Marciniaik Test) [8] и известный с начала прошлого века тест гидростатического выдавливания защемленной заготовки жидкостью (Hydraulic Bulge Test). Методы Наказимы и Марсииака практически различаются только формой пуансона — полуферической для первого варианта и плоской с радиусами закругления для второго, и в настоящее время их часто называют методом Наказимы — Марсииака (Nakazima — Marciniaik Test) (рис. 1, *a*, *b*).

Метод Наказимы — Марсииака заключается в том, что с помощью пуансона разрушаются образцы из листового материала различной формы. Для решения проблемы искажения результатов за счет трения в teste Наказимы между образцом и пуансоном помещают антифрикционную прокладку. При реализации метода Марсииака между пуансоном и образцом располагают транспортный спутник образца, имеющий вырез в середине, чтобы обеспечить создание двухосного растяжения. Иногда для этого делают цилиндрическую проточку в центре плоской части пуансона.

Вид деформированного состояния (соотношение главных деформаций в плоскости листа  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ ) определяется формой и размерами боковых вырезов на образце. Боковые вырезы могут быть различной формы, но чаще всего в виде сегмента круга. Образец без боковых вырезов позволяет получить точку на кривой *FLD*, которая соответствует двустороннему растяжению:  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ . Образец с максимальными вырезами позволяет получить точку, которая приблизительно соответствует одноосному растяжению, т. е.  $\varepsilon_1 = -2\varepsilon_2$ .

Регистрируется деформированное состояние с помощью измерения сетки или узора, нанесенного на поверхность образца. Измерение размеров сетки после начала шейкообразования или нарушения сплошности может осуществляться на микроскопе, однако в последнее время часто используют измерения при помощи нескольких камер. Но такой способ, кроме

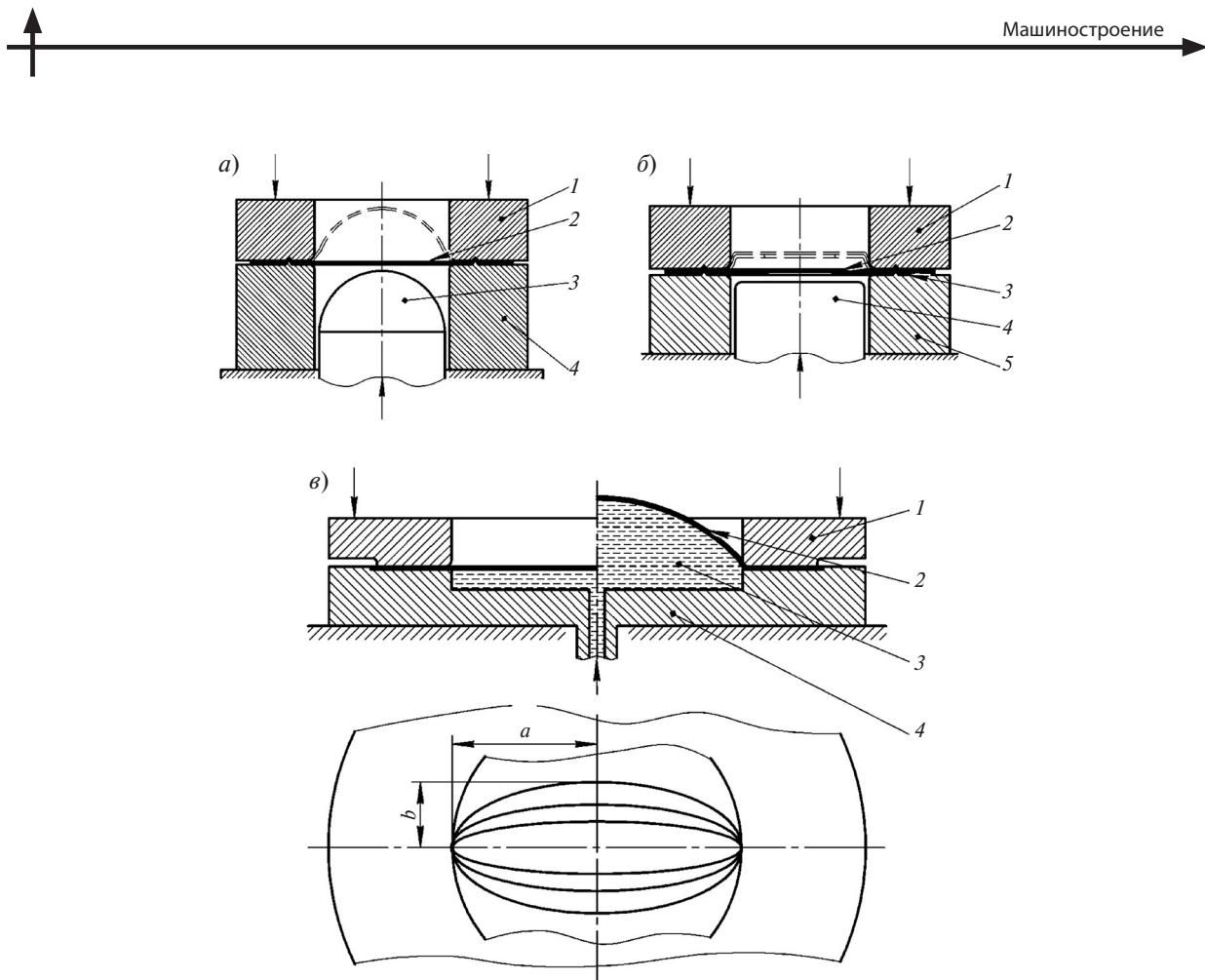


Рис. 1. Схемы испытания материала:

а — схема Наказими (1 — верхняя матрица, 2 — образец, 3 — полусферический пuhanсон, 4 — нижняя матрица);

б — схема Марсииника (1 — верхняя матрица, 2 — образец, 3 — транспортный спутник образца, 4 — плоский цилиндрический пuhanсон, 5 — нижняя матрица);

в — тест гидростатического выдавливания (1 — матрица, 2 — образец, 3 — жидкость, 4 — камера)

сложности нанесения качественного сеточного покрытия на поверхность заготовки, имеет ряд недостатков. Во-первых, необходимо определить начало пластической неустойчивости, поскольку именно этот момент является по определению разрушением материала. Такой момент при визуальном наблюдении определить тяжело, поэтому многие исследователи доводили образцы до разрушения, а затем измеряли деформацию, которая в этом случае включает также деформацию шейкообразования. Получаемая при этом ошибка тем меньше, чем больше диаметр кружка на поверхности образца. Приемлемым считается диаметр кружка 8–10 мм. Во-вторых, при ручном расчете деформации возникает следующая ошибка: измеренные и рассчитанные таким образом деформации — это деформации на поверхности образца, а не нейтральной

поверхности, что было бы более корректно. В-третьих, сетка, нанесенная лазерным, химическим или другим способом, особенно царапанием, может быть источником концентрации напряжений и искажать результаты испытаний для тонколистовых и особо тонколистовых материалов.

Кроме того, механика квазистатического деформирования и разрушения заготовки при использовании метода Наказими — Марсииника значительно отличается от той, что имеет место при листовой штамповке подвижными средами. С этой точки зрения более предпочтительным представляется Hydraulic Bulge Test (рис. 1, в). Деформирование тонколистового образца 2 осуществляется за счет давления жидкости (обычно масла) 3, подающейся в камеру 4. На матрице 1 выполняются закругления, чтобы

разрушение не происходило на кромке. Вид деформированного состояния определяется размерами эллиптической матрицы. При  $a = b$  имеет место двухосное растяжение и деформации равны ( $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ ), а в случае  $a \gg b$  напряженное состояние приближается к плоской деформации и можно приблизиться к уровню  $\varepsilon_2 \approx 0$ .

По сути, можно получить правую положительную часть *FLD*. В условиях формовки листового материала подвижными средами для оценки разрушения заготовки в большинстве случаев правой части *FLD* вполне достаточно. Однако все недостатки с точки зрения измерения деформаций в данном методе присутствуют, как и в методе Наказимы — Марсимиака. Поэтому в нашей работе предлагается более простой в практической реализации метод по типу *Hydraulic Bulge Test* — экспериментально-аналитический метод получения точек диаграмм *FLD*, позволяющий максимально приблизить измерения к зоне шейкообразования.

#### Экспериментально-аналитический способ получения точек диаграмм *FLD*

Исходными данными служат характеристики кривой деформационного упрочнения материала заготовки, аппроксимированные степенной зависимостью

$$\sigma_s = B \varepsilon_i^m,$$

где  $\sigma_s$  — напряжение текучести материала;  $\varepsilon_i$  — интенсивность тензора логарифмических деформаций;  $B$  и  $m$  — параметры аппроксимации. Эксперименты

проводились для стали 12Х18Н10Т толщиной  $h_0 = 0,55$  мм. После аппроксимации опытной кривой деформационного упрочнения получены данные:  $B = 1250$  МПа,  $m = 0,287$ . Экспериментальная оснастка для нагружения образца показана на рис. 2, *a*.

Нагружение листового образца 5 осуществляется давлением нагружающей подвижной среды 4, заключенной в контейнер 3, при перемещении плунжера 2 под действием на него усилия гидравлического пресса, между плитами 1, 7 которого расположено экспериментальная оснастка. Под действием давления полиуретана образец деформируется в матрицу 6. Испытания проводились на гидравлическом прессе ПСУ-100.

В качестве материала нагружающей подвижной среды использовался полиуретан. Твердость составляла 55–60 единиц по Шору, что примерно соответствовало характеристикам полиуретана марки СКУ-6Л. Для данной марки полиуретана коэффициент кулоновского трения в условиях деформирования заготовки не превышает  $\mu \leq 0,01–0,05$  [9]. Поэтому отпадает необходимость в антифрикционной прокладке между листовым образцом и нагружающим элементом (средой). Также за счет давления полиуретана осуществляется прижим фланцевой части листового образца 5 к поверхности матрицы 6.

Радиус круглого отверстия и длина большой полуоси для матриц с отверстием в виде эллипса были  $b = 50$  мм. Диаметр контейнера был  $D = 150$  мм. Образец из листового металла вырезался круглым с диаметром на 0,5 мм меньше

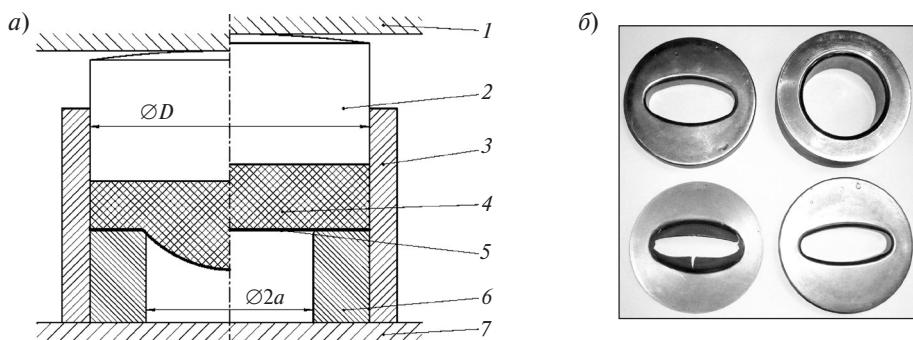


Рис. 2. Технологическая оснастка для испытаний:

*а* — оснастка для нагружения образца (1, 7 — плиты гидравлического пресса, 2 — плунжер, 3 — контейнер, 4 — полиуретан, 5 — образец, 6 — матрица);

*б* — матрицы с круглым отверстием (диаметром 100 мм) и овальными (38×100 мм и 50×100 мм), а также пример разрушенного образца на матрице 50×100 мм



диаметра контейнера. Такое соотношение размеров позволило исключить процесс вытяжки в чистом виде и обеспечить процесс вытяжки-формовки, когда деформирование происходило за счет утонения центральной части заготовки. В процессе испытаний были использованы две овальные матрицы с размерами  $a = 50$  мм,  $b = 19$  мм и  $a = 50$  мм,  $b = 25$  мм, а также круглая матрица с радиусом 50 мм. Кромка матрицы закруглялась радиусом 6 мм. При испытаниях с овальными матрицами направление проката было расположено вдоль полуоси эллипса длиной  $a$ .

В процессе нагружения заготовка доводилась до разрушения. Выбранные условия деформирования и разрушения листовых образцов позволили получать достаточно устойчивую картину их разрушения (рис. 2, б). На разрушенной заготовке визуально определялась граница шейкообразования. На максимально близком расстоянии к этой границе скобой с индикатором часового типа измерялась толщина заготовки  $h$  в 5–10 местах. Затем вычислялась средняя толщинная деформация

$$\varepsilon_h = \varepsilon_3 = \ln(h_0/h).$$

Для круглого в плане отверстия имеет место осесимметричное деформированное состояние ( $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ ). Для этой точки по величине третьей деформации из условия равенства нулю первого инварианта тензора деформаций определяются другие компоненты тензора логарифмических деформаций:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3/2.$$

Для получения других точек  $FLD$  по величине толщинной деформации необходимо знать соотношение двух главных деформаций в плоскости листа. Такое соотношение можно получить, сделав компьютерный расчет деформирования заготовки, например при помощи КЭ комплекса *LS-DYNA*, аналогично тому, как это делалось в работе [10].

Компьютерный расчет осуществлялся с использованием универсального конечно-элементного комплекса *LS-DYNA* 971. При расчетах материал заготовки считался изотропным; задавались следующие схемные параметры: упругие константы —  $E = 202$  ГПа (модуль Юнга),  $\nu = 0,31$  (коэффициент Пуассона); параметры степенного закона упрочнения —  $B$  и  $m$ ; плотность материала  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>. Была принята модель материала *MAT\_POWER\_LAW\_PLASTICITY*.

Материал матрицы задавался моделью *RIGID*. Предполагалось кулоновское трение материала образца по материалу матрицы со значениями коэффициента трения  $\mu = 0,2$  при покое и  $\mu = 0,15$  при движении. При нагружении образца полагалось, что давление линейно возрастает до максимального значения при времени 200 мс. При заданных размерах матрицы и образца это обеспечивало квазистатичность нагружения [10].

Результаты компьютерных расчетов представлены на рис. 3.

На рисунках показаны пути деформирования четырех центральных точек листового образца (рис. 3, б, г). На этих же рисунках представлены расчетные зависимости  $FLD$ . Верхняя кривая расчетной  $FLD$  соответствует разрушению образца. Нижняя кривая  $FLD$  лежит примерно на 20 % ниже верхней кривой и обеспечивает некоторый расчетный запас. Путь нагружения выбран в срединной поверхности листа. Точка пересечения путей деформирования с верхней кривой  $FLD$  определяет соотношение компонент первой и второй главных деформаций. Определив их соотношение ( $\alpha = \varepsilon_2/\varepsilon_1$ ), по величине толщинной деформации определяем сами деформации  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ , которые задают соответствующую точку на кривой  $FLD$ :  $\varepsilon_1 = -\varepsilon_3/(1 + \alpha)$ ,  $\varepsilon_2 = \alpha \times \varepsilon_1$ .

Полученные значения точек  $FLD$  представлены в таблице. Разброс при измерении толщины составляет примерно 10–15 %.

Следует отметить, что полученные точки лежат ниже расчетной кривой  $FLD$ . Это связано с тем, что в данном методе испытания, по сути, реализуется высокоскоростное разрушение листового металла [3], при котором такое снижение критических деформаций возможно [4]. Варьируя соотношение сторон эллипса  $a$  и  $b$  для изготовления соответствующих матриц, можно получить всю диаграмму предельных деформаций для  $\varepsilon_2 > 0$ .

## Заключение

Разработана расчетно-экспериментальная методика получения диаграммы предельных деформаций тонколистового металла для процессов формовки подвижными средами, в которой механика разрушения материала образца близка к механике соответствующего технологического процесса: нагружение и разрушение листовых образцов осуществляется при помощи

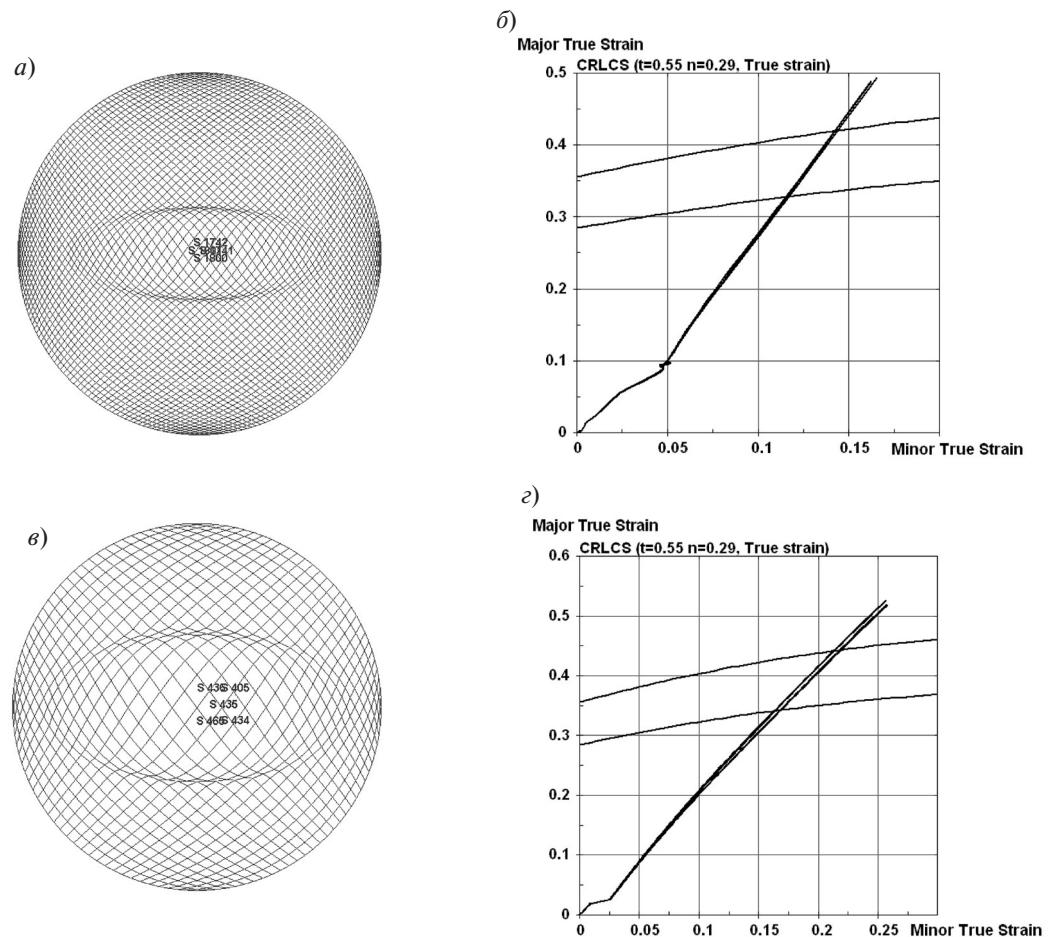


Рис. 3. Пути деформирования для отмеченных точек заготовки при разрушении в овальной матрице с размерами  $38 \times 100$  мм (а, б) и  $50 \times 100$  мм (в, г) (по вертикальной оси — первая главная логарифмическая деформация, по горизонтальной оси — вторая главная логарифмическая деформация)

#### Компоненты тензора деформаций для трех форм матрицы

Форма матрицы	$h$	$-\varepsilon_3$	$\alpha = \varepsilon_2/\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$	$\varepsilon_1$
Круглая с радиусом 50 мм	$0,25 \pm 0,02$	0,79	1	0,395	0,395
Овальная $50 \times 100$ мм	$0,35 \pm 0,03$	0,45	0,48	0,146	0,304
Овальная $38 \times 100$ мм	$0,38 \pm 0,03$	0,37	0,35	0,096	0,274

полиуретана. Варьируя соотношение сторон эллипса  $a$  и  $b$  для изготовления соответствующих матриц, можно получить положительную часть диаграммы предельных деформаций для  $\varepsilon_2 > 0$ , что достаточно для расчетов процессов листовой формовки подвижными средами. Измеряются толщинные деформации непосредственно вблизи зоны разрушения или шейкообразования. Две другие главные деформации в срединной поверхности листа определяются конечно-эле-

ментным расчетом на основе известной кривой деформационного упрочнения материала. Достоинствами предлагаемой методики являются относительная простота оснастки для нагружения образца, простота измерений, отсутствие сетки на поверхности образца и получение критических деформаций для срединной поверхности листового образца. Получены точки диаграммы предельных деформаций тонколистовой стали 12Х18Н10Т толщиной 0,55 мм.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Hallquist J.O.** LS-DYNA theoretical manual / Livermore Software Technology Corporation. Livermore. CA, 2006. 498 p.
2. **Dorel Banabic.** Sheet Metal Forming Processes. Constitutive Modelling and Numerical Simulation. London-New York: Springer Heidelberg Dordrecht, 2010. 301 p.
3. **Аксенов Л.Б., Мамутов В.С., Мамутов А.В.** Построение диаграмм предельных деформаций для прогнозирования разрушения тонколистовой заготовки при высокоскоростной вытяжке-формовке // КИШП. 2002. №4, С. 9–12.
4. **Persy J.N.** The effect of strain rate on the forming limit diagram for sheet metal // Annals of CIPP. 1980. Vol. 29, №1. P. 131–132.
5. **Keeler S.P.** Rating the Formability of Sheet Metal // Metal Progress. 1966. Vol. 90 P. 148–153.
6. **Goodwin G.M.** Application of Strain Analysis to Sheet Metal Forming Problems in the Press Shop // Presented at SAE Automotive Engineering Congress. Detroit. January 1968. Paper 680093. 8 p.
7. **Nakazima K., Kikuma T.** Forming limits under biaxial stretching of sheet metals. Testu-to Hagane 53:455–458 (in Japanese), 1967.
8. **Marciniak Z., Kuczynski K.** Limit strain in the process of stretch forming sheet metal, International Journal of Mechanical Science. 1967. Vol. 9. P. 609–620.
9. **Комаров А.Д.** Штамповка листовых и трубчатых деталей полиуретаном. Л.: Изд-во ЛДНТП, 1975. 36 с.
10. **Мамутов А.В., Мамутов В.С.** Расчеты процессов штамповки подвижными средами при помощи комплекса LS-DYNA // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. 2012. №2(147). Т. 1. С. 127–131.

## REFERENCES

1. **Hallquist J.O.** LS-DYNA theoretical manual / Livermore Software Technology Corporation. Livermore, CA. 2006. 498 p.
2. **Dorel Banabic.** Sheet Metal Forming Processes. Constitutive Modelling and Numerical Simulation. London-New York: Springer Heidelberg Dordrecht. 2010. 301 p.
3. **Aksenov L.B., Mamutov V.S., Mamutov A.V.** Postroyeniye diagramm predelnykh deformatsiy dlya prognozirovaniya razrusheniya tonkolistovoy zagotovki pri vysokoskorostnoy vtyazhke-formovke [Forming Limit Diagram for predicting failure of thin sheet part at high speed metal forming]. *Forging-Stamping Production*. 2002. №4. S. 9–12. (rus.)
4. **Persy J.N.** The effect of strain rate on the forming limit diagram for sheet metal. *Annals of CIPP*. 1980. Vol. 29, №1. P. 131–132.
5. **Keeler S.P.** Rating the Formability of Sheet Metal. *Metal Progress*. 1966. Vol. 90 P. 148–153.
6. **Goodwin G.M.** Application of Strain Analysis to Sheet Metal Forming Problems in the Press Shop. *Presented at SAE Automotive Engineering Congress*. Detroit. January 1968. Paper 680093. 8 p.
7. **Nakazima K., Kikuma T.** Forming limits under biaxial stretching of sheet metals // *Testu-to Hagane* 53:455–458 (in Japanese). 1967.
8. **Marciniak Z., Kuczynski K.** Limit strain in the process of stretch forming sheet metal, *International Journal of Mechanical Science*. 1967. Vol. 9. P. 609–620.
9. **Komarov A.D.** Shtampovka listovykh i trubchatykh detaley poliuretanom. [Metal forming of sheets parts and pipes parts by polyurethane]. Leningrad: Izd-vo LDNTP, 1975. 36 s. (rus.)
10. **Mamutov A.V., Mamutov V.S.** Raschety protsessov shtampovki podvizhnymi sredami pri pomoshchi kompleksa LS-DYNA [Computer simulation of metal-forming by movable media using Ls-Dyna code] / *St. Petersburg State Polytechnical University Journal : Science and education*. 2012. № 2(147). Т. 1. С. 127–131. (rus.)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**АРСЕНТЬЕВА Ксения Сергеевна** — аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: fartran@li.ru

**КУНКИН Сергей Николаевич** — кандидат технических наук доцент, заведующий кафедрой Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: ksn54@mail.ru

**МАМУТОВ Александр Вячеславович** — кандидат технических наук доцент приглашенный ученый Оклендского университета (Мичиган, США. 2200 N Squirrel Rd. Rochester, Michigan 48309. E-mail: A.Mamutov@yahoo.com

**МАМУТОВ Вячеслав Сабайдинович** — доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: mamutov\_vs@spbstu.ru

#### **AUTHORS**

**ARSENTEYEVA Ksenia S.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: fartran@li.ru

**KUNKIN Sergei N.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: ksn54@mail.ru

**MAMUTOV Alexander V.** — Oakland University. 2200 N Squirrel Rd. Rochester, Michigan 48309. E-mail: A.Mamutov@yahoo.com

**MAMUTOV Viacheslav S.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: mamutov\_vs@spbstu.ru



DOI 10.5862/JEST.219.18

УДК 623.438.3-23

*О.А. Усов, М.Н. Гусев,  
А.В. Лойко, А.С. Макаров*

## ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ ТРАНСМИССИЯ ДЛЯ ВОЕННОЙ ГУСЕНИЧНОЙ МАШИНЫ С ГИБРИДНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКОЙ

*O.A. Usov, M.N. Gusev,  
A.V. Loyko, A.S. Makarov*

### ELECTROMECHANICAL TRANSMISSION FOR MILITARY TRACKED VEHICLE WITH HYBRID POWER PLANT

Разработаны кинематическая схема электромеханической трансмиссии и конструкция ее силового блока для военной гусеничной машины массой 54 т и максимальной скоростью 75 км/ч. Определены рациональные значения кинематических и силовых параметров и характеристики трансмиссии и гибридной силовой установки. Выбран вариант управления тепловым двигателем, обеспечивающий минимальный расход топлива при движении машины по тестовой трассе.

**КИНЕМАТИЧЕСКАЯ СХЕМА; ВОЕННАЯ ГУСЕНИЧНАЯ МАШИНА; ГИБРИДНАЯ СИЛОВАЯ УСТАНОВКА; ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ ТРАНСМИССИЯ; МИНИМАЛЬНЫЙ РАСХОД ТОПЛИВА.**

The authors developed the kinematic scheme of electromechanical transmission and designed its power block for the military track laying vehicle weighing 54 t and with a maximum speed of 75 km/h; they defined rational values of kinematic and power parameters and characteristics of the transmission and the hybrid power plant; power of the heat engine, generator, power electric motors and electrical drives energy. This paper presents external fuel and power characteristics of a heat engine with coordinates of the minimum specific fuel consumption, when the option of controlling the heat engine which provides minimum fuel consumption at the vehicle movement on the test route is chosen.

**KINEMATIC SCHEME; MILITARY TRACKED VEHICLE; HYBRID POWER PLANT; ELECTROMECHANICAL TRANSMISSION; MINIMUM FUEL CONSUMPTION.**

Одно из перспективных направлений в развитии шасси военных гусеничных машин (ВГМ) — применение электромеханических трансмиссий (ЭМТ) с гибридными силовыми установками (ГСУ). Этому способствует значительный прогресс в производстве малогабаритных электромашин с высокой удельной мощностью [1–3], электрических и электронных устройств, обеспечивающих преобразование электрического тока и управление электромашинами [4], а также накопителей энергии (НЭ) с большой энергоемкостью, допускающих значительное число перезарядок [5].

В ВНИИТрансмаш в результате инновационных исследований систематизированы воз-

можные схемы ЭМТ по принципу преобразования и передачи энергии к ведущим колесам, разработаны варианты управления тепловым двигателем ГСУ, обеспечивающие существенное повышение экономичности эксплуатации ВГМ, разработана методика определения необходимых кинематических и силовых параметров агрегатов ЭМТ и ГСУ, обеспечивающих современные требования по подвижности ВГМ [6].

Для расчетно-исследовательского сопровождения конструкторских работ разработан метод выбора рационального варианта схемы ЭМТ и управления ГСУ на основе оценки средней скорости движения и путевого расхода топлива по результатам моделирования движения ВГМ

по тестовой трассе [7]. Созданы методики и программы расчета функциональных характеристик ЭМТ с ГСУ, динамических процессов, происходящих в них при переходных режимах работы, показателей нагруженности и долговечности основных механических узлов ЭМТ, а также для определения показателей оперативной подвижности ВГМ в различных условиях эксплуатации [8]. Разработан алгоритм автоматического управления ЭМТ с ГСУ, позволяющий реализовать преимущества ЭМТ по сравнению с современными моторно-трансмиссионными установками (МТУ) ВГМ.

С использованием созданного расчетно-методического аппарата спроектирована ЭМТ для работы в составе шасси перспективного ВГМ и проведен сравнительный анализ характеристик ВГМ с ЭМТ и механической трансмиссией (МТ). В качестве основной цели при выполнении указанной проектной работы ставилось повышение характеристик подвижности и топливной экономичности перспективной ВГМ за счет использования ЭМТ с гибридной силовой установкой. При этом были решены следующие задачи:

поиск рациональной схемы и разработка на ее базе конструкции ЭМТ для перспективной ВГМ;

расчет основных функциональных и динамических характеристик ЭМТ с ГСУ, а также оценка ее долговечности в составе перспективной ВГМ;

сравнительный анализ характеристик подвижности и топливной экономичности перспективной ВГМ с механической и электромеханической трансмиссиями.

В статье представлены описание конструкции ЭМТ для ВГМ и ее основные параметры, являющиеся результатом решения первой задачи. Статьи по результатам выполнения второй и третьей задач оформляются для публикации.

Исходными данными для проектирования ЭМТ приняты: масса ВГМ  $m_T = 54$  т; максимальная скорость  $V_{\max} = 75$  км/ч; радиус ведущего колеса  $R_{\text{ВК}} = 0,34$  м; база машины  $L = 4,773$  м; колея машины  $B = 2,807$  м; передаточное число бортового редуктора  $i_{\text{БР}} = 4,00$ ; максимальная частота вращения вала теплового двигателя  $n_{\text{тд}} = 2100$  об/мин.

Приведенные данные соответствуют значениям параметров шасси перспективной ВГМ с механической трансмиссией.

Рациональные значения параметров и характеристики агрегатов ЭМТ и ГСУ зависят от схемы ЭМТ и должны быть согласованы между собой.

При выборе схемы ЭМТ расчет характеристик проведен для трех вариантов схем с последовательными потоками энергии (1 — центральной; 2 — бортовой без дифференциальной связи бортов; 3 — бортовой с дифференциальной связью бортов), а также для одной схемы с комбинированными потоками энергии (4-й вариант).

С учетом имеющегося конструктивного задела по асинхронным электромашинам с постоянными магнитами при расчете принято дополнительно следующее:

максимальная частота вращения вала генератора  $n_{\Gamma \max} = 8400$  об/мин;

максимальная частота вращения вала электродвигателя  $n_{\text{ЭД} \max} = 10000$  об/мин;

номинальная частота вращения вала электродвигателя  $n_{\text{ЭД} \text{ н}} = 3300$  об/мин;

коробка диапазонов (КД) имеет два диапазона.

Результаты расчета рекомендуемых значений параметров основных агрегатов ЭМТ приведены в табл. 1. В ней использованы следующие обозначения:  $f_d(75)$  — удельная сила тяги при максимальной скорости движения;  $N_{\text{тд}}$  — максимальная мощность теплового двигателя, необходимая для соответствия техническим требованиям перспективной ВГМ;  $N_{\Gamma}$  — максимальная мощность генератора, соответствующая характеристике теплового двигателя;  $N_{\text{ЭД} \max}$  — максимальная мощность одного тягового электродвигателя;  $N_{\text{ЭД} \text{ н}}$  — номинальная мощность одного тягового электродвигателя;  $N_{\text{НЭР}}$  — максимальная мощность, подводимая к электродвигателям от накопителей энергии;  $N_{\text{НЭТ}}$  — средняя мощность, идущая на заряд НЭ;  $N_{\text{ВА}}$  — максимальная мощность, отбираемая на привод вспомогательных агрегатов;  $i_1$  — передаточное число КД на первом диапазоне ( $i_2 = 1,0$  — передаточное число КД на втором диапазоне одинаково для всех вариантов схемы);  $V_{\text{ср}}$  — средняя скорость движения на тестовой трассе;  $G_{100}$  — расход топлива, отнесенный к 100 км пробега в условиях тестовой трассы.

Как видно из таблицы, по ряду показателей комбинированный (4-й) вариант схемы имеет преимущества по сравнению со схемами с последовательными потоками мощности (1–3 варианты). Однако он существенно сложнее по

Таблица 1

## Основные показатели характеристики ЭМТ и ее агрегатов при различных вариантах схемы

Показатели	Рекомендуемые значения показателей для четырех вариантов схемы			
	1	2	3	4
$f_d(75)$	0,023			
$N_{TD}$ , кВт	927,6	922,1	927,6	1064,8
$N_{\Gamma}$ , кВт	913,7	908,2	913,7	803,1
$N_{ED_{max}}$ , кВт	956,0	966,7	502,7	335,2
$N_{ED_n}$ , кВт	712,8	814,0	502,7	335,2
$N_{HEP}$ , кВт	313,2	313,2	313,2	313,2
$N_{HET}$ , кВт	244,4	348,0	251,0	295,0
$N_{BA}$ , кВт	171,0	171,0	171,0	171,0
$u_1$	3,559	1,694	3,275	4,125
$V_{cp}$ , км/ч	37,41	37,28	37,40	39,10
$G_{100}$ , кг	354,27	359,21	354,58	323,29

конструкции механической части трансмиссии и по системе автоматического управления. Поэтому при дальнейшей разработке он не рассматривался.

Как наиболее перспективный и простой в реализации принят вариант бортовой схемы ЭМТ с дифференциальной связью бортов [9] (3-й в табл. 1). Требующиеся характеристики теплового двигателя и генератора, а также показатели оперативной подвижности ВГМ с ЭМТ и ГСУ первых трех вариантов схем практически одинаковы. Однако в третьем варианте из-за использования дифференциальной связи бортов требуется существенно меньшая установочная мощность тяговых электродвигателей.

В результате конструктивного поиска разработана схема ЭМТ, приведенная на рис. 1. В этой схеме дифференциальная связь расположена после КД, а коробка объединена с входным редуктором. Для включения обоих диапазонов используются тормоза, что снижает уровень потерь мощности холостого хода в механической части из-за отсутствия вращающихся торцевых уплотнений каналов подвода масла в бустера фрикционных узлов.

Передаточные числа узлов ЭМТ: для редуктора генератора  $u_1 = 4,0$ ; для редуктора электродвигателя (входной редуктор, объединенный с КД) —  $u_{KD1} = 13,841$  (первый диапазон);  $u_{KD2} = 4,260$  (второй диапазон).

На рис. 2 приведена конструкция половины двигателевого блока ЭМТ (силовой блок с электродвигателем и дифференциальной связью бортов).

Все зубчатые колеса планетарных рядов ЭМТ выполнены с модулем  $m = 4,0$  мм. Для обеспечения необходимой долговечности зубчатые колеса редуктора генератора выполнены косозубыми с углом наклона зуба  $\beta = 16^\circ$ , остальные планетарные ряды имеют прямозубые колеса. Параметр планетарного ряда дифференциальной связи  $p_{dc} = 2,222$ .

Тормоз 1-го диапазона имеет 16 пар трения, что при давлении в гидросистеме управления  $p_{upr} = 1,8$  МПа обеспечивает коэффициент запаса  $k_{T1} = 1,14$  (при коэффициенте трения на срыв  $\mu = 0,12$ ). Тормоз 2-го диапазона при 8 парах трения обеспечивает коэффициент запаса  $k_{T2} = 1,57$ .

Характеристика потерь мощности в механических узлах ЭМТ, выполненных по методике [10], приведена в табл. 2.

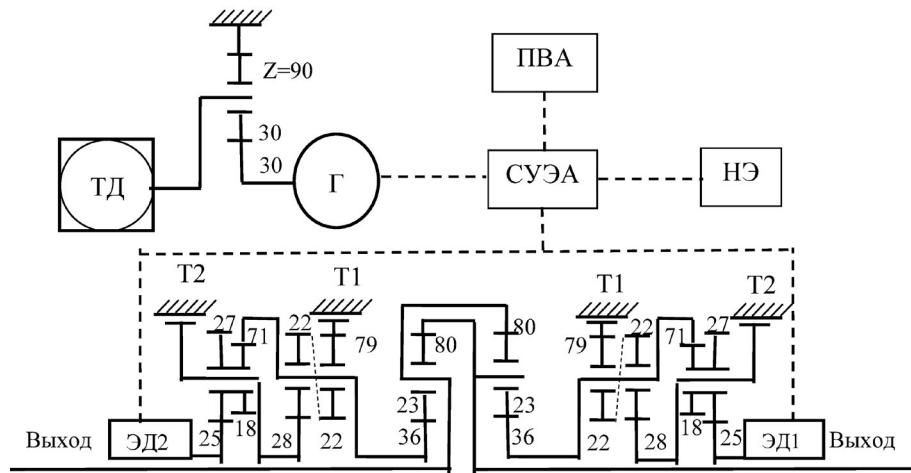


Рис. 1. Кинематическая схема ЭМТ

ТД — тепловой двигатель; Г — генератор; ЭД1, ЭД2 — тяговые электродвигатели; Т1 — тормоз включения 1-го диапазона; Т2 — тормоз включения 2-го диапазона; Выход — выходные валы ЭМП; Z — число зубьев зубчатых колес; ПВА — привод вспомогательных агрегатов; НЭ — накопители энергии; СУЭА — система управления электрическими агрегатами

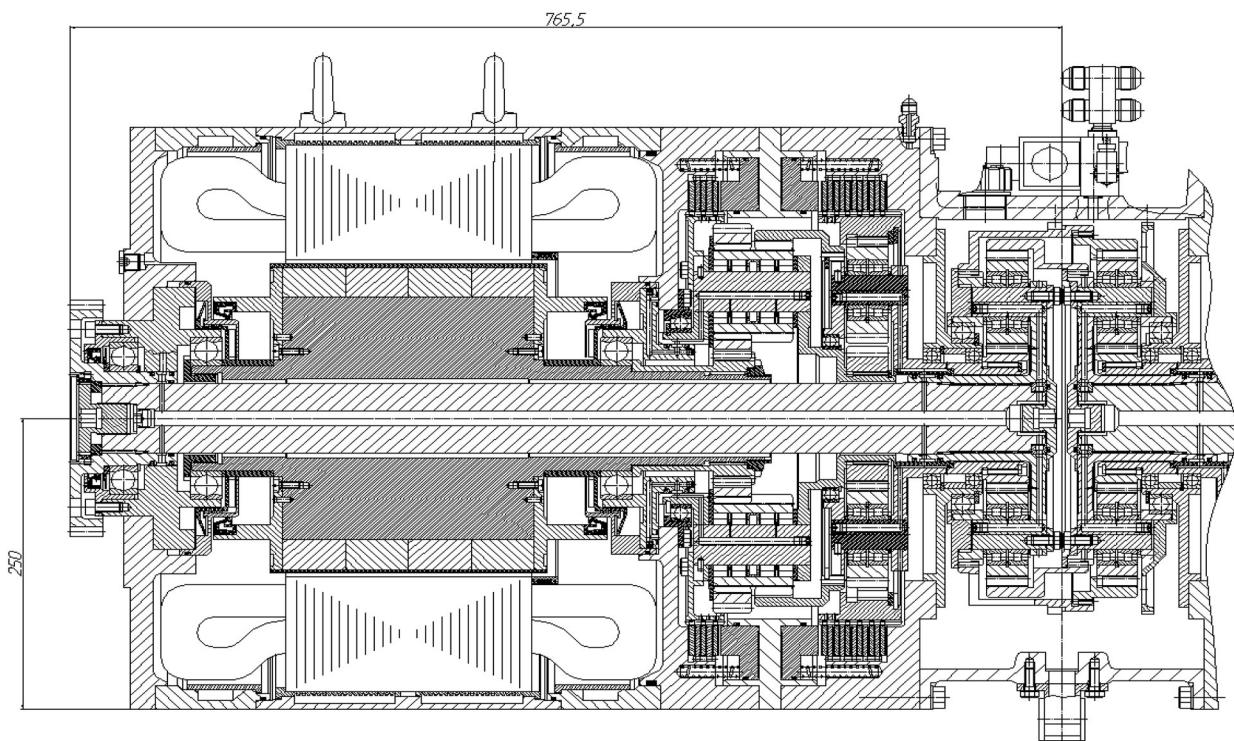


Рис. 2. Конструкция силового блока с электродвигателем, КД и дифференциальной связью бортов



Таблица 2

## Показатели потерь мощности в редукторах ЭМТ

Узел УМТ	$\beta$	$\Delta N_{xx50}$ , кВт	$\Delta N_{xx80}$ , кВт
Редуктор генератора	0,007	0,49	1,03
Редуктор электродвигателя	1-й диапазон	0,037	0,79
	2-й диапазон	0,006	1,02
			2,18

В таблице приняты обозначения:  $\beta$  — коэффициент нагрузочных потерь;  $\Delta N_{xx50}$ ,  $\Delta N_{xx80}$  — значения потерь мощности на холостом ходу при частоте вращения входного вала, равной соответственно 0,5 и 0,8 от максимального значения.

В процессе расчета использовалась расчетная модель теплового двигателя, имеющего следующую внешнюю характеристику:

$n_{\text{Д}}$ , об/мин	$N_{\text{Д}}$ , кВт
1300	715,7
1400	773,5
1500	819,6
1600	855,8
1700	883,4
1800	903,7
1900	917,3
2000	925,2
2100	928,0

Согласно расчетной модели двигателя [11] предполагается, что «ядро» топливно-мощностной характеристики имеет координаты  $n_0 = 1494$  об/мин и  $T_0 = 4,167$  кН·м. При этом мощ-

ность равна  $N_0 = 652$  кВт, а удельный расход топлива  $211$  г/(кВт·ч). На внешней характеристике минимальный удельный расход составляет  $g_{e\min} = 214$  г/(кВт·ч), а на режиме максимальной мощности —  $g_{e\max} = 234$  г/(кВт·ч). Максимальная тормозная мощность теплового двигателя —  $N_{\text{ТДт}} = 185,6$  кВт.

Отсутствие жесткой механической связи теплового двигателя с ведущими колесами позволяет организовать два режима автоматического управления двигателем — экономичный (основной) и форсированный (для интенсивного разгона).

На экономичном режиме система управления удерживает работу двигателя на заданной рабочей моментной характеристике, которая представляется как зависимость крутящего момента  $T_d$  на валу двигателя от частоты вращения его вала  $n_d$ . В результате моделирования движения машины по тестовой трассе при различных вариантах управления тепловым двигателем предлагается вариант, представленный на рис. 3. Для работы

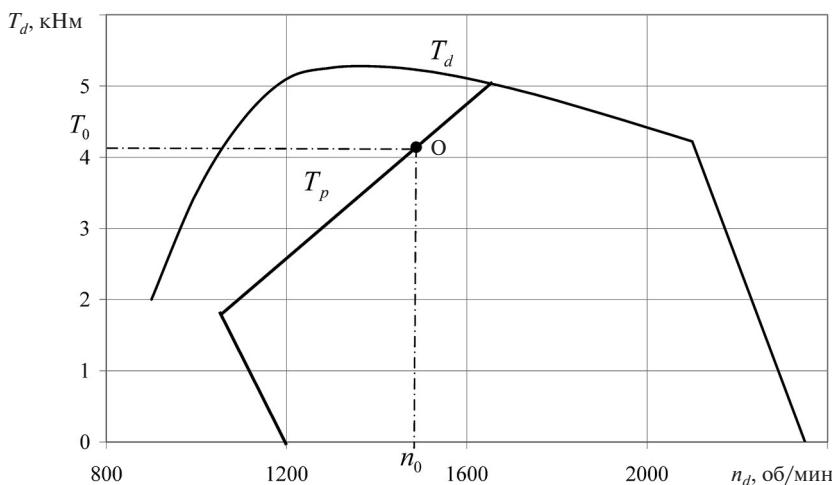


Рис. 3. Характеристика двигателя для ЭМТ перспективного танка с вариантом рабочей моментной характеристики  $T_p$ ; О — «ядро» топливно-мощностной характеристики

двигателя по выбранной моментной характеристике  $T_p$  во всем рабочем скоростном диапазоне требуемая мощность реализуется при минимальном расходе топлива. В табл. 1 величина  $G_{100}$  определена для данного варианта управления.

Моментная характеристика  $T_p$  получена теоретически [12]. Она проходит через точки касания эллипсоидных кривых, соответствующих постоянным удельным расходам топлива  $g_e$ , и гиперболических кривых крутящих моментов, соответствующих постоянной мощности. Точка пересечения характеристики  $T_p$  с внешней характеристикой данного двигателя имеет координаты  $n_b = 1639$  об/мин и  $T_b = 5,01$  кН·м. Слева характеристика  $T_p$  ограничена регуляторной характеристикой с частотой вращения на холостом ходу  $n_{xx} = 1200$  об/мин. Результаты моде-

лирования движения машины по тестовой трассе подтвердили, что это наиболее экономичный режим автоматического управления двигателем.

## Выводы

Разработаны кинематическая схема ЭМТ и конструкция ее силового блока для ВГМ массой 54 т и максимальной скоростью 75 км/ч.

Для разработанной конструкции ЭМТ определены рациональные значения кинематических и силовых параметров и характеристики ЭМТ и ГСУ, обеспечивающие современные технические требования к ВГМ.

Выбран вариант управления тепловым двигателем, при котором движение по тестовой трассе обеспечивается при минимальном расходе топлива.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф. Электрические генераторы с постоянными магнитами. М.: Энергатомиздат, 1988. 280 с.
2. Ледовский А.Н. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами. М.: Энергоатомиздат, 1985. 168 с.
3. Борисов Г.А. Использование постоянных магнитов в электрических машинах. Учебн. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ, 2002. 75 с.
4. Ефимов А.А., Шрейнер Р.Т. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока / Под ред. д.т.н. проф. Р.Т. Шрейнера. Новоуральск: Изд-во НГТИ, 2001.
5. Дидманидзе О.Н. Иванов С.А. Использование суперконденсаторов в комбинированных энергоустановках тяготранспортных средств. М.: УМЦ «ТРИАДА», 2004.
6. Усов О.А., Белоутов Г.С., Гусев, М.Н. [и др.]. Основные варианты схемы электромеханической трансмиссии гибридного типа и методика определения параметров ее агрегатов для военных гусеничных машин. // Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды семнадцатой Всероссийской научно-практической конференции РАРАН (1-4 апреля 2014 г.) Т. 3. Бронетанковая техника и вооружение, М.: РАРАН, 2014. С. 111–122.
7. Усов О.А., Корольков Р.Н. Метод расчета средней скорости и расхода топлива при движении ВГМ по тестовой трассе. // Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды шестнадцатой Всероссийской научно-практической конференции РАРАН (3-6 апреля 2012 г.) Т. 3. Бронетанковая техника и вооружение., М: РАРАН, 2012. С. 197–202.
8. Программа расчета показателей функционирования и долговечности узлов электромеханических передач №035.08 ПП / ВНИИТРАНСМАШ. 2014 г.
9. Гусев М.Н., Белоутов Г.С., Корольков Р.Н., Ширшов Ю.И. Трансмиссия транспортной машины // Патент РФ №2521158. Приоритет 06.11.2012.
10. Усов О.А., Белоутов Г.С., Гусев М.Н. [и др.]. Программа расчета показателей потерь мощности в трансмиссиях транспортных машин.// Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды одиннадцатой Всероссийской научно-практической конференции РАРАН (1-4 апреля 2008 г.) Т. 3. Бронетанковая техника и вооружение., М: РАРАН, 2008. С. 201–204.
11. Усов О.А., Лойко А.В., Белоутов Г.С. [и др.]. Математическая модель дизельного двигателя для расчета электромеханической трансмиссии транспортной машины.// Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды семнадцатой Всероссийской научно-практической конференции РАРАН (1-4 апреля 2014 г.) Т.3. Бронетанковая техника и вооружение., М: РАРАН, 2014. С. 122–130.
12. Белоутов Г.С., Корольков Р.Н., Усов О.А. Модель расчета расхода топлива дизельного двигателя на произвольном режиме. // Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды пятнадцатой Всероссийской научно-практической конференции РАРАН (3-6 апреля 2012 г.) Т. 3. Бронетанковая техника и вооружение., М: РАРАН, 2012. С. 197–202.



## REFERENCES

1. **Balagurov V.A., Galteyev F.F.** Elektricheskiye generatory s postoyan-nymi magnitami [Electric generators with permanent magnets]. M.: Energoatomizdat, 1988. 280 s. (rus.)
2. **Ledovskiy A.N.** Elektricheskiye mashiny s vysokokoertsitivnymi postoyannymi magnitami [Electrical machines with high-coercivity permanent magnets]. M.: Energoatomizdat, 1985. 168 s. (rus.)
3. **Borisov G.A.** Ispolzovaniye postoyannykh magniton v elektricheskikh mashinakh [The use of permanent magnets in electric machines]: Uchebn. posobiye. SPb.: Izd-vo SPbGETU, 2002. 75 s. (rus.)
4. **Efimov A.A., Shreyner R.T.** Aktivnyye preobrazovateli v reguliruyemykh elektroprivodakh peremennogo toka. [Active converters controlled AC drives] / Pod red. d.t.n., prof. R.T. Shreynera — Novouralsk: Izd-vo NGTI, 2001. (rus.)
5. **Didmanidze O.N. Ivanov S.A.** Ispolzovaniye superkondensatorov v kombinirovannykh energoustanovkakh tyagovotransportnykh sredstv [The use of supercapacitors in combined power plants tyagovotransportnyh funds]. M.: UMTs «TRIADA», 2004 g. (rus.)
6. **Usov O.A., Beloutov G.S., Gusev, M.N. [i dr.]** Osnovnyye varianty skhemy elektromekhanicheskoy transmissii gibridnogo tipa i metodika opredeleniya parametrov yeye agregatov dlya voyennykh gusenichnykh mashin [The main options schemes hybrid electromechanical transmission type and method of determining the parameters of its units for military tracked vehicles]. // Aktualnyye problemy zashchity i bezopasnosti: Trudy semnadtsatoy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii RARAN (1-4 aprelya 2014 g.) T. 3. Bronetankovaya tekhnika i vooruzheniye., M.: RARAN, 2014. S. 111–122. (rus.)
7. **Usov O.A., Korolkov R.N.** Metod rascheta sredney skorosti i raskhoda topliva pri dvizhenii VGM po testovoy trasse. [Method of calculating the average speed and fuel consumption when driving a military tracked vehicle on the test track] // Aktualnyye problemy zashchity i bezopasnosti: Trudy shestdnadtsatoy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii RARAN (3-6 aprelya 2012 g.) T. 3. Bronetankovaya tekhnika i vooruzheniye., M: RARAN, 2012. S. 197–202. (rus.)
8. **Programma rascheta pokazateley funktsionirovaniya i dolgovechnosti uzlov elektromekhanicheskikh perevodach.** [Program for calculating performance indicators and durability electromechanical assemblies gear]. №035.08 PP / VNIITRansmash. 2014. (rus.)
9. **Gusev M.N., Beloutov G.S., Korol'kov R.N., Shirshov Y.I.** Transmissiya transportnoy mashiny. [Patent for the vehicle transmission] Patent RF, No.2521158. Prioritet 06.11.2012. (rus.)
10. **Usov O.A., Beloutov G.S., Gusev M.N. [i dr.]** Programma rascheta pokazateley poter moshchnosti v transmissiyakh transportnykh mashin. [The program of calculating power losses in the transmission of transport vehicles.] // Aktualnyye problemy zashchity i bezopasnosti: Trudy odinnadtsatoy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii RARAN (1-4 aprelya 2008 g.) T. 3. Bronetankovaya tekhnika i vooruzheniye., SPb: RARAN, 2008. S. 201–204. (rus.)
11. **Usov O.A., Loyko A.V., Beloutov G.S. [i dr.]** Matematicheskaya model dizelnogo dvigatelya dlya rascheta elektromekhanicheskoy transmissii transportnoy mashiny [A mathematical model of the diesel engine to calculate the electromechanical transmission transport vehicle]. // Aktualnyye problemy zashchity i bezopasnosti: Trudy semnadtsatoy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii RARAN (1-4 aprelya 2014 g.) T. 3. Bronetankovaya tekhnika i vooruzheniye., M: RARAN, 2014. S. 122–130. (rus.)
12. **Beloutov G.S., Korolkov R.N., Usov O.A.** Model rascheta raskhoda topliva dizelnogo dvigatelya na proizvolnom rezhime [Model to calculate the fuel consumption of the diesel engine on an arbitrary mode.] // Aktualnyye problemy zashchity i bezopasnosti: Trudy pyatnadtsatoy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii RARAN (3-6 aprelya 2012 g.) T. 3. Bronetankovaya tekhnika i vooruzheniye., M: RARAN, 2012. S. 197–202. (rus.)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**УСОВ Олег Александрович** — кандидат технических наук генеральный директор ОАО «ВНИИТрансмаш». 198323, Санкт-Петербург, ул. Заречная, д.2. E-mail: usov496@mail.ru

**ГУСЕВ Михаил Николаевич** — начальник НТЦ-35 ОАО «ВНИИТрансмаш». 198323, Санкт-Петербург, ул. Заречная, д.2. E-mail: M.Gusev@vniittransmash.ru

**ЛОЙКО Александр Владимирович** — инженер ОАО «ВНИИТрансмаш». 198323, Санкт-Петербург, ул. Заречная, д.2. E-mail: aleksandr.loyko@inbox.ru

**МАКАРОВ Алексей Сергеевич** — инженер ОАО «ВНИИТрансмаш». 198323, Санкт-Петербург, ул. Заречная, д.2. E-mail: gorodoshnik@bk.ru

#### AUTHORS

**USOV Oleg U.** — Public joint-stock company Russian Mobile Vehicle Engineering Institute. 2, Zarechnaya St., St. Petersburg, 198323. E-mail: usov496@mail.ru

**GUSEV Mikhail N.** — Public joint-stock company Russian Mobile Vehicle Engineering Institute. 2, Zarechnaya St., St. Petersburg, 198323. E-mail: M.Gusev@vniittransmash.ru

**LOYKO Aleksandr L.** — Public joint-stock company Russian Mobile Vehicle Engineering Institute. 2, Zarechnaya St., St. Petersburg, 198323. E-mail: aleksandr.loyko@inbox.ru

**MAKAROV Aleksei S.** — Public joint-stock company Russian Mobile Vehicle Engineering Institute. 2, Zarechnaya St., St. Petersburg, 198323. E-mail: gorodoshnik@bk.ru



DOI 10.5862/JEST.219.19

УДК 631.362.322

И.П. Попов, В.Г. Чумаков, А.Д. Терентьев

## РЕДУКЦИЯ МОЩНОСТИ ПРИВОДА РЕШЕТНЫХ СОРТИРОВАЛЬНЫХ МАШИН

I.P. Popov, V.G. Chumakov, A.D. Terentyev

### REDUCTION IN DRIVE POWER OF SCREEN GRADERS

Установлено, что в рабочем режиме часть сыпучего материала условно может считаться неподвижной относительно решетного стана и вносить вклад в инерционную нагрузку, а оставшаяся часть — подвижной и обеспечивать основную часть диссипативной нагрузки. С учетом инерционности и подвижности сыпучего материала произведен расчет инерционной и диссипативной мощностей, развиваемых приводом; получено, что инерционная мощность более чем в восемь раз превышает диссипативную. Показано, что применение кинематической схемы решетной машины со сдвигом фаз колебаний двух решетных станов относительно друг друга на четверть периода позволяет исключить потребление из сети электрической мощности, равной инерционной, и примерно в пять раз уменьшить неравномерность диссипативной мощности.

РЕШЕТНЫЙ СТАН; КОЛЕБАНИЯ; ИНЕРЦИОННАЯ НАГРУЗКА; ДИССИПАТИВНАЯ МОЩНОСТЬ; ПРИВОД.

The authors have established that in the operating mode some amount of the bulk material can be considered conditionally stationary against the sieve mill, and it can contribute to the inertial load. The rest of the bulk material remains movable and provides the main part of the dissipative load. Allowing for inertia and mobility of the bulk material, the authors calculated the inertial and dissipative power of the actuator, with the inertial power exceeding more than eight times the dissipative one. This paper shows that the use of the kinematic scheme for the screen grader with the shift of oscillation phases of two sieve mills against each other by a quarter of the oscillation period prevents the consumption of the electric power equal to the inertial one, and leads to five time reduction in irregularities of dissipative power.

SIEVE MILL; OSCILLATIONS; INERTIAL LOAD; DISSIPATIVE POWER; DRIVE.

#### Введение

Решетные сортировальные машины применяются во многих отраслях производства — в сельском хозяйстве, строительстве, горном деле, заготовительном производстве в машиностроении и т. д. При всех отличиях между ними, обусловленных особенностями сортируемого материала, они имеют основные общие конструктивные признаки — решетные станы, приводимые в движение шатунным приводом. Поэтому динамические и энергетические соотношения для решетных машин будут одинаковыми независимо от их назначения.

В работе исследуется динамика решетных машин безотносительно их принадлежности к какой-либо отрасли производства.

Характерной особенностью решетных сортировальных машин является потребность в значительной инерционной мощности, необходимой для сообщения массивным решетным станам колебаний с высокой для их массы частотой. Однако до сих пор основные производители решетных сортировальных машин рассматривали потребление инерционной мощности в качестве необходимых издержек и не считали это проблемой, имеющей возможные решения [1–6].

Буквально в последнее время в связи с разработкой колебательных систем, состоящих из однородных элементов [7–14], появилась возможность постановки вышеназванной проблемы и ее решения, вплоть до полной нейтрализации инерционной мощности.



Актуальность этой задачи обусловлена тем, что величина инерционной мощности почти на порядок превосходит диссипативную мощность, расходуемую собственно на сортировку сыпучего материала, и, таким образом, нейтрализация инерционной мощности приводит к существенному повышению энергоэффективности машины.

На рис. 1 показан фрагмент кинематической схемы решетной машины, реализующий колебательную систему, состоящую только из инертных элементов (решетные станы). В этой колебательной системе фазы колебаний решетных станов сдвинуты на  $\pi/2$ .

Энергообмен происходит следующим образом. В некоторый момент времени решетный стан 1 находится в крайнем правом положении, его кинетическая энергия равна нулю. В этот момент решетный стан 2 находится в среднем положении и движется влево с максимальной кинетической энергией. За счет инерции он приводит решетный стан 1 ускоряться влево, отдавая ему часть своей энергии. К моменту, когда решетный стан 2 достигнет крайнего левого положения, он передаст всю свою энергию решетному стану 1, который в среднем положении с максимальной скоростью будет двигаться влево. Теперь решетные станы меняются ролями. За счет инерции решетный стан 1 приводит решетный стан 2 ускоряться вправо, отдавая ему часть своей энергии. Когда решетный стан 1 достигнет крайнего левого положения, он передаст всю свою энергию решетному стану 2, который в среднем положении с максимальной скоростью будет двигаться вправо. Аналогичным образом будут происходить дальнейшие колебания.

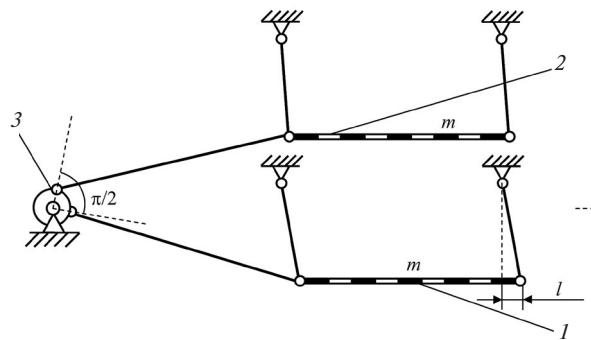


Рис. 1. Кинематическая схема сортировальной машины:

1, 2 — решетные станы; 3 — эксцентрики

При отсутствии потерь на трение колебания решетных станов будут незатухающими.

В [7–14] теоретически установлено, что условием возникновения свободных гармонических или почти гармонических колебаний в системах, состоящих только из инертных элементов, является сдвиг между фазами колебаний элементов на  $\pi/2$ . При этом элементы (решетные станы) обмениваются кинетической энергией между собой, а не с приводом машины, что позволяет полностью исключить потребление мощности, равной инерционной, от внешнего источника (питающая сеть). Очевидно, что при любом другом угле сдвига возможна лишь частичная нейтрализация инерционной мощности. В частности, при углах 0 и  $\pi$  нейтрализация не происходит.

**Цель исследования** заключается в расчетном обосновании применения кинематических схем решетных сортировальных машин со смещением эксцентриков относительно друг друга на угол  $\pi/2$ .

**Задачи исследования** состоят в определении инертности и подвижности сыпучего материала и его влиянии на инерционную и диссипативную нагрузку, расчете инерционной и диссипативной мощностей и сравнительном анализе кинематических схем с эксцентриками, сдвинутыми на  $\pi$  и  $\pi/2$ .

#### Учет инертности сыпучего материала

Для сыпучего материала можно условно определить два *предельных состояния*.

Первому предельному состоянию соответствует максимальная частота колебаний  $\omega_a$ , при которой материал остается неподвижным относительно решетного стана за счет статической силы трения. При этом он совершает колебания относительно корпуса машины с теми же частотой и амплитудой, что и решетный стан. Вся масса материала ( $m_z$ , кг), наряду с массой решетного стана, определяет развиваемую приводом инерционную мощность.

Второму предельному состоянию сыпучего материала соответствует минимальная частота  $\omega_z$ , при которой материал остается неподвижным относительно корпуса машины благодаря инерции. При этом он совершает колебания относительно решетного стана с теми же частотой и амплитудой. Вся масса материала влияет на развиваемую приводом диссипативную мощность. Очевидно, что  $\omega_a < \omega_z$ .



При частоте  $\omega_a < \omega < \omega_z$  часть  $k_v$  ( $k_v < 1$ ) материала условно может считаться неподвижной относительно решетного стана, а оставшаяся часть  $(1 - k_v)$  — подвижной. Значение  $k_v$  можно определить опытным путем.

Суммарная масса системы, совершающей колебания, равна

$$m_v = m + k_v m_z. \quad (1)$$

### Инерционная мощность для одного решетного стана

В связи с тем, что амплитуда колебаний решетного стана несоизмеримо меньше длины шатуна, можно считать, что колебания происходят по гармоническому закону

$$x = l \sin \omega t,$$

где  $x$  — координата решетного стана, м.;  $l$  — амплитуда колебаний, м.;  $\omega$  — циклическая частота колебаний, рад/с.

Скорость решетного стана равна

$$v = \dot{x} = l\omega \cos \omega t.$$

Выражение для инерционной силы, обусловленной массой  $m_v$ , кг, системы, совершающей колебания, имеет вид

$$f = m_v \ddot{x} = -l m_v \omega^2 \sin \omega t.$$

Инерционная мощность, обусловленная массой одного решетного стана с сыпучим материалом, определяется выражением

$$q = f v = -\frac{l^2 m_v \omega^3}{2} \sin 2\omega t. \quad (2)$$

Часть этой мощности, а именно

$$q_z = -\frac{l^2 k_v m_z \omega^3}{2} \sin 2\omega t,$$

расходуется на колебания сыпучего материала.

На рис. 2 представлены временные графики перемещения, скорости, инерционной силы и инерционной мощности.

### Диссипативная мощность для одного решетного стана

Масса сыпучего материала, неподвижного относительно корпуса машины, равна

$$(1 - k_v) m_z.$$

Сила воздействия этой части материала на решетку описывается формулой

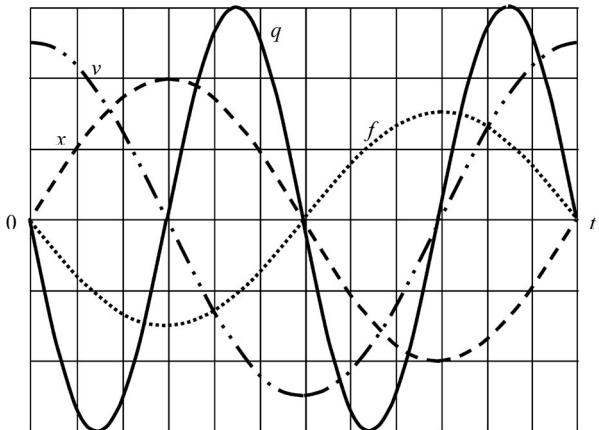


Рис. 2. Инерционная нагрузка:

$x$  — координата решетного стана;  $v$  — скорость решетного стана;  $f$  — сила, действующая на решетный стан;  $q$  — сообщаемая решетному стану мощность;  $t$  — время

$$N = (1 - k_v) m_z g,$$

где  $g$  — ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ .

Сила трения

$$F = kN \left( -\frac{v}{v} \right) = k(1 - k_v) m_z g \left( -\frac{v}{v} \right),$$

где  $k$  — динамический коэффициент трения, определяемый опытным путем, направлен в противоположную скорость.

Диссипативная мощность, рассеиваемая в сыпучем материале, определяется выражением

$$p_z = -F \cdot v = k(1 - k_v) m_z g / \omega |\cos \omega t|. \quad (3)$$

На рис. 3 представлены графики скорости, силы трения и диссипативной мощности, рассеиваемой в сыпучем материале.

Площадь, ограниченная графиком мощности и осью абсцисс, (затененная область) равна диссипативной энергии — теплу, выделяемому в сыпучем материале.

### Диссипативная мощность решетной машины с эксцентриками, сдвинутыми относительно друг друга на $\pi$

Сдвиг на  $\pi$  используется для нейтрализации динамических нагрузок на корпус машины. При этом диссипативная мощность равна

$$p_{z\pi} = 2p_z = 2k(1 - k_v) m_z g / \omega |\cos \omega t|.$$

Пиковые значения мощности составляют

$$P_{z\pi\max} = 2k(1 - k_v) m_z g / \omega. \quad (4)$$

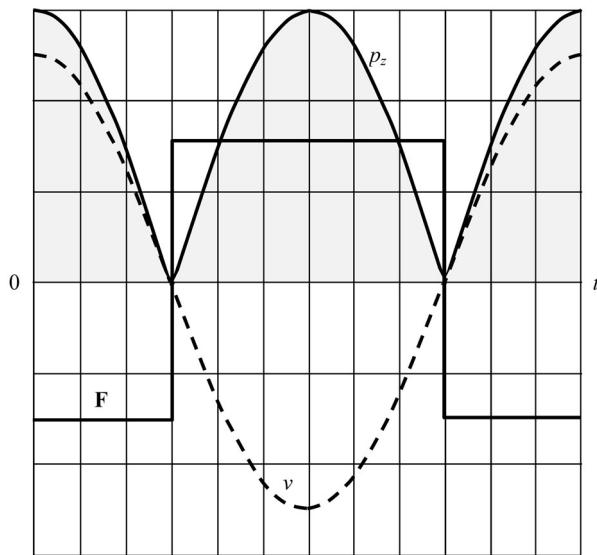


Рис. 3. Диссипативная нагрузка:  $v$  — скорость решетного стана;  $F$  — сила трения;  $P_z$  — диссипативная мощность;  $t$  — время

На рис. 4 представлены графики мощности, соответствующие этому случаю.

#### Диссипативная мощность машины с эксцентриками, сдвинутыми на $\pi/2$

Эта мощность равна

$$P_{z\pi/2} = k(1 - k_v)m_z g l \omega (|\cos \omega t| + |\sin \omega t|).$$

Пиковые значения мощности составляют

$$P_{z(\pi/2)\max} = \sqrt{2}k(1 - k_v)m_z g l \omega. \quad (5)$$

Графики мощности для данного варианта машины представлены на рис. 5.

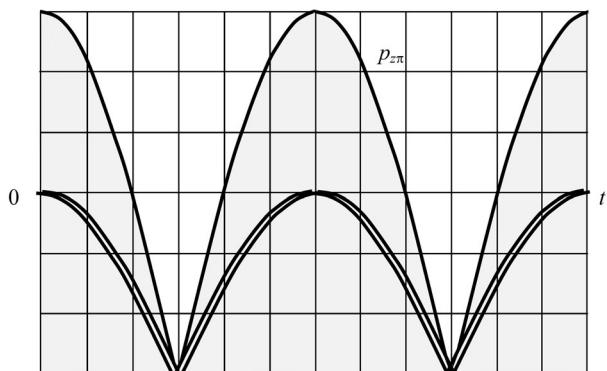


Рис. 4. Диссипативная мощность машины с эксцентриками, сдвинутыми на  $\pi$

#### Сравнение коэффициентов неравномерности

Нагружение привода и питающей сети диссипативной нагрузкой у машины с эксцентриками, сдвинутыми на  $\pi/2$ , существенно равномернее, а ее пиковая мощность в  $\sqrt{2}$  раз меньше (почти на 30 %), чем у машины с эксцентриками, сдвинутыми на  $\pi$ , что следует из отношения (4) к (5).

Коэффициент неравномерности диссипативной мощности решетной машины с эксцентриками, сдвинутыми относительно друг друга на  $\pi$ , по аналогии с [12] равен

$$\delta_\pi = \frac{P_{z\pi\max} - P_{z\pi\min}}{P_{z\pi\text{mid}}} =$$

$$= \frac{P_{z\pi\max} - P_{z\pi\min}}{(P_{z\pi\max} + P_{z\pi\min})/2} = 2,$$

поскольку  $P_{z\pi\min} = 0$ .

Для машины с эксцентриками, сдвинутыми на  $\pi/2$ , соответственно будет

$$\delta_{\pi/2} = \frac{P_{z(\pi/2)\max} - P_{z(\pi/2)\min}}{[P_{z(\pi/2)\max} + P_{z(\pi/2)\min}]/2} \approx 0,343.$$

Отношение коэффициентов неравномерности составляет

$$\frac{\delta_\pi}{\delta_{\pi/2}} \approx 5,8.$$

В связи с тем, что для модуля гармонической функции справедливо

$$P_{z\pi\text{mid}} \neq (P_{z\pi\max} + P_{z\pi\min})/2,$$

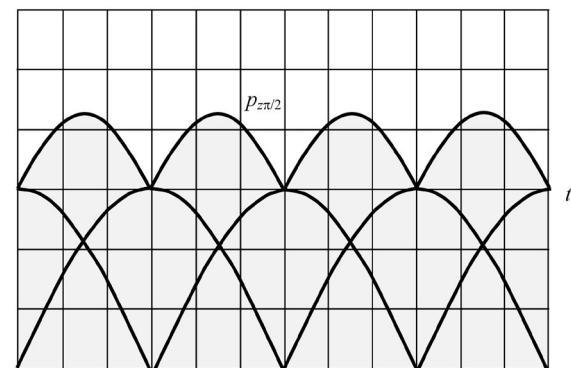


Рис. 5. Диссипативная мощность машины с эксцентриками, сдвинутыми на  $\pi/2$



формула коэффициента неравномерности диссипативной мощности может быть скорректирована:

$$P_{z\pi\text{mid}} = P_{z\pi\text{max}} \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \sin \varphi d\varphi = \frac{2}{\pi} P_{z\pi\text{max}}; \quad (6)$$

$$\delta_\pi = \frac{\pi}{2}.$$

$$P_{z(\pi/2)\text{min}} = \frac{P_{z\pi\text{max}}}{2};$$

$$P_{z(\pi/2)\text{mid}} = \frac{P_{z\pi\text{max}}}{2} + \frac{2}{\pi} \left[ P_{z(\pi/2)\text{max}} - \frac{P_{z\pi\text{max}}}{2} \right] =$$

$$= P_{z\pi\text{max}} \frac{\sqrt{2}\pi + 4 - 2\sqrt{2}}{2\sqrt{2}\pi};$$

$$\delta_{\pi/2} = \frac{P_{z(\pi/2)\text{max}} - P_{z(\pi/2)\text{min}}}{P_{z(\pi/2)\text{mid}}} \approx 0,328;$$

$$\frac{\delta_\pi}{\delta_{\pi/2}} = \frac{\pi}{2} \frac{1}{0,328} \approx 4,8.$$

Таким образом, корректировка формулы коэффициента неравномерности диссипативной мощности достаточно существенна. При этом последнее значение является предпочтительным.

**Пример.** Пусть  $l = 7,5 \times 10^{-3}$  м;  $m = 80$  кг;  $m_z = 40$  кг;  $k_v = 0,3$ ;  $n = 8$  с<sup>-1</sup> ( $\omega = 2\pi n$ );  $k = 0,6$ . Для нейтрализации динамических нагрузок на корпус сортировальной машины используются четыре решетных стана ( $i = 4$ ). Эти данные позволяют рассчитать мощность машины.

Суммарная инерционная мощность машины с учетом (2) и (1) равна

$$Q_\Sigma = \frac{il^2(m + k_v m_z) \omega^3}{2} =$$

$$= \frac{4(7,5)^2 10^{-6} (80 + 0,3 \cdot 40) 2^3 \pi^3 8^3}{2} \approx 1314 \text{ Вт.}$$

В электротехнике аналогом инерционной мощности является реактивная мощность.

Суммарная диссипативная мощность, расходуемая в сыпучем материале, с учетом (3) и (6) равна

$$P_\Sigma = i \frac{2}{\pi} k (1 - k_v) m_z g l \omega =$$

$$= 4 \frac{2}{\pi} 0,6 (1 - 0,3) 40 \cdot 9,8 \cdot 7,5 \cdot 10^{-3} \cdot 2\pi 8 \approx 158 \text{ Вт.}$$

В электротехнике аналогом диссипативной мощности является активная мощность. В соответствии с этими аналогиями полная мощность машины равна

$$S = \sqrt{Q_\Sigma^2 + P_\Sigma^2} = 1323 \text{ Вт.}$$

Снижение полной мощности при нейтрализации инерционной мощности составляет

$$\Delta S = S - P_\Sigma = 1165 \text{ Вт.}$$

Из примера следует, что инерционная мощность в 8,3 раза превышает диссипативную мощность, расходуемую собственно на сортировку сыпучего материала, и ее нейтрализация существенно повышает энергоэффективность машины.

## Выводы

Применение кинематической схемы решетной машины со смещением эксцентриков относительно друг друга на угол  $\pi/2$  позволяет исключить потребление из сети электрической мощности, равной инерционной мощности  $Q_\Sigma$ , и в 4,8 раза уменьшить коэффициент неравномерности диссипативной мощности.

В установившемся режиме для данных, принятых в примере, мощность привода может быть сокращена на 88 % по сравнению со схемами без нейтрализации инерционной мощности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. PETKUS Gigant K-531, Petkus K-527A, Petkus K-547A, PETKUS Super K-541, PETKUS U 12 2.4/U 15 2.4, PETKUS V 12 3.6/V 15 3.6, PETKUS A 09/A 12, PETKUS M 12 3.6/M 15 3.6 [электрон. ресурс] URL: [http://zol.ru/technika/catalog/index.php/Mashini\\_dlya\\_ochistki\\_zerna/](http://zol.ru/technika/catalog/index.php/Mashini_dlya_ochistki_zerna/) (дата обращения: 20.05.2015).
2. Sortiermaschine [электрон. ресурс] URL: <http://autoline-eu.ru/s/selhозtehnika-sortirovochnaya-mashina-iz-germanii--c12tk2430cntDE.html/> (дата обращения: 20.05.2015).
3. VIBAM, OMEGA [электрон. ресурс] URL: <http://selmashservis.ru/pages/damas/> (дата обращения: 20.05.2015).



4. JUBUS P-JS-8/2, JUBUS P-JS-16/2 [электрон. ресурс] URL: <http://apm36.ru/oborudovanie-ochistka-zerna/> (дата обращения: 20.05.2015).
5. MDS 32 [электрон. ресурс] URL: <http://autoline-eu.ru/sf/selhозtehnika-zernoochistitel-MDS-32--15040300461473378900.html> (дата обращения: 20.05.2015).
6. TAS Schmidt-Seeger [электрон. ресурс] URL: <http://rosagro2010.ru/universalnyy-aspirator-tas/> (дата обращения: 20.05.2015).
7. **Popov I.P.** Free harmonic oscillations in systems with homogeneous elements // *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2012. Vol. 76. Iss. 4. P. 393–395.
8. **Popov I.P.** Колебательные системы, состоящие только из инертных или только упругих элементов, и возникновение в них свободных гармонических колебаний // Вестник Томского государственного университета. Серия: Математика и механика. 2013. № 1(21). С. 95–103.
9. **Popov I.P.** Колебательные системы с однородными элементами // *Инженерная физика*. 2013. № 3. С. 52–56.
10. **Popov I.P., Шамарин Е.О.** Свободные механические гармонические колебания со смещенными фазами // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2013. № 2(29). С. 39–48.
11. **Popov I.P.** Механические колебательные системы, состоящие только из однородных элементов, и возникновение в них свободных гармонических колебаний // *Омский научный вестник. Приборы, машины и технологии*. 2012. № 3(113). С. 177–179.
12. **Popov I.P., Чумаков В.Г., Чикун А.В.** Самонейтрализация механических инертных реактансов основной гармоники в решетных станах // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2014. № 4(28). С. 170–174.
13. **Popov I.P.** Свободные механические гармонические колебания в системах с кривошипно-кулисными механизмами // Вестник Курганского государственного университета. Технические науки. 2012. Вып. 7. №2(24). С. 14–16.
14. **Popov I.P., Чумаков В.Г., Чикун А.В., Попов Д.П., Баитов С.Г.** Одно из направлений модернизации решетных станов зерноочистительных машин // *Зауральский научный вестник*. 2014. № 2(6). С. 30–32.
15. **Костыркин М.И.** Теория механизмов и машин. Курск: Изд-во Курского политехнического института, 1969. 714 с.

## REFERENCES

1. PETKUS Gigant K-531, Petkus K-527A, Petkus K-547A, PETKUS Super K-541, PETKUS U 12 2.4/U 15 2.4, PETKUS V 12 3.6/V 15 3.6, PETKUS A 09/A 12, PETKUS M 12 3.6/M 15 3.6, Available: [http://zol.ru/technika/catalog/index.php/Mashini\\_dlya\\_ochistki\\_zerna/](http://zol.ru/technika/catalog/index.php/Mashini_dlya_ochistki_zerna/) (Accessed 20.05.2015).
2. Sortiermaschine, Available: <http://autoline-eu.ru/sf/selhозtehnika-sortirovochnaya-mashina-iz-germani-c12tk2430cntDE.html> (Accessed 20.05.2015).
3. VIBAM, OMEGA, Available: <http://selmashservis.ru/pages/damas/> (Accessed 20.05.2015).
4. JUBUS P-JS-8/2, JUBUS P-JS-16/2, Available: <http://apm36.ru/oborudovanie-ochistka-zerna/> (Accessed 20.05.2015).
5. MDS 32, Available: <http://autoline-eu.ru/sf/selhозtehnika-zernoochistitel-MDS-32--15040300461473378900.html> (Accessed 20.05.2015).
6. TAS Schmidt-Seeger, Available: <http://rosagro2010.ru/universalnyy-aspirator-tas/> (Accessed 20.05.2015).
7. **Popov I.P.** Free harmonic oscillations in systems with homogeneous elements. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2012. Vol. 76. Iss. 4. P. 393–395.
8. **Popov I.P.** Kolebatel'nye sistemy, sostojashchie tol'ko iz inertnyh ili tol'ko uprugih jelementov, i voiniknovenie v nich svobodnyh garmonicheskikh kolebanij. [Oscillatory system consisting only of inert or only elastic elements, and the emergence of them free of harmonic oscillations]. *Vestnik Tihookeanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2013. № 2(29). S. 39–48. (rus.)
9. **Popov I.P.** Kolebatel'nye sistemy s odnorodnymi jelementami. [Oscillatory systems with homogeneous elements]. *Inzhenernaja fizika*. 2013. № 3. S. 52–56/ (rus.)
10. **Popov I.P., Shamarin E.O.** Svobodnye mehanicheskie garmonicheskie kolebanija so smeshhennymi fazami. [Free mechanical harmonic oscillations with staggered phases]. *Vestnik Tihookeanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2013. № 2(29). S. 39–48. (rus.)
11. **Popov I.P.** Mehanicheskie kolebatel'nye sistemy, sostojashchie tol'ko iz odnorodnyh jelementov, i voiniknovenie v nich svobodnyh garmonicheskikh kolebanij. [Mechanical vibration system consisting only of homogeneous elements, and the emergence of them free of harmonic oscillations]. *Omskij nauchnyj vestnik. Pribory, mashiny i tehnologii*. 2012. № 3(113). S. 177–179. (rus.)
12. **Popov I.P., Chumakov V.G., Chikun A.V.** Samonejtralizacija mehanicheskikh inertnyh reaktansov osnovnoj garmoniki v reshetnyh stanah. [Self-neutralization inert mechanical reactance of the fundamental harmonic in reshetnyh]. *Vestnik Ul'janovskoj gosudarstvennoj sel'skohozjajstvennoj akademii*. 2014. № 4(28). S. 170–174. (rus.)
13. **Popov I.P.** Svobodnye mehanicheskie garmonicheskie kolebanija v sistemah s krivoshipno-kulisnymi mehanizmami. [Free mechanical harmonic oscillations in systems with a crank-rocker mechanism]. *Vestnik Kur-*



ganskogo gosudarstvennogo universiteta. *Tehnicheskie nauki*. 2012. Vyp. 7. №2(24). S. 14–16. (rus.)

14. **Popov I.P., Chumakov V.G., Chikun A.V., Popov D.P., Baitov S.G.** Odno iz napravlenij modernizacii reshetnyh stanov zernoochistitel'nyh mashin. [One of the areas

of modernization reshetnyh grain cleaners]. *Zaural'skij nauchnyj vestnik*. 2014. № 2(6). S. 30–32. (rus.)

15. **Kostyrkin M.I.** Teorija mehanizmov i mashin. [Theory of mechanisms and machines] Kursk: Izd-vo Kurskogo politehnicheskogo instituta, 1969. 714 p. (rus.)

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ПОПОВ Игорь Павлович** — руководитель проекта Центра высоких технологий. 640015, Курган, ул Парижской Коммуны, 33. E-mail: ip.popow@yandex.ru

**ЧУМАКОВ Владимир Геннадьевич** — доктор технических наук доцент, научный консультант Центра высоких технологий. 640015, Курган, ул. Парижской Коммуны, 33. E-mail: vg.chumakov@yandex.ru

**ТЕРЕНТЬЕВ Александр Дмитриевич** — инженер Центра высоких технологий. 640015, Курган, ул. Парижской Коммуны, 33. E-mail: ad.terentev@yandex.ru

### AUTHORS

**POPOV Igor P.** — Center of High Technology. 640015, Kurgan, st. Paris Commune, 33. E-mail: ip.popow@yandex.ru

**CHUMAKOV Vladimir G.** — Center of High Technology. 640015, Kurgan, st Paris Commune, 33. E-mail: vg.chumakov@yandex.ru

**TERENTYEV Aleksandr D.** — Center of High Technology. 640015, Kurgan, st Paris Commune. E-mail: ad.terentev@yandex.ru

DOI 10.5862/JEST.219.20

УДК 621.793:620.199:001.18

*B.B. Носов, С.В. Номинас, Н.А. Зеленский*

## **ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ СОСУДОВ ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЯВЛЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

*V.V. Nosov, S.V. Nominas, N.A. Zelensky*

### **PRESSURE VESSEL STRENGTH ASSESSMENT BASED ON ACOUSTIC EMISSION PARAMETERS**

На примере производственных испытаний абсорбера очистки сероводорода и лабораторных испытаний колец, моделирующих корпуса подводных аппаратов, оптимизируется расчет и анализируется диагностическая ценность вытекающих из микромеханической модели акустической эмиссии гетерогенных материалов, связанных с ресурсом акусто-эмиссионных показателей прочности. При рассмотрении метрологических аспектов такого определения используется диагностическая ценность временных зависимостей параметров акустической эмиссии и их статистических распределений. Показана связь между диагностическими параметрами и ресурсом. Оптимизируется расчет диагностического параметра путем выбора информативного первичного параметра акустической эмиссии. Оптимизация осуществляется в информационной форме. Показана устойчивость рассмотренных диагностических параметров к дестабилизирующему факторам.

**АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ; ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ; СОСУДЫ ДАВЛЕНИЯ; МИКРОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ; ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ.**

Exemplifying production tests of a hydrogen sulfide purification absorber and laboratory tests of rings which simulate the case of underwater vehicles, the authors optimized calculation and analyzed the diagnostic value of heterogeneous materials related to the resource of the acoustic emission strength, which resulted from the acoustic emission micromechanical model. Considering metrological aspects of this definition, the researchers used the diagnostic value of the acoustic emission time dependence parameters and their statistical distributions. The paper shows the relationship between diagnostic parameters and the resource, the optimized calculation of the diagnostic parameter by selecting an informative acoustic emission primary parameter. This optimization is used in the information form. The paper presents the resistance of the considered diagnostic parameters to destabilizing factors.

**ACOUSTIC EMISSION; STRENGTH ASSESSMENT; PRESSURE VESSELS; MICROMECHANICAL MODEL; EXPERIMENTAL DATA.**

Одной из главных проблем эксплуатации сварных соединений сосудов давления является слабая прогнозируемость их поведения, что привело к необходимости разработки методов диагностирования состояния. Базой этого должно служить развитие экспериментальных методов фиксации повреждений, прогнозирование накопления повреждений, развитие положений механики разрушения, использование результа-

тов микроструктурных исследований и физики прочности. В качестве одного из таких методов был предложен метод оценки ресурса технических объектов на основе использования явления акустической эмиссии (АЭ) и микромеханической модели временных зависимостей ее параметров [1–9]. Применение метода акустической эмиссии для оценки состояния опасных объектов обязано инструкциями Ростехнадзора



(в частности, ПБ 03–593–03, ГОСТ Р 55045–2012, ГОСТ 27655–88, РД 03–299–99 и др.).

**Цель данной работы** — апробация и корректировка методики АЭ для оценки прочности применительно к решению задач диагностики состояния сосудов давления.

### Методика оценки ресурса

Предложенная модель АЭ детерминированно описывает процесс накопления повреждений в структурно неоднородном материале в условиях статистического изменения звучащего объема на первой стадии разрушения и связь вида распределений параметров АЭ с напряжениями возле трещины на второй стадии разрушения. Модель имеет иерархическую структуру (рис. 1), объединяет физический и статистический подходы к исследованию и использованию явления АЭ. Определив параметры этой модели, можно рассчитать различные показатели прочности исследуемого объекта и его ресурса. При рассмотрении метрологических аспектов такого определения учитывается вид временных зависимостей параметров АЭ и их статистических распределений. Здесь  $\xi$  — информативный параметр АЭ (число импульсов, суммарная АЭ, суммарная амплитуда АЭ);  $k_{AE}$  — акусто-эмиссионный коэффициент («звукящий» объем);  $C(t)$  — зависимость концентрации микротрещин от времени  $t$ ;  $\Psi(\omega)$  — функция плотности распределения

параметра  $\omega = \gamma\sigma/KT$  (параметр прочностного состояния структурного элемента материала) по структурным элементам контролируемого объема  $V$ ;  $\Theta = \tau_0 \exp[U_0/(KT) - \omega]$  — время разрушения структурного элемента;  $\tau_0$  — период атомных колебаний (относительно стабильная величина);  $T$  — абсолютная температура;  $\mu$  — нижняя граница изменения величины  $\omega$ ;  $\Phi(\Delta t, f, U)$  — плотность вероятности распределения сигналов АЭ по интервалам  $\Delta t$  (паузы) между ними, амплитуде  $U$  и частоте  $f$ ;  $\Delta\omega$  — диапазон рассеяния параметра  $\omega$ ;  $U_0$  — энергия активации процесса разрушения (относительно стабильная величина);  $C_0$  — начальная концентрация структурных элементов в материале до разрушения;  $\gamma$  — структурно-чувствительный параметр;  $\sigma$  — растягивающее напряжение;  $K$  — постоянная Больцмана.

Входящая в микромеханическую модель (рис. 1) параметров АЭ зависимость концентрации микротрещин от времени —  $C(t)$  — при однородном разрушении представима в виде

$$C(t) = C_0 KT \exp[(\gamma\dot{\sigma}t - U_0)/(KT)]/(\tau_0\gamma\dot{\sigma});$$

$$\ln(C(t)) = \ln\left(\frac{C_0 KT}{\tau_0 \gamma\dot{\sigma}}\right) + ((\gamma\dot{\sigma}t - U_0)/(KT));$$

$$\ln\left(\frac{C(t)\tau_0 \gamma\dot{\sigma}}{C_0 KT}\right) = (\gamma\dot{\sigma}t - U_0)/(KT);$$



$$\xi(t) = V \int_{\Delta t, f, U} \int \int \Phi(\Delta t, f, U) dU df d\Delta t C_0 \overbrace{\int_{\mu}^{\mu + \Delta\omega} \Psi\left(\omega \left\{ 1 - \exp\left[-\int_0^t ds / \Theta(U_0, \omega(s))\right]\right\}\right) d\omega}^{C(t)}$$

Рис. 1. Структура и вид микромеханической модели АЭ

$$KT \ln \left( \frac{C(t)\tau_0\gamma\dot{\sigma}}{C_0KT} \right) = \gamma\dot{\sigma}t - U_0;$$

$$t = \frac{U_0 - KT \ln \left( \frac{C_0KT}{C^*\tau_0\gamma\dot{\sigma}} \right)}{\gamma\dot{\sigma}}. \quad (1)$$

Поскольку  $C(t^*) = C^*$  и  $C^* = 0,01C_0$ , где  $C^*$  — критическая концентрация микротрещин, то время до разрушения  $\tau^*$  и предел прочности  $\sigma^*$  определяются уравнениями

$$\tau^* = \frac{U_0 - KT \ln \left( \frac{C_0KT}{C^*\tau_0\gamma\dot{\sigma}} \right)}{\gamma\dot{\sigma}};$$

$$\sigma^* = \tau^* \dot{\sigma};$$

$$\sigma^* = \frac{U_0 - KT \ln \left( \frac{C_0KT}{C^*\tau_0\gamma\dot{\sigma}} \right)}{\gamma} =$$

$$= \frac{U_0 - KT \ln \left( \frac{KT}{0,01\tau_0\gamma\dot{\sigma}} \right)}{\gamma}. \quad (2)$$

Участки временных зависимостей числа  $N_\Sigma$  импульсов АЭ на этапе однородного разрушения при равномерном нагружении объекта с постоянной скоростью  $\dot{\sigma}$  роста напряжения  $\sigma$  описываются выражением

$$N_\Sigma(t) = k_{AE}C_0KT \times$$

$$\times \exp \left[ (\gamma\dot{\sigma}t - U_0)/(KT) \right] / (\tau_0\gamma\dot{\sigma}). \quad (3)$$

Тогда логарифм числа импульсов равен

$$\ln(N_\Sigma(t)) = \ln(k_{AE}C_0KT) +$$

$$+ ((\gamma\dot{\sigma}t - U_0)/(KT)) - \ln(\tau_0\gamma\dot{\sigma}). \quad (4)$$

Откуда следует производная по времени  $t$ :

$$\frac{d}{dt} \ln(N_\Sigma(t)) = \frac{\gamma\dot{\sigma}}{KT} = X_{AE}. \quad (5)$$

Производная от  $\ln N_\Sigma(t)$  по напряжениям  $\sigma$  равна

$$Y_{AE} = \gamma/KT. \quad (6)$$

Из (1–6) видно, что диагностические параметры  $X_{AE}$  и  $Y_{AE}$  связаны со временем до разрушения и имеют смысл параметров прочностно-

го состояния. Также видно, что  $N_\Sigma(t)$  в (3) имеет вид  $\xi(t)$ , т. е. является его частным случаем.

Ресурсы контролируемых зон определяются по следующим формулам:

исходный ресурс (с момента образования дефекта)

$$N_c = N_B/\exp(W_{AE}), \quad (7)$$

где  $W_{AE} = Y_{AE} \cdot \sigma = k Y_{AE}$ ,  $F_{\text{раб}} = d \ln \xi / d K_h \approx \omega$ ;  $K_h = F_i / F_{\text{раб}}$  — коэффициент нагрузки;  $F_i$ ,  $F_{\text{раб}}$  — диагностическая и рабочая нагрузки;  $N_B$  — характеристический параметр материала и вида сварного соединения, температуры и частоты его нагружения. Величину  $N_B$  определяют по формуле

$$N_B = \exp(\ln N_G + \sigma_R Y_R), \quad (8)$$

где  $N_G$  — базовое число циклов, соответствующих перегибу кривой усталости ( $2 \cdot 10^6$ );  $\sigma_R$  — предел выносливости при заданном коэффициенте асимметрии  $R$  цикла рабочих напряжений; при отсутствии данных принимаем  $R = -1$  (двуфазные ферритно-мартенситные стали удовлетворительно свариваются методом точечной сварки). Предел выносливости при знакопеременном изгибе составляет для сварного шва и основного металла ( $\sigma^* = 550$  МПа) соответственно 317 и 350 МПа, т. е. 50 и 60 % от  $\sigma^*$  основного металла [10];  $Y_R$  — угловой коэффициент кривой усталости, представленной в полулогарифмических координатах (для стали 09Г2С равен  $0,035$ – $0,046$  МПа $^{-1}$ ). По кривой усталости для стали 09Г2С также находим  $N_B = 10^{10}/1,58$ .

Параметр  $N_B$  оказывается универсальной постоянной, поскольку выражается через относительно устойчивые величины

$$N_B = \tau_0/\omega_p \exp[U_0/(KT)],$$

где  $\omega_p$  — период циклического нагружения;  
минимальный остаточный ресурс

$$N_{\text{ост}} = N_B/\exp W_{AE} - N_{\text{пр}}, \quad (9)$$

где  $N_{\text{пр}}$  — фактическое число циклов предварительного нагружения.

Знание величин разрушающего  $\sigma^*$  и рабочего  $\sigma_{\text{раб}}$  напряжений позволяет рассчитать коэффициент запаса статической прочности

$$[S]_{\text{ст}} = \sigma^*/\sigma_{\text{раб}}. \quad (10)$$

## Производственные испытания

Рассмотрим результаты АЭ-контроля прочности абсорбера очистки сероводорода К-2. На колонну, состоящую из восьми поясов сваренных встык листов были установлены 33 датчика АЭ, с помощью которых снимались значения первичных параметров АЭ (количество и время регистрации импульса, его амплитуда и количество выбросов в каждом импульсе). Набольшее количество датчиков было установлено на самом потенциально опасном нижнем поясе (№8 на рис. 2).

Обработке подвергались две группы результатов регистрации сигналов АЭ, отличающиеся признаками отбраковки шумовых сигналов (полный и сокращенный наборы АЭ-сигналов). В первой группе опытов отбрасывались низкоамплитудные сигналы, а во второй из рассмотрения были исключены сигналы со слишком большим количеством выбросов. С целью нахождения оптимального метода отбраковки по обеим группам результатов испытаний построены графики зависимости натурального логарифма информативного параметра АЭ  $\xi$  от времени (рис. 3, а). В качестве информативных параметров рассматривались количество сигналов, амплитуда сигналов, количество выбросов, произведения количества выбросов на амплитуду сигнала. По графикам были определены параметры  $X_{AE}$  и  $Y_{AE}$  как отношения приращения логарифма параметра к приращению времени (для  $X_{AE}$ ) или напряжений (для  $Y_{AE}$ ), рассчитанных по формуле Лапласа при известном давлении в абсорбере (рис. 3, б). Нагрузка объекта контроля производилась в соответствии с инструкциями, предусматривающими равномерное нагружение сосуда до рабочей нагрузки — давления 50 атм.

При неявных результатах диагностирования метод АЭ рекомендуется использовать совместно с другими методами неразрушающего контроля, в частности ультразвуковым (УЗК, см. рис. 2). При этом информативным УЗК-параметром степени опасности дефекта выступает его максимальный эквивалентный размер (площадь расслоения), величина которого не должна превышать некоторое допустимое значение. Поэтому установление связи между УЗК-и АЭ-параметрами диагностически представляется большой практический интерес.

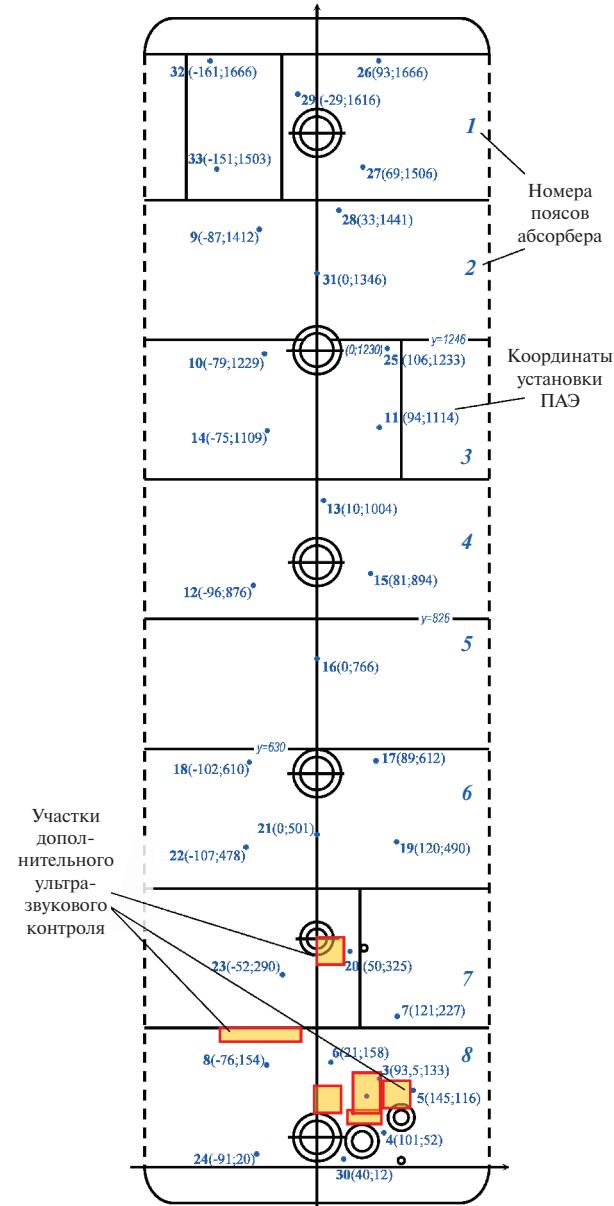


Рис. 2. Координаты расположения ПАЭ, номера поясов колонны и расположения участков дополнительного ультразвукового контроля К-2

В результате обработки первичной АЭ-информации, были определены параметры  $X_{AE}$  и  $Y_{AE}$  для каждого датчика; данные по каждому датчику сгруппированы по поясам, после чего определены ресурс, коэффициенты запаса прочности каждого пояса, коэффициенты корреляции их значений с площадью расслоения, выявленной с помощью УЗК, и номером пояса, коррелирующим с ресурсом (табл. 1, 2).

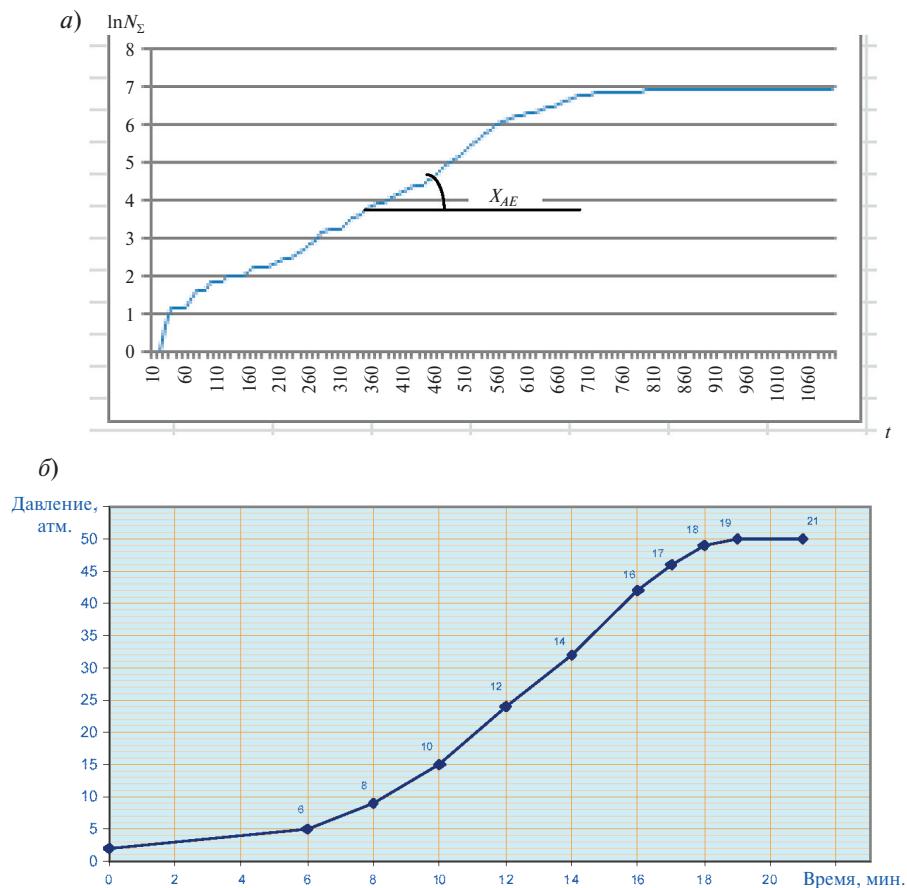


Рис. 3. Типичный вид временной зависимости логарифма числа импульсов АЭ одного из каналов (а) и график нагрузки (б) абсорбера очистки сероводорода

Таблица 1  
Корреляция основных параметров контроля с номером пояса

Параметр, по которому определяется $X_{AE}$	$N_{cp}$	$X_{AE cp}, \text{с}^{-1}$	$X_{AE \max}, \text{с}^{-1}$	Минимальный коэффициент запаса статической прочности	Остаточный ресурс максимальный	Остаточный ресурс минимальный
<i>Полный набор сигналов АЭ</i>						
Количество импульсов	0,893	0,984	0,909	-0,85	-0,955	-0,955
Суммарная амплитуда сигналов	0,893	0,967	0,942	-0,815	-0,964	-0,951
Количество выбросов	0,893	0,752	0,969	-0,597	-0,837	-0,834
Произведение количества выбросов на амплитуду сигнала	0,893	0,736	0,646	-0,602	-0,845	-0,845
<i>Сокращенный набор сигналов АЭ</i>						
Количество импульсов	0,889	0,973	0,511	-0,604	-0,664	-0,662
Суммарная амплитуда сигналов	0,889	0,442	-0,233	-0,575	-0,331	-0,33



Таблица 2

**Корреляция площади расслоения с параметром  $X_{AE}$  и суммарным количеством импульсов  $N_{\text{сумм}}$**

Параметр, по которому определяется $X_{AE}$	$A - X_{AE}$	$A - N_{\text{сумм}}$
<i>Полный набор сигналов АЭ</i>		
Количество импульсов	0,842	0,621
Суммарная амплитуда сигналов	0,85	0,621
Количество выбросов	0,851	0,621
Произведение количества выбросов на амплитуду сигнала	0,851	0,621
<i>Сокращенный набор сигналов АЭ</i>		
Количество импульсов	0,839	0,793
Суммарная амплитуда сигналов	0,823	0,793

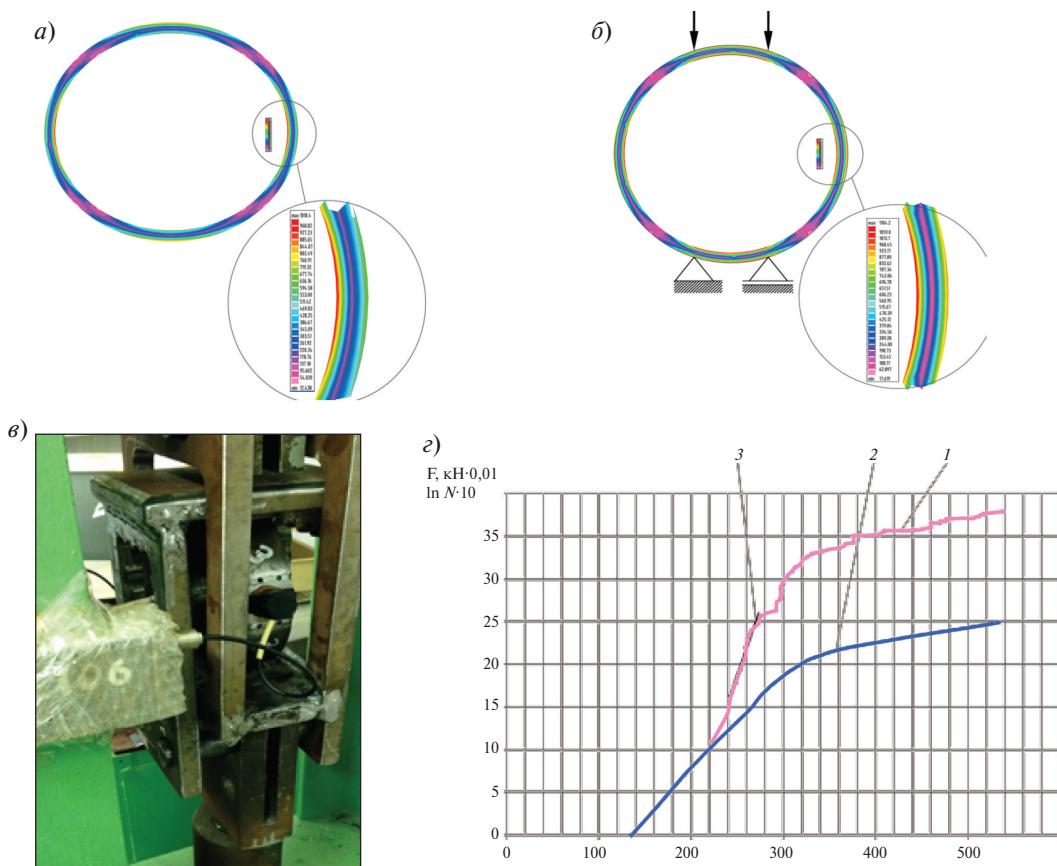


Рис. 4. Результаты исследования сжимаемой оболочки:

распределение напряжений в оболочке под действием гидростатической нагрузки (а); под действием сил, распределенных по кольцу (б); в — нагружающее устройство с захватами во время проведения экспериментов; г — зависимость логарифма числа импульсов (1), нагрузки (2) от времени и участок упругого кинетически однородного разрушения (3) на примере образца 1



В опытах при сокращенном наборе АЭ-сигналов с определением  $X_{AE}$  и ресурса по количеству сигналов были получены удовлетворительные значения корреляции (корреляция среднего  $X_{AE}$  с номером пояса равна 0,973, максимального остаточного ресурса — 0,664; коэффициент корреляции площади расслоения с параметром  $X_{AE}$  равен 0,839).

Несколько лучшие результаты были получены при полном наборе АЭ-сигналов с определением  $X_{AE}$  и ресурса по суммарной амплитуде сигналов (корреляция среднего  $X_{AE}$  с номером пояса — 0,967, максимального остаточного ресурса — 0,964, корреляция площади расслоения с параметром  $X_{AE}$  — 0,85).

Кроме описанных результатов, для подтверждения возможности применения данной методики оценки состояния сжимаемых сосудов давления (корпус подводных аппаратов) были проведены испытания на образцах, которые представляли собой замкнутые кольца, к которым прикладывалась сжимающая нагрузка (рис. 4, а, б). Кольца — это модель прочного корпуса подводного аппарата, который также относится к сосудам давления. Каждый образец был изготовлен из четырех сегментов сваренных между собой электродом марки 08Г2С, материал сегментов — сталь марки Ст3. Сварные швы располагались таким образом, чтобы они находились в зоне максимальных напря-

жений. Было изготовлено четыре образца с различными искусственными дефектами в сварных швах (отверстия диаметром 4 мм) и один без дефектов. Образец помещался между захватами; с одной стороны между сварными швами к нему подключили датчик акустической эмиссии (табл. 3). Нагружение образцов и результаты регистрации АЭ представлены на рис. 4 в, г.

## Выводы

Показана информативность предложенных диагностических показателей для распознавания состояния и оценки ресурса разных вариантов нагружаемых сосудов давления в условиях присутствия различным образом фильтруемых помех регистрации сигналов АЭ. Наиболее информативным является определение диагностических параметров и ресурса по суммарной амплитуде сигналов. Корреляция значений диагностических параметров при различных методах фильтрации сигналов АЭ удовлетворительна, что говорит об их устойчивости к дестабилизирующим факторам. Эффективность применения информативного диагностического показателя проверена для объектов, нагружаемых как внешним, так и внутренним приложением нагрузки, что может быть использовано для разработки методики неразрушающих испытания подводных аппаратов.

Таблица 3

Степень опасности дефектов по параметру  $X_{AE}$ 

Степень опасности дефектов	Номер образца	Дефекты образца	$X_{AE}$ , 1/с	Максимальные напряжения вблизи дефектов, МПа
1	5	Два несквозных отверстия внутри (4 мм и 3 мм)	0,0364	268
2	4	Два несквозных отверстия снаружи (2,4 мм и 3,2 мм); свищ 1 мм	0,0322	178
3	1	Два сквозных отверстия	0,0282	253
4	3	Два несквозных отверстия (внутри 3,5 мм, снаружи 3 мм)	0,0272	274
5	2	Без дефектов	0,0063	177
Коэффициент корреляции между $X_{AE}$ и $\sigma_{max}$				0,9476



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Носов В.В.** Диагностика машин и оборудования: Учебное пособие. СПб.: Лань, 2012. 2-е изд. перераб. и доп. 384 с.
2. **Петров В.А. Башкарёв А.Я., Веттегрен В.И.** Физические основы прогнозирования долговечности конструкционных материалов. СПб.: Политехника, 1993. 475 с.
3. **Носов В.В.** Методика акустико-эмиссионного контроля прочности и прогнозирования остаточного ресурса металлических конструкций // В мире неразрушающего контроля. 2014. № 1. С. 64–66.
4. **Носов В.В.** Методика определения информативных параметров акустической эмиссии // Дефектоскопия. 1998. № 5. С.92–98.
5. **Носов В.В., Бураков И.Н.** Оценка прочности сосудов давления методом акустической эмиссии // Научно-технические ведомости СПбГТУ. 2003. №3 (33). С. 210–218.
6. **Носов В.В.** Методология акустико-эмиссионной оценки прочности как основа эффективности неразрушающего контроля // В мире неразрушающего контроля. 2014. №3 (65). С. 7–13.
7. **Носов В.В. Потапов А.И., Гомера В.П.** Акустический контроль состояния сосудов давления//Материалы 5-й международной научно-технической конференции «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов», Белоруссия, Могилев, 24–25 сентября 2014. С. 66–68.
8. **Носов В.В., Селютин С.В.** Совершенствование методики оценки сосудов давления на основе использования явления акустической эмиссии // Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. Институт metallurgии, машиностроения и транспорта СПбГПУ. Ч. 1. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2014. С. 98–100.
9. **Носов В.В.** Автоматизированная оценка ресурса образцов конструкционных материалов на основе микромеханической модели временных зависимостей параметров акустической эмиссии // Дефектоскопия. 2014. № 12. С. 24–35.
10. Сталь марки 09Г2С. URL: [http://www.metallicheckiy-portal.ru/marki\\_metallov/stk/09G2S](http://www.metallicheckiy-portal.ru/marki_metallov/stk/09G2S) (Дата обращения: 23.05.2015)

## REFERENCES

1. **Nosov V.V.** Diagnostika mashin i oborudovaniya. Uchebnoye posobiye. [Diagnostics of machines and equipment. Textbook] SPb.: «Lan» Publ., 2012. Vol. 2. S. 384 (rus.)
2. **Petrov V.A. Bashkarev A.Ya., Vettegren V.I.** Fizicheskiye osnovy prognozirovaniya dolgovechnosti konstruktsionnykh materialov. [The physical basis for the prediction of structural materials durability.] SPb.: Politehnika, 1993. S. 475.
3. **Nosov V.V.** Metodika akustiko-emissionnogo kontrolya prochnosti i prognozirovaniya ostatochnogo ressura metallicheskikh konstruktsiy. [Methods of acoustic emission durability testing and prediction of metal structures residual life]. *NDT World*. 2014. № 1. P. 64–66. (rus.)
4. **Nosov V.V.** Metodika opredeleniya informativnykh parametrov akusticheskoy emissii. [Method of acoustic emission informative parameters determining.] *Defektoskopiy*. 1998. № 5. S. 92–98. (rus.)
5. **Nosov V.V., Burakov I.N.** Otsenka prochnosti sosudov davleniya metodom akusticheskoy emissii. [Assessment of pressure vessels strength by acoustic emission methods]. St.Petersburg State Politechnical. *Universiti Journal*, 2003. №3 (33). S. 210–218. (rus.)
6. **Nosov V.V.** Metodologiya akustiko-emissionnoy otsenki prochnosti kak osnov effektivnosti nerazrushayushchego kontrolya. [The methodology for acoustic emission strength evaluation as the Foundation of nde effectiveness.] *NDT World*. 2014. 2014. №3 (65). S. 7–13. (rus.)
7. **Nosov V.V. Potapov A.I., Gomera V.P.** Akusticheskiy kontrol sostoyaniya sosudov davleniya. [Acoustic monitoring of pressure vessels.] *The V conference and exhibition with international participation «Modern methods and instruments of quality control and diagnostics of a condition of objects»*. Belarus, Mogilev. September 24–25. S. 66–68. (rus.)
8. **Nosov V.V., Selyutin S.V.** Sovrshenstvovaniye metodiki otsenki sosudov davleniya na osnove ispolzovaniya yavleniya akusticheskoy emissii. [Improved methods of pressure vessels assessment based on the use of acoustic emission.] *Week of Science in SPbSPU: materials of the theoretical and practical conference with international participation. Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Transport*. St. Petersburg: SPbGPU Publ., 2014. S. 98–100. (rus.)
9. **Nosov V.V.** Avtomatizirovannaya otsenka resursa obraztsov konstruktsionnykh materialov na osnove mikromekhanicheskoy modeli vremennyykh zavisimostey parametrov akusticheskoy emissii. [An automated assessment of the construction materials samples resource based on of temporal dependencies micromechanical models of the acoustic emission parameters.] *Defektoskopiy*. 2014. № 12. S. 24–35. (rus.)
10. Stal marki 09G2S. [Steel grade 09G2S] URL: [http://www.metallicheckiy-portal.ru/marki\\_metallov/stk/09G2S](http://www.metallicheckiy-portal.ru/marki_metallov/stk/09G2S) (Date of access: 23.05.2015)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**НОСОВ Виктор Владимирович** — доктор технических наук профессор кафедры машиноведения и основ конструирования Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, профессор кафедры приборостроения Национального минерально-сырьевого университета «Горный». 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: nosovvv@list.ru

**НОМИНАС Сергей Васильевич** — студент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: nominas.s@yandex.ru

**ЗЕЛЕНСКИЙ Николай Алексеевич** — аспирант кафедры приборостроения Национального минерально-сырьевого университета «Горный». 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2. E-mail: smoke.kolay@mail.ru

## AUTHORS

**NOSOV Viktor V.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University and National Mineral Resources University. 29 Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: nosovvv@list.ru

**NOMINAS Sergei V.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: nominas.s@yandex.ru

**ZELENSKY Nikolai A.** — National Mineral Resources University. 2, line 21 V.O., St. Petersburg, Russia, 199106. E-mail: smoke.kolay@mail.ru



# ХРОНИКА СОБЫТИЙ

DOI 10.5862/JEST.219.21

УДК 002.5

*А.В. Иванов*

## ДВАДЦАТЬ ЛЕТ НАЗАД: ХРОНИКА СОЗДАНИЯ ОДНОГО ЖУРНАЛА

*A.V. Ivanov*

### TWENTY YEARS AGO: THE CHRONICLE OF ONE JOURNAL'S CREATION

Автор, непосредственный участник создания журнала «Научно-технические ведомости», анализирует предпосылки и начальные этапы становления нового научного журнала в 90-х годах XX века, обосновывает целесообразность и необходимость именно в тот период создания такого востребованного наукой средства массовой информации. Наряду с необходимостью публикаций научного характера, автор отмечает особенности смены парадигмы как всего книгоиздания страны, так и вузовского книгоиздания в частности, что обосновывается скоростью развития научной мысли в информационную эпоху.

НТВ; НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ; НАУЧНОЕ КНИГОИЗДАНИЕ; ИСТОРИЯ; СРЕДСТВО МАССОВОЙ ИНФОРМАЦИИ.

Twenty years ago: the chronicle of one journal's creation As one of the direct creators of "Scientific and Technical Proceedings" the author (Alexander Ivanov) analyzes preconditions and first periods of the new science journal establishment in 1990s. He also proves validity and necessity of such a kind of the mass-media creation demanded by science. Along with the need of scientific publications, the author emphasizes features of a paradigm shift not only in publishing all over the country, but university publishing in particular. It results from the speed of science evolution in the information age.

SCIENTIFIC AND TECHNICAL PROCEEDINGS; SCIENCE JOURNAL; SCIENCE; HISTORY; UNIVERSITY PUBLISHING; MASS MEDIA.

В начале 90-х годов прошлого века Санкт-Петербургский государственный технический университет, несмотря на революционные преобразования в политической и экономической сферах России, активно работал и развивался. Внедрялись новые механизмы внебюджетного финансирования вуза, создавались хозрасчетные модели структурных подразделений и кафедр. В издательской деятельности вуза с ноября 1993-го по февраль 1994 года было отмечено четырехкратное увеличение объемов производимой учебно-научной литературы [3]. Среди научных

средств массовой информации в то время основным было издание по факультетам ежегодного сборника «Трудов». Каждый сборник формировался из работ определенного факультета, имел серийный номер, но динамично развивающаяся наука требовала другой технологии публикации результатов научных достижений.

24 марта 1994 года ректорат изменил структуру издательско-полиграфического производства вуза: были объединены в единый Издательско-полиграфический центр функционировавшие до этого раздельно редакционно-издательский

отдел, типография и участок множительной техники. Это позволило оптимизировать технологические процессы, сократить сроки выпуска учебной литературы, повысить качество печати и начать модернизацию производственной базы. Благодаря такой интеграции в мае 1996 года Ученый совет университета принял решение о создании Издательства Политехнического университета на базе эффективно работавшего Издательско-полиграфического комплекса.

Уже к лету 1994 года стало ясно, что университет наладил регулярное производство научно-учебной печатной продукции и располагает ресурсом для увеличения ее объема.

Внимательное ознакомление с перечнем издаваемой литературы и исследование книжных потоков выявили существенную проблему в научной деятельности вуза — отсутствие общего научного средства массовой информации, выпускаемого с целью трансляции авторского научного потенциала вуза во внешнее пространство. Так рождалась идея создания журнала, в котором все наши ученые могли бы публиковаться быстро и качественно, но в другом формате, отличном от традиционных «Трудов СПбГТУ». Мной была составлена и подана на имя ректора университета Ю.С. Васильева служебная записка с предложением рассмотреть возможность регистрации на федеральном уровне нового научного журнала с проектным названием «Научно-технические ведомости СПбГТУ» [10].

Юрий Сергеевич идею поддержал сразу же, но перед моим командированием в Москву высказал мнение, что название следует изменить на «Известия СПбГТУ». Оформив доверенность и все необходимые сопроводительные документы, я приехал в Москву в Госкомпечати РФ, и уже там выяснилось, что по картотеке количество научных вузовских журналов с названием «Известия» переваливает за пятьдесят. В то же время «Научно-технических ведомостей» в реестре СМИ на тот момент практически не было. Чтобы не сливаться с общим потоком, следовало регистрировать свое новое уникальное название, и Ю.С. Васильев в телефонной беседе разрешил это сделать. Документы были поданы для регистрации, и к концу 1994 года наш уни-

верситет получил свидетельство № 013165 от 23.12.94 [4].

Достаточно быстро была сформирована первая редакционная коллегия журнала, ответственным секретарем был назначен Юрий Павлович Горюнов, а заместителями главного редактора — проректор Владимир Николаевич Козлов и бывший ректор Константин Павлович Селезнев. Именно они в течение последующих лет осуществляли весь спектр организационной работы по выпуску журнала. Помню наши первые встречи и обсуждение проекта структуры нового журнала, его наполнения. Это были очень знающие и опытные люди, и благодаря их общественной работе журнал стал выходить более-менее регулярно. К тому же постоянное внимание и поддержка Ю.С. Васильева придавали правильный вектор развитию «Научно-технических ведомостей СПбГТУ».

Следует отметить активную помощь проректора по научной работе Альберта Яковлевича Башкарёва, который принимал участие практически во всех заседаниях редакционных коллегий, осуществлял финансовую помощь в издании журнала и всегда мог дать дальний совет.

#### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

*Главный редактор  
ВАСИЛЬЕВ Юрий Сергеевич —  
член-корр. РАН, доктор технических наук, профессор, ректор*

*Первый зам. гл. редактора  
КОЗЛОВ Владимир Николаевич —  
доктор технических наук, профессор, проректор*

*Зам. гл. редактора  
СЕЛЕЗНЕВ Константин Павлович —  
доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки и техники РФ*

*Ответственный секретарь  
ГОРЮНОВ Юрий Павлович —  
кандидат технических наук, доцент*

#### ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ:

*БАШКАРЕВ Альберт Яковлевич —  
профессор, доктор технических наук, проректор  
БОРОНИН Виталий Николаевич —  
профессор, кандидат технических наук, проректор  
ДЕГТЬЯРЕВА Раиса Васильевна —  
профессор, доктор исторических наук, научный секретарь Ученого совета вуза  
ИВАНОВ Александр Васильевич —  
директор Издательско-полиграфического центра  
ИЛЬИН Владимир Иванович —  
профессор, доктор технических наук, декан факультета  
ЛАПОТА Виталий Александрович —  
профессор, доктор технических наук, директор и генеральный конструктор ЦНИИ РТК  
КОЛОСОВ Владимир Григорьевич —  
профессор, доктор технических наук, директор Центра наукоемкого инжиниринга  
ФЕДОРОВ Михаил Петрович —  
профессор, доктор технических наук, декан факультета  
ФЕДОТОВ Александр Васильевич —  
профессор, кандидат экономических наук, генеральный директор учебного центра подготовки руководителей  
ШМАКОВ Эдуард Михайлович —  
профессор, кандидат технических наук, проректор*



Научное качество публикуемых статей от номера к номеру становилось все лучше, и тематика журнала наполнялась смыслом — стали появляться серьезные научные исследования авторов-политехников, особенно в физико-математических и технических областях наук.

Работа над первым номером началась в начале 1995 года, то есть двадцать лет назад. Поскольку в то время не было широкой компьютеризации и в стране, и в вузе, то большую часть материалов приходилось набирать вручную с машинописных страниц и потом доверстывать. Как раз в конце 1994 года в наш Издательско-полиграфический центр по решению ректората была передана и оперативно запущена в производственный процесс первая настольная издательская система, состоящая из четырех персональных компьютеров и ризографа [1]. Это было мощным подспорьем, значительно упростившим технологию допечатных процессов: таким образом было положено начало переходу с металлического набора текстов на компьютерный. Созданный в 1995 году сектор компьютерного макетирования был укомплектован молодежью,

чей средний возраст составлял 23 года. Тот период был началом смены парадигмы книгоиздания как такового, и именно в этот момент для «раскрутки» нового журнала появление электронных наборных машин было своего рода спасением, так как на участке высокой печати, где научные тексты отливались на линотипе, существовал серьезный перегруз и наш журнал могла ждать судьба многих других, когда оперативность издания не удовлетворяла бы скорости научной мысли [2].

Первый номер «НТВ СПбГТУ» [6] был посвящен 50-летию победы в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг., имел содержание на русском и английском языках, справочный материал об авторах, хронологию важнейших событий университета за год, и там же публиковались сведения о наиболее значимых книгах, выпущенных учеными-политехниками за год. Была разработана типовая обложка с синеватым фоном и графикой главного здания вуза со сменной картинкой на первой странице, которая применялась достаточно долгое время. Первый тираж журнала составил 1500 экземпляров и стал



СОДЕРЖАНИЕ	
Обращение к читателям . . . . .	4
Приглашение председателя Государственного комитета Российской Федерации по высшему образованию В.Г.Кинеля . . . . .	4
Ю.С.Васильев. Ученые-политехники — делу в Великой Отечественной войне 1941 — 1945 годов . . . . .	5
Ю.С.Васильев, В.Н.Козлов. Интеллектуальные технологии университетского образования . . . . .	9
А.Я.Башкаров. Ненужные проблемы научных школ . . . . .	15
В.А.Иванов, А.Я.Благовещенский. Атомная энергетика и СПбГТУ . . . . .	17
А.П.Еперин. Проблемы и перспективы развития атомной энергетики в Северо-Западном регионе России . . . . .	27
М.П.Федоров, С.Г.Шульман. Надежность и экологическая безопасность энергетических объектов . . . . .	33
М.А.Казак. Политехники и прогресс в судовом атомном турбиностроении . . . . .	37
В.Н.Боронин, В.В.Кораблев. Международная деятельность Университета . . . . .	46
С.М.Вертешев. Псковский политехнический институт Санкт-Петербургского государственного технического университета . . . . .	55
В.В.Бадалов. Профсоюз сегодня . . . . .	64
Алина Мальцева. Дому ученых в Лесном (поэма) . . . . .	68
С.А.Прохоров, В.Ф.Розин. 60 лет вместе с Политехническим . . . . .	68
Университет в цифрах (некоторые статистические данные за 1993 и 1994 гг.) . . . . .	80
Р.В.Дегтиарева. Итоги работы диссертационных советов . . . . .	81
В.Н.Снетков. Из эскизов Технического университета . . . . .	82
Н.М.Кузнецов. Позднее и современное издание . . . . .	85
В.М.Ананьева. Книги ученых-политехников, изданные в 1994 году . . . . .	87
Сведения об авторах . . . . .	89
CONTENTS	
Address to readers . . . . .	4
Congratulation of V.G.Kinely, Chairman of the Russian Federation State Committee of High Education . . . . .	4
Y.S.Vasilev. Polytechnic scientists' contribution to the Great Patriotic War 1941-1945 Victory . . . . .	5
Y.S.Vasilev, V.N.Kozlov. Intellectual technology in the university education . . . . .	9
A.J.Bashkarev. Non-scientific problems of schools of thought . . . . .	15
V.A.Ivanov, A.J.Blagoveshchenski. Nuclear power engineering and StPSTU . . . . .	17
A.P.Eperin. Russia North-West region nuclear power engineering problems and the outlook for development . . . . .	27
M.P.Fedorov, S.G.Shulman. Power engineering projects reliability and ecology safety . . . . .	33
M.A.Kazack. Polytechnic scientists and marine nuclear turbomachinery development . . . . .	37
V.N.Boronin, V.V.Korablev. The University international activity . . . . .	46
S.M.Verteshov. Pskov Polytechnic Institute of the Saint Petersburg State Technical University . . . . .	55
V.V.Badalov. The trade union today . . . . .	64
Alina Maltseva. To the House of Scientists in Lesnoy (Poem) . . . . .	68
S.A.Prochorov, V.F.Rozin. 60 years with the Polytechnic . . . . .	68
The University in figures (Some statistical data on 1993-1994) . . . . .	80
R.V.Degtiareva. The results of the dissertation Councils' activity . . . . .	81
V.N.Snetkov. Some sketches from the Technical University life . . . . .	82
N.M.Kuznetsov. The useful and up to date edition . . . . .	85
V.M.Anan'eva. Books of the Polytechnic scientists printed in 1994 . . . . .	87
About the authors . . . . .	89

*Председателю Ученого совета  
Санкт-Петербургского государственного  
технического университета  
члену-корреспонденту РАН Ю.С.ВАСИЛЬЕВУ*

Поздравляю коллектив Санкт-Петербургского государственного технического университета, который я считаю одним из самых достойных вузов России, с выходом первого номера журнала "Научно-технические ведомости СПбГТУ".

Выражая уверенность, что на страницах журнала будут широко и ярко освещаться научные достижения ученых-политехников, многогранная жизнь крупнейшего вуза страны.

Выход первого номера "Научно-технических ведомостей СПбГТУ" — заметное событие в жизни высшей школы страны. Рождение нового журнала — яркое подтверждение того, что, несмотря на все трудности, коллектив политехников уверенно смотрит в будущее. Государственный комитет Российской Федерации по высшему образованию окажет помощь и поддержку новому изданию.

Желаю больших творческих успехов.

*Председатель Государственного комитета  
Российской Федерации по высшему образованию*

*В.Г.КИНЕЛЕВ*



**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ  
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА,  
№ 1, 1995**

Учредитель — Санкт-Петербургский государственный технический университет

Издание зарегистрировано в Госкомпечати РФ, свидетельство № 013165 от 23.12.94

Научный редактор *В.А.Исаев*

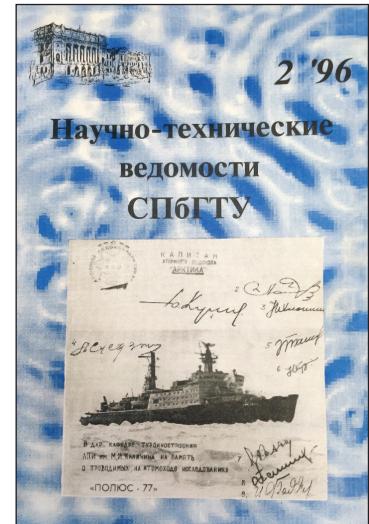
Технические редакторы: М. А. Молчанова, А. И. Колодяжная  
Корректоры: Н. В. Бакк, Л. А. Сафонова, А. В. Явственная

Компьютерный набор: Е. В. Калинина, М. Ю. Еремеева  
Компьютерная верстка: К. Г. Пугинский, Е. В. Калинина, М. Ю. Еремеева

Лицензия ЛР № 020593 от 09.07.92

Подписано в печать 19.04.95. Формат 60×90 1/8. Бум. тип. № 1.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 11,25. Уч.-изд. л. 11,0. Тираж 1500 экз.  
Заказ 234.

Санкт-Петербургский государственный технический университет.  
Издательско-полиграфический центр СПбГТУ.  
Адрес университета и ИПЦ: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.



заметным событием в жизни не только университета, но и страны. Приветственное обращение председателя Госкомитета РФ по высшему образованию, опубликованное в первом номере, является тому подтверждением.

Сбор, редакционная обработка материала и создание макета журнала — вся технология издания отрабатывались на ходу под личным контролем ректората и редколлегии. Приходилось искать и организовывать новые формы взаимодействия «автор — редакция — издательство — типография», чтобы избежать временных сбоев и ошибок. Полиграфическое качество журнала в части иллюстраций еще не было на необходимой высоте, но это уже было издание с большим количеством фото- и графических материалов.

В 1995 году вышли два номера журнала [6, 7] и в 1996 году еще два [8, 9]. С первых лет выпуска «Научно-технических ведомостей» соблюдалась периодичность выхода издания. В этот же период изменяются и требования к направляемым в журнал рукописям: появляется вариант сдачи текстов статей на диске в разных редакторах. Середина 90-х годов была как раз тем периодом, когда персональный компьютер только входил в нашу жизнь. На производствах устанавливались тогда еще маломощные машины на базе процессоров 086 и 286. Через несколько лет наши ученые уже почти все приносили свои статьи в издательство в набранном виде, что сильно ускоряло процесс.

До начала XXI столетия версткой журнала и всеми организационными вопросами его выпуска занималось исключительно Издательство Политехнического университета, хотя Ю.П. Горюнов уже имел штат своих сотрудников, которые проверяли рукописи, организовывали рецензирование и правили материалы. Благодаря настойчивости редакции журнала, возглавляемой Юрием Павловичем, ее профессионализму, бренд «Научно-технических ведомостей СПбГТУ» стал узнаваем в стране, и периодичность выпуска увеличивалась.

Начиная со второго номера журнала появляются первые рубрики журнала: «Вести из академий», «Проблемы высшего образования», «Международное сотрудничество», «Проблемы науки. Информатика и управление», «Металлургия» и др. Публикуются также рецензии на некоторые книги и биографические очерки о видных ученых-политехниках.

Первоначально журнал распространялся по факультетской подписке и продавался в книжном киоске «Политехник», позже журнал был зарегистрирован в системе Роспечати со своим подписным индексом. Со второго номера журнала был оптимизирован тираж сначала до 500, в 1996 году до 400 экземпляров, и снизились издержки [5].

Опыт своевременного создания и развития научного журнала «Научно-технические ведомости СПбГТУ» говорит о многом: наш университет как бы предвосхитил возникшую позже

потребность в наличии такого вузовского средства массовой информации для публикации результатов научных исследований в соответствии с будущими требованиями Высшей аттестационной комиссии, и сейчас уже весь научный мир оперирует такими понятиями, как импакт-фак-

тор журнала, индекс Хирша, цитируемость и т. д. Причем опередил на многие годы вперед. В заключение хочется пожелать всему коллективу нашего уже большого журнала с сериями по направлениям науки и техники дальнейших успехов и «хороших индексов»!

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов А.В., Поляков А.О. Функциональность информационных систем и глобальные хранилища научных текстов СПб.: Наука, 2012. 238 с.
2. Иванов А.В. Информационные управленческие технологии в издательской деятельности. Издание второе, перераб. и доп. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. 187 с.
3. Проблемы университетского книгоиздания. СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация университетов России, 2007. 122 с.
4. Свидетельство о регистрации в Госкомпечати РФ № 013165 от 23.12.1994.
5. Свидетельство о регистрации СМИ от 13 октября 2006г. ПИ № ФС77–2581.
6. Научно-технические ведомости СПбГТУ. СПб. 1995. №1.
7. Научно-технические ведомости СПбГТУ. СПб. 1995. №2.
8. Научно-технические ведомости СПбГТУ. СПб. 1996. №1.
9. Научно-технические ведомости СПбГТУ. СПб. 1996. №2.
10. Научно-технические ведомости СПбГПУ. [Офиц. сайт]. URL:<http://ntv.spbstu.ru/> (Дата обращения 19.02.2015).

## REFERENCES

1. Ivanov A.V., Polyakov A.O. Funktsionalnost informatsionnykh sistem i globalnyye khranilishcha nauchnykh tekstov [Functionality of information systems and global repository of scientific texts]. SPb.: Nauka, 2012. 238 s. (rus.)
2. Ivanov A.V. Informatsionnyye upravlencheskiye tekhnologii v izdatelskoy deyatelnosti [Information management technologies in publishing]. Izdaniye vtoroye, pererab. i dop. SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2003. 187 s. (rus.)
3. Problemy universitetskogo knigoizdaniya [Problems of university publishing]. SPb.: Izdatelsko-poligraficheskaya assotsiatsiya universitetov Rossii, 2007. – 122 s. (rus.)
4. Svidetelstvo o registratsii v Goskompechati RF № 013165 ot 23.12.1994 [Certificate of registration in the State Committee of the Russian Federation of 23.12.1994 № 013 165] (rus.)
5. Svidetelstvo o registratsii SMI ot 13 oktyabrya 2006g. PI № FS77–2581 [Mass media registration certificate dated October 13, 2006. PI number FS77–2581] (rus.)
6. Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGTU [St. Petersburg Polytechnic University journal of engineering sciences and technology]. SPb. 1995. №1. (rus.)
7. Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGTU [St. Petersburg Polytechnic University journal of engineering sciences and technology]. SPb. 1995. №2. (rus.)
8. Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGTU [St. Petersburg Polytechnic University journal of engineering sciences and technology]. SPb. 1996. №1. (rus.)
9. Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGTU [St. Petersburg Polytechnic University journal of engineering sciences and technology]. SPb. 1996. №2. (rus.)
10. Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGPU [St. Petersburg Polytechnic University journal of engineering sciences and technology]. [Ofits. sayt]. URL:<http://ntv.spbstu.ru/> (Data obrashcheniya 19.02.2015). (rus.)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**ИВАНОВ Александр Васильевич** — доктор технических наук директор издательства Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: ivanov.mediabooks@gmail.com

## AUTHOR

**IVANOV Aleksandr V.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: ivanov.mediabooks@gmail.com



DOI 10.5862/JEST.219.22

УДК 629.78

А.Б. Железняков, В.В. Кораблёв

## ОСВОЕНИЕ КОСМОСА ЯПОНИЕЙ

A.B. Zheleznyakov, V.V. Korablev

## JAPAN'S OUTER SPACE EXPLORATION

В статье изложена история развития ракетно-космической техники в Японии, основные этапы становления японской космонавтики, наиболее значимые достижения и перспективы исследования космического пространства с помощью японских кораблей и спутников. Данной статьей авторы продолжают серию публикаций о космических программах стран Азии [1–3].

КОСМОНАВТИКА; КОСМОДРОМ; РАКЕТА-НОСИТЕЛЬ; СПУТНИК; ТАНЕГАСИМА УТИНОУРА.

The article describes the history of the space technology development in Japan, the main steps of the Japanese space activity and the most important achievements in this area, as well as prospects of the future space exploration by Japanese satellites and spaceships. The authors have analyzed Japan's space program, have indicated the main achievements and failures, have described the activity of Japanese astronauts and their contribution into the space exploration. The article outlines the forecast for coming years in the field of the Japanese space activity.

ASTRONAUTICS; SPACEPORT; LAUNCH VEHICLE; SATELLITE; TANEGASHIMA UTINOURA.

Япония относительно поздно начала осуществлять программу освоения космического пространства. Первый японский искусственный спутник Земли был запущен в 1970 году, на 12,5 лет позднее, чем это сделал Советский Союз. Но «страна восходящего Солнца» стала первой азиатской державой, вошедшей в «космический клуб», опередив на два месяца китайцев.

За прошедшие с той поры четыре с половиной десятилетия японцы многое достигли, и их успехи в космической отрасли уже никого не удивляют. Сегодня это воспринимается как само собой разумеющееся. Но чтобы выйти на такой уровень, японцам пришлось немало потрудиться. И не всегда их путь в космос был усыпан розами.

### Первые ракеты «страны восходящего Солнца»

Как известно, ракеты были изобретены в Китае в III веке нашей эры. Однако в соседнюю Японию они попали только в 1600 году. Причем, пришли туда кружным путем, через Европу. Но широкого распространения до середины XX-го века они в Японии не получили.

Впервые серьезный интерес к ракетной технике японцы проявили на заключительном этапе Второй мировой войны, сделав, как и их союзники — немцы, на них ставку как на некое «чудо-оружие».

В Японии того времени разрабатывались несколько видов ракетного оружия. Самой «продвинутой» разработкой считается ракетоплан MXY-7 «Ohka» (яп. — 櫻花). Его предполагалось сбрасывать с бомбардировщика и наводить на цель пилотом-смертником. Пороховые ракетные ускорители должны были разгонять ракетоплан в последние 10 секунд полета перед поражением цели.

Также известен факт пуска некой «большой» ракеты в 1944 году. Испытание было неудачным — ракета упала в пригороде Токио, напугав случайных прохожих.

После поражения в войне Японии было запрещено проводить широкий спектр научно-технических исследований, а разработки 1930—1940 годов вместе с документацией были уничтожены. Именно по этой причине мы очень мало знаем о достижениях японцев в ракетостроении той поры.



細密占星術の生みの親 糸川英夫博士

**ХИДЕО ИТОКАВА** (20 июля 1912–21 февраля 1999) — пионер японского ракетостроения и национальных космических программ. Средства массовой информации именовали его не иначе как «Доктор Ракета» (DrRocket) и «отец японской космонавтики».

В 1935 году окончил Токийский императорский университет по специальности «Авиационная и ракетная техника».

Во время Второй мировой войны Итокава занимался проектированием боевых самолетов в компании «Накадзима» (яп. — 中島飛行機株式会社). Он, в частности, проектировал истребитель Ki-43 «Хаябуса» (яп. — 隼).

В 1941 году Итокава стал доцентом, а в 1948 — профессором Токийского университета.

С декабря 1953 года возглавлял группу изучения авиационного оборудования и сверхзвуковой аэродинамики. В 1956 году основал Японское ракетное общество.

Итокава был разносторонним человеком и интересовался многими областями деятельности. Он занимался спортом (баскетбол, гольф, плавание), философией, музыкой (играл на виолончели, на органе, на рояле, на скрипке, на японской разновидности ксилофона), аранжировал музыку для оркестра. Итокава занимался литературным творчеством, в общей сложности он написал 49 книг.

Именем Итокавы назван астероид (25143) Итокава, к которому был отправлен японский исследовательский зонд «Хаябуса».

Также практически ничего не известно о работах, которые проводились в первые послевоенные годы. Официально этих работ как бы и не было. А если они и велись, то «за закрытыми дверями» и в основном на уровне «эскизного проектирования».

Запрет на проведение работ в высокотехнологичной сфере был снят только в 1954 году. Практически сразу после этого в Японии началась разработка ракетной техники.

Одним из первых к этим работам приступил профессор Токийского университета Хидэо Итокава (яп. — 糸川英夫). Вместе со студентами Института промышленных наук он сделал тогда крошечную пороховую ракету, окрещенную «Карандаш» (яп. — ペンシリロケット). Она имела длину 23 сантиметра и диаметр 1,8 сантиметра. Ее возможности были под стать размерам. Но это была первая японская ракета. Она и стала той основой, на которой впоследствии развивалась вся японская космонавтика.

Всего было запущено более 150 «Карандашей». Главным результатом этих запусков стал опыт проектно-конструкторской отработки, который получили создатели ракеты.

Следующим импульсом в становлении японской космонавтики стало решение правительства об участии страны в научной программе предстоящего Международного геофизического года. В середине 1950-х годов многие государства мира, в том числе Советский Союз и США, объявили о своих планах по запуску ракет и спутников для изучения Земли и околоземного пространства. Не осталась в стороне и Япония, где производство ракет развернулось на солидной основе.

Уже в августе 1955 года группа Итокавы запустила новую двухступенчатую ракету Baby-S (от Simple — «простейший»). Она имела длину 1 метр и 34 сантиметра, а ее диаметр составлял 7,5 сантиметров.

Спустя месяц состоялся запуск ракеты Baby-T (от Telemetry — «телеметрический»). На наземные станции были переданы данные о полете.

В октябре—ноябре того же года состоялись пуски трех ракет серии Baby-R (от Recovery — «возвращаемые»). На их борту находились 16-миллиметровые камеры, сделавшие снимки земной поверхности с высоты около 5 километров.

Работы Итокавы заинтересовали японскую промышленность. Главным подрядчиком группы стала компания Nissan Motor. Кроме того, была получена помощь и от японского правительства.

Результатом этого сотрудничества стала зондирующая ракета Карра (яп. — カッパロケット). Ее летные испытания были начаты в сентябре 1956 года.



По мере совершенствования твердотопливных ракетных двигателей группе Итокавы удалось сконструировать и новые версии этой ракеты, в том числе многоступенчатые. В двухступенчатом варианте ракета была уже способна доставить полезную нагрузку в 7–10 килограммов на высоту около 60 километров. А трехступенчатая Карпа-9М поднимала груз в 80 килограммов на высоту более 300 километров.

Основными задачами при полетах этих ракет, которые были осуществлены в 1957–1962 годах, стало изучение верхних слоев земной атмосферы, космического излучения, а также метеонаблюдения.

В начале 1960-х годов работы Итокавы привлекли внимание и финансовую поддержку со стороны японских государственных учреждений, включая Управление по науке и технике, Министерство почт и связи и Министерство транспорта. Это позволило расширить масштабы работ и вывести их на новый уровень. В частности, группа Итокавы была преобразована в Институт космических исследований (англ. — Institute Space and Astronautical Science, ISAS).

Внимание со стороны правительственные кругов, а также растущие «комерческие» интересы японских компаний к освоению космического пространства привели к тому, что в первой половине 1960-х годов формирующаяся японская ракетно-космическая отрасль оказалась на перепутье.

С одной стороны, сам Итокава, которого поддерживали министерства и ведомства правительства Японии, выступал за создание ракетносителей и спутников собственными силами, без помощи извне, и за «чистые» научные исследования.

Но, с другой стороны, Управление по науке и технике, мнение которого разделяла Федерация экономических организаций «Кайданрен», выступало за тесное сотрудничество с США и запуск японских космических аппаратов в том числе и на неяпонских ракетах. Они же лobbировали и «комерческое» применение ракет и спутников.

Результатом этих споров стало разделение космической программы Японии на две части: ISAS продолжала научные исследования по ракетостроению и космонавтике, а на базе Управления по науке и технике (в 1966 году было преобразовано в Национальный центр по осво-

ению космоса) в 1969 году было создано Национальное управление по космическим разработкам (англ. — National Space Development Agency of Japan, NASDA) для коммерческого применения результатов космической деятельности. Долгие годы такое разделение «по интересам» сохранялось\*, хотя в работы активно включались и другие «игроки» в лице крупных промышленных корпораций. Особенно это было заметно на рынке телекоммуникационных услуг.

Пока шли споры между «заинтересованными сторонами», разработка ракетной техники в Японии шла своим чередом.

В 1961 году в Утиноура (префектура Кагосима, о. Кюсю) началось строительство Космического центра Токийского университета — первого космодрома Японии. Была создана новая многоступенчатая ракета Lambda (яп. — ラムダロケット). В различных вариантах она могла выводить на околоземную орбиту грузы разной массы. Так, в трехступенчатом варианте полезная нагрузка массой в 100 килограммов могла быть доставлена на высоту до 1000 километров.

Первая Lambda стартовала с космодрома Утиноура в июле 1964 года. А уже летом 1966 года ракета Lambda-3H-2 позволила поднять научную аппаратуру на высоту более 1800 километров и впервые в Японии провести исследования радиационных поясов.

Как указывают некоторые специалисты, «интерес Японии к космонавтике не был случаен — безграничный «новый океан» стал для страны символом возрождения и могущества на новом, послевоенном этапе истории. Это необычайно важно для духа нации, особенно на Востоке». А раз это важно, то и работы велись с соответствующим «старанием и тщанием», чтобы свершить то, что требовалось.

### На пути к первому спутнику

Достигнутые успехи позволили японским конструкторам «замахнуться» на спутник. В разработанной Национальным советом по космосу в 1966 году перспективной программе

\* Третьим «участником» космических исследований в Японии была Научно-исследовательская лаборатория радио, занимавшаяся разработкой ИСЗ для изучения ионосферы. Позднее она была преобразована в Национальную аэрокосмическую лабораторию Японии (англ. — National Aerospace Laboratory of Japan, NAL).

предусматривался запуск первого ИСЗ уже в следующем году (позже этот срок сместили на 1968 год). А к 1970 году планировалось вывести на орбиту уже девять научных спутников.

Для реализации этого плана предполагалось задействовать экспериментальную ракету-носитель Lambda-4S, которая, по сути дела, являлась многоступенчатой зондирующей ракетой с двумя навесными ускорителями и специализированным ракетным двигателем, который предполагалось включить в апогее траектории для выведения полезной нагрузки на орбиту. Стартовая масса этой ракеты не превышала 9,5 тонн. Но масса спутника при этом могла быть до 26 килограммов. Довольно эффективное соотношение.

В производстве ракеты и наземного оборудования были задействованы более 30 промышленных предприятий Японии, в том числе Nissan Motor, Mitsubishi Heavy Industries, Matsushita Communication Industrial, Meisei Electric, Japan Aviation Electronics Industry, Nippon Electric и другие.

Несмотря на размах работ и привлеченные к этому «силы», быстро решить поставленную задачу не удалось.

Первый пуск состоялся 26 сентября 1966 года и был неудачен. Первые три ступени ракеты Lambda-4S-1 отработали штатно, но система управления полетом дала сбой и ракета полетела не в космос, а в сторону дома.

Неудачным оказался и второй запуск, осуществленный 20 декабря 1966 года. На этот раз не запустился двигатель четвертой ступени.

Не удалось запустить спутник и с третьей попытки — 13 апреля 1967 года у ракеты Lambda-4S-3 не включился двигатель третьей ступени.

Специалисты ISAS пребывали в глубоком пессимизме от преследовавших их неудач. Больше других переживал Хидео Итокава. Чувствуя свою неспособность «взять под контроль» события, в 1967 году он ушел из института и из космической программы.

Неудачи с запуском спутника привели к тому, что бюджетное финансирование деятельности ISAS резко сократилось. Соответственно уменьшился и объем работ в институте. Ко всем неприятностям добавились требования японских рыбаков запретить пуски ракет с космодрома Утиноура, что заставило резко ограничить деятельность этой стартовой площадки и занять-

ся созданием нового космодрома — Космического центра Танегасима, расположенного на одноименном острове в 115 километрах южнее о. Кюсю. В настоящее время это основной космодром Японии, с которого стартуют космические носители.

В результате всех этих осложнений четвертая попытка запуска спутника была предпринята только 22 сентября 1969 года. Но и она оказалась неудачной, хотя конструкторы как никогда были близки к успеху. На этот раз все шло хорошо до момента отделения третьей ступени. Она штатно отделилась, но произошло ее соударение с отсеком системы управления четвертой ступени. В результате была нарушена ориентация, и ракета погибла.

Лишь с пятой попытки японцам удалось осуществить задуманное. Случилось это 11 февраля 1970 года. Полет ракеты Lambda-4S-5 прошел «без сучка и задоринки» и первый японский спутник, который нарекли «Осуми» (яп. — オスミ) в честь полуострова, откуда он был запущен, передал из космоса первую информацию.

Успешный запуск сделал Японию четвертой страной (после СССР, США и Франции), самостоятельно запустившей свой спутник. В «региональном споре» с Китаем японцам удалось опередить своих «соперников» из Поднебесной на два месяца.

«Осуми» — первый японский искусственный спутник Земли. Космический аппарат весил 24 килограмма. На борту были акселерометры, термометр и радиопередатчик. Бортовое электропитание — от химических источников тока.

Передатчик отключился менее чем через сутки после запуска.

Спутник находился на орбите более 32 лет и сгорел в плотных слоях земной атмосферы 2 августа 2003 года.

А ракета Lambda-4S, позволившая Японии стать космической державой, после своего триумфа больше не эксплуатировалась («мавр сделал свое дело — мавр может уходить»).

### Другие ракеты, другие спутники

Параллельно с работами по запуску спутника с помощью ракеты-носителя Lambda-4S в ISAS с 1963 года велись работы по созданию еще одного космического носителя. Эта ракета получила наименование Mu-4S (яп. — ミューアーチ) и на 20 лет стали основным средством для



доставки полезной нагрузки на околоземную орбиту.

Ракета Mi-4S была значительно мощнее Lambda-4S. Она не имела автономной бортовой системы управления — полет ракеты шел по радиокомандам с Земли.

Летные испытания носителя начались 31 октября 1966 года с запуска прототипа, в котором действующей была только первая ступень. Через три года суборбитальный полет совершил трехступенчатый вариант.

В том же 1969 году в ISAS была разработана первая национальная космическая программа. Но она сразу же подверглась жесткой критике многих министерств и ведомств «за отрыв от реальности». Принять ее в измененном виде удалось только в 1970 году, когда первый спутник в Японии был уже запущен.

Впрочем, эта программа и не была ориентирована на запуск спутника как такового. В ней были прописаны основные направления работ, на которых предполагалось сориентировать японских конструкторов и японские фирмы, которые намеревались заняться космическими исследованиями.

Значилась в программе и ракета-носитель Mi-4S как основное средство доставки японских грузов на орбиту в ближайшие десятилетия.

В конце концов так и получилось. Но первая попытка запуска спутника с помощью Mi-4S была предпринята только 25 января 1970 года, менее чем за месяц до первого успешного полета Lambda-4S. Как это часто бывает, первый полет оказался неудачным — не включился двигатель четвертой ступени и спутник MS-F1 («Научный спутник № 1») был потерян.

К счастью у этого аппарата был «дублер», который и было решено запустить на орбиту. Но перед этим было решено провести дополнительные эксплуатационные испытания ракеты с технологическим макетом космического аппарата. Его-то и запустили 16 февраля 1971 года. Спутник получил название «Тансей», или «Светло-синий» (цвет здания Токийского университета).

А действующий научный спутник японцы запустили 28 сентября того же года. После выхода на орбиту он получил название «Сансей» («Новая звезда»).

С той поры запуски космических аппаратов стали в Японии регулярными. По сравнению с Россией, США и Китаем японцы запускают не

так уж и много космических аппаратов. Но, как правило, каждый из этих запусков имеет большое прикладное или научное значение.

Главенствующую роль среди японских космических аппаратов играют спутники прикладного назначения.

В первую очередь это телекоммуникационные аппараты. На геостационарную орбиту они доставляются не только национальными космическими средствами, но и с помощью российских, американских и европейских носителей. Использование зарубежных носителей позволило Японии достаточно быстро развернуть сеть собственных спутников связи и полностью удовлетворить свои потребности в телекоммуникационных услугах. Не были забыты и другие страны Азиатско-Тихоокеанского региона.

А вот на глобальный рынок телекоммуникационных услуг японцы не замахиваются, считая, что он весьма насыщен и в условиях жесткой конкуренции его завоевание нецелесообразно — в лучшем случае удастся компенсировать затраты, а прибыли придется ждать очень долго.

Такую же направленность имеют и программы по запуску метеорологических и навигационных спутников. Их работа, как и связных спутников, ориентирована на Японию и прилегающие районы Азии и Тихоокеанского бассейна. Прочую информацию при необходимости в ней японцы покупают у других стран.

Как правило, закупаются и данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Лишь некоторые японские спутники сориентированы на сбор таких данных. Чаще всего это небольшие аппараты, разработанные для решения конкретных задач.

Но не надо думать, что спутники ДЗЗ мало интересуют японцев. Как островное государство, часто испытывающее на себе удары природной стихии, Япония активно участвует в ряде международных проектов по сбору данных о стихийных бедствиях. Для обработки этих данных, а также по оповещению населения о возможных природных катализмах на основе этих данных, используются ресурсы многих научных центров, в том числе и входящих в структуру Японского аэрокосмического агентства.

Довольно много японских спутников можно отнести к классу технологических. Как правило, это небольшие по своим размерам космические аппараты, предназначенные для

получения данных о работе бортовой аппаратуры в условиях космического пространства. Свою необходимость и эффективность они уже не раз доказывали — испытанные на их борту аппаратура в дальнейшем долго и без сбоев работала в составе межпланетных станций.

И последнее прикладное направление японской космонавтики — разведывательная деятельность. На околоземной орбите развернута и функционирует уже почти десять лет спутниковая группировка, задачей которой является наблюдение за Северной Кореей. Она появилась в космосе после того, как КНДР обзавелась собственной ядерной бомбой. В ближайшее время предполагается усилить ее, так как Пхеньян теперь обладает и средствами доставки бомбы. Япония, пережившая в 1945 году ужасы Хиросимы и Нагасаки, не хочет повторения тех трагических страниц своей истории, поэтому и предпринимает меры по защите своих национальных интересов.

Первыми достижениями японской космонавтики был запуск научных спутников. И эту практику в Японии продолжают и поныне.



Ракета-носитель H-2A

В разные годы были запущены несколько десятков спутников именно научной направленности. Но, чтобы подчеркнуть их значимость, достаточно отметить только один — «Гинга» (яп. — 銀河), запущенный в феврале 1987 году. Этот космический аппарат привлек к себе внимание тем, что он зарегистрировал рентгеновские лучи, переданные от сверхновой звезды, которая была обнаружена в том же месяце, феврале, в Большом Магеллановом облаке. Это был такой большой успех, что ряд стран мира обратились к Японии с предложением проводить проекты совместных исследований космического пространства.

В последние годы запускается довольно много спутников, созданных в университетах Японии. Это небольшие космические аппараты весом в несколько килограммов, изготовленные на базе платформы CubeSat. Запуски производятся с помощью национальных и зарубежных средств выведения. Чаще всего — с помощью российских ракет.

Университетские CubeSat'ы решают широкий спектр задач, от научных исследований до сложнейших технических экспериментов. Но, главное, они помогают специалистам приобретать столь необходимый для любой космической державы опыт.

В отличие от ведущих космических держав, Япония никогда не стремилась располагать широким набором ракет-носителей. Действительно, ракета Lambda-4S была использована только для запуска первого спутника, ракета Mi-4S в различных вариантах — для запусков космических аппаратов в 1970—1990-х годах, а сейчас практически все нужды космонавтики Японии удовлетворяет ракета H-II в вариантах «А» и «В».

Это, конечно, не означает, что ракетостроение в Японии свернуто полностью. Так в 2013 году состоялся первый запуск ракеты-носителя Epsilon легкого класса. Ведутся разработки и других носителей. Но основная масса запусков производится с помощью «рабочей лошадки» H-II.

Со второй половины 1990-х годов Япония активно участвовала в работах по строительству Международной космической станции (МКС). Столь же активно сегодня она участвует в эксплуатации станции и в проведении на ее борту экспериментов и исследований.



Вкладом Японии в МКС стал научный модуль «Кибо» (яп. — 錦望), а также грузовые корабли серии HTV «Конотори» (яп. — こうのとり3号機), доставляющие на станцию разнообразные грузы. Очередной японский грузовик отправится на станцию в 2015 году.

Большим событием я истории японской космонавтики стало создание в 2003 году Японского аэрокосмического агентства (англ. — Japan Aerospace Exploration Agency, JASA).

Агентство было образовано в результате слияния трех ранее независимых организаций: ISAS, NASDA и NAL. Сейчас это ведомство обладает возможностью запуска искусственных спутников Земли, автоматических межпланетных станций, участвует в программе Международной космической станции, планирует создание пилотируемой космонавтики и освоение Луны.

### На межпланетных трассах

Япония одной из первых стала осваивать межпланетные трассы и добилась в этой области значительных успехов. Некоторые ее достижения носят пионерский характер.

Свои первые межпланетные зонды — «Сакигакэ» (яп. — さきがけ, «Пионер») и «Суйсэй» (яп. — すいせい, «Комета») — японцы запустили еще в 1985 году. Оба этих космических аппарата вошли в «земную армаду», которая была отправлена человечеством на изучение кометы Галлея. Кроме «Сакигакэ» и «Суйсэй», в нее входили советские межпланетные станции «Вега-1» и «Вега-2», а также европейский межпланетный зонд «Джотто» (англ. — Giotto).

Задачами «Сакигакэ» были испытания схем преодоления гравитационного притяжения Земли на базе японской техники, наблюдения космической плазмы и магнитного поля в межпланетном пространстве, а также изучение кометы Галлея с расстояния почти в семь миллионов километров. Кроме того, сигналы с аппарата должны были скорректировать траекторию движения зонда «Суйсэй», стартовавшего вторым.

Пролет мимо кометы Галлея «Сакигакэ» совершил 11 марта 1986 года, исследовав кометное вещество в хвосте «небесной странницы». Существовали планы использовать зонд для сближения с кометой 21P/Джакобини — Циннера. Но от них пришлось отказаться из-за нехватки топлива на борту. С 15 ноября 1995 года исследователи перестали получать телеметрию с ап-



Грузовой транспортный корабль «Конотори»

парата, хотя сигнал маячка продолжал поступать до 7 января 1999 года.

Главной целью полета зонда «Суйсэй» было получение изображений водородной короны кометы Галлея приблизительно за 30 дней до и после пересечения кометой плоскости эклиптики.

По своей конструкции «Суйсэй» идентичен «Сакигакэ», но нес другую полезную нагрузку.

В частности, на нем была установлена ультрафиолетовая камера на ПЗС\* и инструменты для изучения солнечного ветра.

С ноября 1985 года аппарат начал производить наблюдения за кометой Галлея в ультрафиолетовой части спектра, делая шесть изображений за сутки. 8 марта 1986 года «Суйсэй» пролетел на расстоянии 151 тысячи километров от ядра кометы. За время пролета произошло только два столкновения с пылинками-фрагментами кометы.

От планов достичь комету 21P/Джакобини — Циннера также пришлось отказаться — у «Суйсэя», как и у «Сакигакэ», закончилось топливо. После этого зонд остался на гелиоцентрической орбите и продолжал использоваться до тех пор, пока был жизнеспособен.

В 1990 году Япония приступила к изучению Луны. Первый японский «лунник» — «Хитэн» (яп. — ひてん, буквально «Звездная дева») — стартовал 24 января того года и стал первым земным аппаратом после 14-летнего перерыва, который полетел на свидание с «ночным светилом».

\* ПЗС — прибор с зарядной связью — обозначение класса полупроводниковых приборов, в которых применяется технология управляемого переноса заряда в объеме полупроводника.



Первоначально зонд предназначался для исследований окололунного пространства и изучения аэродинамического торможения на высокоэллиптической орбите, находясь на которой, он мог приблизиться к Луне. Космический аппарат совершил десять пролетов близ Луны. Во время первого сближения, 19 марта 1990 года, от «Хитэна» был отделен мини-зонд «Хагоромо» (яп. — はごろも, «покрывало ангела»), при помощи которого планировалось исследовать Луну и окололунное пространство с сelenоцентрической орбиты. Однако радиопередатчик мини-зонда вышел из строя, оставив специалистов в неведении о дальнейшей судьбе аппарата. Пологают, что «Хагоромо» упал на лунную поверхность.

Программа работ с «Хитэном» была закончена 19 марта 1991 года. Планировалось, что станция войдет в земную атмосферу и сгорит там. Однако из-за неудачи с «Хагоромо» было решено отправить к Луне основной космический аппарат. 24 апреля того же года спутник был переведен с круговой земной орбиты на экспериментальную низкоэнергетическую трансферную орбиту (англ. — Lowenergytransfer), предложенную американским ученым Эдвардом Белбрано (англ. — Edward Belbruno) из Лаборатории реактивного движения. «Хитэн» стал первым в мире космическим аппаратом на такой орбите.

Использование этой траектории позволило станции за три месяца достичь сelenоцентрической орбиты — 2 октября 1991 года «Хитэн» был захвачен гравитационным полем Луны и вышел на орбиту, проходящую через точки Лагранжа  $L_4$  и  $L_5$ . 15 февраля 1992 года станция была окончательно переведена на орбиту искусственного спутника Луны, на которой и проработала более года.

10 апреля 1993 года по команде с Земли «Хитэн» врезался в Луну.

Свой второй космический аппарат к Луне Япония направила спустя 17 лет после первого — 14 сентября 2007 года с космодрома Танегасима стартовал межпланетный зонд «Кагуя» (яп. — かぐや). Этот старт стал первым в череде запусков, которые осуществили в 2007–2008 году ряд стран после возрождения интереса к исследованиям Луны. В начале «второй лунной гонки» Япония опередила своих извечных конкурентов Китай и Индию.

Основными задачами «Кагуя» было изучение происхождения Луны и ее геологической эволюции, получение данных о поверхности спутника Земли, выполнение радиоэкспериментов на орбите искусственного спутника Луны. Все эти цели были достигнуты в ходе миссии, продолжавшейся полтора года. В частности, удалось составить топографическую карту лунной поверхности с разрешением 15 километров.

Вместе с «Кагуя» к Луне были направлены вспомогательные субспутники «Окина» (яп. — おきな) и «Юна» (яп. — おうな). Они отделились от корабля-матки соответственно 9 и 12 октября 2007 года.

Потребность в субспутниках возникла из-за того, что лунный зонд, исследуя обратную сторону Луны, невидим с Земли, и, значит, данные о гравитационных аномалиях не могут быть получены непосредственно. Два дополнительных микроспутника решали эту проблему.

Так, с помощью «Окина» удалось составить карту распределения сил тяжести на обратной стороне Луны. Полученные данные также позволили сделать выводы о затухании вулканической активности Луны 2,84 миллиарда лет назад.

12 февраля 2009 года «Окину» «уронили» на лунную поверхность. Аналогичную операцию провели 10 июня того же года и с «Кагуя».

А вот судьба «Юны» неизвестна. Вероятнее всего, субспутник также упал на лунную поверхность. Но когда это произошло, да и точку падения не знает никто.

Как и в случае с Луной, Япония стала третьей страной, направившей свой исследовательский зонд в сторону Марса. Это произошло 4 июля 1998 года, когда была запущена станция «Нозоми» (яп. — のぞみ, «надежда»).

Основными научными задачами этой миссии стало изучение динамики и состава верхней атмосферы и ионосферы Марса, взаимодействие ее с солнечным ветром и связанные с этим процессы диссипации.

Масса зонда составляла 541 килограмм, из них 282 килограмма приходились на топливо.

В какой-то степени миссия «Нозоми» носила международный характер. Из 14 научных приборов, установленных на зонде, десять были японскими и по одному прибору создали ученыe из Германии, США, Канады и Швеции.

Возможности ракеты-носителя М-5, с помощью которой «Нозоми» была запущена, было



недостаточно, чтобы отправить зонд к Марсу напрямую. Поэтому японскими специалистами была разработана довольно оригинальная схема полета с использованием ряда гравитационных маневров. Аппарат должен был дважды пролететь возле Луны, затем во время пролета близ Земли получить дополнительный разгонный импульс и лишь после этого выйти на траекторию полета к Марсу.

20 декабря 1998 года доразгон у Земли прошел нештатно, и станция вышла на нерасчетную орбиту вокруг Солнца. Ценой больших затрат топлива после ряда коррекций ее все же удалось направить на новую траекторию, обеспечивающую прибытие к Марсу на 4 года позже начального срока.

Однако этим проблемы не ограничились: 21 апреля 2002 года во время мощной солнечной вспышки вышла из строя система распределения электропитания, и связь с аппаратом стала затрудненной. Несмотря на все возникающие трудности, специалистам все-таки удалось провести два дополнительных гравитационных маневра в поле тяготения Земли (21 декабря 2002 года и 19 июня 2003 года) и направить станцию по кратчайшей траектории к Марсу.

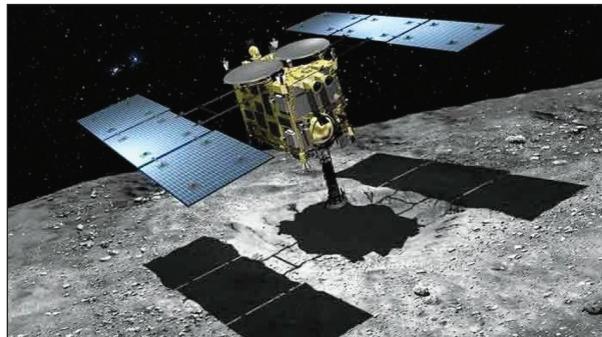
На подходе к марсианской орбите без надежного электроподогрева гидразин в баках двигательной установки постепенно замерз, тормозной импульс выдать не удалось, и 9 декабря 2003 года Нодзоми прошла на высоте около тысячи километров над поверхностью Красной планеты.

Единственным научным результатом этой неудачной миссии стали наблюдения межпланетной среды, проведенные за годы блуждания по Солнечной системе.

Пионерским достижением является и миссия межпланетного зонда «Хаябуса» (яп. — はやぶさ), состоявшаяся в 2003–2010 годах. Впервые в мире на Землю были доставлены образцы с поверхности астероида.

Зонд «Хаябуса» был запущен 9 мая 2003 года. Основной задачей полета было изучение астероида (25143) Итокава, названного так в честь «отца японской космонавтики» Хидэо Итокавы, и взятие образцов грунта с его поверхности. Планировалось, что в июне 2007 года зонд вернется к Земле и сбросит капсулу с добытыми образцами грунта.

Практически с самого начала экспедиции она столкнулась с рядом трудностей, которые



Межпланетный зонд «Хаябуса»

было практически невозможно предусмотреть заранее.

Так, сильная солнечная вспышка, происшедшая, когда аппарат находился на траектории полета к астероиду, нарушила работу солнечных батарей, что снизило до минимума маневренность «Хаябусы». Из-за этого космический корабль достиг астероида лишь в сентябре 2005 года, на несколько месяцев позднее, чем планировалось. Вызывала нарекания и работа ионных двигателей, что также осложнило проведение операций по забору грунта и возвращению домой. А тут еще два из трех гироскопов вышли из строя. В какой-то момент никто уже и не надеялся даже на частичное выполнение полетного задания.

Тем не менее работы с зондом продолжались, и к 12 сентября 2005 года он вышел на расчетные 20 километров от поверхности астероида.

На ноябрь того же были запланированы три короткие посадки на поверхность Итокавы — одна пробная и две штатные. Однако из-за ряда сбоев одна посадка прошла неудачно (хотя при этом аппарат, как и планировалось, смог остановить на астероиде алюминиевую пластинку с именами 880 тысяч землян из почти 150 стран).

Кроме того, «Хаябуса» должен был выпустить на поверхность крошечного робота «Минерва» (яп. — 詳細は「) массой в 519 грамм. Эта «крошка» должна была изучить химический состав малой планеты и сфотографировать отдельные детали поверхности, вплоть до отдельных пылинок. Однако после отделения робота связь с ним установить не удалось, и «Минерва» был потерян. Предполагают, что робот улетел в открытый космос.

26 ноября аппарат осуществил еще одну попытку забора грунта. В момент максимального

сближения с поверхностью астероида произошел сбой компьютера. Аппарат потерял ориентацию и повредил один из двигателей, вскоре связь с ним была потеряна. Однако, как оказалось впоследствии, грунт все же удалось забрать.

К марту 2006 года связь с «Хаябусой» удалось восстановить. Спустя три месяца японские специалисты пришли к выводу, что аппарат все-таки сможет вернуться на Землю. Правда, для этого потребовалось четыре года, в течение которых с зондом велась кропотливая работа, чтобы не потерять его вновь. 4 февраля 2009 года наконец-то удалось перезапустить двигатели и окончательным маневром направить аппарат к Земле.

13 июня 2010 года зонд вошел в земную атмосферу и сбросил спускаемую капсулу, приземлившуюся в районе австралийского полигона Вумера. Сам аппарат сгорел в плотных слоях атмосферы.

Капсула была доставлена в Японию, и спустя пять месяцев ученые выяснили, что значительная часть собранных частиц состоит из олигина, что свидетельствует об их внеземном происхождении.

Таким образом, несмотря на «пережитые» проблемы миссия «Хаябусы» в целом увенчалась успехом.

Опыт, приобретенный японскими специалистами в ходе этой миссии, позволил им задуматься о продолжении работ в данном направлении. 30 декабря 2014 года в глубины космоса отправился межпланетный зонд «Хаябуса-2» (яп. — はやぶさ2). Он — почти точная копия своего предшественника, но при его создании были учтены те конструктивные недостатки, которые «осложнили жизнь» «Хаябусы».

В качестве цели выбран астероид (162173), больший по размерам, чем астероид Итокава, и относящийся к другому классу малых планет. Если все пойдет по плану, то в 2018 году «Хаябуса-2» возьмет образцы грунта с поверхности астероида и через два года возвратит их на Землю. Также он должна доставить на поверхность небесного тела маленький планетоход. То есть сделать то, что не удалось сделать в 2005 году.

И еще одна межпланетная миссия, которая осуществляется японскими учеными.

21 мая 2010 года в Японии был запущен космический аппарат «Акацуки» (яп. — あかつき,

«Рассвет», «Утренняя заря»), предназначенный для изучения Венеры. Предполагалось, что на орбите вокруг «утренней звезды» космический аппарат проведет не менее двух лет. Однако вывести его на расчетную орбиту не удалось — подвел двигатель.

Как использовать зонд после этой неудачи, пока не решили. При самом благоприятном стечении обстоятельств, если удастся задействовать двигатель для контроля ориентации, в ноябре 2015 года «Акацуки» сможет выйти на долгопериодическую (90 дней) орбиту вокруг Венеры.

Одновременно с «Акацуки» был запущен еще один космический аппарат — «Икарос» (яп. — イカルス), предназначенный для испытаний солнечного паруса. Через 45 минут после старта он отделился от носителя и начал самостоятельный полет.

Раскрытие солнечного паруса началось 3 июня 2010 года и успешно завершилось спустя неделю. По переданным с борта «Икароса» кадрам, можно судить, что все 200 квадратных метров ультратонкого полотна справились успешно, а тонкопленочные солнечные батареи начали вырабатывать энергию.

Задача-минимум миссии заключалась в раскрытии паруса, а задача-максимум состояла в том, чтобы научить парусник регулировать скорость и направление в зависимости от солнечного излучения. Обе задачи были успешно выполнены, и началась дополнительная программа.

Солнечный парус изготовлен из полиамидной пленки толщиной 7,5 микрон. Представлен четырьмя лепестками трапециевидной формы. Внутри лепестков вшиты солнечные батареи и солнечные рули. Раскрытие паруса происходит за счет вращения аппарата вокруг оси со скоростью 20 оборотов в минуту. Под силой инерции четыре грузика вытягивают лепестки паруса. Таким образом, в раскрытом виде получается квадрат со стороной 14 метров.

В настоящее время «Икарос» продолжает свой полет, собирая столь необходимую для специалистов информацию.

На конец 2010-х годов запланирован запуск второго космического аппарата с большим парусом — со стороной 50 метров.

В планах Японии и другие межпланетные миссии, о которых будет упомянуто ниже.



## Японские космонавты

Несмотря на то, что у Японии нет собственных пилотируемых космических кораблей (они только в перспективе), уже почти четверть века японские космонавты совершают полеты в космос. Доставку их на орбиту обеспечивали советские / российские и американские корабли.

Первым японцем, побывавшим в космосе в 1990 году на советском корабле «Союз ТМ-11», стал журналист телерадиокорпорации Tokyo Broadcasting System (TBS) Тоёхиро Акияма (яп. — 秋山豊寛). Свой полет он совершил на коммерческой основе, что позволяет считать его и первым космическим туристом.

Еще до появления «японского Гагарина» в «стране восходящего Солнца», в 1985 году, был проведен первый набор в национальный отряд космонавтов, которые должны были летать в космос на американских кораблях многоразового использования системы «Спейс Шаттл» (англ. — Space Shuttle). Были отобраны три кандидата: Мамору Мори (яп. — 毛利衛), Такао Дои (яп. — 土井隆雄) и Тиаки Мукаи (яп. — 向井千秋, до замужества Тиаки Найто).

Первым из этой троицы в 1992 году в космосе побывал Мамору Мори. Спустя семь лет он вторично отправился на орбиту.

Следом за ним в 1994 году стартовала Таики Мукаи. Она стала первой японкой, побывавшей в космосе. В ее активе также две экспедиции на околоземную орбиту.

Четвертым японским космонавтом стал Коити Ваката (яп. — 若田光一). В отряд космонавтов он был зачислен в составе второго набора в 1992 году, а первый раз в космос отправился в 1996 году. Всего в активе Вакаты четыре космических полета. Трижды он стартовал в космос на американских шаттлах, один раз — на российском «Союзе». К тому же Ваката единственный японец, который был командиром одного из экипажей Международной космической станции.

Такао Дои стал пятым японцем, побывавшим в космосе, и первым японцем, который совершил выход в открытый космос.

К настоящему времени уже девять японцев летали в космос. Кроме вышеназванных космонавтов, на орбите побывали Соити Ногути (яп. — 野口聰), Акихико Хосидэ (яп. — 星出彰彦), Сатоси Фурукава (яп. — 古川聰) и Наоко Ямадзаки (яп. — 山崎直子, до замужества Наоко Сумино).



Японский космонавт  
Тоёхиро Акияма

В ближайшие два года еще двое японских космонавтов будут работать на борту Международной космической станции. Старт Кимии Юи (яп. — 油井亜美也) запланирован на май 2015 года.

Есть в планах Японского аэрокосмического агентства и планы отправки космонавтов на собственных кораблях. Но все эти планы рассчитаны, как минимум, на вторую половину 2020-х годов. А пока японцы по-прежнему будут использовать для своих полетов российские, а после 2017 года и американские корабли.

## Японская космонавтика: настоящее и будущее

Японская космонавтика сегодня — это высокотехнологичная конкурентоспособная отрасль, запускающая спутники различного назначения на околоземную орбиту, отправляющая космические аппараты к другим планетам, активно участвующая во многих международных проектах. Высокое реноме ей обеспечивает наличие разумной и выверенной программы исследований космического пространства, разработанной структурами Японского аэрокосмического агентства, которую поддерживало и профинансировало правительство Японии.

Основные элементы этой программы:

1. Широкий спектр научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, направленных не только на разработку образцов космической техники, но и на создание технологий, которые могут быть применены как в космосе, так и на земле.



2. Разработка спутников прикладного назначения (дистанционное зондирование Земли, связь, навигация, метеорология и другие), их запуск и эксплуатация на околоземной орбите.

3. Осуществление полетов автоматических межпланетных станций к Луне, Марсу, Венере, астероидам и другим небесным телам Солнечной системы.

4. Создание ракет-носителей и космических кораблей, предназначенных для пилотируемых полетов в космос, причем не только по околоземной орбите, но и для полетов к Луне с последующей высадкой на ее поверхность.

5. Участие в космических исследованиях совместно с другими странами как на двухсторонней, так и на многосторонней основе.

Следует отметить, что большое влияние на планы Японии по освоению космоса оказывает

Китай. По своей сути — это космическая гонка на региональном уровне. Каждая из этих двух стран стремится обогнать соседа, первой достигнув определенного рубежа на космических трассах. Будь это первый зонд, направленный в сторону какого-то небесного тела, или спутниковая группировка какого-то конкретного назначения, или, например, первая лунная база.

Пока больше достижений у Китая, стремящегося к приоритетам не только в азиатском регионе, но и в глобальном аспекте. Однако есть потенциал и у Японии. Поэтому трудно предугадать, как будут развиваться события в дальнейшем, лет через 20, 30, 50.

Но одно можно сказать определенно: японская космонавтика и сегодня не находится на задворках мировой космонавтики. Не окажется она там и завтра.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Железняков А.Б., Кораблёв В.В. Опыт освоения космоса Китайской Народной Республикой // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия: Наука и образование. 2012. № 2(147), Т. 2. С. 13–21.

2. Железняков А.Б., Кораблёв В.В. От «Ариабады» до полета на Марс // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2013. №2 (171). С. 38–43.

3. Железняков А.Б., Кораблёв В.В. Космические программы двух Корей // Научно-технические ведо-

мости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2013. №4(183), Т. 1. С. 20–30.

4. Афанасьев И., Лавренов А. Большой космический клуб. М.: РТСофт, 2006.

5. Железняков А. Тайны ракетных катастроф. Изд. 2-е, доп. М.: Эксмо, Яуза, 2011.

6. Космонавтика: Энциклопедия. / Гл. ред. В.П. Глушко; Редколлегия: В.П. Бармин, К.Д. Бушуев, В.С. Верещайн [и др.]. М.: Сов.Энциклопедия, 1985.

## REFERENCES

1. Zheleznyakov A.B., Korablev V.V. Opyt osvoyeniya kosmosa Kitayskoy Narodnoy Respublikoy [The experience of space exploration PRC]. *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGPU*. Seria: Nauka i obrazovaniye. 2012. № 2(147), Т. 2. S. 13–21. (rus.)

2. Zheleznyakov A.B., Korablev V.V. Ot «Ariabady» do poleta na Mars [From «Ariabady» before the flight to Mars]. *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*, 2013. №2 (171). S. 38–43. (rus.)

3. Zheleznyakov A.B., Korablev V.V. Kosmicheskiye programmy dvukh Korey [Space programs of the two Ko-

reas.]. *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*. 2013. №4(183), Т. 1. S. 20–30. (rus.)

4. Afanasyev I., Lavrenov A. Bolshoy kosmicheskiy klub [Large space club]. M.: RTSoft, 2006. (rus.)

5. Zheleznyakov A. Tayny raketnykh katastrof [Mysteries of rocket disasters.]. Izd. 2-ye, dop. M.: Eksmo, Yauza. 2011. (rus.)

6. Kosmonavtika: Entsiklopediya. [Astronautics Encyclopedia.] / Gl. red. V.P. Glushko; Redkollegiya: V.P. Barmin, K.D. Bushuyev, V.S. Vereshchain [i dr.]. M.: Sov. Entsiklopediya, 1985. (rus.)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ЖЕЛЕЗНЯКОВ Александр Борисович** — советник директора — главного конструктора Центрально-го научно-исследовательского и опытно-конструкторского института робототехники и технической кибернетики. 194064, Россия, Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., 21.. E-mail: zheleznyakov@rtc.ru



**КОРАБЛЁВ Вадим Васильевич** — доктор физико-математических наук профессор, советник ректора Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: korablev@spbstu.ru

#### **AUTHORS**

**ZHELEZNYAKOV Aleksandr B.** — State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics (RTC). 21, Tikhoretsky prospect, Saint-Petersburg, Russia, 194064. E-mail: zheleznyakov@rtc.ru

**KORABLEV Vadim V.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: korablev@spbstu.ru

DOI 10.5862/JEST.219.23

УДК 001.92;52

*O.A. Матенев*

## **ИМЕНА УЧЕНЫХ ПЕТЕРБУРГА НА НЕБОСВОДЕ**

*O.A. Matenев*

### **THE NAMES OF SCIENTISTS PETERSBURG IN A FIRMAMENT**

В статье приводятся данные о части малых планет, коим были присвоены имена выдающихся петербуржцев. Приведены сведения о фактах открытия первых малых планет, в том числе и российскими исследователями. Вкратце раскрывается история возникновения современной тенденции наименования вновь найденных малых планет.

МАЛЫЕ ПЛАНЕТЫ; АКАДЕМИЯ НАУК; ПЕТЕРБУРЖЦЫ; ЛЕНИНГРАД; ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ.

The article presents data on the part of minor planets which have been named after prominent St. Petersburgians. The author provides information about the facts of discovering the first minor planets, including the involvement of Russian researchers. The article outlines the history of modern trends in naming newly discovered minor planets.

MINOR PLANETS; ACADEMY OF SCIENCES; THE OUTSTANDING PETERSBURGERS; LENINGRAD; POLYTECHNICAL INSTITUTE.

*«Санкт-Петербург всегда впитывал в себя все лучшее, что создавалось пытливым умом и золотыми руками наиболее талантливых представителей рода человеческого. Многие научно-технические достижения сперва внедрялись в нашем городе и только потом распространялись по России. Не случайно, знакомясь с историей развития города на Неве, мы очень часто встречаем слово «впервые». Почти все, чем богата сегодня Россия, зародилось в Петербурге.»*

*(О.Н. Коротцев)*

В современном мире человек все реже поднимает свой взгляд вверх и любуется звездным небом, а ведь не мало в нем небесных тел, носящих имена выдающихся личностей, в том числе и наших современников.

В этой статье рассказано лишь о малой части выдающихся петербуржцев, чьи имена увековечены на звездном небосклоне. Приведены данные о малых планетах, которые носят имена именитых петербуржцев — членов Российской академии наук.

Малые планеты (астероиды) — тела Солнечной системы, имеющие размеры от километра до десятков и сотен километров. Каждая малая планета независимо от ее размеров является самостоятельным членом Солнечной системы и движется вокруг Солнца по своей ор-

бите, сохраняющей устойчивость в течение миллионов лет. Основная часть многочисленного семейства астероидов движется в пространстве между орбитами Марса и Юпитера. Как и большие планеты, они светят отраженным солнечным светом. Вследствие малых размеров и больших расстояний от Земли видны они только в телескоп. [1]

Первые малые планеты были открыты в XIX веке. В 1801 году в Палермской астрономической обсерватории итальянский астроном Джузеппе Пиацци открыл малую планету, получившую название в честь древнеримской богини плодородия Цереры. Таким образом, Джузеппе Пиацци положил начало традиции присваивать обнаруженным объектам Солнечной системы имена мифических персонажей, а уже после —



имена людей, внесших вклад в развитие мировой цивилизации.

После этого открытия XIX век превратился в век «охоты» астрономов всего мира за малыми планетами. В России же наблюдения за малыми планетами были начаты в 1912 году в Симеизской обсерватории (Крым). В период Великой Отечественной войны обсерватория была разрушена, но после войны была построена новая, Крымская астрофизическая обсерватория Академии наук СССР (действует по сей день). В настоящее время в России насчитывается более 20 обсерваторий.

Говоря о малых планетах и об их именах, невозможно не сказать о Международном планетном центре, размещенном при Смитсоновской астрофизической обсерватории в США, в который стекаются все сведения о наблюдениях за малыми планетами, но в то же время по решению Международного астрономического союза (МАС) каталог «Эфемериды малых планет», в который заносятся сведения о вновь открытых

малых планетах, издается Институтом прокладной астрономии Российской академии наук (ИПА РАН) в Санкт-Петербурге. В Международном каталоге первая «российская» малая планета — Симеиза — значится под номером 748. Ее открыл 14 марта 1913 года русский астроном Григорий Николаевич Неуймин. [3] В числе первых малых планет, открытых Г.Н. Неуйминым, есть малая планета Пулкова (номер 762), названная в честь Пулковской обсерватории.

Приведем в сводной таблице данные о малых планетах, имеющих имена выдающихся петербуржцев — ученых и государственных деятелей. Малым планетам присвоены имена более 200 членов Российской академии наук: президентов АН СССР и РАН, нобелевских лауреатов, выдающихся математиков и физиков, астрономов и химиков, конструкторов и технологов, биологов и государственных деятелей. В настоящее время более 600 планет носят имена наших соотечественников.

#### Малые планеты, носящие имена ученых-петербуржцев

Петербуржцы, в чью честь названы малые планеты	Название малой планеты	Порядковый номер малой планеты	Абсолютная звездная величина, зв. вел.	Диаметр (км)	Среднее расстояние от Солнца, млн км	Среднее расстояние от Земли, млн км
Александров А.П.	ALEKSANDROV	2711	11,5	18	450	329,5
Александров Е.Б.	EVGENIJ	24609	15,4	3	347	186,5
Алфёров Ж.И.	ALFEROV	3884	12,7	10	466	328
Амбарцумян В.А.	AMBARTSUMIAN	1905	13,5	7	333	203,5
Бехтерева Н.П.	BECHTEREVA	6074	13,5	—	—	—
Бонч-Бруевич А.М.	BONCH-BRUEVICH	12657	12,3	12	452	328,5
Вавилов Н.И. и Вавилов С.И.	VAVILOV	2862	12,7	—	—	—
Васильев Ю.С.	V'YUS	13474	13,5	7	392	202,5
Галеркин Б.Г.	GALERKIN	22611	15,7	3	380	255
Глебов И.А.	GLEBOV	6108	14,0	6	328	186,5
Голант В.Е.	GOLANT	5156	13,5	7	359	215,5
Зельдович Я.Б.	ZELDOVICH	11438	13,8	6	328	190
Иоффе А.Ф.	IOFFE	5222	11,3	22	415	—
Капица П.Л.	KAPITSA	3437	13,4	7	340	239,5
Кондратюк Ю.В.	KONDRATYUK	3084	13,5	8	364,7	—
Крылов А.Н.	KRYLOV	5247	12,5	11	349	220
Курчатов И.В.	KURCHATOV	2352	11,1	21	465	341
Менделеев Д.И.	MENDELEEV	2769	12,1	14	469	332
Осипов Ю.С.	OSIPOVYURIJ	10259	12,3	12	465	279
Парийский Ю.Н.	PARIJSKIJ	5303	12,4	12	430	346
Павлов И.П.	PAWLOWIA	1007	11,2	—	—	—
Попов А.С.	POPOV	3074	13,7	—	—	—

Петербуржцы, в чью честь названы малые планеты	Название малой планеты	Порядковый номер малой планеты	Абсолютная звездная величина, зв. вел.	Диаметр (км)	Среднее расстояние от Солнца, млн км	Среднее расстояние от Земли, млн км
Рутберг Ф.Г.	RUTBERG	14815	14,0	6	328	176
Сикорский И.И.	SIKORSKY	10090	13,4	7	354,4	—
Лихачев Д.С.	LIKACHEV	2877	12,1	—	—	—
Ломоносов М.В.	LOMONOSOWA	379	10,8	—	—	—
Фортов В.Е.	FORTOV	3813	13,3	8	328	195,5
Финкельштейн А.М.	FINKELSTEIN	5706	12,7	10	467,1	—
Харитон Ю.Б.	KHARITON	9263	13,7	6	470	307

**П р и м е ч а н и е:** часть данных взята из базы данных JPL NASA по малым телам Солнечной системы Калифорнийского технологического института [4]

Всем перечисленным в таблице петербуржцам, как и всем, кто был удостоен такого вселенского масштаба памятника, были торжественно вручены Свидетельства о присвоении малым планетам их имен.

Завершая этот короткий материал о больших людях Петербурга, нельзя забыть и о малых планетах, получивших названия Академия (Academia — № 289), Ленинград (Leningrad — № 2046),

Политех (Polytech — № 14312) соответственно в честь Российской академии наук, города-героя Ленинграда и Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

Факт присвоения малой планете имени того или иного человека свидетельствует о признании его достижений мировым сообществом. К сожалению, в мировых системах рейтинга этот фактор не учитывается.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черных Н.С. О названиях малых планет. Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга МГУ. [электр. ресурс] ([http://www.sai.msu.ru/news/2007/01/20/mal\\_planet.html](http://www.sai.msu.ru/news/2007/01/20/mal_planet.html))

2. Финкельштейн А.М. Российская академия наук между Марсом и Юпитером. СПб.: Наука, 2003. 376 с.

3. Коротцев О.Н. Звездные имена Петербурга. Малые планеты, названные именами ленинградцев-петербуржцев. Энциклопедический справочник 2005. 544 с.

4. Базы данных JPL NASA по малым телам Солнечной системы Калифорнийского технологического института. [электр. ресурс] <http://ssd.jpl.nasa.gov/>

## REFERENCES

1. Chernykh N.S. O nazvaniyakh malykh planet [About titles minor planets]. Gosudarstvennyy astronomicheskiy institut imeni P.K. Shternberga MGU. [elektron. resurs] ([http://www.sai.msu.ru/news/2007/01/20/mal\\_planet.html](http://www.sai.msu.ru/news/2007/01/20/mal_planet.html)). (rus.)

2. Finkelshteyn A.M. Rossiyskaya akademiya nauk mezhdu Marsom i Yupiterom [Russian Academy of Sciences between Mars and Jupiter]. SPb.: Nauka, 2003. — 376 s. (rus.)

3. Korottsev O.N. Zvezdnyye imena Peterburga. Malyye planety, nazvannyye imenami leningradtsev-peterburzhtsev [The stellar names Petersburg. Small planet named after the St. Petersburg-Leningrad]. Entsiklopedicheskiy spravochnik. 2005. — 544 s. (rus.)

4. Bazy dannykh JPL NASA po malym telam Solnechnoy sistemy Kaliforniyskogo tekhnologicheskogo instituta/ [elektron. resurs] <http://ssd.jpl.nasa.gov/> (rus.)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**МАТЕНЕВ Олег Александрович** — инженер лаборатории «Управление инновациями» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: ntv-nauka@spbstu.ru

## AUTHOR

**MATENEV Oleg A.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: ntv-nauka@spbstu.ru

DOI 10.5862/JEST.219.24

УДК 929:328:321:327

*В.Н. Волкова*

## **ВЯЧЕСЛАВ МИХАЙЛОВИЧ МОЛОТОВ**

*V.N. Volkova*

### **VYACHESLAV M. MOLOTOV**

В период Великой Отечественной войны народ нашей страны совершил непревзойденный в истории подвиг, отстояв независимость Советского Союза. В исследованиях, посвященных осмыслианию этого периода, все больше осознается, что этот подвиг был бы невозможен без объединяющего наш народ руководства. Как бы ни оценивались успехи и неудачи Совета народных комиссаров (Совнарком, в последующем Совет министров) СССР и Государственного комитета обороны (ГКО) СССР, нельзя не признать заслуг председателя этих органов управления страной И. В. Сталина и его заместителя В.М. Молотова. Именно В.М. Молотов 22 июня 1941 года в 12 часов выступил по радио с сообщением о начале войны, закончив эту речь знаменитыми словами: «Наше дело правое. Враг будет разбит. Победа будет за нами». В этом году исполнилось 125 лет со дня рождения Вячеслава Михайловича Молотова, некоторый период жизни которого связан с Политехническим институтом. Поэтому Комиссия по изучению истории нашего университета посчитала целесообразным ознакомить студентов и преподавателей университета с историей жизни и деятельности выдающейся личности — Героя Социалистического Труда Вячеслава Михайловича Молотова.

**МОЛОТОВ; ВОВ; СОВНАРКОМ; ГЕРОЙ СОЦИАЛИСТИЧЕСКОГО ТРУДА; ГКО; ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ.**

During the Great Patriotic War of 1941–1945, the people of our country contributed to the history of the unmatched feat, defended the sovereignty of the Soviet Union. Studies on this period show a growing awareness that this feat would have been impossible without the country leaders who united our people. No matter how are assessed successes and failures of the Council of People's Commissars (SovNarKom — later the Council of Ministers) and the USSR State Defense Committee (SDC), it is impossible not to recognize the merits of the chairman of the USSR government Stalin and his deputy V. M. Molotov. It was V.M. Molotov who on June 22, 1941 at 12 o'clock broadcasted the message about the beginning of the war and finished his speech with the famous words: «Our cause is just. The enemy will be defeated. Victory will be ours.» This year marks the 125th birth anniversary of Vyacheslav Mikhailovich Molotov, whose part of life is connected with the Polytechnic Institute. Therefore, the Commission for the Historical Studies at our university decided to make students and the faculty aware of the life and work of the outstanding personality, Hero of Socialist Labor Vyacheslav Mikhailovich Molotov.

**МОЛОТОВ; GREAT PATRIOTIC WAR; COUNCIL OF PEOPLE'S COMMISSIONS; HERO OF SOCIALIST LABOR; STATE DEFENSE COMMITTEE (SDC); POLYTECHNIC UNIVERSITY.**

**Вячеслав Михайлович Молотов** (Скрябин) (1890–1986) родился 9 марта (25 февраля по старому стилю) 1890 года в слободе Кукарка Нолинского уезда Вятской губернии в семье приказчика.

Во время учебы в школе Вячеслав проявлял разносторонние интересы, играл на скрипке и писал стихи. С 1902 года вместе со старшими братьями до 1908 года учился в Казанском первом реальном училище. В эти годы большая

часть казанской молодежи была настроена весьма радикально. Вячеслав вступил в один из кружков самообразования по изучению марксистской литературы.

В 1905–1907 годах участвовал в событиях первой русской революции в Казани. Летом 1906 года вступил в РСДРП и принимал участие в создании нелегальной революционной организации учащихся средних учебных заведений в качестве одного из главных организаторов.

В апреле 1909 года перед выпускными экзаменами в реальном училище был арестован за революционную деятельность и отправлен в ссылку в Вологду. Большое внимание в этот период он уделяет освоению основных трудов марксизма («Капитал» К. Маркса и др.) [1].

Освобожден в 1911 году. Сдал экстерном экзамены за реальное училище и в том же году поступил в Санкт-Петербургский политехнический институт. Был зачислен на кораблестроительный факультет, однако почти сразу переведен на экономический [5].

Поступив в институт, Вячеслав Скрябин проводит большую работу по сплочению большевистских кадров студенчества института. При его участии были созданы большевистские группы и в других учебных заведениях, объединенные в Общегородской комитет социал-демократов высших учебных заведений. Эти студенческие большевистские организации Петербурга создали ряд нелегальных студенческих кружков и проводили революционные выступления против царизма, распространяли большевистские прокламации в вузах. Параллельно Вячеслав вел большую работу сразу в нескольких рабочих кружках, работал как член Петербургского комитета партии большевиков, занимался пропагандистской работой в Выборгском районе и среди железнодорожников Николаевской (Октябрьской) железной дороги, принимал участие в выборной компании в IV-ю Государственную Думу и в руководстве большевистской думской фракции [2].

В этот же период Вячеслав Скрябин стал сотрудничать в большевистских газетах «Звезда», «Правда» (член редколлегии с 1912).

В 1912 году начала издаваться первая легальная большевистская газета «Правда». Вячеслав работал секретарем редакции с 1912 по 1913 год. Во время подготовки издания «Правды» познакомился с одним из лидеров большевиков — Иосифом Сталиным. Сталин стал первым из руководителей большевистского подполья, с которым Скрябин лично встретился [9].

В 1912-м В. Скрябин был исключен из института за революционную деятельность с формулировкой «в связи с политической неблагонадежностью» [3]. Однако, согласно собственным воспоминаниям, периодически посещал занятия до четвертого курса.

В апреле 1913 года при ликвидации властью Петербурга «Объединенного социал-демократического студенческого комитета» Вячеслава Скрябина арестовывают и через несколько месяцев высыпают из Петербурга с запрещением проживать в ряде крупных городов России. Однако, поселившись недалеко от Петербурга, В. Скрябин продолжает нелегальную работу в Петербурге, в том числе в вузах.

С осени 1914 года Вячеслав Молотов работал в Москве над воссозданием парторганизации, закрытой в начале Первой мировой войны. Однако в 1915 году был арестован и сослан на три года в Иркутскую губернию, откуда в 1916 году бежал. В том же году стал членом Русского бюро ЦК РСДРП (Петроград, 1916) и вошел в его руководящую тройку.

В 1915 году В. Скрябин стал использовать партийный псевдоним Молотов.

Внук Молотова историк и политолог В.А. Никонов отмечает, что взятие такого псевдонима было вызвано тем, что «Молотов» — это звучало вполне по-пролетарски, индустриально, что должно было импонировать рабочим, которые недолюбливали партийцев из интеллигенции. Вторая причина — вполне прозаическая: деду было легче его произносить, а в слове «Скрябин» три первых согласных звука заставляли его заскакивать, особенно, когда он волновался [10].

В 1918–1920 годах В.М. Молотов работал на различных руководящих партийных и советских постах в Поволжье. С сентября 1920 года был секретарем Донецкого губкома РКП(б), а с ноября 1920 по март 1921 года — секретарем ЦК КП(б) Украины. В 1921–1930 В.М. Молотов — секретарь ЦК ВКП(б) и одновременно с 1926-го член Политбюро, а в 1928–1929 — первый секретарь Московского городского комитета партии. В 1930–1941 годах — председатель Совета народных комиссаров (Совнарком, аналог Совета министров) СССР и Совета труда и обороны СССР (до 1937).

23 августа 1939 года В.М. Молотов в Москве подписал с Германией Пакт о ненападении, а также секретный протокол к нему о разделе сфер влияния в Восточной Европе. Этот документ вошел в историю под названием «Пакт Молотова — Риббентропа» (существование секретного протокола в течение десятилетий отрицалось советской стороной, только в конце



1980-х годов во время горбачевской перестройки он стал достоянием мировой общественности).

22 июня 1941 года в 12 часов В.М. Молотов выступил по радио с сообщением о начале войны, закончив эту речь знаменитыми словами: «Наше дело правое. Враг будет разбит. Победа будет за нами».

С 1941 года В.М. Молотов — заместитель председателя, а в 1942—1957 годы — первый заместитель председателя Совнаркома СССР, одновременно в 1941—1945 гг. — заместитель председателя Государственного комитета обороны (ГКО). В 1939—49 и 1953—56 годах Вячеслав Михайлович Молотов — народный комиссар (нарком) по иностранным делам (министр иностранных дел СССР).

В.М. Молотов представлял Наркомат иностранных дел на Тегеранской (1943), Крымской (1945), Потсдамской (1945) конференциях глав правительств трех союзных держав — СССР, США, Великобритании.

Как народный комиссар по иностранным делам В.М. Молотов принимал участие в становлении Организации объединенных наций (ООН). На конференции в Сан-Франциско, проведенной в период с апреля по июнь 1945 года, собрались представители пятидесяти стран для создания Международной организации, обсудили и составили Устав ООН (Устав был подписан 26 июня 1945 года). На четвертом пленарном заседании 28 апреля 1945 председательствовал В.М. Молотов.

В 1945—49 и 1953—56 гг. В.М. Молотов часто выезжал в США для участия в работе ООН, причем из-за своей непримиримой позиции, а также частого использования права «вето» получил в дипломатических кругах прозвище «Господин Нет» [6].

С 1947-го по 1949 год Молотов возглавлял советскую внешнюю разведку в качестве председателя Комитета информации при Совете министров СССР.

Одновременно В.М. Молотов — член ЦК партии в 1921—1957 годах. Член президиума ЦК КПСС в 1926—57. Был членом ВЦИК, ЦИК СССР, депутатом Верховного Совета СССР I—IV созывов.

Кроме военных вопросов, В.М. Молотов курировал вопросы науки, в том числе работу МГУ.



В его архиве сохранилась переписка по поводу письма 14 академиков председателю Всесоюзного комитета по делам высшей школы С. Кафтанову и документы, связанные с дальнейшим развитием этой ситуации. Письмо четырех академиков, написанное от лица Абрама Федоровича Иоффе, было адресовано лично ему. Молотов вмешался в ситуацию противостояния между так называемой «академической» и «университетской» физикой и разрешил этот вопрос [11]. В.М. Молотов был Почетным академиком АН СССР (удостоен звания 29.11.1946; лишен звания в марте 1959).

В 1947 году В.М. Молотову были делегированы полномочия Сталина по атомному проекту: 8 февраля 1947 года на заседании Политбюро ЦК ВКП(б) было принято решение о том, что вопросы работы Спецкомитета при Совете министров СССР докладываются или непосредственно Председателю Совета министров И.В. Сталину или его первому заместителю, В.М. Молотову [11].

После смерти И.В. Сталина В.М. Молотов занимает пост первого заместителя Председателя Совета министров СССР и одновременно — министра иностранных дел (1953—1956).

Молотов не принял решений XX съезда партии в области внешней и внутренней политики. В частности, он выступал против осуждения культа личности Сталина и массовой реабили-

тации политзаключенных, против политики мирного сосуществования, сокращения вооруженных сил, против идеологических послаблений и «оттепели». 29 июня 1957 Молотов был снят со всех постов «за принадлежность к антипартийной группе», выведен из состава Президиума ЦК КПСС и из ЦК КПСС и отправлен послом в Монголию. В 1960–1962 годах он возглавлял Советское представительство в Международном агентстве по атомной энергии (МАГАТЭ) в Вене.

После критики проекта новой Программы КПСС, которая должна была обсуждаться на XXII-м съезде партии, Молотов в середине ноября был отозван из Вены, снят с занимаемой должности и исключен из партии. 12 сентября 1963 года Молотов был отправлен на пенсию.

Несмотря на опалу, Молотов продолжил вести активный образ жизни, постоянно работал дома или в библиотеке. Мемуары он не писал, но свои взгляды на те или иные события общественной жизни он излагал в записках, направляемых в ЦК КПСС. В течение ряда лет добивался восстановления членства в партии, и в 1984 году Молотов был восстановлен в партии. Генеральный секретарь К.У. Черненко лично вручил ему партийный билет.

В результате восстановления в партии с сохранением партстажа (с 1906 года) он стал ее старейшим членом. В 1986 году успел дать интервью газете «Московские новости», в котором сообщил: «У меня счастливая старость. Хочу дожить до 100 лет».

В отличие от имен Маленкова и Кагановича, имя Молотова и после отставки и исключения из партии продолжало свободно упоминаться в литературе, печати, кино, статьи о нем помещались в энциклопедии. Образ Молотова неоднократно появлялся в художественных фильмах, его играли, главным образом Максим

Штраух (в 1940-е гг.) и Николай Засухин (в 1970–1980-е гг.).

### Интересные факты

В.М. Молотов был самым долгоживущим руководителем правительства среди глав правительств Советского Союза и России.

По свидетельству его внука\*, из мировых политиков В.М. Молотов особенно уважал Уинстона Черчилля. В свою очередь У. Черчилль вспоминал о В.М. Молотове: «Он был, очевидно, разумным и тщательно отшлифованным дипломатом» [13].

До конца жизни В.М. Молотов оставался весьма узнаваемым в народе человеком.

В июне 1986 года В.М. Молотов был госпитализирован в Кунцевскую больницу в Москве, где скончался 8 ноября 1986 года. За свою долгую жизнь В.М. Молотов перенес 7 инфарктов миокарда, однако прожил до 96 лет.

В.М. Молотов был удостоен многих наград: Указом № 79 Президиума Верховного Совета СССР от 30 сентября 1943 года за особые заслуги перед советским государством в развитии танковой промышленности в годы Великой Отечественной войны Вячеславу Михайловичу Молотову присвоено звание Героя Социалистического Труда с вручением ордена Ленина и медали «Серп и Молот»; кроме того, он имел 4 ордена Ленина, Орден «Знак Почета», медали.

В его честь при его жизни были переименованы несколько городов и различного рода объектов.

По оценке Жореса Медведева, В.М. Молотов, «...был субъективно честен, исключительно работоспособен, умен и не имел заметных пороков». К тому же, как отмечает Медведев, он «был единственным, кроме Сталина, членом Политбюро, который обладал популярностью в народе и особенно среди интеллигенции» [13].

\* Внук В.М. Молотова Вячеслав Алексеевич Никонов (род. 5 июня 1956, Москва) — советский и российский историк, политолог, государственный и политический деятель, депутат Государственной думы VI созыва.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Большая Советская энциклопедия / Гл. ред. О.Ю. Шмидт. Гос. институт «Советская энциклопедия». М. ОГИЗ РСФСР, 1938. С. 721.
2. Большая Советская энциклопедия. Второе издание / Гл. ред. Б.А. Введенский. М.: Гос. Научное издательство «Большая Советская энциклопедия». 1954. Т. 28. С. 152–154.
3. Большая Советская энциклопедия. Т. 20. М.: Научное издательство «Большая Российская энциклопедия», 2012. С. 697.
4. Всемирная история в Интернете. Биографический справочник // Сайт: [hrono.info](http://hrono.info)>biograf.
5. Малая Советская энциклопедия. Т. 5. М.: АО «Советская энциклопедия», 1930. С. 322–323.
6. Медведев Р.А. Они окружали Сталина. М.: Политиздат, 1990. 351 с. ISBN 5–250–01341–4.
7. Никонов В.А. Молотов. Молодость. М.: Вагриус, 2005. 768 с.
8. Чуев Ф. Сто сорок бесед с Молотовым. М., 1990.
9. Никонов В.А. Молотов вспоминает (Из домашнего архива) // [momonik.ru](http://momonik.ru)>ramoefepusav / Nikonov\_Vyacheslav.
10. Есаков В.Д. Эпизоды истории атомного проекта // Журнал «Природа». 2003. Вып. 10. С. 55–56. М.: Изд-во РАН, 2003.
11. Полунин В.В. Становление центральных органов управления атомной промышленностью СССР (1945–1953 гг.) // Журнал Российского государственного гуманитарного университета. 2007. № 2(16). С.
12. Вячеслав Михайлович Скрябин (Молотов) // Сайт «Люди.ру»
13. Медведев Ж. Соломон Лозовский, Полина Жемчужина и Вячеслав Молотов // Из кн.: Медведев Ж. Сталин и еврейская проблема. Новый анализ. М.: Права человека, 2003. 288 с.

## REFERENCES

1. Bolshaya Sovetskaya entsiklopediya [Great Soviet Encyclopedia] / Gl. red. O.Yu. Shmidt. Gos. institut «Sovet-skaya entsiklopediya». M. OGIZ RSFSR, 1938. S. 721. (rus.)
2. Bolshaya Sovetskaya entsiklopediya [Great Soviet Encyclopedia]. Vtoroye izdaniye / Gl. red. B.A. Vvedenskiy. M.: Gos. Nauchnoye izdatelstvo «Bolshaya Sovetskaya entsiklopediya». 1954. Т. 28. S. 152–154. (rus.)
3. Bolshaya Sovetskaya entsiklopediya [Great Soviet Encyclopedia]. Т. 20. М.: Nauchnoy izdatelstvo «Bolshaya Rossiyskaya entsiklopediya», 2012. S. 697. (rus.)
4. Vsemirnaya istoriya v Internete [History of the World online]. Biograficheskiy spravochnik. Site: [hrono.info](http://hrono.info)>biograf. (rus.)
5. Malaya Sovetskaya entsiklopediya [Small Soviet Encyclopedia]. Т. 5. М.: АО «Sovetskaya entsiklopediya», 1930. S. 322–323. (rus.)
6. Medvedev R.A. Oni okruzhali Stalina [They surrounded Stalin] (SShA, 1984). M.: Politizdat, 1990. 351 s. ISBN 5-250-01341-4. (rus.)
7. Nikonov V.A. Molotov. Molodost [Youth]. M.: Vagrius. 2005. 768 s. (rus.)
8. Chuyev F. Sto sorok besed s Molotovym [One hundred and forty interviews with Molotov]. M., 1990. (rus.)
9. Nikonov V.A. Molotov vspominayet. (Iz domashnego arkhiva) [Molotov recalls. (From home archive)]. // [momonik.ru](http://momonik.ru)>ramoefepusav / Nikonov\_Vyacheslav. (rus.)
10. Esakov V.D. Epizody iz istorii atomnogo proyekta [Episode in the history of the atomic project] // zhurnal «Priroda». M.: RAN, 2003. Vyp. 10. S. 55–56. ISSN 0032-874X. (rus.)
11. Polunin V.V. Stanovleniye tsentralnykh organov upravleniya atomnoy promysh-lennostyu sssr (1945 1953 gg.) [Formation of the central government-nuclear industrial laziness of the USSR (1945 1953)] // Zhurnal Rossiyskogo gosudarstvennogo gumanitarnogo universiteta. M., 2007. № 2 (16). (rus.)
12. Vyacheslav Mikhaylovich Skryabin (Molotov) // Sayt «Lyudi.ru» [Site «Lyudi.ru»]. (rus.)
13. Medvedev Zh. Solomon Lozovsky, Polina Zhemchuzhina i Vyacheslav Molotov [Solomon Lozovsky, Pauline Pearl and Vyacheslav Molotov]. Iz kn.: Medvedev Zh. Stalin i evreyskaya problema. Noviy analiz. M.: Prava cheloveka, 2003. 288 s. (rus.)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**ВОЛКОВА Виолетта Николаевна** — доктор экономических наук профессор кафедры системного анализа и управления Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: violetta\_volkova@list.ru

## AUTHOR

**VOLKOVA Violetta N.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: violetta\_volkova@list.ru

DOI 10.5862/JEST.219.25

УДК 001:93/94

А.И. Демидов

## НИКОЛАЙ ВЛАДИМИРОВИЧ АГЕЕВ. ПУТЬ В НАУКУ

A.I. Demidov

### NIKOLAY VLADIMIROVICH AGUEYEV. WAY TO SCIENCE

В очерке изложены факты биографии русского ученого Н.В. Агеева (1903–1983), основные результаты его научных трудов, выполненных под руководством академика Н.С. Курнакова в Ленинградском политехническом институте, его педагогическая деятельность в Ленинградском металлургическом и Ленинградском индустриальном институтах, которые были образованы на базе Политехнического института в 1930 и 1934 гг. Отмечено важное значение стажировки в Германии для становления Н.В. Агеева как выдающегося ученого. Показана особая роль Н.В. Агеева в распространении нового рентгеновского метода исследования металлов и сплавов для решения научных и прикладных задач. В середине XX века этот метод оказался особенно плодотворным для развития знаний о природе металлических веществ, которые являются основой учения о металлах и сплавах.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ; РЕНТГЕНОГРАФИЯ; ТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ.

The essay provides some facts about the Russian scientist N.V. Agueyev (1903–1983): his main scientific outputs fulfilled under the leadership of the Academy member N.S. Kurnakov in the Leningrad Polytechnic Institute, his educational works in the Leningrad Metallurgical Institute and in the Leningrad Industrial Institute, which were affiliated to the Polytechnic Institute in 1930 and 1934. The essay emphasizes the importance of training in Germany for N.V. Agueyev's self-development as an outstanding scientist. The author shows a special role of N. V. Agueyev in disseminating a new x-ray research method for metals and alloys in order to solve scientific and applied tasks. In the middle of the XX century this method was especially fruitful for the development of knowledge about the nature of metal substances which are the foundation of the science about metals and alloys.

PHYSICOCHEMICAL ANALYSIS; X-RAY ANALYSIS; THERMAL ANALYSIS.

Будущий академик Академии наук СССР Николай Владимирович Агеев (1903–1983) с 1921 по 1925 год учился на металлургическом факультете Ленинградского политехнического института (ЛПИ) [1–6]. Во время учебы в Политехническом институте жил случайным заработком, главным образом чертежными работами. Дипломную работу он выполнял под руководством академика Николая Семеновича Курнакова [7]. По результатам исследований была опубликована статья «Аномальные свойства металлических эвтектик высокой дисперсности» [8], в которой показано влияние дисперсности в эвтектических смесях на электрическую проводимость, твердость и коэффициент линейного расширения. Аномальное поведение эвтек-

тического сплава особенно резко проявляется на диаграммах «твёрдость сплава — состав».

По окончании курса Николай Владимирович был зачислен аспирантом металлургического факультета Ленинградского политехнического института. Об этом периоде его жизни можно судить из текста служебной записки помощника декана металлургического факультета М.П. Славинского проректору ЛПИ по учебной работе, написанной в мае 1927 года [6]: «Аспирант Н.В. Агеев работает под руководством академика Н.С. Курнакова. План работы этого аспиранта, рассчитанный на два года, заключает ряд работ в различных областях производства и обработки сплавов, объединенных общей идеей физико-химического исследования их. Для из-



учения прикладной стороны вопросов Н.В. Агееву была предоставлена возможность в течение полугода работать на заводе «Большевик» и провести там свои наблюдения, пользуясь полученным заводом новейшим заграничным оборудованием. С этой же целью была установлена связь с металлургическим отделением «Горметлаба» (Горно-металлургическая лаборатория), где означенный аспирант проработал часть предложенной ему темы «об окислении никеля при отжиге». Кроме плановых экспериментальных работ, на обоих аспирантов (Н.В. Агеева и аспиранта М.И. Замоторина (руководитель профессор А.А. Байков [9]) была возложена разборка, приведение в порядок и литературная обработка материалов, оставшихся после смерти проф. М.К. Циглера. Последняя потребовала почти два года, в настоящее время работа окончена и результаты сданы в печать [10].

Для осуществления контроля над занятиями аспирантов деканом факультета (проф. М.А. Павлов [11]) было предложено аспирантам сделать сообщения о выполненной работе в научном студенческом кружке металлургов и химиков и в предметных комиссиях; в исполнение этого постановления каждый из аспирантов прочел по три доклада в кружке и по одному в предметных комиссиях.

На основании поступивших материалов о проделанной работе деканат признал ее удовлетворительной и постановил просить о продлении Н.В. Агееву и М.И. Замоторину аспирантуры на следующий год.

**Замоторин Михаил Иванович (1901–1976)** — ученик академика А.А. Байкова [12]. С 1921 по 1925 год учился на металлургическом факультете Ленинградского политехнического института. По окончании курса М.И. Замоторин стал аспирантом металлургического факультета Ленинградского политехнического института. В 1940 году М.И. Замоторину была присуждена ученая степень кандидата технических наук. С 1928 года преподавал в ЛПИ — ЛКИ\* — ЛИИ\*\* — ЛПИ, доцент с 1933 года, с 1962 по 1972 год заведовал кафедрой «Оборудование и технология термической обработки» ЛПИ им. М.И. Калинина.

В 1929 году Николай Владимирович Агеев представил в качестве аспирантской работы «Физико-химическое исследование твердых растворо-

ров золота с медью»; позже она была опубликована в печати [13]. Как отмечалось в статье, возможно считать, что твердый раствор золота с медью, существующий при высоких температурах, при температуре около 425–450 °С претерпевает превращения, образуя определенные химические соединения — AuCu и AuCu<sub>3</sub>. Существование указанных соединений подтверждают как изотермы электросопротивления, так и максимум изменения электросопротивления в интервале температур 400–450 °С именно при указанных концентрациях золота и меди. Образование соединений AuCu и AuCu<sub>3</sub> сопровождается резко выраженным уменьшением объема, что подтверждают дилатометрические кривые этих сплавов.

После окончания аспирантуры Н.В. Агеев был командирован Наркомпросом в Германию, в Keiser Wilhelm-Institut für Metallforschung, Berlin-Dahlem, к профессору Г. Заксу (G. Sachs) для продолжения научной работы. В этом институте, руководимым Г. Заксом, проводили рентгенографические исследования и выращивали монокристаллы твердых растворов, главным образом на основе меди [14]. Результаты исследований,



М.И. Замоторин (слева) и Н.В. Агеев.  
Химический корпус ЛПИ.

\* Ленинградский кораблестроительный институт.

\*\* Ленинградский индустриальный институт.



выполненных Н.В. Агеевым в Германии, были опубликованы [15, 16].

В институте у Г. Закса Николай Владимирович встретил Г.В. Курдюмова, который был сотрудником Ленинградского физико-технического института и уже имел опыт рентгеноструктурных исследований.

**Курдюмов Георгий Вячеславович (1902–1996)** — ученик академика А.Ф. Иоффе [14, 17]. С 1921 по 1926 год учился на физико-механическом факультете Ленинградского политехнического института. По окончании курса Г.В. Курдюмов стал аспирантом Ленинградского физико-технического института. В 1929 году Г.В. Курдюмов был командирован в Германию, к профессору Г. Заксу. Всего три месяца потребовалось Г.В. Курдюмову для налаживания методики выращивания монокристаллов аустенита и определения полной взаимной кристаллографической ориентировки аустенита и мартенсита. Полученные результаты позволили предложить схему перестройки кристаллической структуры аустенита в структуру мартенсита путем двух сдвигов. Подобная взаимная ориентировка получила широко известное в литературе название — ориентировка Курдюмова—Закса. В 1937 году Г.В. Курдюмову была присуждена ученая степень доктора физико-математических наук без защиты диссертации, он был избран действительным членом АН УССР (1939), академиком АН СССР (1953).

Для всей последующей научной деятельности Н.В. Агеева командировка в Германию и ра-

бота в лаборатории профессора Г. Закса, известного немецкого специалиста в области рентгеноструктурного анализа, сыграли важную роль. Привлечение в те годы развивающихся методов рентгеноструктурного анализа к изучению фаз переменного состава в металлических системах позволило Николаю Владимировичу создать оригинальное направление в науке о металлах [5].

По возвращении из заграничной командировки доценту Н.В. Агееву было поручено чтение дисциплины «Рентгенография» в Ленинградском металлургическом институте (ЛМИ) [6], который был образован после разделения ЛПИ на несколько отраслевых вузов в 1930 году [18]. В конце 1931 года Николаем Владимировичем подготовлена к печати монография «Рентгенография металлов и сплавов» [19], в предисловии к которой автор отмечал:

«Быстрое распространение нового рентгеновского метода исследования металлов и сплавов выявило его ценные качества и указало те области знаний, в которых новый метод не имеет себе конкурентов. Применение рентгеновских лучей к изучению металлов оказалось особенно плодотворным, произведя целые революции в наших представлениях и дав возможность значительно углубить наши знания о природе металлических веществ, которые являются основой учения о металлах и сплавах.

Понятен поэтому тот большой интерес, который проявляют металлурги к этому новому



На переднем плане Г. Закс (слева), Н.В. Агеев (в центре), Г.В. Курдюмов (справа). Берлин, 1930 г.



орудию физико-химического исследования. Рентгенография включена в настоящее время как обязательный предмет во всех металлургических вузах для специальностей по термической обработке стали, а также производству и обработке сплавов. Переход на лабораторно-бригадный метод занятий требует обязательного наличия учебника. До настоящего времени было весьма затруднительно указать студентам-металлургам книгу по рентгенографии, в которой бы они могли найти те сведения, которые им необходимы по их специальности. Желание уничтожить этот пробел и обеспечить возможность вести занятия в Металлургическом институте по лабораторно-бригадному методу побудило меня составить настоящее руководство.

При составлении главной основой послужила прекрасная книга R. Glocker'a «Materialprüfung mit Röntgenstrahlen», которая ближе всего удовлетворяет требованиям, предъявляемым металлургами к руководству по рентгенографии. Некоторые главы заимствованы мною с небольшими изменениями из этой книги, так как я не считал нужным вновь разрабатывать то, что вряд ли может быть в настоящее время разработано лучше, чем в книге R. Glocker'a.

Книга мною построена таким образом, что весь материал разбит на три части (задания), или три больших темы:

1. Рентгеновские лучи и кристаллическое строение материи.
2. Методы изучения вещества рентгеновскими лучами.
3. Исследование металлов и сплавов рентгеновскими лучами.

Курс рентгенографии должен сопровождаться обязательными лабораторными занятиями, что учтено при составлении настоящего руководства.

Объем курса, на который рассчитано настоящее руководство, равен 30–45 часам.

Руководство это, вероятно, имеет много недостатков, объясняемых, главным образом, спешностью работы вследствие стремления дать возможно скорее печатное руководство, столь необходимое студентам-металлургам. Указания на все имеющиеся недостатки будут мною с благодарностью приняты, особенно от студентов, которые будут пользоваться книгой.

В заключение я пользуюсь случаем принести благодарность профессору G. Sachs

и Г.В. Курдюмову, которые ввели меня в эту интересную область знания и были моими первыми руководителями по усвоению основ рентгенографии».

В 1934 году Н.В. Агеевым были разработаны методические указания к основному учебнику «Рентгенография металлов и сплавов» [20], в которых содержались дополнения и поправки. Интересно отметить, что в 1936 году в Московском горном институте были изданы дополнения к книге Н.В. Агеева «Рентгенография металлов и сплавов» и дана рецензия на эту книгу [21].

В 1936 году Н.В. Агеев защитил диссертацию на тему «Физико-химическое исследование интерметаллических молекулярных твердых растворов», за которую ему была присуждена ученая степень доктора химических наук. Материалы работы были опубликованы [22], в заключении отмечалось: «Химические соединения в твердом состоянии обладают упорядоченным расположением атомов, простым стехиометрическим соотношением компонентов и сингулярностью свойств.

Твердые растворы имеют статистическое расположение атомов, переменный состав и плавное изменение свойств в пределах однородности твердого раствора.

Интерметаллические фазы в большинстве обнаруживают промежуточные типы между двумя указанными выше крайними случаями. Молекулярные твердые растворы и являются таким промежуточным типом между химическим соединением и твердым раствором.

Фазы, в которых химическое соединение является растворителем, называем концентрированными молекулярными твердыми растворами, а фазы, в которых растворителем служит чистый металл, можно назвать разбавленными молекулярными твердыми растворами.

Концентрированными молекулярными твердыми растворами могут быть как «далтониды» — фазы, обладающие сингулярной точкой (AuCu, AuCu<sub>3</sub>, FeAl, Fe<sub>3</sub>Al), так и «бертолиды» — фазы переменного состава без сингулярной точки (фаза  $\beta$  системы «свинец — натрий» и др.). В первом случае химическое соединение находится в пределах однородности фазы; во втором случае химическое соединение является «мнимым», состав его находится за пределами реального существования фазы.



Концентрированные молекулярные твердые растворы поддаются во многих случаях непосредственному рентгенографическому исследованию, показывающему их строение. Степень упорядоченности такого раствора убывает не прямо пропорционально количеству введенных избыточных атомов, а имеет криволинейную зависимость от концентрации. Характер убывания упорядоченности зависит от характера вводимого в раствор атома, т. е. он не одинаков для различных атомов. Свойства молекулярного концентрированного раствора в значительной мере определяются степенью его упорядоченности. Это относится к таким свойствам, как электросопротивление, твердость, зависящим от периодичности силового поля решетки. Плотность, как показывает эксперимент, очень мало изменяется в зависимости от расположения атомов, т. е. она почти равна для статистического твердого раствора и упорядоченного химического соединения.

Разбавленные молекулярные твердые растворы не могли быть обнаружены в исследованных системах, число которых, однако, ограничено и не позволяет безоговорочно принять невозможность существования таких растворов в металлических системах. Можно думать, что при большом разбавлении химическое соединение полностью диссоциирует (статистическое расположение атомов) и молекулярных твердых растворов при большом разбавлении не существует. Необходимо отметить большие экспериментальные трудности исследования разбавленных молекулярных твердых растворов.

Связь свойств фаз переменного состава с их строением, обнаруженная благодаря применению рентгенографического анализа совместно с изучением других свойств, подтверждает еще раз непосредственным экспериментальным исследованием правильность основ физико-химического анализа, основ, которые были заложены Н.С. Курнаковым задолго до возможности проверки их при помощи рентгеновых лучей, проникающих во внутреннее строение сплавов. Это новое экспериментальное подтверждение показывает всю глубину принципов, положенных в основу физико-химического анализа.

Считаю своей приятной обязанностью выразить глубокую признательность Н.С. Курнакову и С.Т. Конобеевскому за ценную критику и обсуждение затронутых в исследовании вопросов».

В Ленинградском индустриальном институте (ЛИИ), который образовался в 1934 году в результате слияния отраслевых вузов [18], доцент кафедры металлографии Н.В. Агеев читал дисциплины «Рентгенография» для студентов металлургического факультета и «Металлография» — для студентов инженерно-физического факультета, проводил практические занятия по металлографии [6].

В 1936 году было издано учебное пособие «Термический анализ металлов и сплавов», написанное Н.В. Агеевым и Д.Н. Шойхетом [23]. В предисловии книги академик Н.С. Курнаков писал: «Книга «Термический анализ металлов и сплавов» Н.В. Агеева и Д.Н. Шойхета является оригинальным изложением одного из методов физико-химического анализа. Авторы ограничили себя изложением применения этого метода лишь в области исследования металлов и сплавов. При таком ограничении термический анализ мог быть обрисован действительно достаточно полно и предлагаемое руководство может служить как рабочая книга для дипломантов и аспирантов наших вузов и вузов при выполнении ими исследовательских работ по термическому анализу. Таким образом, задача, поставленная авторами книги, можно считать, ими выполнена.

Выбор для изложения именно термического метода из всех имеющихся методов физико-химического анализа может быть обоснован тем, что этот метод, являясь наиболее старым, в то же время и наиболее разработан как в теоретическом отношении, так и в практически экспериментальном.

При составлении руководства авторами использована достаточно полно как советская, так и иностранная литература (английская, немецкая, французская, американская, итальянская и японская), о чем свидетельствует перечень литературы, приведенный в конце книги.

Весьма важно приведенное авторами сравнение метода термического анализа с другими методами, обосновывающее его положение в общем здании физико-химического анализа и указывающее на большое значение применения разнообразных методов для надежного решения вопроса о природе взаимодействия металлов.

Представленная книга является ценным вкладом в металлографическую и физико-хи-



мическую литературу, и поэтому я выражаю надежду, что она будет издана в возможно краткий срок. Для целей строительства нашей страны подобное сочинение является необходимым».

**Шойхет Давид Николаевич (1904–1968)** — ученик академика Н.С. Курнакова, закончил химический факультет Ленинградского политехнического института в 1928 году [7, 24]. В 1938 году Д.Н. Шойхету присуждена ученая степень кандидата технических наук без защиты. С 1931 года работал доцентом на кафедре общей химии ЛМИ — ЛИИ — ЛПИ. С 1941 по 1944 год был откомандирован в Институт химической физики для проведения работ по оборонной тематике.

С 1938 года Николай Владимирович Агеев работал в Академии наук СССР — сначала в Институте общей и неорганической химии имени Н.С. Курнакова в качестве заведующего лабораторией рентгенографии (1938–1940; 1942–1951 гг.), а с 1951 года — в Институте металлургии им. А.А. Байкова в качестве заведующего лабораторией кристаллохимии металлов и сплавов, а затем — директора института (1971–1975) [1]. В 1946 году Н.В. Агеев избран членом-корреспондентом Академии наук СССР, в 1968 году — академиком.

Пользуясь случаем, выражаю глубокую признательность И.Н. Агеевой и Н.А. Грекову за предоставленные фотографии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Николай Владимирович Агеев [Nikolay Vladimirovich Ageev] / Вступ. статья Л.Н. Гусевой. Библиогр. сост. Г.Н. Финашиной. М.: Наука, 1976. 73 с. (АН СССР. Материалы к библиографии ученых СССР. Серия хим. науки. Вып. 57).
2. Николай Владимирович Агеев [Nikolay Vladimirovich Ageev]. В кн.: Химия металлических сплавов (к 70-летию академика Н.В. Агеева). М.: Наука, 1973. С. 1–4.
3. Николай Владимирович Агеев (к 80-летию со дня рождения) [Nikolay Vladimirovich Ageev (to the 80 anniversary since birth)] // Изв. АН СССР. 1983. № 4. С. 3–4.
4. Академик Николай Владимирович Агеев (некролог) [Academician Nikolay Vladimirovich Ageev] // Изв. АН СССР. Металлы. 1983. № 6. С. 3–4.
5. Морачевский А.Г. Металлурги и химики — выпускники Политехнического института. Петербург, Петроград, Ленинград. 1907–1930 гг. [Metallurgists and chemists graduates of Polytechnic institute. Petersburg, Petrograd, Leningrad. 1907–1930]. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. 190 с.
6. Агеев Николай Владимирович [Ageev Nikolay Vladimirovich] // Архив СПбПУ. Фонд № 3121. Опись 44. Дело № 2.
7. Морачевский А.Г. Академик Николай Семенович Курнаков и его научная школа [Academician Nikolay Semenovich Kurnakov and his school of sciences] / Под ред. акад. РАН Ю.С. Васильева. СПб.: Изд-во Политехн. ин-та, 2010. 99 с.
8. Агеев Н.В., Погодин С.А., Курнаков Н.С. Аномальные свойства эвтектик высокой дисперсности [Abnormal properties of eutectics of high dispersion] // Изв. ИФХА. 1928. Т. 4, № 1. С. 23–38.
9. Морачевский А.Г. Академик Александр Александрович Байков. Жизнь и деятельность (1870–1946) [Academician Alexander Aleksandrovich Baykov. Life and activity (1870–1946)] СПб.: Изд-во Политехн. ин-та, 2010. 102 с.
10. Демидов А.И. Михаил Александрович Павлов в Политехническом (К 150-летию со дня рождения) [Mikhail Aleksandrovich Pavlov in Polytechnic Institute (To the 150 anniversary since birth)] // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 1(166). С. 321–330.
11. Агеев Н.В., Замоторин М.И. Диффузия примесей в сталь и целлюлозная (клеточная) теория старения металлов (По работам проф. М.К. Циглера) [Diffusion of impurity in steel and the cellulose (cellular) theory of aging of metals (On works of the prof. M.K. Ziegler)] // Изв. Лен. политехн. ин-та. Отд. 2: Металлургия и химия. 1928. Т. 31. С. 183–197.
12. Замоторин Михаил Иванович [Zamotorin Mikhail Ivanovich] // Архив СПбПУ. Фонд № 3121. Опись 206. Дело № 203.
13. Курнаков Н.С., Агеев Н.В. Физико-химические исследования твердых растворов золота с медью [Physical and chemical researches of solid solutions of gold with copper] // Изв. ИФХА. 1933. Т. 6. С. 25–46.
14. Академик Георгий Вячеславович Курдюмов: Страницы жизни. Вспоминания. Итоги [Academician Georgy Vyacheslavovich Kurdyumov: Pages of life. Recalls. Results] / Отв. ред. Ю.А. Осипьян. М.: Наука, 2004. 323 с.
15. Ageew N., Sachs G. Röntgengraphische Bestimmung der Löslichkeit von Kupfer in Silber // Z. Phys. 1930. Bd. 63, H. 5–6. S. 293–303.
16. Ageew N., Hansen M., Sachs G. Entmischung und Eigenschaftsänderungen übersättigter Silber Kupferlegierungen // Z. Phys. 1930. Bd. 63, H. 5–6. S. 350–376.
17. Георгий Вячеславович Курдюмов [Georgy Vyacheslavovich Kurdyumov] / Сост. М.В. Верещак;

Автор вступ. статьи Л.Г. Хандрос; Отв. ред. В.В. Немошканенко. Киев: Наук. думка, 1992. 56с. (Библиография ученых Украины).

18. Смелов В.А. Политехнический институт. Тридцатые годы [Polytechnic Institute. Thirtieth 2015s]. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 356 с.

19. Агеев Н.В. Рентгенография металлов и сплавов [X-ray analysis of metals and alloys]. Л.: Кубуч, 1932. 192 с.

20. Агеев Р.В. Рентгенография [X-ray analysis]: Метод. указания к руководству Н.В. Агеева. Л.: Полиграфлаборатория ЛМИ, 1934. 24 с.

21. Онищик Е.И. Дополнения к книге Н.В. Агеева «Рентгенография металлов и сплавов» (Л.: Кубуч, 1932 г.) [Additions to N.V. Ageev's book «X-ray analysis

of metals and alloys»] / Рецензент проф. А.К. Трапезников. М.: Типостеклография Московского горного ин-та им. И.В. Сталина, 1936. 61 с.

22. Агеев Н.В. Физико-химическое исследование интерметаллических молекулярных твердых растворов [Physical and chemical research of intermetallic molecular solid solutions] // Изв. АН СССР. ОМЕН. Серия хим. 1936. № 2. С. 285–319.

23. Агеев Н.В., Шойхет Д.Н. Термический анализ металлов и сплавов [Thermal analysis of metals and alloys] / Под ред. Н.С. Курнакова. Л.: Кубуч, 1936. 180 с.

24. Шойхет Давид Николаевич [Shoykhet David Nikolaevich] // Архив СПбПУ. Фонд № 3121. Опись 143. Дело № 834.

## REFERENCES

1. Nikolay Vladimirovich Ageyev [Nikolay Vladimirovich Ageyev] / Vstup. statya L.N. Gusevoy. Bibliogr. sost. G.N. Finashinoy. M.: Nauka, 1976. 73 s. (AN SSSR. Materialy k biobibliografii uchenykh SSSR. Seriya khim. nauki. Vyp. 57). (rus.)
2. Nikolay Vladimirovich Ageyev [Nikolay Vladimirovich Ageyev]. V kn.: *Khimiya metallicheskikh splavov (k 70-letiyu akademika N.V. Ageyeva)*. M.: Nauka, 1973. S. 1–4. (rus.)
3. Nikolay Vladimirovich Ageyev (k 80-letiyu so dnya rozhdeniya) [Nikolay Vladimirovich Ageyev (to the 80 anniversary since birth)]. *Izv. AN SSSR*. 1983. № 4. S. 3–4. (rus.)
4. Akademik Nikolay Vladimirovich Ageyev (nekrolog) [Academician Nikolay Vladimirovich Ageyev]. *Izv. AN SSSR. Metally*. 1983. № 6. S. 3–4. (rus.)
5. Morachevskiy A.G. Metallurgi i khimiki vypuskniki Politekhnicheskogo instituta. Peterburg, Petrograd, Leningrad. 1907–1930 gg. [Metallurgists and chemists graduates of Polytechnic institute. Petersburg, Petrograd, Leningrad. 1907–1930]. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2013. 190 s. (rus.)
6. Ageyev Nikolay Vladimirovich [Nikolay Vladimirovich Ageyev]. *Arkhiv SPbPU*. Fond № 3121. Opis 44. Delo № 2. (rus.)
7. Morachevskiy A.G. Akademik Nikolay Semenovich Kurnakov i yego nauchnaya shkola [Academician Nikolay Semenovich Kurnakov and his school of sciences] / Pod red. akad. RAN Yu.S. Vasilyeva. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2010. 99 s. (rus.)
8. Ageyev N.V., Pogodin S.A., Kurnakov N.S. Anomalnyye svoystva evtektik vysokoy dispersnosti [Abnormal properties of eutectics of high dispersion]. *Izv. IFKhA*. 1928. T. 4, № 1. S. 23–38. (rus.)
9. Morachevskiy A.G. Akademik Aleksandr Aleksandrovich Baykov. Zhizn i deyatelnost (1870–1946) [Academician Alexander Aleksandrovich Baykov. Life and
- activity (1870–1946)]. SPb.: Izd-vo Politekhn. in-ta, 2010. 102 s. (rus.)
10. Demidov A.I. Mikhail Aleksandrovich Pavlov v Politekhnicheskem (K 150-letiyu so dnya rozhdeniya) [Mikhail Aleksandrovich Pavlov in Polytechnic Institute (To the 150 anniversary since birth)]. *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGPU*. 2013. № 1(166). S. 321–330. (rus.)
11. Ageyev N.V., Zamotorin M.I. Diffuziya primesey v stal i tsellyuloznaya (kletochnaya) teoriya stareniya metallov (Po rabotam prof. M.K. Tsiglera) [Diffusion of impurity in steel and the cellulose (cellular) theory of aging of metals (On works of the prof. M.K. Ziegler)]. *Izv. Len. politekhn. in-ta. Otd. 2: Metallurgiya i khimiya*. 1928. T. 31. S. 183–197. (rus.)
12. Zamotorin Mikhail Ivanovich [Zamotorin Mikhail Ivanovich]. *Arkhiv SPbPU*. Fond № 3121. Opis 206. Delo № 203. (rus.)
13. Kurnakov N.S., Ageyev N.V. Fiziko-khimicheskiye issledovaniya tverdykh rastvorov zolota s medyu [Physical and chemical researches of solid solutions of gold with copper]. *Izv. IFKhA*. 1933. T. 6. S. 25–46. (rus.)
14. Akademik Georgiy Vyacheslavovich Kurdyumov: Stranitsy zhizni. Vspominaniya. Itogi [Academician Georgiy Vyacheslavovich Kurdyumov: Pages of life. Recalls. Results] / Otv. red. Yu.A. Osipyan. M.: Nauka, 2004. 323 s. (rus.)
15. Ageew N., Sachs G. Röntgengraphische Bestimmung der Löslichkeit von Kupfer in Silber. *Z. Phys.* 1930. Bd. 63, H. 5–6. S. 293–303. (rus.)
16. Ageew N., Hansen M., Sachs G. Entmischung und Eigenschaftsänderungen übersättigter Silber Kupferlegierungen. *Z. Phys.* 1930. Bd. 63, H. 5–6. S. 350–376. (rus.)
17. Georgiy Vyacheslavovich Kurdyumov [Georgy Vyacheslavovich Kurdyumov] / Sost. M.V. Vereshchak; Avtor vstup. statii L.G. Khandros; Otv. red. V.V. Nemoshkalenko. Kiyev: Nauk. dumka, 1992. 56s. (Bibliografiya uchenykh Ukrayny). (rus.)



18. Smelov V.A. Politekhnicheskiy institut. Tridtsatyye gody [Polytechnic Institute. Thirtieth years]. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2008. 356 s. (rus.)
19. Ageyev N.V. Rentgenografiya metallov i splavov [X-ray analysis of metals and alloys] L.: Kubuch, 1932. 192 s. (rus.)
20. Ageyev N.V. Rentgenografiya [X-ray analysis] Metod. ukazaniya k rukovodstvu N.V. Ageyeva. L.: poligraflaboratoriya LMI, 1934. 24 s. (rus.)
21. Onishchik Ye.I. Dopolneniya k knige N.V. Ageyeva «Rentgenografiya metallov i splavov» L.: Kubuch, 1932 g. [Additions to N.V. Ageev's book «X-ray analysis of metals and alloys»] / Retsenziya prof. A.K. Trapeznikov. M.: Tiposteklografia Moskovskogo gornogo in-ta im. I.V. Stalina, 1936. 61 s. (rus.)
22. Ageyev N.V. Fiziko-khimicheskoye issledovaniye intermetallicheskikh molekulyarnykh tverdykh rastvorov [Physical and chemical research of intermetallic molecular solid solutions]. Izv. AN SSSR. OMEN. Seriya khim. 1936. № 2. S. 285–319. (rus.)
23. Ageyev N.V., Shoykhet D.N. Termicheskiy analiz metallov i splavov [Thermal analysis of metals and alloys] / Pod red. N.S. Kurnakova. L.: Kubuch, 1936. 180 s. (rus.)
24. Shoykhet David Nikolayevich [Shoykhet David Nikolaevich]. Arkhiv SPbPU. Fond № 3121. Opis 143. Delo № 834. (rus.)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**ДЕМИДОВ Александр Иванович** — доктор химических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: demidov1902@gmail.com

## AUTHOR

**DEMIDOV Aleksandr I.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: demidov1902@gmail.com

DOI 10.5862/JEST.219.26

УДК 001:929:66

А.Г. Морачевский

## АКАДЕМИК ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ КИСТЯКОВСКИЙ (к 150-летию со дня рождения)

A.G. Morachevskij

## ACADEMICIAN VLADIMIR ALEKSANDROVICH KISTYAKOVSKY (for the 150th anniversary)

Очерк посвящен жизни, педагогической и научной деятельности профессора Петербургского (Петроградского, Ленинградского) политехнического института (с 1902 по 1918 и с 1922 по 1934 год), действительного члена Академии наук Украины (с 1919 г.) и Академии наук СССР (с 1929 г.) В.А. Кистяковского, крупного ученого в области физической химии, теоретической электрохимии и защиты металлов от коррозии.

КИСТЯКОВСКИЙ В.А.; АКАДЕМИК АН СССР; НАУЧНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ; ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ; ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ; ВЫСШЕЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ.

The essay is dedicated to the life, teaching and research activities of the Professor of St. Petersburg (Petrograd, Leningrad) Polytechnic Institute (from 1902 to 1918 and from 1922 to 1934.), Member of the Ukrainian Academy of Sciences (since 1919) and the USSR Academy of Sciences (since 1929) V.A. Kistyakovsky, who is a prominent scientist in the field of physical chemistry, theoretical electrochemistry and corrosion protection of metals.

KISTYAKOVSKY V.A.; ACADEMICIAN OF USSR ACADEMY OF SCIENCES; SCIENTIFIC ACTIVITY; PHYSICAL CHEMIST; SAINT PETERSBURG POLYTECHNIC INSTITUTE; HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTION.

Владимир Александрович Кистяковский родился 12 октября (30 сентября) 1865 года в Киеве в весьма интеллигентной семье, ряд представителей которой в дальнейшем получили широкую известность. Его отец — Александр Федорович Кистяковский (1833–1885), профессор уголовного права в Киевском университете, один из известнейших криминалистов России.

В 1883 году В.А. Кистяковский успешно окончил Вторую Киевскую гимназию и поступил на естественное отделение физико-математического факультета Киевского университета. Осенью 1885-го он перешел на аналогичное отделение Петербургского университета. Юноша проявлял интерес к химии, а в Киевском университете химические дисциплины были представлены весьма слабо. В Петербургском университете в то время преподавали Д.И. Менделеев, Н.А. Меншуткин, М.Д. Львов. На старших курсах В.А. Кистяковский особенно заинтересовался работами будущих лауреатов Нобелевской

премии В. Оствальда, Я. Вант-Гоффа, С. Аррениуса в области природы растворов электролитов и по согласованию с деканом факультета Н.А. Меншуткиным в качестве дипломной работы представил реферат «Гипотеза Планка — Аррениуса». Это была одна из первых работ в России с изложением взглядов группы западных ученых на процессы диссоциации при образовании растворов электролитов.

В январе 1889 года В.А. Кистяковский успешно закончил Петербургский университет со степенью кандидата и, не имея каких-либо перспектив в отношении работы, по собственной инициативе выехал в Германию в Лейпциг в лабораторию В. Оствальда. Вернулся в Россию В.А. Кистяковский только в ноябре 1890-го. За время пребывания в Германии он познакомился с рядом виднейших физико-химиков того времени, выполнил экспериментальное исследование по электропроводности водных растворов двойных солей и опубликовал результаты в рос-



сийском и немецком журналах. После работы в лаборатории В. Оствальда молодой ученый прослушал курс лекций по физике в Парижском университете.

Вакантных мест преподавателя в высших учебных заведениях Петербурга не было, и В.А. Кистяковский вынужден был изыскивать различные источники заработка. Кроме того, в качестве сверхштатного сотрудника он продолжает различные экспериментальные исследования в химической лаборатории Петербургского университета. После сдачи магистерского экзамена и чтения двух пробных лекций В.А. Кистяковский в 1896 году допускается к чтению лекций по отдельным разделам физической химии в Петербургском университете в качестве приват-доцента. В 1898-м В.А. Кистяковский публикует большую статью обзорного характера, посвященную десятилетию теории электролитической диссоциации. В декабре 1901 года он выступает с докладом «Разбор возражений на теорию электролитической диссоциации» на XI съезде Русских естествоиспытателей и врачей, состоявшемся в Петербурге 20–30 декабря 1901 г. Предварительно, до съезда, текст доклада был опубликован в виде отдельной брошюры, позднее доклад был опубликован в Журнале Русского физико-химического общества. Доклад вызвал большой интерес научной общественности.

В 1897–1902 годах В.А. Кистяковский публикует ряд статей общен научного и экспериментального характера. В августе 1902-го он получает приглашение от декана металлургического отделения Петербургского политехнического института профессора Н.А. Меншуткина занять место преподавателя в создаваемой впервые в России лаборатории физической химии и теоретической электрохимии. В конце 1902 года В.А. Кистяковский представил в Совет физико-математического факультета Московского университета диссертацию на соискание ученой степени магистра под кратким названием «Физико-химические исследования». После ее успешной защиты в мае 1903 года он был утвержден в ученой степени магистра и 15 июня 1903 г. назначен экстраординарным профессором Политехнического института. В течение последовавших ближайших лет В.А. Кистяковский создал лабораторию, имевшую по тем временам первоклассное оборудование, читал лек-



ции по физической химии и теоретической электрохимии, занимался сам экспериментальными исследованиями, позднее руководил дипломными работами студентов.

Период жизни ученого с августа 1902-го до конца 1917 года был весьма продуктивным. Помимо прочего, все основные его научные достижения относятся к этому периоду. Среди научных направлений в деятельности В.А. Кистяковского центральное место заняло изучение электрохимического поведения металлов в водных средах. Будучи прекрасным экспериментатором, он сам производил разнообразные электрохимические исследования. Начиная с 1909 года он развивает собственную оригинальную теорию пассивности и коррозии металлов в водных средах. В 1910-м В.А. Кистяковский защитил в Московском университете диссертацию на соискание ученой степени доктора химии на тему «Электрохимические реакции и электродные потенциалы некоторых металлов». После защиты диссертации он был назначен ординарным профессором Политехнического института.

Летом 1918 года В.А. Кистяковский выехал в Киев, где жили его мать и другие родственники. После образования в конце 1918 года Академии наук на Украине ученый избран в январе 1919 года ее действительным членом. В связи

с ухудшением состояния здоровья и другими обстоятельствами в ноябре 1919 года В.А. Кистяковский переехал на Северный Кавказ. О его пребывании там можно судить только по автобиографическому очерку «О времени и о себе», написанному ученым в 1938 году и впервые опубликованному в 1995 году [1]. Очерк воспроизведен в сборнике [2]. Несмотря на тяжелые условия жизни на Северном Кавказе, отсутствие постоянного места работы, болезнь, В.А. Кистяковский находит время и силы для научной деятельности, публикует две статьи термодинамической направленности.

Осенью 1922 года В.А. Кистяковский возвратился в Петроград и возобновил прерванную более чем на четыре года педагогическую и научную деятельность в Политехническом институте. В 1925-м на очередных выборах в АН СССР В.А. Кистяковский был избран членом-корреспондентом Академии наук. В представлении его к этому званию, подписанном академиками Н.С. Курнаковым, В.Н. Ипатьевым, П.П. Лазаревым, А.Ф. Иоффе и Д.П. Коноваловым, говорится о работах В.А. Кистяковского в области природы жидкого состояния, пассивности металлов, защиты металлов от коррозии. Отмечено также, что написанный ученым учебник «Электрохимия» — одно из лучших руководств по этому предмету на русском языке. В 1929 году В.А. Кистяковский избирается действительным членом АН СССР.

В 1930 году по предложению Президиума АН СССР В.А. Кистяковский создал в Ленинграде Коллоидо-электрохимическую лабораторию (ЛАКЭ), входящую в число учреждений Академии наук. В задачу лаборатории первоначально входило исследование коллоидо-электрохимических явлений, в частности изучение дисперсных систем, тонких пленок, проблем коррозии, электрокристаллизации металлов. В 1934-м вместе с целым рядом академических учреждений ЛАКЭ была переведена в Москву и вскоре преобразована в Коллоидо-электрохимический институт (КЭИН) АН СССР. В.А. Кистяковский руководил институтом до 1939 года.

В 1934 году по инициативе В.А. Кистяковского в Москве состоялась Первая Всесоюзная конференция по коррозии металлов. Он же вы-

ступил с большим докладом «Современное состояние учения о коррозии металлов при температурах ниже 50 °C» [3]. Докладчик охарактеризовал существующие подходы к пониманию процессов коррозии металлов и отметил, что предлагаемая им теория пассивности и коррозии металлов позволяет вполне удовлетворительно объяснить основную массу наблюдаемых явлений.

В созданном В.А. Кистяковским Коллоидо-электрохимическом институте, не имевшем по своей тематике аналогов не только в СССР, но и в других странах, начинали свою научную деятельность многие видные впоследствии ученые, среди которых академики А.Н. Фрумкин, П.А. Ребиндер, Б.В. Дерягин. Во время войны (1941–1944 гг.) КЭИН вместе с другими академическими учреждениями был эвакуирован в г. Казань.

В 1945 году в Москве было торжественно отмечено 80-летие со дня рождения ученого, он был награжден орденом Ленина. В том же году второй орден Ленина был вручен ему в связи с празднованием 220-летия АН СССР. Последний период жизни ученого был омрачен тем, что во время пребывания в эвакуации в Казани он получил тяжелую травму (перелом ноги). Несмотря на длительное лечение, он потерял способность самостоятельно передвигаться. Тем не менее до последних лет жизни не прерывались его научные связи с институтом и промышленными организациями.

По воспоминаниям современников, В.А. Кистяковский был широкообразованным ученым, хорошо знал литературу, интересовался театром, писал стихи. Он пользовался известностью не только в нашей стране, но и за ее рубежами, многие годы он поддерживал дружественные связи с С. Аррениусом, В. Нернстом, Г. Бредигом, другими известными учеными. В.А. Кистяковский состоял действительным членом Парижского физико-химического общества, Электрохимического общества в США.

Владимир Александрович Кистяковский скончался 19 октября 1952 года на 88-м году жизни после продолжительной тяжелой болезни. Жизни, педагогической и научной деятельности В.А. Кистяковского посвящен в последние годы целый ряд публикаций [4–8].



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Соловьев Ю.И.** Выдающийся естествоиспытатель // Вестник РАН. 1995. Т. 65, № 12. С. 1120–1134.
2. **Кистяковский В.А.** О времени и о себе. // Академик Владимир Александрович Кистяковский: Сб. материалов/Составители: А.Г. Морачевский, А.И. Демидов. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2005. 168 с.
3. **Кистяковский В.А.** Современное состояние учения о коррозии металлов при температурах ниже 50°C // Труды Первой конференции по коррозии металлов при Академии наук СССР. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1935. С. 9–17.
4. **Морачевский А.Г.** Очерки об ученых-химиках Санкт-Петербургского политехнического института. Работы академика В.А. Кистяковского в области теории пассивного состояния и коррозии металлов. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2002. С. 69–78.
5. **Морачевский А.Г.** Очерки об ученых-химиках. Вторая половина XIX века и XX век. Академик Владимир Александрович Кистяковский. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. С. 28–37.
6. **Морачевский А.Г.** Очерки о химиках России. Педагогическая и научная деятельность В.А. Кистяковского в Санкт-Петербургском политехническом институте. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. С. 79–90.
7. **Морачевский А.Г.** Академик Владимир Александрович Кистяковский. Жизнь и деятельность / Под ред. Ю.С. Васильева. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. 90 с.
8. **Морачевский А.Г.** Химия и химики в Политехническом институте. Санкт-Петербург, Петроград, Ленинград. 1902–1930 гг. / Под ред Ю.С. Васильева. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 288 с.

## REFERENCES

1. **Solov'yev Yu.I.** Vydayushchiysya yestestvoispytatel [An outstanding naturalist] // Vestnik RAN. 1995. T. 65, № 12. S. 1120–1134. (rus.)
2. **Kistyakovskiy V.A.** O vremeni i o sebe [About time and about himself]. // Akademik Vladimir Aleksandrovich Kistyakovskiy: Sb. materialov/Sostaviteli: A.G. Morachevskiy, A.I. Demidov. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2005. 168 s. (rus.)
3. **Kistyakovskiy V.A.** Sovremennoye sostoyaniye ucheniya o korrozii metallov pri temperaturakh nizhe 50°С [The current state of the doctrine of the corrosion of metals at temperatures below 50 ° C]. Trudy Pervoy konferentsii po korrozii metallov pri Akademii nauk SSSR. M.-L.: Izd-vo AN SSSR, 1935. S. 9–17. (rus.)
4. **Morachevskiy A.G.** Ocherki ob uchenykh-khimikakh Sankt-Peterburgskogo politekhnicheskogo instituta. Raboty akademika V.A. Kistyakovskogo v oblasti teorii passivnogo sostoyaniya i korrozii metallov. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2002. S. 69–78. (rus.)
5. **Morachevskiy A.G.** Ocherki ob uchenykh-khimikakh. Vtoraya polovina XIX veka i XX vek. Akademik Vladimir Aleksandrovich Kistyakovskiy. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2007. S. 28–37. (rus.)
6. **Morachevskiy A.G.** Ocherki o khimikakh Rossii. Pedagogicheskaya i nauchnaya deyatelnost V.A. Kistyakovskogo v Sankt-Peterburgskom politekhnicheskem institute [Essays about chemists Russia. Pedagogical and scientific activity VA Kistyakovskiy in St.-St. Petersburg Polytechnic Institute]. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2008. S. 79–90. (rus.)
7. **Morachevskiy A.G.** Akademik Vladimir Aleksandrovich Kistyakovskiy. Zhizn i deyatelnost [Academician Vladimir Kistyakovskiy. Life and activity of]/ Pod red. Yu.S. Vasilevaya. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2011. 90 S. (rus.)
8. **Morachevskiy A.G.** Khimiya i khimiki v Politekhnicheskem institute [Chemistry and chemists at the Polytechnic Institute]. Sankt-Peterburg, Petrograd, Leningrad. 1902–1930 gg. / Pod red Yu.S. Vasilevaya. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2012. 288 s. (rus.)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**МОРАЧЕВСКИЙ Андрей Георгиевич** — доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: andrey.morachevsky@gmail.com

## AUTHOR

**MORACHEVSKIY, Andrei G.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politehnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: andrey.morachevsky@gmail.com

Научное издание

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбГПУ**

**№2(219)'2015**

Учредитель – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

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

Научный редактор, корректор — канд. техн. наук доцент *Л.В. Спирidonова*

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 24.06.2015. Формат 60×84 1/8. Бум. тип. № 1.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 28,75. Тираж 1000. Заказ .

---

Отпечатано с готового оригинал-макета,  
предоставленного Издательством Политехнического университета,  
в Типографии Политехнического университета.  
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.  
Тел.: (812) 552-77-17; 550-40-14.

**УСЛОВИЯ ПУБЛИКАЦИИ СТАТЕЙ**  
**в журнале «Научно-технические ведомости СПбГПУ»**

**1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

Журнал «Научно-технические ведомости СПбГПУ» является периодическим печатным научным рецензируемым изданием:

— зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия (свидетельство ПИ № ФС77-25981 от 13 октября 2006г.) и распространяется по подписке через объединенный каталог «Пресса России» (индекс 18390);

— имеет международный стандартный номер serialного периодического издания (ISSN 1994-2354);

— внесен Высшей аттестационной комиссией Минобразования 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 Редколлегия может потребовать представления Акта экспертизы.

Представление всех материалов осуществляется в электронном виде через личный кабинет ЭЛЕКТРОННОЙ РЕДАКЦИИ по адресу: <http://journals.spbstu.ru>

Статьи подаются в формате .docx (MS Word 2007–2010). Файл статьи, подаваемый через электронную редакцию, должен содержать только сам текст, без названия, списка литературы, фамилий и данных авторов. Список литературы, название статьи, вся информация об авторах задаются при подаче через электронную редакцию в отдельных полях. В тексте статьи должны быть ссылки на все источники из списка литературы. Порядковый номер источника в тексте статьи указывается в квадратных скобках.

**2.2. Оформление материалов**

2.2.1. Объем статей, как правило, 15–20 страниц формата А-4. Количество рисунков и фотографий (в том числе цветных) не должно превышать 4, таблиц – 3.

2.2.2. Число авторов — не более трех от одной организации и не более пяти от разных организаций. Статья должна быть подписана всеми авторами. Авторами являются лица, принимавшие участие во всей работе или ее главных разделах. Лица, участвовавшие в работе частично, указываются в сносках.

2.2.3. Статья должна содержать следующие разделы:

номер УДК в соответствии с классификатором;

фамилии авторов на русском и английском языках;

название на русском и английском языках;

аннотация — 3–5 предложений на русском и английском языках;

ключевые слова – не менее 2 и не более 7 на русском и английском языках;

введение (актуальность, краткое обоснование существующей проблемы) — 1,0–1,5 стр.;

цель работы (краткая четкая формулировка поставленной задачи);

методика проведения исследований и расчетов, включая краткую информацию об использованных приборах, методах и точности экспериментальных измерений и теоретических расчетов и т. д.;