ISSN 1029-7448 (Print) ISSN 2414-0341 (Online)

# ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕДИНЕНИЙ СНГ

ЭНЕРГЕТИКА

Том 59, № 4

2016

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1958 ГОДА

#### Учредители

Электроэнергетический совет СНГ, Министерство образования Республики Беларусь, Министерство образования и науки Российской Федерации

Журнал включен в базы данных РИНЦ; Directory of Open Access Journals (DOAJ)

#### СОДЕРЖАНИЕ

#### ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Радкевич В. Н., Михайлова Я. В. Характеристики электропотребления свето-	
диодных световых приборов и их учет при расчете электрических сетей	289
Зализный Д. И., Широков О. Г., Широков Г. О., Капанский А. А. Адап-	
тивная математическая модель тепловых процессов косинусного силового кон-	
денсатора	301
Гулиев Г. Б. Нечеткий алгоритм управления потоками реактивной мощности	
в электрической сети с нелинейной нагрузкой	313

#### ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Добрего К. В. Решение задачи о распространении внутрипластового горения	
на основе эвристической гипотезы о температурном и концентрационном полях	327
Купреев Е. И., Карницкий Н. Б. Эффективность работы газоперекачивающих	
агрегатов	338
Карпов С. В., Загоскин А. А. Конвективный теплообмен в циклонных рецир-	
куляционных нагревательных устройствах	353
Зенович-Лешкевич-Ольпинский Ю. А., Широглазова Н. В., Зенович-Леш- кевич-Ольпинская А. Ю. Совершенствование систем технического водоснабже-	
Зенович-Лешкевич-Ольпинский Ю. А., Широглазова Н. В., Зенович-Леш- кевич-Ольпинская А. Ю. Совершенствование систем технического водоснабже- ния с градирнями с целью улучшения технико-экономических показателей тепло-	
Зенович-Лешкевич-Ольпинский Ю. А., Широглазова Н. В., Зенович-Леш- кевич-Ольпинская А. Ю. Совершенствование систем технического водоснабже- ния с градирнями с целью улучшения технико-экономических показателей тепло- вых электростанций (Часть 2)	362
Зенович-Лешкевич-Ольпинский Ю. А., Широглазова Н. В., Зенович-Леш- кевич-Ольпинская А. Ю. Совершенствование систем технического водоснабже- ния с градирнями с целью улучшения технико-экономических показателей тепло- вых электростанций (Часть 2) Романюк В. Н., Бобич А. А. Численное исследование тепловых схем ТЭЦ	362
Зенович-Лешкевич-Ольпинский Ю. А., Широглазова Н. В., Зенович-Леш- кевич-Ольпинская А. Ю. Совершенствование систем технического водоснабже- ния с градирнями с целью улучшения технико-экономических показателей тепло- вых электростанций (Часть 2)	362 376

#### ЮБИЛЕИ

К 100-летию со дня рождения. Пр	оофессор Григорий Ефимович Поспелов	391
---------------------------------	-------------------------------------	-----

#### Главный редактор Федор Алексеевич Романюк

#### Редакционная коллегия

С. Н. АСАМБАЕВ (Алматинский университет энергетики и связи, Алматы, Республика Казахстан),

В. ВУЙЦИК (Технический университет «Люблинская политехника», Люблин, Республика Польша),

В. В. ГАЛАКТИОНОВ (Русский институт управления имени В. П. Чернова, Москва, Российская Федерация),

М. ДАДО (Зволенский технический университет, Зволен, Словацкая Республика),

В. А. ДЖАНГИРОВ (Комитет ТПП РФ по энергетической стратегии и развитию ТЭК, Москва, Российская Федерация),

К. В. ДОБРЕГО (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь) (зам. главного редактора),

И. В. ЖЕЖЕЛЕНКО (Приазовский государственный технический университет, Мариуполь, Украина), П. В. ЖУКОВСКИ (Технический университет «Люблинская политехника», Люблин, Республика Польша)

А. С. КАЛИ́НИЧЕНКО (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),

А. И. КИРИЛЛОВ (Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация),

ЛУ ЧЖУН-У (Северо-Восточный университет Китая, Шэньян, Китайская Народная Республика),

Б. К. МАКСИМОВ (Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Российская Федерация),

А. С. МИХАЛЕВ (Республиканский институт высшей школы, Минск, Республика Беларусь),

А. А. МИХАЛЕВИЧ (Национальная академия наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),

Е. С. МИШУК (Исполнительный комитет Энергетического совета Содружества Независимых Государств, Москва, Российская Федерация),

НГО ТУАН КИЕТ (Научный энергетический институт Вьетнамской академии наук и технологий, Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам),

О. Г. ПЕНЯЗЬКОВ (Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь),

Е. Н. ПИСЬМЕННЫЙ (Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, Украина),

Э. Н. САБУРОВ (Архангельский государственный технический университет, Архангельск, Российская Федерация),

А. С. САУХАТАС (Рижский технический университет, Рига, Латвийская Республика),

В. С. СЕВЕРЯНИН (Брестский государственный технический университет, Брест, Республика Беларусь),

И. И. СЕРГЕЙ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь) (зам. главного редактора),

Б. С. СОРОКА (Институт газа НАН Украины, Киев, Украина),

В. А. СТРОЕВ (Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Российская Федерация),

В. И. ТИЙОШПОЛЬСКИЙ (ООО, Киев, Украина),

Е. В. ТОРОПОВ (Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Российская Федерация),

Е. УШПУРАС (Литовский энергетический институт, Каунас, Литовская Республика),

Б. М. ХРУСТАЛЕВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),

Л. В. ШЕНЕЦ (Министерство энергетики Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь)

#### Ответственный секретарь редакции В. Н. Гурьянчик

Издание зарегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 5 февраля 2010 г. Регистрационный номер 1257

Набор и верстка выполнены в редакции журналов «Энергетика» и «Наука и техника»

Подписано к печати 05.07.2016. Формат бумаги 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. Уч.-изд. л. . Тираж 250 экз. Дата выхода в свет . 2016. Заказ .

Адрес редакции: 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65. Белорусский национальный технический университет, корп. 2, комн. 327. Телефон +375 17 292-65-14. e-mail: energy@bntu.by

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 02330/74 от 03.03.2014. 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65

© Белорусский национальный технический университет, 2016

## PROCEEDINGS OF THE CIS HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS AND POWER ENGINEERING ASSOCIATIONS

## **ENERGETIKA**

V. 59, No 4 2016

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL PUBLISHED FROM JANUARY, 1958

#### Founders

CIS Electric Power Council, Ministry of Education of the Republic of Belarus, Ministry of Education and Science of the Russian Federation

The Journal is included in the following databases RSCI; Directory of Open Access Journals (DOAJ)

#### CONTENTS

#### ELECTRICAL POWER ENGINEERING

Radkevich V. N., Michailova Ya. V. Specific Features of Power Consumption	
of LED Devices and Accounting them in Calculation of Electrical Networks	289
Zalizny D. I., Shirokov O. G., Shirokov G. O., Kapanskiy A. A. Adaptive Mathe-	
matical Model of Thermal Processes in a Cosine Power Capacitor	301
Guliyev H. B. Fuzzy Algorithm to Control Reactive Power Flow in Electric Network	
with Nonlinear Loads	313

#### HEAT POWER ENGINEERING

<b>Dobrego K. V.</b> Solution of the Problem of Oil-Pool In-Situ Combustion Front Propa- gation on the Basis of Heuristic Hypothesis Regarding Temperature and Concentration	
Profiles	327
Kupreev E. I., Karnitzki N. B. The Efficiency of Gas-Pumping Units	338
Karpov S. V., Zagoskin A. A. Convective Heat Transfer in Cyclone Device with Exter-	
nal Gas Recirculation	353
Zenovich-Leshkevich-Olpinskiy Yu. A., Shiroglazova N. V., Zenovich-Leshkevich- Olpinskaya A. Yu. Improvement of Systems of Technical Water Supply with Cooling Towers for Steam Power Plants Technical and Economic Indicators Perfection (Part 2)	362
<b>Romaniuk V. N., Bobich A. A.</b> Numerical Study of Thermal Schemes of Thermal Power Plants Fulfilled with the Aid of their Topological Models	376
JUBILEES	
To 100-Anniversary. Professor Grigory Pospelov	391

#### Editor-in-Chief Fiodar A. Romaniuk

#### **Editorial Board**

S. N. ASAMBAEV (Almaty University of Power Engineering & Telecommunications, Almaty, Republic of Kazakhstan),

V. VUITSIK (Lublin University of Technology, Lublin, Republic of Poland),

V. V. GALAKTIONOV (Russian Institute of Management named after V. P. Chernov, Russian Federation), M. DADO (Technical University in Zvolen, Zvolen, Slovak Republic),

V. A. JANGIROV (RF CCI Committee on Energy Strategy and the Development of Fuel-Energy Complex, Moscow, Russian Federation),

K. V. DOBREGO (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus) (Deputy Editorin-Chief).

I. V. ZHEZHELENKO (Pryazovskyi State Technical University, Mariupol, Ukraine),

P. V. ZHUKOVSKY (Lublin University of Technology, Lublin, Republic of Poland),

A. S. KALINICHENKO (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),

A. I. KIRILLOV (Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation),

LU CHZHUN-U (Northeastern University China, Shenyang, People's Republic of China),

B. K. MAKSIMOV (National Research University "MPEI", Moscow, Russian Federation),

A. S. MIKHALEV (Republican Institute of Higher Institution, Minsk, Republic of Belarus),

A. A. MIKHALEVICH (The National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),

E. S. MISHUK (The Executive Committee of the Energy Council of the Commonwealth of Independent States, Moscow, Russian Federation),

NGO TUAN KIET (Research Energy Institute under the Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Socialist Republic of Vietnam),

O. G. PENYAZKOV (A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),

E. N. PISMENNYI (National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute", Kiev, Ukraine),

E. N. SABUROV (Arkhangelsk State Technical University, Arkhangelsk, Russian Federation),

A. S. SAUKHATAS (Riga Technical University, Riga, Republic of Latvia),

V. S. SEVERYANIN (Brest State Technical University, Brest, Republic of Belarus),

I. I. SERGEY (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus) (Deputy Editor-in-Chief),

B. S. SOROKA (National Academy of Sciences of Ukraine the Gas Institute, Kiev, Ukraine),

V. A. STROEV (National Research University "MPEI", Moscow, Russian Federation),

V. I. TIMOSHPOLSKY (LLC, Kiev, Ukraine),

E. V. TOROPOV (South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation),

E. USHPURAS (Lithuanian Energy Institute, Kaunas, Republic of Lithuania),

B. M. KHROUSTALEV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),

L. V. SHENETS (Ministry of Energy of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),

#### Executive Secretary of Editorial Board V. N. Guryanchyk

#### Publication is registered in the Ministry of Information of the Republic of Belarus in 2010, February, 5<sup>th</sup> Reg. No 1257

Typesetting and makeup are made in editorial office of Journals "Energetika" and "Science & Technique"

Passed for printing 05.07.2016. Dimension of paper  $60 \times 84^{1}/_{8}$ . Offset paper. Printed on risograp. Type face Times. Conventional printed sheet . An edition of 250 copies. Date of publishing 2016. Order list .

> ADDRESS Belarusian National Technical University 65 Nezavisimosty Ave., Building 2, Room 327 220013, Minsk, Republic of Belarus Tel.: +375 17 292-65-14 e-mail: energy@bntu.by

Printed in BNTU. License LP No 02330/74 from 03.03.2014. 220013, Minsk, 65 Nezavisimosty Ave.

© Belarusian National Technical University, 2016

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-4-289-300

УДК 621.32 (075.8)

## Характеристики электропотребления светодиодных световых приборов и их учет при расчете электрических сетей

#### В. Н. Радкевич<sup>1)</sup>, Я. В. Михайлова<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016 Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Исследованы показатели электропотребления световых приборов на основе светодиодов в зависимости от подведенного напряжения. Для светильника и прожектора со светодиодами экспериментально определялись активная и реактивная мощности, ток и коэффициент мощности в функции напряжения, величина которого изменялась в диапазоне 200-245 В. Анализ экспериментальных данных показал, что благодаря применяемым драйверам в указанном диапазоне напряжения потребляемая световыми приборами активная мощность остается практически неизменной. Реактивная мощность светодиодных приборов зависит от подведенного напряжения и носит емкостный характер. В отличие от газоразрядных источников света исследованные светодиодные приборы не потребляют, а генерируют реактивную мощность. С изменением подведенного напряжения от 200 до 245 В генерируемая реактивная мощность увеличивается на 60 % у прожектора и на 50 % – у светильника. При этом светодиодный прожектор имеет низкие значения коэффициента активной мощности. Ток, потребляемый прожектором, возрастает на 22 %, а светильника – на 13 %. Получены формулы для определения предельного значения длины расчетного участка однофазной групповой линии с учетом конкретных исходных данных. Светодиодные источники света, как правило, питаются по однофазным групповым линиям. Количество ламп, подключаемых к однофазным линиям, регламентируется нормативными документами. С учетом этого и небольшой мощности светодиодных источников света однофазные групповые линии обычно выполняются проводниками, имеющими минимально возможное сечение. Для них определены предельные значения длины расчетного участка, соответствующие заданной потере напряжения в линии при температуре окружающей среды от 15 до 60 °C. Расчеты показали, что для групповых линий, питающих светодиодные световые приборы, выбор сечений проводников по допустимой потере напряжения не имеет определяющего значения. Определяющим при выборе сечений жил проводников групповых электрических сетей является расчет по допустимому нагреву с учетом температуры окружающей среды.

Ключевые слова: светодиоды, световые приборы, электропотребление, реактивная мощность, напряжение, сечение проводника

Для цитирования: Радкевич, В. Н. Характеристики электропотребления светодиодных световых приборов и их учет при расчете электрических сетей / В. Н. Радкевич, Я. В. Михайлова // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 4. С. 289–300

Адрес для переписки	Address for correspondence
Радкевич Владимир Николаевич	Radkevich Vladimir N.
Белорусский национальный технический университет	Belarusian National Technical University
просп. Независимости, 65/2,	65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, г. Минск, Республика Беларусь	220013, Minsk, Republic of Belarus
Тел.: +375 17 292-65-52	Tel.: +375 17 292-65-52
epp@bntu.by	epp@bntu.by

## **Specific Features of Power Consumption of LED Devices and Accounting them in Calculation of Electrical Networks**

#### V. N. Radkevich<sup>1)</sup>, Ya. V. Michailova<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The indicators of power consumption of lighting devices based on LEDs are studied depending on the supplied voltage. For the lamp and floodlight with LEDs active and reactive power, current and power factor as a function of voltage (which value changed in the range 200-245 V) were experimentally determined. The analysis of experimental data demonstrated that due to the drivers in the specified voltage range the active power consumed by light devices remains practically unchanged. The reactive power of LED devices depends on the supplied voltage and is capacitive in its nature. In contrast with gas-discharge light sources the LED devices under study do not consume reactive power, but generate it. With the change of the supplied voltage from 200 to 245 V the value of the generated reactive power increases to 60 % for the floodlight and 50 % for the lamp. The LED floodlight has a low coefficient of active power. The current consumed by the floodlight has increased by 22 %, and by the lamp - by 13 %. The formulas for determining the maximum value of the length of the calculated section of single-phase group lines were developed, taking into account specific source data. LED light sources tend to feed by electric power by single-phase group lines. The number of lamps connected to single-phase lines is regulated by normative documents. Bearing this in mind as well as the small power of LED sources single-phase group lines are usually performed with conductors of the smallest possible cross section. The limit values of the length of the calculated section that correspond to a predetermined loss of voltage in line with ambient temperature from 15 to 60 °C were determined for them. The calculations demonstrated that for group lines that feed the LEDs, the choice of conductor cross-sections in accordance with permissible voltage loss is not critical. The determinant factor for the choice of the cross-section of the conductors of group electrical networks is the calculation of acceptable heat with respect to temperature of the environment.

**Keywords:** LEDs, lighting fixtures, power consumption, reactive power, voltage, section of the conductor

**For citation:** Radkevich V. N., Michailova Ya. V. (2016) Specific Features of Power Consumption of LED Devices and Accounting them in Calculation of Electrical Networks. *Energetika*. *Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (4), 289–300 (in Russian)

#### Введение

В Республике Беларусь в осветительных установках промышленных предприятий и коммунально-бытовых объектов применяются светодиодные источники света, характеризующиеся высокой светоотдачей и сроком службы, значительно превышающим время горения газоразрядных ламп. При использовании светодиодного освещения снижаются расход электроэнергии, потери в электрических сетях, а также затраты на сооружение электрических осветительных установок (меньшие затраты на провода, кабели, электрические аппараты и т. д.) [1, 2]. Внедрение источников света должно сопровождаться светотехническими и электрическими расчетами на основе действующих нормативно-технических документов и руководящих технических материалов [3–5]. Однако в них вопросам проектирования и использования светодиодного освещения уделено недостаточно внимания. В технической литературе отсутствуют рекомендации и справочные данные, необходимые для выполнения светотехнических и электрических расчетов осветительных установок, в которых применяются светодиодные световые приборы. Поэтому указанные расчеты выполняются методами, разработанными для установок с газоразрядными лампами. В то же время светодиодные световые приборы имеют свои особенности, неучет которых может повлиять на результаты расчета.

Светодиодные световые приборы в своем составе, помимо светодиодов, имеют драйверы (преобразователи, источники питания), предназначенные для питания и управления работой как отдельных светодиодов, так и их групп. Для выполнения электрического расчета осветительной сети необходимо знать потребляемую мощность светового прибора и его коэффициент мощности соѕф в зависимости от подведенного к его зажимам напряжения. Производители светодиодных световых приборов в технической документации дают минимальную информацию о показателях их электропотребления. Как правило, отсутствуют данные по драйверам. В паспортах и на упаковках световых приборов и ламп обычно указываются лишь их основные технические характеристики и срок службы. В связи с этим исследование показателей электропотребления световых приборов на основе светодиодов представляет определенный интерес.

#### Основная часть

В электрических сетях переменного тока световые приборы с газоразрядными лампами потребляют активную и реактивную мощность. Активная мощность необходима для создания дугового разряда, требуемого для светового излучения. Реактивная мощность имеет место при наличии в приборах элементов, обладающих индуктивностью и электрической емкостью. Эта мощность оказывает существенное влияние на режим напряжения в осветительных сетях. В общем случае реактивная мощность может быть представлена как

$$Q = Q_L - Q_C, \tag{1}$$

где  $Q_L$  – мощность, потребляемая элементами с индуктивностью, вар;  $Q_C$  – то же, генерируемая элементами, обладающими емкостью, вар.

В газоразрядных световых приборах обычно преобладает индуктивная составляющая  $Q_L$ , вследствие чего они потребляют реактивную мощность. Для выполнения расчетов электрических осветительных сетей со светодиодными световыми приборами необходимо знать их показатели электропотребления. При этом представляет интерес реактивная мощность, возникающая из-за наличия в них драйверов.

Показатели электропотребления световых приборов зависят от подведенного напряжения, величина которого в точках подключения световых приборов к электрической сети может отличаться от номинального значения. В технической литературе нет информации о статических характеристиках активной и реактивной мощности по напряжению для светодиодных световых приборов. В связи с этим выполнены экспериментальные исследования зависимости от напряжения U следующих показателей электропотребления некоторых световых приборов со светодиодными источниками света:

- потребляемого тока *I*;
- активной потребляемой мощности Р;
- реактивной мощности Q;
- коэффициента мощности соѕф.

Исследования проводили для светодиодного прожектора типа Kanlux PACO LED45-W и светильника типа L-school 16/1500/Д, основные технические данные которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Паспортные данные светодиодных	световых приборов
Certificate data of LED light	ting devices

Основная	Тип светового прибора			
техническая характеристика	L-school 16/1500/Д	Kanlux PACO LED45-W		
Напряжение питания, В	140–265	220–240		
Частота, Гц	50; 60	50; 60		
Рабочий ток светодиодов, мА	150	_		
Коэффициент мощности соѕф	≥0,95	_		
Потребляемая мощность, Вт	≤16	4		

Измерения показателей электропотребления проводили на лабораторной установке, в которой основным измерительным прибором являлся трехфазный многофункциональный электронный счетчик типа СС-301 (Гран-Электро). Класс точности счетчика по активной энергии – 1 (по СТБ ГОСТ Р52322–2007), по реактивной энергии – 1 (СТБ ГОСТ Р 52425–2007). Счетчик СС-301, кроме учета активной и реактивной энергии, измеряет подведенное напряжение, активную и реактивную мощности, ток и коэффициент активной мощности соѕф. В процессе измерений фиксировали технические характеристики всего комплекта «драйвер – светодиоды». Результаты измерений приведены в табл. 2, 3.

Полученные экспериментальные данные имеют невысокую точность главным образом из-за сложности отсчета небольших величин с помощью электрического счетчика. Однако у них есть приемлемая согласованность измеренных показателей, позволяющая произвести качественную оценку характеристик электропотребления светодиодных приборов.

#### Таблица 2

#### Характеристики электропотребления светодиодного прожектора типа Kanlux PACO LED45-W

#### Specific features of power consumption of the LED floodlight of the Kanlux PACO LED45-W type

Подведенное напряжение, В	Ток, А	Активная мощность, Вт	Реактивная мощность, вар	Коэффициент мощности соѕф
200,0	0,09	5,00	-15,00	0,29
205,0	0,09	5,00	-16,00	0,27
211,0	0,09	5,00	-17,00	0,26
215,9	0,10	5,00	-18,00	0,25
220,0	0,10	5,00	-19,00	0,25
225,0	0,10	5,00	-20,00	0,24
230,0	0,11	5,00	-23,00	0,22
235,7	0,11	5,00	-23,00	0,22
240,0	0,11	5,00	-23,00	0,22
245,0	0,11	5,00	-24,00	0,22

Таблица 3

#### Характеристики электропотребления светодиодного светильника типа L-school 16/1500/Д

Specific features of power consumption of the LED lamp
of the L 16/1500 school/D type

Подведенное напряжение, В	Ток, А	Активная мощность, Вт	Реактивная мощность, вар	Коэффициент мощности соѕф
200,0	0,085	15,5	-5,00	0,95
210,0	0,082	15,5	-5,50	0,95
220,0	0,080	15,5	-5,50	0,95
225,0	0,079	16,0	-6,00	0,95
230,0	0,078	16,0	-6,50	0,95
235,0	0,078	16,0	-6,50	0,95
240,0	0,075	16,0	-7,50	0,95
245,0	0,075	16,0	-7,50	0,95

Измерения показали, что у прожектора фактическое потребление активной мощности (5 Вт) больше паспортного (4 Вт) на 25 %. Анализ полученных результатов демонстрирует, что благодаря применяемым драйверам изменение подведенного фазного напряжения в диапазоне 200–245 В практически не влияет на потребление активной мощности световыми приборами. Совершенно иной режим реактивной мощности – исследуемые приборы освещения ее не потребляли, а генерировали. Однако это не было указано в паспорте световых приборов. При этом с изменением напряжения от 200 до 245 В генерируемая реактивная мощность увеличивалась на 60 % у прожектора и на 50 % – у светильника. Отметим, что светодиодные световые приборы сохраняли работоспособность и при бо́льших отклонениях напряжения на их зажимах. Коэффициент мощности сояф светильника типа L-school 16/1500/Д практически не изменялся и соответствовал численному значению, заявленному в паспорте прибора, но при токе, опережающем напряжение на угол ф. Выявленное обстоятельство необходимо учитывать при расчете режимов напряжения в электрических сетях осветительных установок.

Прожектор типа Kanlux PACO LED45-W имеет низкий коэффициент мощности соѕф, который при росте напряжения снижается, а значит, увеличивается коэффициент реактивной мощности tgф. Так как реактивная мощность

$$Q = P \cdot tg\phi, \tag{2}$$

то увеличение tg $\varphi$  влечет за собой рост величины Q, генерируемой драйвером.

Надежность и эффективность работы электрических сетей осветительных установок в значительной степени зависят от тока нагрузки, возникающего в элементах сети при включении приборов искусственного освещения. Превышение величины допустимого тока вызывает ускоренный тепловой износ изоляции проводников и отказы в работе электрических сетей.

Как видно из табл. 2 и 3, при изменении подведенного напряжения в диапазоне 200–245 В ток, потребляемый прожектором, возрастает на 22 %, а светильника – снижается на 13 %. Увеличение тока прожектора обусловлено существенным возрастанием величины генерируемой реактивной мощности при повышении напряжения. У светильника коррекция коэффициента мощности драйвером более эффективная. Она обеспечивает высокий соsф и незначительную реактивную мощность. Так как однофазный ток

$$I = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{U},\tag{3}$$

то при одном и том же значении активной мощности *P* повышение напряжения *U* приводит к уменьшению тока светового прибора.

Линии электрического освещения могут питать сосредоточенную и распределенную нагрузку световых приборов. К первым относятся питающие и распределительные линии, питающие осветительные щитки (ОЩ), а ко вторым – групповые, к которым подключаются светильники (рис. 1).



*Рис. 1.* Схема групповой линии электрического освещения с равномерно распределенной нагрузкой: ИП – источник питания (ОЩ) *Fig. 1.* The pattern of a group line of electric lighting with evenly distributed load: IP – power supply

Групповая линия состоит из нескольких участков с одинаковым сечением проводников. Участки имеют разные токи нагрузки и, следовательно, неодинаковую температуру нагрева токопроводящих жил проводов и кабелей. Максимальный ток нагрузки имеет головной (первый) участок, минимальный – последний. Сечение проводников определяется по расчетной нагрузке *P*<sub>p</sub> головного участка

$$P_{\rm p} = \sum_{i=1}^{n} P_{\rm HOMi}, \qquad (4)$$

где  $P_{\text{ном}i}$  – номинальная мощность *i*-го светового прибора, кВт; n – количество световых приборов, присоединенных к линии, шт.

Осветительная сеть должна работать в длительно допустимом тепловом режиме и обеспечивать требуемое качество напряжения, подведенного к зажимам световых приборов. Выбор сечений проводников по допустимому нагреву производится согласно [2, 6, 7] с учетом фактической температуры окружающей среды  $\Theta_c$ . Для осветительных электрических сетей, прокладываемых в воздухе, условная температура окружающей среды  $\Theta_{cH} = 25 \text{ °C } [7]$ . Значение расчетной (фактической) температуры  $\Theta_c$  зависит от производственных условий. Например, в горячих цехах металлургических заводов температура воздуха может достигать 50–55 °C. Осветительные сети, располагаемые вверху помещений, по условиям охлаждения находятся в худших условиях по сравнению с силовыми сетями, что целесообразно учитывать при выполнении расчетов осветительных установок.

В Республике Беларусь в настоящее время нет нормативно-технических документов и методик, предназначенных для использования при расчете осветительных установок со светодиодными световыми приборами. Поэтому будем руководствоваться документацией, регламентирующей проектирование освещения с традиционными источниками света.

Согласно [4, 5] каждая групповая линия, как правило, должна содержать на фазу не более 20 ламп (накаливания, газоразрядных). Тогда для групповой линии, питающей 20 светильников со светодиодными лампами с номинальной мощностью  $P_{\text{ном}} = 0,06 \text{ kBT}$ , в соответствии с формулой (4) расчетная нагрузка линии  $P_{\text{p}} = 0,06 \cdot 20 = 1,2 \text{ kBT}$ . При номинальном напряжении сети  $U_{\text{ном}} = 230 \text{ B}$  и соs $\varphi = 0,95$  расчетный ток линии  $I_{\text{p}} = 5,5 \text{ A}$ . Для питания светодиодных световых приборов малой мощности, как правило, применяются однофазные групповые линии [8], выполненные проводниками, имеющими сечения, минимально допустимые по механической прочности: 1,5 мм<sup>2</sup> – для проводов и кабелей с медными жилами; 2,5 мм<sup>2</sup> – с алюминиевыми [9]. Они имеют длительные допустимые по нагреву токи  $I_{\text{доп}}$ , выдерживающие  $I_{\text{р}}$  групповой светодиодной линии даже при  $\Theta_{\text{c}} = 55 \text{ °C}$ .

По допустимой потере напряжения сечения проводников, как правило, рассчитываются без учета реактивных нагрузок и индуктивных сопротив-

лений электрических сетей. В этом случае площадь сечения проводников групповой осветительной линии (мм<sup>2</sup>) определяется по выражению [2, 6]

$$F = \frac{P_{\rm p}L}{\Delta U_{\rm non}C},\tag{5}$$

где L – длина расчетного участка линии, м;  $\Delta U_{\text{доп}}$  – допустимая потеря напряжения в линии, %; C – расчетный коэффициент,  $B^2 \cdot M/(OM \cdot MM^2)$ .

При расчете групповой линии равномерно распределенная нагрузка световых приборов заменяется суммарной сосредоточенной, приложенной в середине участка между первым и последним световыми приборами. В этом случае при одинаковых расстояниях между точками подключения соседних световых приборов длина расчетного участка вычисляется по формуле

$$L = l_1 + l(N_R - 1)/2, \tag{6}$$

где  $l_1$  – длина участка линии от осветительного щитка до первого прибора, м; l – расстояние между соседними световыми приборами в ряду, м;  $N_R$  – количество световых приборов в одном ряду, шт.

Численное значение *C* зависит от материала проводника, номинального напряжения линии, рода тока и системы сети. Для однофазной линии переменного тока данный коэффициент определяется по формуле

$$C = \frac{\gamma_{\rm p} U_{\rm HOM, \dot{\Phi}}^2}{2} \cdot 10^{-5},\tag{7}$$

где  $U_{\text{ном.}\phi}$  – номинальное фазное напряжение линии, В;  $\gamma_p$  – удельная проводникового материала, м/(Ом·мм<sup>2</sup>), при расчетной температуре  $\Theta_p$ .

Значения коэффициента *C* приводятся в [2, 6, 10] для удельной проводимости меди и алюминия при расчетной температуре  $\Theta_p$ . В то же время фактическая температура нагрева жилы  $\Theta$  может отличаться от расчетной  $\Theta_p$ , что оказывает влияние на выбранное сечение проводников. Более точно площадь сечения токопроводящих жил можно определить, используя удельную проводимость проводникового материала при действительной температуре нагрева жил  $\Theta$ , которую можно найти по выражению

$$\gamma_{\Theta} = \frac{\gamma_0}{1 + \alpha(\Theta - 20)},\tag{8}$$

где  $\gamma_{\Theta}$  – удельная проводимость при температуре 20 °C, м/(Ом·мм<sup>2</sup>);  $\alpha$  – температурный коэффициент электрического сопротивления, который для меди и алюминия равен 0,004  $\frac{1}{^{\circ}C}$ . Значение  $\gamma_{\Theta}$  для меди составляет 55,56, а для алюминия 33,90 м/(Ом·мм<sup>2</sup>) [6]. Для осветительных электрических сетей, работающих с мало изменяющейся во времени нагрузкой, температура нагрева жил проводников может быть приближенно найдена по формуле [10]

$$\Theta = (\Theta_{\text{\tiny WH}} - \Theta_{\text{\tiny CH}})(I_{\text{p}} / I_{\text{\tiny JOH}})^2 + \Theta_{\text{c}}.$$
(9)

С учетом изложенного более точно площадь сечения проводов или жил кабеля можно найти по формуле

$$F = \frac{2P_{\rm p}L}{\Delta U_{\rm gon}\gamma_{\Theta}U_{\rm HOM,\varphi}^2} \cdot 10^5.$$
(10)

Из (10) получим предельное значение *L* при конкретных исходных данных

$$L = \frac{F\Delta U_{\text{gon}} \gamma_{\Theta} U_{\text{hom},\phi}^2}{2P_{\text{p}}} \cdot 10^{-5}.$$
 (11)

С учетом (8) формулу (11) представим в следующем виде:

$$L = \frac{F\Delta U_{\text{gon}}\gamma_{\Theta}U_{\text{HOM},\phi}^2}{2P_{\text{n}}(1+\alpha(\Theta-20))} \cdot 10^{-5}.$$
 (12)

Полученное выражение позволяет определять предельную длину расчетного участка групповой линии, питающей световые приборы, в зависимости от ее параметров и расчетной температуры нагрева жил проводников.

Максимально допустимая потеря напряжения  $\Delta U_{\text{доп.с}}$  в осветительных сетях зависит от технических параметров силового трансформатора, его коэффициента загрузки  $\beta_{\text{т}}$  и коэффициента мощности соѕф нагрузки. Например, для масляного трансформатора мощностью 1000 кВ·А при  $\beta_{\text{т}} = 0,7$  и соѕф = 0,9 значение  $\Delta U_{\text{доп.с}} = 7,6$ %. Большая часть  $\Delta U_{\text{доп.с}}$  относится к питающим и распределительным линиям. Допустимая потеря напряжения в групповых линиях, как правило, составляет 1,5–2,0%.

Произведем расчеты *L* по формуле (12) при  $\Delta U_{\text{доп}} = 1,5$  и 2,0 % и температуре окружающей среды  $\Theta_{\text{с}} = 15-60$  °C. Полученные результаты приведены в табл. 4.

Из представленных на рис. 2, 3 графических зависимостей  $L = f(\Theta)$  видно, что при минимально допустимых сечениях токопроводящих жил алюминиевые проводники имеют большие значения L по сравнению с медными.

Таблица 4

		Материал жили	ы – медь	Материал жилы – алюминий			алюминий
Θ <sub>c</sub> , °C	0.00	$\Delta U_{\text{доп}} = 1,5 \%$	$\Delta U_{\text{доп}} = 2,0 \%$	Θ <sub>c</sub> , <sup>o</sup> C	0.00	$\Delta U_{\text{доп}} = 1,5$ %	$\Delta U_{\text{доп}} = 2,0 \%$
	0, C	L,	М		0, C	L,	М
15	18,35	27,7	37,0	15	17,74	28,3	37,7
20	23,35	27,2	36,3	20	22,74	27,7	37,0
25	28,35	26,7	35,6	25	27,74	27,2	36,2
30	33,35	26,2	34,9	30	32,74	26,7	35,6
35	38,35	25,7	34,2	35	37,74	26,2	34,9
40	43,35	25,2	33,6	40	42,74	25,7	34,2
45	48,35	24,8	33,0	45	47,74	25,2	33,6
50	53,35	24,3	32,4	50	52,74	24,8	33,0
55	58,35	23,9	31,9	55	57,74	24,3	32,5
60	63,35	23,5	31,3	60	62,74	23,9	31,9

#### Предельные значения длины расчетного участка групповой линии The limit values of the length of the calculated section a group line

Результаты расчета иллюстрируют рис. 2, 3.



*Рис. 2.* Зависимость  $L = f(\Theta)$  при  $\Delta U_{\text{доп}} = 1,5$  % для проводника: 1 – с алюминиевыми жилами; 2 – с медными жилами





*Рис. 3.* Зависимость  $L = f(\Theta)$  при  $\Delta U_{\text{доп}} = 2,0$  % для проводника: 1 – с алюминиевыми жилами; 2 – с медными жилами

*Fig. 3.* The dependence  $L = f(\Theta)$  if  $\Delta U_{\text{non}} = 2.0 \%$  for the conductor: 1 – aluminum conductors; 2 – copper conductors

При проектировании осветительных установок с использованием однофазных групповых линий в больших зданиях и помещениях предусматривается установка нескольких групповых щитков, которые размещаются на расстоянии 30-60 м один от другого. В этом случае групповая линия, как правило, имеет длину не более 30 м и реальные длины расчетных участков будут меньше предельных значений *L*, указанных в табл. 4. Следовательно, расчет по допустимой потере напряжения осветительных сетей, питающих светодиодные источники света, не является столь актуальным, как для газоразрядных ламп. Тем более что при емкостном характере реактивной мощности световых приборов потери напряжения в линиях будут меньше, чем при чисто активной нагрузке.

Суммарная потеря напряжения в однофазной групповой линии освещения, выраженная в %, рассчитывается по формуле

$$\Delta U\% = 2\sum_{i=1}^{n} (P_i r_0 + Q_i x_0) l_i \cdot 10^5 / U_{\text{HOM}, \phi}^2, \qquad (13)$$

где  $P_i$ ,  $Q_i$  – активная и реактивная мощность *i*-го участка линии, кВт, квар;  $l_i$  – длина *i*-го участка линии, км;  $r_0$ ,  $x_0$  – активное и индуктивное погонное сопротивление линии, Ом/км; n – количество участков групповой линии.

При емкостном характере реактивной мощности  $Q_i$ , когда ее величина имеет отрицательное значение, суммарная потеря напряжения снижается. В том случае, когда источники света генерируют реактивную мощность

и  $\sum_{i=1}^{n} P_i r_0 l_i \leq \sum_{i=1}^{n} Q_i x_0 l_i$ , потеря напряжения в осветительной линии  $\Delta U \leq 0$ .

То есть теоретически могут быть случаи, когда напряжение в конце линии освещения будет несколько больше, чем в начале. Следовательно, при расчете осветительных сетей по потере напряжения нужно знать величину коэффициента мощности, а также, какой характер имеет реактивная мощность световых приборов – емкостный или индуктивный.

Нагрев проводников с учетом температуры окружающей среды является определяющим фактором при выборе площади сечений проводов и кабелей сетей, питающих светодиодные световые приборы. По условию нагрева в осветительных сетях, как правило, не требуются проводники с большими сечениями. Во многих случаях принимаются минимальные сечения, соответствующие механической прочности проводников. Полученные результаты могут использоваться при выполнении электрических расчетов осветительных сетей, питающих светодиодные световые приборы.

#### выводы

1. Исследованные световые приборы имеют стабильную потребляемую активную мощность в допустимом диапазоне отклонения напряжения от номинального значения при практически неизменном световом потоке источников света. Мощность светильника типа L-school 16/1500/Д при разных подведенных напряжениях соответствует паспортному значению, а прожектора типа Kanlux PACO LED45-W – на 25 % больше, чем указана в паспорте. Реактивная мощность светодиодных приборов имеет емкостный характер, что должно учитываться при расчете режимов напряжения в осветительных установках.

2. Так как светодиодные световые приборы генерируют реактивную мощность, то при относительно небольшой мощности световых приборов выбор сечений проводников по допустимой потере напряжения для групповых линий не имеет решающего значения. Определяющим при выборе сечений жил проводов и кабелей групповых электрических сетей является расчет по допустимому нагреву с учетом температуры окружающей среды.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1. Трофимов, Ю. В. Светодиоды: тенденция и проблемы внедрения / Ю. В. Трофимов, С. И. Лишик // Энергоэффективность. 2013. № 4. С. 24–26.
- 2. Козловская, В. Б. Электрическое освещение / В. Б. Козловская, В. Н. Радкевич, В. Н. Сацукевич. Минск: Техноперспектива, 2011. 543 с.
- 3. Естественное и искусственное освещение. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-2.04-153–2009. Минск: Минстройархитектуры, 2010. 100 с.
- Системы электрооборудования жилых и общественных зданий. Правила проектирования: ТКП 45-4.04-149–2009. Минск: Минстройархитектуры, 2009. 63 с.
- 5. Силовое и осветительное электрооборудование промышленных предприятий. Правила проектирования: ТКП 45-4.04-296–2014 (02250). Минск: Минстройархитектуры, 2014. 87 с.
- Кнорринг, Г. М. Справочная книга для проектирования электрического освещения / Г. М. Кнорринг, В. Н. Сидоров, И. М. Фадин. СПб.: Энергоатомиздат, 1992. 448 с.
- 7. Правила устройства электроустановок. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1985. 640 с.
- Оценка и повышение эффективности работы установок промышленных предприятий / В. А. Анищенко [и др.]. Минск: БНТУ, 2014. 218 с.
- Электроустановки зданий. Ч. 5: Выбор и монтаж электрооборудования. Гл. 52. Электропроводки: ГОСТ 30331.15–2001 (МЭК 364-5-52–93). Введ. 01.03.2003. Минск: БелГИСС; Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2003. 17 с.
- Тульчин, И. К. Электрические сети и электрооборудование жилых и общественных зданий / И. К. Тульчин, Г. И. Нудлер. М.: Энергоатомиздат, 1990. 480 с.

Поступила 23.03.2016 Подписана в печать 25.05.2016 Опубликована онлайн 03.08.2016

#### REFERENCES

- 1. Trofimov Yu. V., Lishik S. I. (2013) LEDs: the Trend and Challenges of Implementation. *Energoeffektivnost* [Power Efficiency], (4), 24–26 (in Russian).
- 2. Kozlovskaya V. B., Radkevich V. N., Satsukevich V. N. (2011) *Electric Lighting*. Minsk, Technoperspectiva. 543 (in Russian).
- 3. TCP 45-2.04-153–2009 (2010) Natural and Artificial Lighting. Building Design Standards. Minsk: Ministry of Architecture and Construction of Belarus. 100 (in Russian).
- 4. TCP 45-4.04-149–2009. (2009) The Electrical System of Residential and Public Buildings. Design Rules. Minsk: Ministry of Architecture and Construction of Belarus. 63 (in Russian).
- TCP 45-4.04-296–2014 (02250). (2014) Power and Lighting Electrical Equipment of Industrial Enterprises. Design Rules. Minsk: Ministry of Architecture and Construction of Belarus. 87 (in Russian).
- 6. Knorring G. M., Sidorov V. N., Fadin I. M. (1992) *Reference Book for Electric Lighting Design*. St. Petersburg, Energoatomizdat. 448 (in Russian).
- 7. Rules of Electrical Devices Mounting (1985). 6<sup>th</sup> ed., Revised. and Added. Moscow, Energoatomizdat. 640 (in Russian).
- 8. Anishchenko V. A., Kozlovskaia V. B., Radkevich V. N., Kolosova I. V. (2014) Assessing and Improving the Efficiency of Devices of Industrial Enterprises. Minsk: BNTU. 218 (in Russian).
- State Standard 30331.15–2001 (IEC 364-5-52–93) (2003). Electrical Installations of Buildings. Part 5. Selection and Erection of Electrical Equipment. Chapter 52. Wiring. Minsk: BelGISS; Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification. 17 (in Russian).
- 10. Tulchin I. K., Nudler G. I. (1990) *Electrical Networks and Electrical Equipment of Residential and Public Buildings*. Moscow, Energoatomizdat. 480 (in Russian).

Received: 23.03.2016

Accepted: 25.05.2016

Published online: 03.08.2016

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-4-301-312

УДК 681.518

## Адаптивная математическая модель тепловых процессов косинусного силового конденсатора

#### Д. И. Зализный<sup>1)</sup>, О. Г. Широков<sup>1)</sup>, Г. О. Широков<sup>1)</sup>, А. А. Капанский<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого (Гомель, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016 Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Существующие системы защиты и диагностики не способны выявлять анормальный нагрев силовых конденсаторов, обусловленный развитием их внутренних неисправностей. Предлагается методика, позволяющая на ранней стадии обнаружить такой нагрев. Данная методика состоит из алгоритмов, аппаратной части в виде микропроцессорного прибора и основана на непрерывном измерении температуры поверхности корпуса конденсатора, температуры внешней окружающей среды, напряжений и токов со стороны источника питания. На основе измеренных величин выполнен расчет потерь активной мощности в конденсаторе и температуры наиболее нагретой точки его диэлектрика. После этого осуществлен анализ среднесуточных значений расчетной температуры и при обнаружении тенденции непрерывного роста этих значений сформированы диагностические сигналы уровней опасности анормального нагрева: низкий, средний, высокий и очень высокий. Приведенные алгоритмы разработаны эвристически. Окончательное их формирование возможно только после многолетней эксплуатации предлагаемой системы диагностирования на реальных объектах. Внедрение разработанной системы снизит вероятность внезапного отказа конденсаторных установок и соответственно повысит надежность системы электроснабжения предприятия.

Ключевые слова: силовой конденсатор, диагностика, анормальный нагрев, система диагностирования

Для цитирования: Адаптивная математическая модель тепловых процессов косинусного силового конденсатора / Д. И. Зализный [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 4. С. 301–312

### Adaptive Mathematical Model of Thermal Processes in a Cosine Power Capacitor

#### D. I. Zalizny<sup>1)</sup>, O. G. Shirokov<sup>1)</sup>, G. O. Shirokov<sup>1)</sup>, A. A. Kapanskiy<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>P. O. Sukhoi Gomel State Technical University (Gomel, Republic of Belarus)

**Abstract.** The existing protection and diagnostics systems are unable to detect the power capacitor abnormal heating caused by the development of its malfunctions. A diagnosis technique is presented that provides discovering such a heating at its early manifestation. The technique

Адрес для переписки	Address for correspondence
Зализный Дмитрий Иванович	Zalizny Dmitry I.
Гомельский государственный технический	P. O. Sukhoi Gomel State Technical
университет имени П. О. Сухого	University
просп. Октября, 48, корп. 2,	48/2 October Ave.,
246746, г. Гомель, Республика Беларусь	246746, Gomel, Republic of Belarus
Тел.: +375 232 40-57-64	Tel.: +375 232 40-57-64
kaf_power@gstu.by	kaf_power@gstu.by

includes algorithms and an apparatus component in a form of a digital device, and it is based on continuous measuring of a capacitor body surface temperature, ambient temperature, voltages and currents from the power source. On the basis of measured values the active power losses in the capacitor and the temperature of the hottest point of its dielectric were calculated. Thereafter, the calculated average daily values of the temperature was analyzed, and, should the tendency of permanent increase of these values is detected, the diagnosis alarms of danger levels of abnormal heating are formed, viz. a low level, an average level, a high level and a very high level. The presented algorithms have been developed heuristically. Their final formation is possible only after years of operation of the proposed diagnosis system applied to the real objects. Because of application of the diagnosis system the probability of capacitor units' failure will be lower and thus the dependability of the power supply may be higher. The implementation of the developed system will reduce the probability of sudden failure of capacitor units, and, correspondingly, will increase the reliability of the electricity supply system of an enterprise.

Keywords: power capacitor, diagnostics, abnormal heating, diagnostic system

**For citation:** Zalizny D. I., Shirokov O. G., Shirokov G. O., A. A. Kapanskiy (2016) Adaptive Mathematical Model of Thermal Processes in a Cosine Power Capacitor. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (3), 301–312 (in Russian)

#### Введение

В электроэнергетике силовые конденсаторы имеют различные области применения. Так называемые косинусные конденсаторы предназначены для компенсации реактивной мощности в электрических сетях. В качестве диэлектрика в них применяют конденсаторную бумагу или полипропиленовые пленки, а также различные пропитывающие жидкости.

Косинусные конденсаторы состоят из плоскопрессованных секций, соединенных последовательно или параллельно и обеспечивающих суммарную емкость в десятки и сотни микрофарад. Учитывая, что их рабочее напряжение составляет 220 В и более, а рабочие токи более 10 А, в них имеются потери активной мощности, достаточные для того, чтобы температура наиболее нагретой точки диэлектрика приблизилась к максимально допустимому значению. Если же из-за процессов старения и увлажнения диэлектрика возрастет тангенс угла диэлектрических потерь или увеличатся сопротивления контактов между секциями, значения этой температуры будут еще выше. Кроме того, дополнительный нагрев конденсатора может быть обусловлен наличием высших гармонических составляющих в протекающих через него токах. Все эти факторы свидетельствуют о том, что непрерывный контроль тепловых процессов косинусного силового конденсатора – важная и актуальная задача.

В подавляющем большинстве косинусных конденсаторов отсутствуют конструктивные элементы для установки датчиков температуры, поэтому получить значения температуры наиболее нагретой точки их диэлектрика можно только расчетным путем. Тепловой расчет силовых конденсаторов – это стандартный этап при их проектировании. Так, в [1, с. 204–233] подробно рассматривается двухмерная математическая модель стационарных тепловых процессов, для которой должны быть известны все геометрические параметры внутренних элементов конденсатора. Очевидно, что данная модель не может быть использована в реальных условиях эксплуатации, когда тепловые процессы в конденсаторе являются нестационарными. Такие же соображения справедливы и по отношению к стационарным моделям, основанным на методе конечных элементов [2].

В литературе рассматриваются математические модели нестационарных тепловых процессов в электролитических конденсаторах, применяющихся в силовой электронике [3], а также в электрохимических конденсаторах [4–7]. Нестационарные модели косинусных силовых конденсаторов в публикациях практически отсутствуют или описаны очень кратко. Так, в упрощенной модели, приведенной в [1, с. 234], явно отсутствует температура окружающей среды, что не позволяет применить эту модель для расчетов в реальном времени.

В данной статье предлагается математическая модель, позволяющая рассчитывать тепловые процессы в косинусном силовом конденсаторе (далее – конденсаторе) в режиме реального времени и не требующая подробных сведений о его внутренней конструкции. Модель основана на методе малого количества тепловых однородных тел, тепловых схемах замещения [8, 9] и обладает адаптивными свойствами.

#### Исходная математическая модель

В большинстве конденсаторов внутренние секции плотно упакованы и состоят из равномерно распределенных диэлектрика и алюминиевой фольги [1], поэтому рассмотрим их как единое тепловое однородное тело. Поскольку существуют две основные конструкции конденсаторов [1] – цилиндр и параллелепипед, – примем их как базовые с соответствующими обозначениями размеров, как изображено на рис. 1.



*Рис. 1.* Представление конденсаторов как тепловых однородных тел: а – цилиндрической формы; b – в форме параллелепипеда

*Fig. 1.* Representation of thermal capacitors as homogeneous bodies: a - of cylindrical shape; b - in the form of a parallelepiped

Пунктиром на рис. 1 изображена внутренняя окружающая среда, т. е. слой окружающей среды, температура которой зависит от температуры поверхности конденсатора. Для обоих вариантов конденсаторов структурная схема тепловых процессов будет одинаковой, как показано на рис. 2.

Примем первоначальное допущение, что значения тепловых сопротивлений не зависят от температуры. Тогда систему уравнений, соответствующую схеме на рис. 2, можно записать следующим образом [8, 9]:

$$\begin{cases} C_1 \frac{d\theta_1}{dt} + \frac{\theta_1 - \theta_2}{R_1} = \Delta P_1; \\ C_2 \frac{d\theta_2}{dt} + \frac{\theta_1 - \theta_2}{R_1} + \frac{\theta_2 - \theta_3}{R_2} = \Delta P_2, \end{cases}$$
(1)

где  $\theta_1$  – температура наиболее нагретой точки диэлектрика конденсатора в соответствии с уровнем установки датчика температуры поверхности корпуса;  $\theta_2$  – температура поверхности корпуса конденсатора;  $R_1$ ,  $C_1$ ,  $\Delta P_1$  – соответственно тепловое сопротивление, теплоемкость и потери активной мощности конденсатора;  $R_2$ ,  $C_2$  – тепловое сопротивление и теплоемкость внутренней окружающей среды;  $\Delta P_2$  – эквивалентные потери активной мощности во внутренней окружающей среде.



*Puc. 2.* Структурная схема тепловых процессов конденсатора *Fig. 2.* Structural scheme of thermal processes in the capacitor

Теплоемкостью  $C_2$  будем пренебрегать в силу малой плотности воздуха. Параметр  $\Delta P_2$  необходим для работы адаптивного алгоритма, что будет показано ниже.

Тепловая схема замещения, составленная в соответствии с (1), приведена на рис. 3.



Рис. 3. Тепловая схема замещения конденсатора

Fig. 3. Thermal equivalent circuit of the capacitor

На основе тепловой схемы замещения получим выражения для расчетных температур в операторной форме:

$$\begin{cases} \theta_{1}(p) = \frac{(R_{1} + R_{2})\Delta P_{1}(p) + R_{2}\Delta P_{2}(p) + \theta_{3}(p)}{1 + p(R_{1} + R_{2})C_{1}}; \\ \theta_{2}(p) = \frac{R_{2}\Delta P_{1}(p) + (1 + pR_{1}C_{1})R_{2}\Delta P_{2}(p) + (1 + pR_{1}C_{1})\theta_{3}(p)}{1 + p(R_{1} + R_{2})C_{1}}. \end{cases}$$

$$(2)$$

#### Расчет тепловых параметров

Для конденсаторов цилиндрической формы тепловое сопротивление  $R_1$  найдем по аналогии с тепловыми сопротивлениями силовых кабелей [9], считая, что тепловой поток идет только через боковую поверхность [1, с. 221]:

$$R_1 = \frac{1}{2\pi\gamma_1 h},\tag{3}$$

где  $\gamma_1$  – удельная теплопроводность диэлектрика конденсатора; *h* – высота конденсатора.

Так как тепловое сопротивление алюминия намного меньше теплового сопротивления диэлектрика и электроды конденсатора выполняются в виде тонкой фольги, их тепловым сопротивлением будем пренебрегать. Для конденсатора в форме параллелепипеда тепловое сопротивление представим как параллельное соединение четырех тепловых сопротивлений в соответствии с четырьмя направлениями теплового потока от центра конденсатора к поверхности его корпуса, как показано на рис. 4.

$$R_{1,4} \underbrace{\overbrace{R_{1,3}}^{R_{1,1}}}_{R_{1,3}} R_{1,2}$$

*Puc.* 4. Направления тепловых потоков в конденсаторе *Fig.* 4. The direction of heat flow in the capacitor

Учитывая обозначения на рис. 4, для составляющих теплового сопротивления конденсатора можно записать:

$$R_{1,1} = R_{1,3} = \frac{a}{2\gamma_1 bh};$$
(4)

$$R_{1,2} = R_{1,4} = \frac{b}{2\gamma_1 ah}.$$
 (5)

В соответствии с (4) и (5) общее тепловое сопротивление

$$R_{\rm l} = \frac{1}{\frac{1}{R_{\rm l,1}} + \frac{1}{R_{\rm l,2}} + \frac{1}{R_{\rm l,3}} + \frac{1}{R_{\rm l,4}}} = \frac{ab}{4\gamma_{\rm l}h(a^2 + b^2)}.$$
(6)

Теплоемкость  $C_1$  определим как сумму произведений удельной теплоемкости диэлектрика  $c_{_{\rm A}}$  на массу диэлектрика  $G_{_{\rm A}}$ , удельной теплоемкости металла электродов  $c_{_{\rm M}}$  на массу металла  $G_{_{\rm M}}$  и удельной теплоемкости материала корпуса  $c_{_{\rm K}}$  на массу корпуса  $G_{_{\rm K}}$ . В результате для цилиндрического конденсатора получим:

$$C_{1} = c_{\pi}G_{\pi} + c_{\mu}G_{\mu} + c_{\kappa}G_{\kappa} = (1 - \delta V_{\mu})c_{\pi}\beta_{\pi}\frac{\pi(d_{1} - w_{\kappa})^{2}}{4}h + \delta V_{\mu}c_{\mu}\beta_{\mu}\frac{\pi(d_{1} - w_{\kappa})^{2}}{4}h + c_{\kappa}\beta_{\kappa}\cdot\left(\frac{\pi d_{1}^{2}}{4} - \frac{\pi(d_{1} - w_{\kappa})^{2}}{4}\right)h,$$
(7)

где  $\delta V_{\rm M}$  – доля металла электродов в объеме конденсатора;  $\beta_{\rm g}$  – плотность диэлектрика;  $\beta_{\rm M}$  – то же металла электродов;  $\beta_{\rm K}$  – то же материала корпуса;  $w_{\rm K}$  – толщина корпуса.

Для конденсатора в форме параллелепипеда

$$C_{1} = c_{\mu}G_{\mu} + c_{\kappa}G_{\kappa} + c_{\kappa}G_{\kappa} = (1 - \delta V_{\mu})c_{\mu}\beta_{\mu}(a - w_{\kappa})(b - w_{\kappa})h + \delta V_{\mu}c_{\mu}\beta_{\mu}(a - w_{\kappa})(b - w_{\kappa})h + c_{\kappa}\beta_{\kappa}(abh - (a - w_{\kappa})(b - w_{\kappa})h).$$

$$(8)$$

Тепловое сопротивление  $R_2$  определим по стандартной формуле

$$R_2 = \frac{1}{\alpha F},\tag{9}$$

где  $\alpha$  – суммарный коэффициент теплоотдачи с поверхности конденсатора; F – площадь поверхности теплоотдачи.

Для цилиндрического конденсатора

$$R_2 = \frac{1}{\alpha \pi d_1 h}.$$
 (10)

Для параллелепипеда

$$R_2 = \frac{1}{\alpha 2h(a+b)}.$$
(11)

В качестве расчетного выберем трехфазный силовой конденсатор марки TGL-200-8264 с номинальным напряжением 380 В и суммарной емкостью 220 мкФ (три конденсатора емкостью 73,4 мкФ, соединенные в треугольник), предназначенный для компенсации реактивной мощности в электрических сетях. Рассматриваемый конденсатор имеет форму параллелепипеда. Его геометрические параметры: a = 95 мм; b = 190 мм; h = 350 мм. Корпус конденсатора стальной с толщиной стенок  $w_{\rm k} = 2$  мм. Примем в качестве материала диэлектрика конденсаторную бумагу, пропитанную хлордифенилом, а в качестве материала электродов – алюминий, как наиболее вероятные материалы для такого типа конденсаторов. Приблизительные геометрические размеры активной части:  $a_1 = 80$  мм;  $b_1 = 150$  мм;  $h_1 = 270$  мм. Предположим, что различие реальных и расчетных параметров конденсатора будет скомпенсировано адаптивным алгоритмом при расчете тепловых процессов. Тепловое сопротивление  $R_1$  найдем по формуле (6), используя значение удельной теплопроводности бумаги  $\gamma_1 = 0,17$  BT/(м·°С). Тепловое сопротивление  $R_2$  определим по (11), используя приближенное значение коэффициента теплоотдачи с поверхности корпуса  $\alpha = 10$  BT/(м·°С), приведенное в [1, с. 215]. Теплоемкость  $C_1$  рассчитаем по формуле (8), используя значение удельного объема металла электродов  $\delta V_{\rm M} = 0,4$  в соответствии с [10, с. 91]. В результате получаем следующие значения:  $R_1 = 1,01$  °C/BT;  $R_2 = 0,46$  °C/BT;  $C_1 = 8395$  BT·C/°C.

#### Расчет потерь

Потери активной мощности в конденсаторе определим как сумму двух слагаемых [1, с. 190]

$$\Delta P_1 = \Delta P_{\rm m} + \Delta P_{\rm m}, \qquad (12)$$

где  $\Delta P_{\rm d}$  – потери активной мощности в диэлектрике;  $\Delta P_{\rm M}$  – то же в металле электродов.

Потери  $\Delta P_{\pi}$  найдем по известной формуле

$$\Delta P_{\mu} = 2\pi f C_{\mu} \operatorname{tgd} \sum_{i=1}^{3} U_{i}^{2}, \qquad (13)$$

где f – частота напряжения;  $C_{3\pi}$  – электрическая емкость конденсатора;  $U_i$  – действующее значение приложенного напряжения *i*-й фазы;  $\delta$  – угол диэлектрических потерь.

Значение  $\Delta P_{\rm M}$  для конденсаторов напряжением до 1 кВ в [1, с. 191] рекомендуется выбирать из условия

$$\Delta P_{\rm M} \approx 0.14 \Delta P_{\rm l}.\tag{14}$$

Выразив  $\Delta P_1$  из (14) и подставив его в (12), получим расчетное выражение для  $\Delta P_{\rm M}$ 

$$\Delta P_{\rm\scriptscriptstyle M} = \frac{0.14}{0.86} \Delta P_{\rm\scriptscriptstyle R}.\tag{15}$$

#### Алгоритм адаптации математической модели

Для рассматриваемого конденсатора при номинальном напряжении и  $tg\delta = 0, 26 \cdot 10^{-3}$  (бумага, пропитанная хлордифенилом) потери составят:  $\Delta P_{\mu} = 26$  Вт;  $\Delta P_{\mu} = 4,2$  Вт, т. е.  $\Delta P_{1} = 30,2$  Вт.

В соответствии с рис. 3 и системой (2) исходный алгоритм для расчета значений температур в рассматриваемой системе первого порядка для единичного конденсатора при нулевых начальных условиях запишется следующим образом:

$$\begin{cases} \Theta_{1,k,j} = h_{1,k} \Delta P_{1,j} + \left( \Theta_{1,k,j-1} - h_{1,k} \Delta P_{1,j} \right) e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}; \\ \Theta_{2,k,j} = h_{2,k} \Delta P_{2,j} + \left( \Theta_{2,k,j-1} - h_{2,k} \Delta P_{2,j} \right) e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}; \\ \Theta_{3,k,j} = h_{3,k} \Theta_{3,j} + \left( \Theta_{3,k,j-1} - h_{3,k} \Theta_{3,j} \right) e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}; \\ \Theta_{1,j} = \Theta_{1,1,j} + \Theta_{2,1,j} + \Theta_{3,1,j}; \\ \Theta_{2,j} = \Theta_{1,2,j} + \Theta_{2,2,j} + \frac{R_1 R_2 \Delta P_{2,j}}{R_1 + R_2} + \Theta_{3,2,j} + \frac{R_1 \Theta_{3,j}}{R_1 + R_2}, \end{cases}$$
(16)

где k – номер температуры (1 – диэлектрик, 2 – поверхность корпуса); j – номер расчетного интервала;  $\tau$  – тепловая постоянная времени;  $h_{1,k}$ ,  $h_{2,k}$ ,  $h_{3,k}$  – коэффициенты, рассчитываемые в соответствии с правилами обратного преобразования Лапласа;  $\vartheta_{1,k,j}$ ,  $\vartheta_{2,k,j}$ ,  $\vartheta_{3,k,j}$  – соответственно составляющие k-й температуры от потерь в  $\Delta P_{1,j}$  и  $\Delta P_{2,j}$  и от температуры внешней охлаждающей среды  $\theta_{3,j}$ ;  $\Delta t$  – период дискретизации.

Рассмотрим второе уравнение системы (16) для температуры  $\theta_2$  (k = 2). Сгруппируем параметры этого уравнения при  $\Delta P_2$ 

$$\vartheta_{2,2,j} = h_{2,2} \Delta P_{2,j} \left( 1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \right) + \vartheta_{2,2,j-1} e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}.$$
 (17)

Подставим (17) в четвертое уравнение системы (16) для температуры  $\theta_2$ и, считая значения температуры  $\theta_2$  непосредственно измеряемыми, выразим  $\Delta P_2$ 

$$\Delta P_{2,j} = \frac{\Theta_{2,j} - \vartheta_{2,2,j-1}e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} - \frac{R_1\Theta_{3,j}}{R_1 + R_2} - \vartheta_{1,2,j} - \vartheta_{3,2,j}}{h_{2,2}\left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}\right) + \frac{R_1R_2}{R_1 + R_2}},$$
(18)

где  $\Theta_{2,j}$ ,  $\Theta_{3,j}$  – непосредственно измеренные с помощью датчиков значения температуры поверхности корпуса конденсатора и внешней окружающей среды на *j*-м интервале.

Выражение (18) представляет собой алгоритм расчета адаптирующего параметра при наличии измеренных значений температуры поверхности корпуса конденсатора, температуры воздуха и напряжения, приложенного к конденсатору. Полученные на каждом шаге расчета значения параметра  $\Delta P_2$  необходимо учитывать при расчете температуры  $\theta_1$  в соответствии с системой (16). Температура  $\theta_{2,j}$ , рассчитываемая по (16), должна полностью совпадать с измеряемой температурой  $\Theta_{2,j}$ , так как определяется путем обратного пересчета. Если совпадение отсутствует, то алгоритм работает неверно.

#### Экспериментальные исследования

Для проверки адекватности математической модели авторами в лабораторных условиях проведены экспериментальные исследования тепловых процессов в конденсаторе TGL-200-8264. Фотография собранной установки показана на рис. 5.



*Puc.* 5. Внешний вид установки для экспериментальных исследований *Fig.* 5. Appearance of the unit for experimental studies

В качестве средства измерений использован прибор ПКРТ-3 (прибор контроля и расчета температур электроэнергетического оборудования), разработанный авторами в рамках задания № 1.1.22 ГПНИ в 2014–2015 гг. Установка работает следующим образом. Напряжения из трехфазной сети через автоматический выключатель и лабораторные измерительные трансформаторы тока типа И54М подаются на конденсатор. Коэффициенты трансформации этих трансформаторов выбраны равными 50/5. Цепи напряжения прибора ПКРТ-3 подключены к сети непосредственно, а цепи тока – через измерительные трансформаторы.

Для измерения температур использовались два чувствительных элемента. Первый устанавливали на верхнюю часть корпуса конденсатора, а второй – на расстоянии 25 см от корпуса на той же высоте, что и первый. Поместить датчик температуры в диэлектрик конденсатора возможности не было из-за токсичности хлордифенила и предполагаемого избыточного давления внутри корпуса. В процессе измерений необходимые величины автоматически записывались в flash-память прибора ПКРТ-3, а затем были считаны в компьютер. Графики измеренной и расчетной температур поверхности корпуса конденсатора приведены на рис. 6. При этом расчетная температура получена по математической модели без применения алгоритма адаптации (18), так как в противном случае измерение и расчет полностью совпали бы.



*Puc. 6.* Графики температур конденсатора: Θ<sub>2</sub> – измеренная температура корпуса; θ<sub>2</sub> – расчетная температура корпуса без применения алгоритма адаптации



Из рисунка 5 видно, что предлагаемая математическая модель достаточно близка по параметрам к реальным тепловым процессам в конденсаторе. Максимальная абсолютная погрешность расчета составляет  $\pm 3$  °C, а коэффициент корреляции равен 0,974.

В рамках поставленного эксперимента проверить работу алгоритма адаптации (18) возможно только путем сравнения значений расчетной температуры диэлектрика, полученных без применения этого алгоритма, и значений с его применением. Соответствующие графики показаны на рис. 7.





 $\Theta_2$  – измеренная температура корпуса;  $\theta_1$ ,  $\theta_{ad,1}$  – расчетная температура диэлектрика без применения и с применением алгоритма адаптации

Fig. 7. Graphs of temperature of the capacitor:

 $\Theta_2$  – the measured temperature of the enclosure;  $\theta_1$ ,  $\theta_{ad,1}$  – the calculated temperature of the dielectric material without and with application of algorithm of adaptation

Коэффициент корреляции между температурами  $\Theta_2$  и  $\theta_1$  равен 0,966, а между  $\Theta_2$  и  $\theta_{ad,1}$  он составляет 0,977. Поскольку очевидно, что между температурой корпуса и температурой диэлектрика должна быть статистическая взаимосвязь, эти значения свидетельствуют о приближении параметров модели к реальным тепловым параметрам конденсатора с помощью алгоритма адаптации.

#### вывод

Предложенная математическая модель может быть использована в качестве базовой при расчете тепловых процессов косинусных силовых конденсаторов в режиме реального времени, поскольку ее адекватность подтверждена экспериментальными исследованиями. Далее на ее основе необходимо разработать математическую модель тепловых процессов групп конденсаторов в установках компенсации реактивной мощности и соответствующие аппаратно-программные средства, позволяющие выявлять анормальный нагрев конденсаторов, обусловленный их неисправностями. Применение таких средств повысит эксплуатационную надежность конденсаторных установок.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Кучинский, Г. С. Силовые электрические конденсаторы / Г. С. Кучинский, Н. И. Назаров. М.: Энергоатомиздат, 1992. 320 с.
- Thermal Simulation for Geometric Optimization of Metallized Polypropylene Film Capacitors / M. El-Husseini [et al.] // IEEE Transactions on Industry Applications. 2002. Vol. 38, № 3. P. 713–718.
- 3. Parler, S. G. Predicting Operating Temperature and Expected Lifetime of Aluminum-Electrolytic Bus Capacitors with Thermal Modeling / S. G. Parler, L. L. Macomber // Powersystems World International Conference (PCIM), November 1999.
- Development of an Equivalent Circuit Model for Electrochemical Double Layer Capacitors with Distinct Electrolytes / J. Kang [et al.] // Electrochimica Acta. 2014. Vol. 115, No 1. P. 587–598.
- Electrochemical Double Layer Capacitor Electro-Thermal Modeling / W. Sarwar [et al.] // Journal of Energy Storage. 2016. Vol. 5, No 1. P. 10–24.
- Guillemet, Ph. Multi-Level Reduced-Order Thermal Modeling of Electrochemical Capacitors / Ph. Guillemet, Y. Scudeller, Th. Brousse // Journal of Power Sources. 2006. Vol. 157, No 1. P. 630–640.
- D'Entremont, A. First-Principles Thermal Modeling of Electric Double Layer Capacitors under Constant-Current Cycling / A. D'Entremont, L. Pilon // Journal of Power Sources. 2014. Vol. 246. P. 887–898.
- Широков, О. Г. Тепловые схемы замещения электроэнергетических устройств / О. Г. Широков, Д. И. Зализный // Наукоемкие технологии. 2008. № 2. С. 63–67.
- 9. Зализный, Д. И. Математическая модель тепловых процессов одножильного силового кабеля / Д. И. Зализный, С. Н. Прохоренко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2012. № 5. С. 25–34.
- Гулевич, А. И. Производство силовых конденсаторов: учеб. пособие для подготовки рабочих на производстве / А. И. Гулевич, А. П. Киреев. М.: Высш. шк., 1981. 284 с.

Поступила 21.12.2015 Подписана в печать 22.01.2016 Опубликована онлайн 03.08.2016

#### REFERENCES

- Kuchinsky G. S., Nazarov N. I. (1992) *Electric Power Capacitors*. Moscow, Energoatomizdat. 320 (in Russian).
- 2. El-Husseini M., Venet P., Rojat G., Joubert C. (2002) Thermal Simulation for Geometric Optimization of Metallized Polypropylene Film Capacitors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 38 (3), 713–718. DOI: 10.1109/TIA.2002.1003421.
- Parler S. G., Macomber L. L. (1999) Predicting Operating Temperature and Expected Lifetime of Aluminum-Electrolytic Bus Capacitors with Thermal Modeling. *Powersystems World International Conference (PCIM)*, November 1999.
- Development of an Equivalent Circuit Model for Electrochemical Double Layer Capacitors with Distinct Electrolytes / J. Kang [et al.] // Electrochimica Acta. 2014. Vol. 115, No 1. P. 587–598.
- Kang J., Wen J., Jayaram S. H., Yu A., Wang X. (2014) Development of an Equivalent Circuit Model for Electrochemical Double Layer Capacitors with Distinct Electrolytes. *Electrochimica Acta*. 115 (1), 587–598. DOI: 10.1016/j.electacta.2013.11.002.
- Sarwar W., Marinescu M., Green N., Taylor N., Offer G. (2016) Electrochemical Double Layer Capacitor Electro-Thermal Modeling. *Journal of Energy Storage*, 5 (1), 10–24. DOI: 10. 1016/j.est.2015.11.001.
- Guillemet Ph., Scudeller Y., Brousse Th. (2006) Multi-Level Reduced-Order Thermal Modeling of Electrochemical Capacitors. *Journal of Power Sources*, 157 (1), 630–640. DOI: 10. 1016/j.jpowsour.2005.07.072.
- D'Entremont A., Pilon L. (2014) First-Principles Thermal Modeling of Electric Double Layer Capacitors under Constant-Current Cycling. *Journal of Power Sources*, 246, 887–898. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2013.08.024.
- Shirokov O. G., Zalizny D. I. (2008) Thermal Equivalent Circuit of Power Industry Equipment. *Naukoyemkiye Tehknologiyi* [High Technologies], (2), 63–67 (in Russian).
- Zalizny D. I., Prokhorenko S. N. (2012) Mathematical Model for Thermal Processes of Single-Core Power Cable. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG* [Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.], (5), 25–34 (in Russian).
- 10. Gulevich A. I., Kireyev A. P. (1981) Production of Power Capacitors: Training Manual for Training Workers of Production. Moscow, Vysshaya Shkola. 284 (in Russian).

Received: 21.12.2015

Accepted: 22.01.2016

Published online: 03.08.2016

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-4-313-326

УДК 621.311

## Нечеткий алгоритм управления потоками реактивной мощности в электрической сети с нелинейной нагрузкой

Г. Б. Гулиев<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Азербайджанский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт энергетики (Баку, Азербайджанская Республика)

© Белорусский национальный технический университет, 2016 Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Важнейшими задачами обеспечения эффективности функционирования электрических сетей, содержащих узлы нагрузок с нелинейным характером электропотребления, являются компенсация реактивной мощности и поддержание качества напряжения в сети в целом. Существующие методы компенсации высших гармоник тока с помощью фильтрокомпенсирующих устройств позволяют решить задачу в рамках процесса изменчивости тока нелинейной нагрузки. В реальных условиях стохастический характер процессов потребления нелинейной нагрузки проявляется в соответствующих изменениях гармонического состава и их доли в общем токе нагрузки. Это может существенно повлиять на величину и направление потока реактивной мощности в сети и ухудшить процесс регулирования реактивной мощности существующими средствами. Предлагаются схема и алгоритм регулирования конденсаторными установками в сетях с нелинейной нагрузкой, построенных на использовании математического аппарата нечеткой логики. Приводятся результаты анализа модельных экспериментов режимов гармонического потокораспределения на примерах 14-узловой схемы IEEE и схемы реальной электрической сети с мощной тяговой подстанцией. Полученные результаты свидетельствуют о том, что при гармоническом составе, превосходящем нормативные значения, использование предложенного алгоритма позволяет устранить дополнительную нагрузку конденсаторов от токов высших гармоник, а само регулирование получается качественным, количество переключений снижается, конденсаторная батарея служит дольше и вероятность ее отказа уменьшается.

Ключевые слова: электрическая сеть, управление реактивной мощностью, несинусоидальность напряжения, нелинейная нагрузка, нечеткие множества, нечеткая логика, функция принадлежности

Для цитирования: Гулиев, Г. Б. Нечеткий алгоритм управления потоками реактивной мощности в электрической сети с нелинейной нагрузкой / Г. Б. Гулиев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 4. С. 313–326

Адрес для переписки	Address for correspondence
Гулиев Гусейнгулу Байрам	Guliyev Huseyngulu B.
Азербайджанский научно-исследовательский	Azerbaijan Scientific-Research
и проектно-изыскательский институт	and Design-Prospecting Institute
энергетики	of Energetics
просп. Г. Зардаби, 94	94 G. Zardabi Ave.,
Аз1012, г. Баку, Азербайджанская Республика	Az1012, Baku, the Azerbaijani Republic
Тел.: +994 12 431-64-07	Tel.: +994 12 431-64-07
huseyngulu@mail.ru	huseyngulu@mail.ru

### **Fuzzy Algorithm to Control Reactive Power Flow in Electric Network with Nonlinear Loads**

#### H. B. Guliyev<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Azerbaijan Research and Design-and-Exploration Institute of Power Engineering (Baku, the Azerbaijani Republic)

Abstract. One of the important problems of efficient function of electric networks containing load nodes of nonlinear character of power consumption is reactive power compensation and maintaining voltage quality in a grid. The commonly used methods for compensation of harmonic currents by filtering devices make it possible to solve the problem in a narrow band of variation of current of a nonlinear load. In the reality stochastic character of power consumption of nonlinear load reveals itself in appropriate changes in harmonic components of voltage and their share in total load current. This could considerably change the magnitude and direction of reactive power flow in a grid and impair the existing processes of reactive power control. The scheme and the algorithm of control of capacitor banks in networks with non-linear load that are based on the use of fuzzy logic software are presented in the article. The results of model experiments analysis of the modes of the harmonic of the power flows on behalf of the 14-nodal scheme recommended by IEEE as well as the schemes of a real grid with powerful traction substation are presented. The mentioned results demonstrate that when harmonic components of voltages exceed normative magnitudes, the use of the proposed algorithm eliminates additional loading on the capacitor banks with higher harmonic currents whereas the control procedure acquires quality, the number of commutations is being reduced, the capacitor battery functions longer and the probability of its malfunction decreases.

**Keywords:** electric network, managements of reactive capacity, non-sinusoidal voltage, nonlinear loading, fuzzy sets, fuzzy logic, membership function

**For citation:** Guliyev H. B. (2016) Fuzzy Algorithm to Control Reactive Power Flow in Electric Network with Nonlinear Loads. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (4), 313–326 (in Russian)

#### Введение

В последние годы широкое использование в сетях электроснабжения различных установок силовой электроники, а также рост доли энергоемких потребителей с нелинейной вольт-амперной характеристикой послужили причиной интенсивности потоков реактивной мощности (PM) в распределительных электрических сетях [1, 2]. Особенность потоков PM в подобных сетях состоит в том, что она имеет полигармонический характер со случайно изменяющимся значением. В результате протекания PM от токов высших гармоник в сетях возникают дополнительные потери мощности и напряжения. Компенсация PM в узлах сети с подключенной нагрузкой нелинейного характера имеет важное практическое значение [3, 4].

В статье предлагаются схема и алгоритм компенсации PM в сети электроснабжения с нелинейной нагрузкой (HH) с помощью регулируемых батарей статических конденсаторов (БСК). Данный алгоритм реализован в виде нечеткого регулятора, стабилизирующего величину напряжения в узле подключения в зависимости от составляющих PM каждой гармоники.

#### Принцип работы нечеткого регулятора в сети с нелинейной нагрузкой

Принцип работы предлагаемого нечеткого регулятора реактивной мощности (HP PM) может быть описан в виде следующей блочной структуры (рис. 1): 1 – «спокойная» нагрузка; 2 – датчик PM; 3 – датчик напряжения

на шинах потребителя; 4 – «Динамика» (скорость изменения PM); 5 – счетчик количества переключений, совершаемых за день; 6 – нечеткий контроллер; 7 – фаззификатор, предназначенный для трансформации четких сигналов  $Q, Q', U, K_U, N$  в нечеткие множества  $\mu_Q, \mu_{Q'}, \mu_U, \mu_{R_U}, \mu_N$ (где Q, Q', U, K<sub>U</sub>, N – PM, производная PM, напряжения, суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения и количество выполняемых переключений соответственно, а  $\mu_Q$ ,  $\mu_Q$ ,  $\mu_U$ ,  $\mu_R$ ,  $\mu_N$  – соответствующие им функции принадлежности); 8 – механизм нечеткого вывода (таблица лингвистических правил, т. е. совокупность нечетких правил, описывающих нечеткое отношение между входными и выходными параметрами контроллера); 9 – дефаззификатор, где полученное нечеткое значение после дефаззификации в виде четкого управляющего воздействия поступает на вход блока управления 11; 10 – база данных, где хранятся функции принадлежности (ФП) нечетких множеств, описывающих эти сигналы, и базы знаний, где хранятся нечеткие правила управления; 12 – блок коммутации; 13 – нелинейная нагрузка, которая является источником высших гармонических составляющих (ВГС) напряжения; 14 – датчик показателей несинусоидальности напряжения.



Рис. 1. Структурная схема нечеткого регулятора реактивной мощности с учетом влияния высших гармонических составляющих напряжения

*Fig 1.* Structural scheme of a fuzzy controller for reactive power that accounts the influence of higher harmonic components of voltage

Нечеткий регулятор реактивной мощности работает следующим образом. Текущие выходные сигналы управляемого процесса – реактивная мощность Q, ее производная Q', напряжения U, суммарный коэффициент гармонических составляющих  $K_U$  [5] и количество переключений секций БСК N в виде четких сигналов поступают на вход нечеткого контроллера. Трансформированные в фаззификаторе нечеткие сигналы в виде нечетких множеств поступают в механизм нечеткого вывода. Для этого используется следующий оператор фаззификации [6–8]:

$$F = fuzzifier(Q, Q', U, K_{U}, N),$$
(1)

где  $Q, Q', U, K_U, N$  – четкие сигналы, поступающие в систему; F – нечеткое множества; *fuzzifier* – оператор фаззификации.

Механизм вывода, получая эти нечеткие сигналы с использованием базы данных 14, где хранятся ФП нечетких множеств  $\mu_Q$ ,  $\mu_Q'$ ,  $\mu_U$ ,  $\mu_{R_U}$ ,  $\mu_N$ , описывающих эти сигналы, и базы знаний, где хранятся нечеткие правила управления в виде (1), осуществляет логический вывод для получения нечетких выходных сигналов контроллера направления *Dr* и задержки *DL*. База данных включает дискретизацию, нормализацию универсума, нечеткое разделение пространства входов и выходов, определение ФП нечетких множеств. Для проектирования базы знаний сначала определяются переменные состояния и переменные управления, источники типов нечетких правил управления и др. Так как на вход исполнительного органа (блок управления – БК) 10 должен поступить четкий управляющий сигнал, то дефаззификатор осуществляет отображение из допустимого пространства нечетких управляющих воздействий в пространство четких управляющих воздействий. Для этого используется следующий оператор:

$$Y = F^{-1}(\mu_i(Y^*));$$
(2)

$$\mu_{i}(Y^{*}) = \max(\min(\mu_{i}(Q), \mu_{i}(Q'), \mu_{i}(U), \mu_{i}(K_{U}), \mu_{i}(N))), \ \forall i,$$
(3)

где Y – вектор четких управляющих воздействий;  $F^{-1}(\cdot)$  – оператор дефаззификации;  $Y^*$  – вектор результирующих нечетких управляющих воздействий;  $\mu_i(\cdot)$  – результирующая  $\Phi \Pi$  управляющих воздействий.

#### Алгоритм регулирования реактивной мощности

Регулирование реактивной мощности в сети с нелинейной нагрузкой реализуется программно в блоке в виде последовательности вычислительной процедуры, представленной на рис. 2. Измеренные датчиками значения параметров состояния (выходные параметры) (U – напряжения; Q – реактивная мощность;  $K_U$  – суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения), вычисленные значения производной РМ, а также количество совершаемых переключений секций БСК за день при выполнении условия  $K_U > K_U^{\text{норм}}$  поступают на блок нечеткого механизма принятия решения.

С учетом текущих значений выходного вектора состояний принимается одно из решений переключения секций с задержкой времени в зависимости от количества выполняемых переключений и динамики изменения PM: «Вверх», «Вниз», «Стоп». При невыполнении условия  $K_U > K_U^{\text{норм}}$  про-

исходит отключение секций БСК. При выполнении условия  $tg\phi \le tg\phi_{ycr}$  работа контроллера считается завершенной, где  $tg\phi$  и  $tg\phi_{ycr}$  – текущее и установленное значения коэффициента реактивной мощности соответственно ( $tg\phi = Q/P$ ). В противном случае количество совершаемых переключений за день подается на механизм принятия решения, и работа алгоритма повторяется.



*Puc.* 2. Блок-схема алгоритма нечеткого управления потоками реактивной мощности *Fig.* 2. The block diagram of algorithm of reactive power flow fuzzy control

#### Нечеткая модель нечеткого регулятора реактивной мощности

Для идентификации нечеткого алгоритма был выбран алгоритм Мамдани. Для непрерывных универсумов ФП нечетких множеств имеют треугольную, трапецеидальную, колоколообразную – *S*- и *Z*-образные – формы. Описываются они формулами и параметрами, приведенными в табл. 1 [9–11]. При работе контроллера по алгоритму Мамдани в распределительных сетях (поддержание отклонения РМ в нормируемых пределах) [2] на вход нечеткого контроллера подавались: вычисленное значение РМ, динамика изменения РМ, вычисленное значение напряжения и наибольшее количество переключений за день, совершаемых установкой. С выхода контроллера снимались значения лингвистических переменных «Направление», «Задержка».

Таблица 1

Функция принадлежности	Параметр	Формула
<i>S</i> -образная	a, b	$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ 1, & x > b \end{cases}$
Z-образная	<i>b</i> , <i>c</i>	$\mu(x) = \begin{cases} 1, & x < b \\ \frac{c - x}{c - b}, & b < x < c \\ 0, & x > c \end{cases}$
Треугольная	a, b, c	$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x < c \\ 0, & x > c \end{cases}$
Трапецеидальная	$a, b_1, b_2, c$	$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b_1-a}, & a < x < b_1 \\ \frac{c-x}{c-b_2}, & b_2 < x < c \\ 0, & x > c \end{cases}$

Параметры и формулы функций принадлежности The parameters and formulas of membership functions

Все входные и выходные величины являются четкими значениями, поскольку снимаются с приборов, измеряющих значения реальных параметров. Далее, в самом контроллере, эти величины преобразуются в нечеткие. После срабатывания нечетких правил полученные выходные переменные вновь преобразуются в четкий вид.

Для работы нечеткого контроллера использовались лингвистические переменные на входе контроллера (входные переменные). Нечеткие значения, ФП и параметры входных лингвистических переменных показаны в табл. 2. После дискретизации и определения нечетких значений терммножеств  $T_{E_{ij}}(\cdot)$  переменных состояний (параметры входа) и управляемых параметров (параметры выхода)  $T_{E_{ij}}(Q)$  с  $j = \overline{1,5}$ ,  $T_{E_{2j}}(Q')$  с  $j = \overline{1,3}$ ,  $T_{E_{3j}}(U)$ 

## c $j = \overline{1,4}$ , $T_{E_{4j}}(K_U)$ c $j = \overline{1,3}$ , $T_{E_{5j}}(DL)$ c $j = \overline{1,2}$ , $T_{E_{6j}}(Dr)$ c $j = \overline{1,3}$ , $T_{E_{7j}}(Dy)$

с  $j = \overline{1,5}$  составляли набор нечетких правил управления (нечеткое моделирование).

Таблица 2

#### Нечеткие значения, функции принадлежности и параметры входных и выходных лингвистических переменных

Fuzzy values, membership functions and input and output parameters of linguistic variables

Значение переменной	Функция принадлежности	Параметр		
Реактивная мощность				
Очень малое	Z-образная	(0; 0,05)		
Малое	Трапецеидальная	(0; 0,05; 0,15; 0,2)		
Среднее	Трапецеидальная	(0,15; 0,2; 0,4; 0,45)		
Большое	Трапецеидальная	(0,4; 0,45; 0,85; 0,95)		
Очень большое	S-образная	(0,8; 0,91; 1)		
	Динамика			
Отрицательное	Z-образная	(-0,5;0)		
Нулевое	Треугольная	(-0,8; 0; 0,8)		
Положительное	S-образная	(0; 0,5)		
Напряжение				
Низкое	Трапецеидальная	(0,69; 0,749; 0,89; 0,95)		
Нормальное	Трапецеидальная	(0,89; 0,94; 1,05; 1,1)		
Высокое	S-образная	(1,05; 1,1)		
Аварийное	Z-образная	(0,69; 0,74)		
Гармонические искажения				
Нормальное	Z-образная	(2,5; 6)		
Немного большее	Треугольная	(2,5; 6; 9)		
Большое	<i>S</i> -образная	(6; 9)		
Количество				
Малое	Z-образная	(0; 7; 10)		
Не малое	S-образная	(7; 10; 12)		
Направления				
Вверх	Трапецеидальная	(0,5; 0,75; 1,25; 1,5)		
Вниз	Трапецеидальная	(-1,5; -1,25; -0,75; -0,5)		
Стоп	Трапецеидальная	(-0,5; -0,25; 0,25; 0,5)		
Задержка				
Очень малое	Z-образная	(0; 0,05)		
Короткое	Трапецеидальная	(0; 0,05; 0,15; 0,2)		
Среднее	Трапецеидальная	(0,15; 0,2; 0,4; 0,45)		
Долгое	Трапецеидальная	(0,4; 0,45; 0,85; 0,95)		
Очень долгое	<i>S</i> -образная	(0,8; 0,9; 1,1)		

Нечеткие правила управления имеют форму нечетких условных утверждений, которые соотносят переменные состояния в антецеденте (посылка правила) и управляющие переменные процесса в консеквентах (заключение правила) [9, 10]. Для многих нечетких логических котроллеров используются нечеткие правила, имеющие следующий вид: если (if)  $x_1$  есть (is)  $A_{11}$  и (and)  $x_2$  есть (is)  $A_{12}$ , ..., и (and)  $x_n$  есть (is)  $A_{1n}$ , то (then) y есть (is)  $B_1$ ; если (if)  $x_1$  есть (is)  $A_{21}$  и (and)  $x_2$  есть (is)  $A_{22}$ , ..., и (and)  $x_n$  есть (is)  $A_{2n}$ , то (then) y есть (is)  $B_2$ 

если (if)  $x_1$  есть (is)  $A_{n1}$  и (and)  $x_2$  есть (is)  $A_{n2}$ , ..., и (and)  $x_n$  есть (is)  $A_{mn}$ , то (then) y есть (is)  $B_m$ .

По приведенным выше переменным состояния и управления составлено 67 наборов правил нечеткого управления для данной HP PM в вышеуказанной форме.

#### Результаты компьютерного моделирования

Для апробации разработанных моделей и алгоритма управления РМ электрической сети с нелинейными потребителями проведены расчетные тесты для 14-узловой схемы IEEE, и для реальной схемы электрической сети системы Азерэнержи.

Спектры напряжения для двух характерных узлов 14-узловой схемы IEEE (B4, B14) изображены на рис. За, b и для реальной схемы энергосистем (B5, B10) при работе шестифазных вентильных преобразователей тяговой подстанции (ПС), подключенных на эти узлы с максимальной нагрузкой, – на рис. Зс, d. В обоих спектрах доминируют гармоники 5, 7, 11, 13. Как видно из рис. За, d, в узле B4 схемы IEEE 5-я гармоника достигает значения 6 %, в узле B10 реальной схемы – 16 %.





*Fig. 3.* Spectral composition of voltage of the characteristic network nodes: a, b – for the 14-node IEEE scheme; c, d – for the real circuit of power system
Профиль коэффициента суммарного гармоническиго искажения напряжения  $K_U$  по узлам схемы IEEE и реальной электрической сети энергосистемы изображен на рис. 4a, b. Как видно, во всех случаях  $K_U > 2$  % и превышает установленные нормы для шин напряжением 110 кВ [3]. Например, на шинах 110 кВ ПС № 4 схемы IEEE  $K_U > 7$  %, а на шинах ПС № 9  $K_U > 6$  % (рис. 4a), для реальной электрической сети на шинах ПС № 12, 15 и 16  $K_U > 10$  %, а на шинах ПС № 1–3 и № 9  $K_U > 9$  %. Аналогичные результаты получаются на шинах 35 и 10 кВ. На этих шинах значения коэффициента  $K_U$  значительно превосходят установленные нормы для данных классов напряжения. Так, на шинах 35 кВ ПС № 8 этот показатель находится в пределах 15 % ( $K_U^{\text{норм}} = 4$  %), а на шинах 10 кВ – 20–25 % ( $K_U^{\text{норм}} = 5$  %). На шинах 10 кВ действующее значение напряжения уменьшается соответственно до 7,90 % и 8,05 %.



Рис. 4. Профиль коэффициента  $K_U$  в максимальном режиме нелинейных потребителей: а – для 14-узловой схемы IEEE; b – для реальной электрической сети

*Fig. 4.* The profile of the  $K_U$  coefficient in the maximum mode of non-linear consumers: a – 14 node IEEE scheme; b – for a real electric network

Итак, на основании результатов проведенных расчетных экспериментов на формате ЕТАР можно сделать вывод о том, что в условиях несинусоидальности питающего напряжения необходимо учесть значение суммарного коэффицента гармонических составляющих в нечетком алгоритме управления РМ для предотвращения частых перегрузок БСК и соответственно обеспечения невыхода из строя их секций. Для представления эффективности использования предложенного нечеткого алгоритма в виде (3) НР РМ в электрических сетях энергосистем в условиях несинусоидальности питающего напряжения проведены расчетные эксперименты путем компьютерного моделирования в среде программного комплекса MatLab с использованием модуля Fuzzy Logic Toolbox [12]. Фрагмент процедуры принятия решения на основе реализации алгоритма отображен на рис. 5. При моделировании использованы типичные суточные графики активных и реактивных нагрузок, которые показаны на рис. 6.

Благодаря компьютерной реализации алгоритма HP PM на основе базы знаний в виде (3) получены две пары управления поверхности  $Y = f(U', K_{U})$  и  $Y = f(Q, K_{U})$ , которые изображены на рис. 7a, b.



Рис. 5. Фрагмент процедуры принятия решения

Fig. 5. A fragment of the decision-making procedure



— — – реактивной нагрузки; — — – активной нагрузки
 *Fig. 6.* A typical daily schedule of active and reactive loads:
 — — – reactive load; — — – resistive load

Если  $K_U$  = **Нормальное**, то для уменьшения напряжения и коэффициента реактивной мощности tg $\varphi$  HP PM принимает решения о включения секции БСК, а при соответствии напряжения термам, выше номинальных напряжений, нечеткий контроллер формирует управляющее воздействие на отключение секций БСК.

При значении  $K_U$  = **Большое** нечеткий контроллер принимает решение мгновенного отключения БСК независимо от значений напряжений и tg $\phi$ .

При  $K_U$  = **Немного большое** в зависимости от значения напряжения и tg $\phi$  контроллер принимает то или иное решение в соответствии с алго-

ритмом управления НР РМ. Время выдержки работы контроллера генерируется в зависимости от количества переключений секций БСК и от значения переменной «Динамика». Если количество переключений за день мало и динамика отрицательная, то задержка будет средней. Если количество переключений за день мало и динамика положительная, то задержка будет короткой, и т. п.



*Рис.* 7. Управление поверхностью с учетом значений  $K_U$  *Fig.* 7. The surface control based on the values of  $K_U$ 

Полученные диаграммы нечеткого управления РМ (а) и tg $\phi$  (b) при исходном режиме с учетом и неучетом значений коэффициента  $K_U$  изображены на рис. 8а, b. Как видно из рис. 8, в соответствии с управлением поверхности при учете значения  $K_U$  нечеткий контроллер вырабатывает управляющие сигналы только при ее малых значениях и значениях, находящихся в пределах нормы ( $K_U^{\text{норм}}$ ), установленных [3]. При управлении значения tg $\phi$  в определенные часы (например, часов в 4–7 tg $\phi$  = 0,71) получаются выше нормы. Но несмотря на это, при условии  $K_U > K_U^{\text{норм}}$  предотвращаются перегрузка конденсаторов БСК, а также их преждевременный выход из строя.

Таким образом, на основе нечеткого алгоритма Мамдани предложен алгоритм НР РМ в электрических сетях со специфическими нагрузками с целью поддержания значения коэффициента реактивной мощности tgф в пределах, установленных в технических условиях для потребителей, а также для обеспечения нормального эксплуатационного состояния БСК. В результате учета в алгоритме ВГС напряжения предотвращаются пере-



грузки БСК с токами высших гармоник. Это приводит к повышению надежности переключающих устройств, а также БСК.



• - - original mode; - • - the one after fuzzy regulation; - • - - the same in consideration of  $K_U$ 

#### выводы

1. Предложены структурная схема и алгоритм для нечеткого регулятора реактивной мощности в распределительных электрических сетях энергосистем, работающих со специфическими нагрузками. Выполнены расчетные эксперименты в реальной электрической сети с преобразовательными установками, питающими электрифицированный транспорт. Полученные результаты свидетельствуют о том, что суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения значительно превосходит установленные нормы.

2. Результаты компьютерного моделирования предложенного метода регулирования показали, что учет гармонических составляющих напряже-

ния позволяет устранить дополнительную нагрузку БСК с токами высших гармоник, а само регулирование получается качественным, количество переключений снижается, конденсаторная батарея служит дольше и вероятность ее отказа уменьшается.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Rashtchizadeh, A. Genetic Algorithm for Optimal Distributed Generation Sitting and Sizing for Losses and Voltage Improvement / A. Rashtchizadeh, N. Rahmanov, K. Dursun // International Journal for Knowledge, Science and Technology. 2009. Vol. 1, No 1. P. 56–61.
- 2. Воронин, К. А. Эффективность компенсации реактивной мощности при больших нелинейных нагрузках / К. А. Воронин, Ю. В. Рахманова, Ю. Волкова // Промышленная энергетика. 2015. № 8. С. 54–58.
- Wilkosz, K. Harmonic Sources Localization: Comparison of Methods Utilizing the Voltage Rate or the Current Rate / K. Wilkosz // 9<sup>th</sup> International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, EPQU. Barcelona, Spain, 2007. Article number 4424101.
- 4. Harmonic Propagation Analysis in Electric Energy Distribution Systems / C. A. Canesin [et al.] // 11<sup>th</sup> International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU 2007). Lisbon, Portugal: IEEE, 2007. P. 577–583.
- 5. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 32144–2013. Введ. 01.02.2016. М.: Госстандарт, 2015. 18 с.
- 6. Гашимов, А. М. Улучшенный алгоритм нечеткой логики для управления реактивной мощностью и напряжением в распределительных сетях / А. М. Гашимов, Н. Р. Рахманов, Г. Б. Гулиев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2014. № 2. С. 29–39.
- Guliyev, H. B. System of Automatic Regulation of Reactive Power by Means of Fuzzy Logic. Reliability / H. B. Guliyev, Z. I. Farkhadov, J. F. Mammadov // Reliability: Theory & Applications. 2015. Vol. 10, No 2 (37). P. 50–58.
- 8. Рахманов, Н. Р. Идентификация структуры нечеткого регулятора реактивной мощности индукционной печи / Н. Р. Рахманов, Г. Б. Гулиев, З. И. Фархадов // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2015. № 4. С. 28–31.
- 9. ИУС газопромысловых объектов. Современное состояние и перспективы развития / Р. А. Алиев [и др.]. М.: Недра, 2014. 462 с.
- Штовба, С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MatLab / С. Д. Штовба. М.: Горячая линия – Телеком, 2007. 288 с.
- New Approach Based on Fuzzy Controller for Volt/Var Control in Distribution System / M. Nayeripour [et al.] // Australian Journal of Basic and Applied Sciences. 2010. Vol. 4, No 3. P. 468–480.
- 12. Fuzzy Logic Toolbox. User's Guide. Version 2. The MathWorks. Inc. 1999.

Поступила 14.12.2015 Подписана в печать 12.02.2016 Опубликована онлайн 03.08.2016

#### REFERENCES

- 1. Rashtchizadeh A., Rahmanov N., Dursun K. (2009) Genetic Algorithm for Optimal Distributed Generation Sitting and Sizing for Losses and Voltage Improvement. *International Journal for Knowledge, Science and Technology*, 1 (1), 56–61.
- Voronin K. A., Rakhmanova Yu. V., Volkova Yu. (2015) The Effectiveness of Reactive Power Compensation for Large Nonlinear Loads. *Promyshlennfya Energetika* [Industrial Power Engineering], (8), 54–58 (in Russian).
- 3. Wilkosz K. (2007) Harmonic Sources Localization: Comparison of Methods Utilizing the Voltage Rate or the Current Rate. 9<sup>th</sup> International Conference on Electrical Power Quali-

ty and Utilisation, EPQU. Barcelona, Spain, Article number 4424101. DOI: 10.1109/EPQU. 2007.4424101/.

- Oliveira L. C. O., Melo G. A., Souza J. B., Canesin C. A., Bonatto B. D., Belchior F. N., Oliveira M., Mertens E. A. (2007) Harmonic Propagation Analysis in Electric Energy Distribution Systems. *11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation* (EPQU 2007). Lisbon, Portugal, 577–583. DOI: 10.1109/EPQU.2011.6128827.
- 5. State Standard 32144–2013. Electric Power. Electromagnetic Compatibility of Technical Equipment. Quality Norms of Electric Power in Power Supply Systems of General Purpose. Moscow, Gosstandart, 2015. 18 (in Russian).
- 6. Gashimov A. M., Rahmanov N. R., Guliyev G. B. (2014) Improved Algorithm of Fuzzy Logic for Control of Reactive Capacity and Voltage in Distributive Networks. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG* [Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.], (2), 29–39 (in Russian).
- Guliyev H. B., Farkhadov Z. I., Mammadov J. F. (2015) System of Automatic Regulation of Reactive Power by Means of Fuzzy Logic. Reliability. *Reliability: Theory & Applications*, 10 (2), 50–58.
- Rahmanov N. P., Guliyev G. B., Farhadov Z. I. (2015) Structure Identification of a Fuzzy Controller of Reactive Power of the Induction Furnace. *ELECTRO. Elektrotekhnika, Elektoenrgitika i Elektrotekhnicheskaya Promyshlennost.* [ELECTRO. Electrical Engineering, Power Engineering, Electrical Industry], (4), 28–31 (in Russian).
- 9. Aliyev R. A., Arabskii A. K., Arno O. B., Gunkin S. I., Talybov E. G. (2014) *ICS of Gas-Output Facilities: Current State and Prospects of Development*. Moscow, Nedra. 462 (in Russian).
- 10. Shtovba S. D. (2007) *The Design of Fuzzy Systems by Means MatLab*. Moscow: Goryachaya Liniya Telecom. 288 (in Russian).
- 11. Nayeripour M., Khorsand H., Roosta A. R., Niknam T. (2010) New Approach Based on Fuzzy Controller for Volt/Var Control in Distribution System. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4 (3), 468–480.
- 12. Fuzzy Logic Toolbox. User's Guide. Version 2. The MathWorks. Inc., 1999.

Received: 14.12.2015

Accepted: 12.02.2016

Published online: 03.08.2016

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-4-327-337

УДК 622.01

# Решение задачи о распространении внутрипластового горения на основе эвристической гипотезы о температурном и концентрационном полях

К. В. Добрего<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016 Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. В настоящее время увеличивается доля месторождений с вязкими и трудноизвлекаемыми нефтями. В связи с этим растет интерес к методам термохимического воздействия на нефтяные и угольные пласты. Примером является белорусско-российский проект «Вишатермогаз». Для управления термохимическими процессами внутри пласта необходимо использование моделей различного уровня - качественных аналитических, простых численных с «усредненными» параметрами, а также детальных многомерных расчетов. Ввиду специфических особенностей внутрипластовых процессов развитие новых упрощенных методов их анализа является актуальной задачей как с научной, так и практической точки зрения. В работе излагается решение задачи о распространении квазистационарной волны тепловыделения в пласте на основе эвристических гипотез. В основе решения лежит предположение о связи профилей температуры Т и концентрации недостающего компонента у:  $\exp(-E/T) = \exp(-E/T_{max})(1-y)$ . Другой гипотезой является предположение о том, что максимальный градиент профиля концентрации недостающего компонента реализуется при некотором фиксированном значении его концентрации. Математически это соответствует уравнению  $y''(y = y^*) = 0$ . Выводятся простые формулы для определения концентрационного температурного профиля, а также скорости распространения температурного фронта для двух случаев - недостатка окислителя и недостатка горючего компонента. Указаны основные функциональные зависимости скорости фронта от параметров задачи. Сравнение полученного данным способом профиля с профилем, рассчитанным численно, показывает адекватность самого метода и принятых гипотез. Данный метод может применяться для оперативной оценки и параметрического исследования профилей и скорости движения фронта. Он также может быть использован для сходных задач химической технологии и теппотехники

Ключевые слова: фильтрационное горение, внутрипластовое горение, однотемпературное приближение, эвристический метод

Для цитирования: Добрего, К. В. Решение задачи о распространении внутрипластового горения на основе эвристической гипотезы о температурном и концентрационном полях / К. В. Добрего // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 4. С. 327–337

Адрес для переписки	Address for correspondence
Добрего Кирилл Викторович	Dobrego Kirill V.
Белорусский национальный технический университет	Belarusian National Technical University
просп. Независимости, 65/2,	65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, г. Минск, Республика Беларусь	220013, Minsk, Republic of Belarus
Тел.: +375 17 292-42-32	Tel.: +375 17 292-42-32
ef@bntu.by	ef@bntu.by

# Solution of the Problem of Oil-Pool In-Situ Combustion Front Propagation on the Basis of Heuristic Hypothesis Regarding Temperature and Concentration Profiles

## K. V. Dobrego<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. At present the number of oil deposits with viscous and stranded oil is steadily growing. Due to the mentioned circumstance there is growing interest in methods of thermochemical treatment of an oil and coal-beds. This interest is reflected, e.g., in the "Visha-Thermogaz" Belarusian-Russian joint project. In order to provide control over the in-situ thermochemical processes it is necessary to use models of different levels, i.e. qualitative analysis, simplified numerical simulation with "averaged" parameters, as well as detailed 2D and 3D modeling. Due to variety of specific parameters and conditions of in-situ processes, design of new simplified methods of analysis is a topical objective both for research and practical activity. Therefore, a new method of solution of the problem of in-situ combustion front propagation based on heuristic hypothesis is discussed in the present article. The designed method is based on heuristic assumption of functional relationship between the profiles of temperature T and deficit component concentration y:  $\exp(-E/T) = \exp(-E/T_{\text{max}})(1-y)$ . Another hypothesis is the assumption that the maximum gradient of the concentration profile of the missing component is implemented with a fixed value of concentration that is expressed as  $y''(y = y^*) = 0$ . Simple algebraic and differential equations for determination of the temperature and concentration profiles as well as for the front propagation velocity are derived for two cases i.e. the lack of oxidizer and the fuel component fault. Principal functional dependencies of the front velocity are revealed. Comparison of the profiles obtained with the use of the described method with the one obtained numerically proves the adequacy of the method itself and the hypotheses adopted. The method can be used for rapid assessment and parametric studies of the profiles and the speed of the front. It can also be used for analysis of similar problems of chemical and heat engineering.

Keywords: filtration combustion, in-situ combustion, one-temperature approximation, heuristic method

For citation: Dobrego K. V. (2016) Solution of the Problem of Oil-Pool In-Situ Combustion Front Propagation on the Basis of Heuristic Hypothesis Regarding Temperature and Concentration Profiles. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (4), 327–337 (in Russian)

Имея почти вековую историю, методы термохимического воздействия на нефтяные и угольные пласты (подземная газификация, внутрипластовое горение, термогазовый метод и т. п.) не являются массовыми технологиями добычи нефти и газа [1–4]. В первую очередь это связано с достаточным количеством «простых» для добычи месторождений, а также со значительными трудностями моделирования и управления внутрипластовыми термохимическими процессами [5–7]. В настоящее время наблюдается тенденция сокращения «простых» для добычи месторождений. Например, в Краснодарском крае России доля трудноизвлекаемых запасов в 2011 г. оценивалась в 13 %. Одновременно повышаются возможности вычислительного моделирования сложных гетерогенных систем. Обе эти тенденции ведут к возрастанию интереса и актуальности методов термохимического воздействия на пласт для повышения нефтеотдачи. Анализ работ в данной области показывает, что для управления термохимическими процессами внутри пласта необходимо использование моделей различного уровня – качественных аналитических, простых численных с «усредненными» параметрами, а также детальных многомерных расчетов [8, 9]. Таким образом, развитие новых упрощенных методов анализа, чему, собственно, и посвящена данная статья, является актуальным как с научной, так и практической точки зрения.

Задача о фильтрационном горении (ФГ) нефти внутри пласта близка к известным в литературе задачам о фильтрационном горении газов и фильтрационном горении бедных угольных слоев [10-13]. При этом имеются и существенные различия в физической постановке данной задачи. Газовое дутье осуществляется под давлением, достигающим нескольких сотен атмосфер, в связи с чем плотность дутья приближается к плотности нефти, а скорость фильтрации мала. Вытеснение нефти происходит одновременно с диффузией дутья в нефти, интенсивной вследствие высоких температуры и давления (возможно сверхкритическое состояние дутья) и дисперсионного механизма перешивания. Температура химического реагирования существенно ниже температуры горения при обычных условиях. Отсутствует взрывной характер зажигания (малый параметр теории Франк-Каменецкого относительно велик). Задача существенно однотемпературная, поскольку температуры газовой, жидкой и твердой подсистем практически не различаются. Имеет место специфический химизм системы, в частности объемные реакции между растворенным кислородом и нефтью. В системе могут присутствовать две топливные (горючие) подсистемы – подвижная нефть и неподвижная относительно пористой матрицы нефтяная пленка (углеводородный сорбат, кероген). Процесс горения не повышает существенно плотность продуктов, как в случае атмосферного горения. Продукты сгорания при высоком давлении могут быть в виде растворенных газов или флюидов, а не в газообразном состоянии.

Известно, что анализ задач о ФГ газов может быть проведен в двухтемпературном приближении при относительно большом числе упрощающих предположений. Это предположения о моментальном протекании реакции, малой скорости тепловой волны по сравнению со скоростью фильтрации, пренебрежении диффузией недостающего реагента и др. Исходя из перечисленных выше особенностей задачи о горении в нефтяном пласте, можно считать, что для данной задачи адекватным является однотемпературное приближение, в то время как приближение мгновенной реакции и малого коэффициента диффузии подвижного компонента – неприменимо. Вследствие этого невозможно воспользоваться аналитическими решениями и результатами, известными для задач ФГ газов.

Распространенным подходом для решения задачи ФГ газов, формулируемым через уравнения теплопроводности газа, каркаса и уравнение диффузии для недостающего топливного компонента, являются нахождение решения слева и справа от узкой зоны химического реагирования и последующее определение свободных параметров с помощью условий сшивки [7, 11, 14]. Для решения системы уравнений необходимо понизить порядок характеристического уравнения, по крайней мере, до третьего. Вследствие этого ограничения, в частности, приходится пренебрегать диффузией топливного компонента и предполагать бесконечно быстрое протекание реакции. Однако в случае рассматриваемой задачи такие упрощения неправомерны, и поэтому требуется применение нестандартных, эвристических методов ее решения. Такие методы были использованы при решении задачи об инициировании очага в нефтенасыщенном пласте [14] и скорости волны ΦГ газов [7, 14]. Суть подхода заключается в применении гипотезытождества, связывающей температуру в волне ΦГ с концентрацией топливного компонента, для понижения порядка и уменьшения числа неизвестных при интегрировании соответствующих дифференциальных уравнений. Данный метод дал неплохой результат для определения температуры и профиля стационарной волны ΦГ газа.

В настоящей статье исследуется возможность использования подобного эвристического метода для решения задачи внутрипластового горения нефти. Выведены простые формулы для определения концентрационного температурного профиля, а также скорости распространения температурного фронта. Рассмотрены два случая – недостаток окислителя и недостаток жидкого горючего компонента.

#### Постановка задачи и решение

Система уравнений задачи о фильтрационном горении состоит из уравнений баланса энергии для твердой фазы и флюида, уравнения баланса массы для недостающего компонента и уравнения неразрывности флюида:

$$(c\rho)_f \frac{\partial T}{\partial t} + (c\rho)_f u_f \frac{\partial T}{\partial x} = \Lambda_f \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + QW(y,T); \tag{1}$$

$$(c\rho)_s \frac{\partial T}{\partial t} = \Lambda_s \frac{\partial^2 T}{\partial x^2};$$
 (2)

$$\frac{\partial y}{\partial t} + u_f \frac{\partial y}{\partial x} = D \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - W(y,T);$$
(3)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u_f) = 0. \tag{4}$$

Здесь T – температура; y – концентрация окислителя;  $\Lambda_f$  – эффективный коэффициент теплопроводности двухкомпонентной среды нефть – газ, учитывающий дисперсию;  $\Lambda_s$  – то же пористой среды;  $u_f$  – скорость движения флюида в области контакта и смешения газа и нефти; y – концентрация окислителя в трехфазной системе; Q – тепловой эффект реакции окисления нефти; W – скорость реакции окисления нефти, теплоемкости твердой

фазы  $(c\rho)_s$  и флюида  $(c\rho)_f$ , относятся к единице объема системы. Скорость реакции в режиме недостатка окислителя представляется функцией Аррениуса:  $W(y,T) = zy \exp(-E/T)$ . Здесь размерность энергии активации приведена к градусам делением на универсальную газовую постоянную.

Сложение двух первых уравнений приводит к выражению

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} + (c\rho)_f u_f \frac{\partial T}{\partial x} = \Lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + QW(y,T).$$
(5)

Здесь и далее используем обозначения:  $(c\rho)_f + (c\rho)_s = c\rho$ ;  $\Lambda_f + \Lambda_s = \Lambda$ .

Предположим, что во фронте волны окисления с достаточно высокой точностью выполняется равенство

$$\exp(-E/T) = \exp(-E/T_{\max})(1-y).$$
 (6)

Обоснованием данной гипотезы является ее адекватность стационарной задаче о фильтрационном горении [16]. Из (6) следуют тождества:

$$T = \frac{E}{E/T_{\text{max}} - \ln(1-y)}; \ \frac{dT}{dy} = -\frac{T^2}{(1-y)E}; \ \frac{d^2T}{dy^2} = -\frac{T^2}{(1-y)^2E} \left(1 - \frac{2T}{E}\right).$$
(7)

Ввиду «некорректного» поведения равенств (6) и (7) при y = 1, область определения y должна быть сужена  $y \subset [y^*, 0]$ , где  $y^* < 1$ ;  $E/T_0 = E/T_{\text{max}} - 1 - \ln(1 - y^*)$ ;  $T_0$  – начальная температура пласта.

Исключая из (3) и (5) скорость химической реакции, получим уравнение

$$\frac{c\rho}{Q}\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{(c\rho)_f u_f}{Q}\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} + u_f\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{\Lambda}{Q}\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + D\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}.$$
(8)

В равномерно движущейся со скоростью волны горения  $u_w$  системе координат справедливо преобразование  $\partial/\partial t = -u_w \partial/\partial x$ , и уравнение (8) можно записать в виде

$$AT' + By' = CT'' + Dy'',$$
 (9)

где введены обозначения:  $A = \frac{u_f(c\rho)_f - u_w c\rho}{Q}; \quad B = u_f - u_w; \quad C = \Lambda/Q.$ 

Штрихом в (9) обозначена производная по координате  $\partial T/\partial x = T'$ . Интегрирование от  $-\infty$  до *x* с учетом граничных условий  $T(-\infty) = T_0$ ;  $y(-\infty) = y^*$  позволяет избавиться от второй производной

$$A(T - T_0) - B(y^* - y) = CT' + Dy'.$$
(10)

Учитывая, что  $T' = \frac{dT}{dx} = \frac{dT}{dy}\frac{dy}{dx}$  и используя равенства (7), перепи-

шем (10) в виде

$$A(T - T_0) - B(y^* - y) = \left[D - \frac{CT^2}{E(1 - y)}\right]y'.$$
 (11)

Отсюда следует решение для концентрации окислителя

$$x = -\int_{y(x)}^{1-\delta} \left[ \frac{D - \frac{CT^2}{E(1-y)}}{A(T-T_0) - B(y^* - y)} \right] dy,$$
 (12)

где  $T = \frac{E}{E/T_{\text{max}} - \ln(1 - y)}$  и установлено граничное условие  $y(0) = 1 - \delta$ ,

обеспечивающее корректность интегрирования на нижнем пределе.

Уравнения (11) и (12) могут быть легко решены любым математическим солвером. Решение для y(x) автоматически определяет также и T(x)согласно (7). Очевидно, что решение будет зависеть от скорости распространения фронта  $u_w$ , играющего роль параметра в (11), (12).

Для определения  $u_w$  примем гипотезу о том, что максимальный градиент профиля концентрации недостающего компонента реализуется при некотором фиксированном значении его концентрации, например y = 0,5, что математически соответствует уравнению

$$y''(y=0,5) = 0.$$
(13)

Учитывая два последних тождества (7), а также и равенства

$$T' = \frac{dT}{dx} = \frac{dT}{dy}\frac{dy}{dx} \times T'' = \frac{d^2T}{dx^2} = \frac{d^2T}{dy^2}\left(\frac{dy}{dx}\right)^2 + \frac{dT}{dy}\frac{d^2y}{dx^2},$$

перепишем уравнение (9) в виде

$$\left(B - \frac{AT^2}{(1-y)E}\right)y' = -\frac{CT^2}{(1-y)^2E} \left[1 - \frac{2T}{E}\right]y'^2 - \left[\frac{CT^2}{(1-y)E} - D\right]y''.$$
 (14)

С учетом гипотезы (13) из (14) следует

$$y' = -\left(B - \frac{2AT^{*2}}{E}\right) \frac{E}{4CT^{*2}} / \left[1 - \frac{2T}{E}\right],$$
(15)

где  $T^* = E/(E/T_{\text{max}} - \ln 0, 5).$ 

Приравнивая значения производной (15) и (11), получаем

$$2A(T^* - T_0) - B = \left(\frac{2AT^{*2}}{E} - B\right) \left(\frac{ED}{2CT^{*2}} - 1\right) / \left[1 - \frac{2T}{E}\right].$$
 (16)

Уравнение (16) может быть однозначно алгебраически разрешено относительно  $u_w$  в достаточно громоздком виде. Для упрощения конечного выражения можем принять:  $u_f(c\rho)_f \ll u_w c\rho$ ;  $T \ll E$ . Тогда

$$u_{w} \cong u_{f} \frac{2 - \frac{ED}{2CT^{*2}}}{2 - \frac{ED}{2CT^{*2}} + \frac{2c\rho(T^{*} - T_{0})}{Q}}.$$
(17)

## Случай недостатка горючего компонента

В рассмотренной выше постановке задачи, когда окислитель является недостающим компонентом, выраженный фронт реакции образуется при условии резкой температурной активации реакции, а квазистационарное распространение фронта возможно в узком диапазоне параметров системы.

В случае отсутствия выраженной активации реакции (низкая энергия активации E) более адекватна постановка задачи с недостатком горючего компонента. Переформулируем задачу, заменив неизвестный параметр y на параметр b – безразмерную концентрацию нефти в пласте. Уравнение (3) запишется в виде

$$\frac{\partial b}{\partial t} + u_f \frac{\partial b}{\partial x} = D_{oil} \frac{\partial^2 b}{\partial x^2} - W(b,T).$$
(18)

Эвристические тождества (6), (7) примут вид:

$$T = \frac{E}{E/T_{\text{max}} - \ln b}; \quad \frac{dT}{db} = -\frac{T^2}{bE}; \quad \frac{d^2T}{db^2} = -\frac{T^2}{b^2 E} \left(1 - \frac{2T}{E}\right), \tag{19}$$

где  $b \subset [\delta, 1]$ ;  $\delta$  – малая величина, соответствующая начальной температуре пласта  $E/T_0 = E/T_{\text{max}} - \ln \delta$ .

Пользуясь тождествами (19), по аналогии с выкладками (8)–(17) получим выражения для профиля концентрации горючего компонента (22) и скорости распространения фронта тепловыделения (25):

$$A(T - T_0) + B(b - \delta) = CT' + Db' = \left[\frac{CT^2}{Eb} + D\right]b';$$
(20)

$$x = \int_{\delta}^{b(x)} \left[ \frac{D + \frac{CT^2}{Eb}}{A(T - T_0) + B(b - \delta)} \right] db;$$
(21)

$$\left(\frac{AT^2}{bE} + B\right)b' = -\frac{CT^2}{b^2E}\left(1 - \frac{2T}{E}\right)b'^2 + \left[\frac{CT^2}{bE} + D\right]b''.$$
(22)

С учетом гипотезы b''(b=0,5) = 0

$$b' = -\left(\frac{2AT^{*2}}{E} + B\right) \frac{E}{4CT^{*2}} / \left(1 - \frac{2T^{*}}{E}\right).$$
(23)

Приравнивая производные из (21) и (23), получаем

$$\left(2A(T^* - T_0) + B\right)\left(1 - \frac{2T^*}{E}\right) = -\left[\frac{DE}{2CT^{*2}} + 1\right]\left[\frac{2AT^{*2}}{E} + B\right].$$
 (24)

Принимая  $u_f(c\rho)_f \ll u_w c\rho$ ;  $T \ll E$  и учитывая соответственно определения A и B, получим

$$u_{w} \cong u_{f} \frac{2 + \frac{ED}{2CT^{*2}}}{2 + \frac{ED}{2CT^{*2}} + \frac{2c\rho(T^{*} - T_{0})}{Q}}.$$
(25)

Приняв стандартные значения задачи (табл. 1), получим скорость распространения фронта  $u_w = 0,025$  мм/с.

Таблица 1

## Характерные значения параметров задачи Typical values of the parameters of the problem

Параметр	Размерность	Значение	Параметр	Размерность	Значение
$(c\rho)_f$	Дж/(К·м <sup>3</sup> )	100	$T_0$	К	335
$(c\rho)_s$	Дж/(К·м <sup>3</sup> )	3000	$T_{\rm max}$	К	800
$u_f$	м/с	$10^{3}$	Ε	К	8840
$\Lambda_f$	Вт/(м·К)	0,12	D	м <sup>2</sup> /с	10-7
$\Lambda_s$	Вт/(м·К)	0,8	Q	Дж/м <sup>3</sup>	$10^{4}$

Воспользовавшись (12), рассчитаем профиль безразмерной концентрации окислителя (рис. 1). Из рис. 1 видно, что профиль концентрации в целом адекватен задаче внутрипластового горения.



*Fig. 1.* The profile of the dimensionless concentration of oxidant

at standard values of parameters of the problem

Уравнения для скорости волны (17) и (25) позволяют получить информацию о закономерностях задачи. Так, из формул следует, что скорость волны внутрипластового горения прямо пропорциональна скорости фильтрации дутья. Расчет показывает, что скорость волны слабо зависит от теплопроводности пласта. Зависимость скорости фронта от коэффициента диффузии близка к линейной (рис. 2).



*Рис. 2.* Зависимость скорости фронта внутрипластового горения от коэффициента диффузии согласно (17); стандартные значения параметров

*Fig.* 2. The dependence of the front velocity of in-situ combustion on the diffusion coefficient according to (17); standard parameter values

Скорость волны существенно зависит от максимальной температуры (рис. 3).





*Fig. 3.* The dependence of the front velocity of in-situ combustion on the maximum temperature of the front according to (17); standard parameter values

Расчет показывает, что скорость волны немонотонно и незначительно зависит от значения энергии активации реакции (рис. 4).





*Fig. 4.* The dependence of the front velocity of in-situ combustion on the values of the activation energy of the reaction according to (17); standard parameter values

#### выводы

1. Предложен новый метод анализа задачи фильтрационного горения в нефтесодержащем пласте, использующий эвристические гипотезы о характере тепловых и концентрационных полей. Данный подход обеспечивает оперативную оценку профилей и скорости движения фронта в тех случаях, когда стандартные методы анализа задач фильтрационного горения не могут быть применены.

2. Качественный анализ получаемых профилей и зависимостей показывает адекватность самого метода и принятых эвристических гипотез. Однако необходимы детальная верификация результатов на основе точных численных решений задачи и уточнение моделей. Помимо академического интереса, данный подход может найти применение при составлении алгоритмов управления процессом интенсификации нефтедобычи наряду с «медленным» детальным расчетом тепловых и температурных полей в пласте.

 Дальнейшим развитием исследований могут стать уточнение рабочих формул на основе сравнения с численными расчетами задачи и определение зависимостей основных параметров распространения фронта от разнообразных характеристик системы.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Шейнман, А. Б. Подземная газификация нефтяных пластов и термический способ добычи нефти / А. Б. Шейнман, К. К. Дубровай. М.: ОНТИ, 1934. 95 с.
- 2. Рубинштейн, Л. И. Температурные поля в нефтяных пластах / Л. И. Рубинштейн. М.: Недра, 1972. 387 с.
- Чарный, И. А. Подземная гидрогазодинамика / И. А. Чарный. М.: Гостоптехиздат, 1963. 397 с.
- Боксерман, А. А. Термогазовый метод увеличения нефтеотдачи / А. А. Боксерман // Георесурсы. 2007. Т. 22, № 3. С. 18–20.
- 5. Нефтегазовая энциклопедия: в 3 т. / под ред. Ю. В. Вадецкого. М.: Московское отд-ние «Нефть и газ», 2004. Т. 3. 308 с.
- 6. Богданов, И. И. Численное исследование начального этапа и развитых режимов внутрипластового горения / И. И. Богданов, Л. А. Чудов. М.: Изд-во Лтд. ИПМ, 1983. 74 с. (Препринт / ИПМ АН СССР; № 227).
- 7. Добрего, К. В. Физика фильтрационного горения газов / К. В. Добрего, С. А. Жданок. Минск: Ин-т тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова, 2002. 204 с.
- 8. Совершенствование виртуальной залежи / Д. О. Афилака [и др.] // Нефтегазовое обозрение. 2002. Т. 7, № 1. С. 58–79.
- 9. Моделирование коллектора при растущей сложности геологических условий / Д. А. Эдвардс [и др.] // Нефтегазовое обозрение. Зима 2011–2012. Т. 23, № 4. С. 4–21.
- Babkin, V. S. Filtration Combustion of Gases. Present State of Affairs and Prospects / V. S. Babkin // Pure and Applied Chem. 1993. Vol. 65, No 2. P. 335–344.
- Babkin, V. S. Propagation of Premixed Gaseous Explosion Flames in Porous Media / V. S. Babkin, A. A. Korzhavin, V. A. Bunev // Combustion and Flame. 1991. Vol. 87, No 2. P. 182–190.
- 12. Добрего, К. В. Режимы газификации бедных угольных слоев / К. В. Добрего, И. А. Козначеев // ИФЖ. 2006. Т. 79, № 2. С. 56–61.
- 13. Математическая теория горения и взрыва / Я. Б. Зельдович [и др.]. М.: Наука, 1980. 478 с.
- Bubnovich, V. I. Analytical Study of the Combustion Waves Propagation under Filtration of Methane-Air Mixture in a Packed Bed / V. I. Bubnovich, S. A. Zhdanok, K. V. Dobrego // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2006. Vol. 49, No 15–16. P. 2578–2586.

- Козначеев, И. А. К вопросу об инициировании очага горения в нефтенасыщенном пласте / И. А. Козначеев, К. В. Добрего // ИФЖ. 2013. Т. 86, № 6. С. 1301–1309.
- Футько, С. И. Приближенное аналитическое решение задачи распространения фильтрационной волны горения в пористой среде / С. И. Футько, С. И. Шабуня, С. А. Жданок // ИФЖ. 1998. Т. 71, № 1. С. 41–45.

Поступила 22.02.2016 Подписана в печать 25.04.2016 Опубликована онлайн 03.08.2016

#### REFERENCES

- Sheinman A. B., Dubrovai K. K. (1934) Underground Gasification of Oil Formations and the Thermal Method of Oil Production. Moscow, Department of Scientific and Technical Information. 95 (in Russian).
- 2. Rubinshtein L. I. (1972) Temperature Fields in Oil Strata. Moscow: Nedra. 387 (in Russian)
- Charniy I. A. (1963) Underground Fluid Dynamics Gas Dynamics. Moscow, Gostoptehizdat Publ. 397 (in Russian).
- Bokserman A. A. (2007) Thermo-Gas Method of Enhancement of Oil Recovery. *Georesursy* [Georesources], 22 (3), 18–20 (in Russian).
- 5. Vadetskiy Yu.V. ed. (2004) *Oil and Gas Encyclopedia*. Vol. 3. Moscow, "Oil and Gas" Moscow Branch, 308 (in Russian).
- 6. Bogdanov I. I., Chudov L. A. (1983) *Numerical Study of the Initial Stage and Developed Modes of Combustion Inside a Seam.* Moscow: IPM Publ. Ltd. 74 (in Russian).
- Dobrego K. V., Zhdanok S. A. (2002) *Physics of Filtration Combustion of Gases*. Minsk, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus. 204 (in Russian).
- Afilaka D. O., Bakhamaish Dzh., Bauen G., Bratved K., Kholms Dzh. A., Miller T., F'erstad P., Grainstaf Dzh., Dzhalali Iu., Lukas Ch., Khimenes Z., Lolomeri T., Mei E., Rendal E. (2002) Improving the Virtual Deposit. *Neftegazovoye Obozreniye* [Oil and Gas Review], 7 (1), 58–79 (in Russian).
- Edwards D. A., Gunasekera D., Morris Dzh., Shou G., Shou K., Uolsh D., F'erstad P. A., Kikani Dzh., Franko Dzh., Khoang V., Ket'e L. (Winter 2011–2012) Reservoir Simulation under Geological Conditions of Growing Complexity. *Neftegazovoye Obozreniye* [Oil and Gas Review], 23 (4), 4–21 (in Russian).
- Babkin V. S. (1993) Filtration Combustion of Gases. Present State of Affairs and Prospects. Pure and Applied Chem., 65 (2), 335–344. DOI: 10.1351/pac199365020335.
- Babkin V. S., Korzhavin A. A., Bunev V. A. (1991) Propagation of Premixed Gaseous Explosion Flames in Porous Media. *Combustion and Flame*, 87 (2), 182–190. DOI: 10.1016/0010-2180(91)90168-B.
- Dobrego K. V., Koznacheev I. A. (2006) Regimes of Gasification of Lean Coal Layers. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 79 (2), 261–267. DOI: 10.1007/s10891-006-0095-0.
- 13. Zeldovich Ya. B., Barenblatt G. I., Librovich V. B., Makhviladze G. M. (1980) *The Mathematical Theory of Combustion and Explosion*. Moscow, Nauka. 478 (in Russian).
- Bubnovich V. I., Zhdanok S. A., Dobrego K. V. (2006) Analytical Study of the Combustion Waves Propagation under Filtration of Methane-Air Mixture in a Packed Bed. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49 (15–16), 2578–2586. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstrans fer.2006.01.019.
- Koznacheev I. A., Dobrego K. V. (2013) A Contribution to the Problem of Initiation of a Combustion Source in an Oil-Saturated Bed. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 86 (6), 1385–1394. DOI: 10.1007/s10891-013-0964-2.
- Futko S. I., Shabunia S. I., Zhdanok S. A. (1998) Approximate Analytical Solution of the Problem of Propagation of Filtration Combustion Waves in Porous Media. *Inzhenerno-Phizicheskiy Zhurnal* [Journal of Engineering Physics], 71 (1), 41–45 (in Russian).

Received: 22.02.2016

Accepted: 25.04.2016

Published online: 03.08.2016

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-4-338-352

УДК 621

# Эффективность работы газоперекачивающих агрегатов

## Е. И. Купреев<sup>1)</sup>, Н. Б. Карницкий<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>ОАО «Газпром трансгаз Беларусь» (Минск, Республика Беларусь), <sup>2)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

Белорусский национальный технический университет, 2016
 Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Надежность работы газотранспортной сети ОАО «Газпром трансгаз Беларусь» зависит от эффективности работы газоперекачивающих агрегатов. Трубопроводный транспорт находится на первом месте среди всех остальных способов доставки газа, поскольку таким образом обеспечивается равномерная и бесперебойная поставка газа при минимальных издержках. К основным объектам магистральных газопроводов относятся технологические участки, включающие несколько компрессорных станций, и участки магистрали между ними. В настоящее время значительная часть основного оборудования газовой промышленности приближается к своему предельному сроку эксплуатации, из-за чего происходит снижение энергетической эффективности и надежности газотранспортной системы. На компрессорных станциях ОАО «Газпром трансгаз Беларусь» находятся в эксплуатации более 4000 газоперекачивающих агрегатов, из них порядка 80 % с газотурбинным приводом. Понятно, что на привод таких агрегатов затрачивается значительная доля перекачиваемого газа. В течение многих лет компания инвестирует и активно участвует в создании современных газоперекачивающих агрегатов, широко используя конверсионный потенциал стран СНГ. В последнее время активно применяется комплексный подход к оценке надежности и эффективности объектов магистральных газопроводов на основе математического моделирования. В сочетании с развитием компьютерных средств диспетчерского контроля и управления это открывает широкие возможности для повышения энергоэффективности магистрального транспорта газа на основе математических моделей и технологических процессов. Получение реального эффекта основано на фактическом состоянии эксплуатационных характеристик оборудования, которые необходимо контролировать во времени и уточнять.

Ключевые слова: газоперекачивающие агрегаты, энергоэффективность, магистральные газопроводы, компрессорные станции, надежность, математическое моделирование

Для цитирования: Купреев, Е. И. Эффективность работы газоперекачивающих агрегатов / Е. И. Купреев, Н. Б. Карницкий // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 4. С. 338–352

Адрес для переписки	Address for correspondence
Карницкий Николай Борисович	Karnitzki Nicolai B.
Белорусский национальный технический университет	Belarusian National Technical University
просп. Независимости, 65/2,	65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, г. Минск, Республика Беларусь	220013, Minsk, Republic of Belarus
Тел.: +375 17 293-91-45	Tel.: +375 17 293-91-45
tes_bntu@tut.by	tes_bntu@tut.by

## The Efficiency of Gas-Pumping Units

## E. I. Kupreev<sup>1)</sup>, N. B. Karnitzki<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> JSC "Gazprom Transgaz Belarus" (Minsk, Republic of Belarus),

<sup>2)</sup> Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The reliability of the gas transmission network of the JSC "Gazprom Transgaz Belarus" depends on the efficiency of gas compressor units. Pipeline transport takes the first place among all the other ways to deliver gas because it ensures a uniform and uninterrupted supply of gas at minimum costs. The main objects of main gas pipelines include process areas, including several compressor stations and sections of the pipeline between them. Currently, a significant part of the main equipment of the gas industry is approaching its deadline of operation, which causes decrease in energy efficiency and reliability of the transmission system. At compressor plants of the JSC "Gazprom Transgaz Belarus" there are more than 4000 gas compressor units in operation including about 80% ones with gas turbine drives. It is clear that the drives of these units take a significant proportion of the pumped gas. For many years the company invests and actively participates in the creation of modern gas-pumping units practicing the wide use of conversion potential of the CIS countries. In recent years, a comprehensive approach to the assessment of the reliability and efficiency of objects of gas pipelines on the basis of mathematical modeling is actively applied. Together with the development of computer supervisory and control this opens up opportunities to improve energy efficiency in pipeline transport of gas on the basis of mathematical models and processes. The real effect obtaining is based on the actual performance of the equipment that needs to be monitored over time and to clarify.

**Keywords:** gas compressor units, energy efficiency, natural gas pipelines, compressor stations, reliability, mathematical modeling

For citation: Kupreev E. I., Karnitzki N. B. (2016) The Efficiency of Gas-Pumping Units. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (4), 338–352 (in Russian)

## Введение

Концептуально газоперекачивающий агрегат (ГПА) состоит из: воздушного компрессора, камеры сгорания, газовой турбины, силовой турбины, приводящей в движение компрессор для перекачки природного газа.

Простейшая камера сгорания газотурбинной установки (ГТУ) (рис. 1) состоит из топливораздающего устройства, регистра первичного воздуха, пламенной трубы и смесителя, которые размещаются в корпусе. Корпус нагружен давлением изнутри. Топливораздающее устройство (горелка или форсунка) подает топливо в зону горения. Весь воздух, подаваемый в камеру сгорания, разделяется на два потока. Меньшая часть воздуха (первичный воздух) в количестве, необходимом для поддержания процесса горения, поступает через регистр в зону горения. Большая часть воздуха (вторичный воздух) в процессе горения не участвует, а проходит между корпусом и пламенной трубой, охлаждая ее. Затем, пройдя через смеситель, этот воздух перемешивается с продуктами сгорания в зоне смешения, охлаждая их до заданной температуры.



Рис. 1. Простейшая камера сгорания: 1 – подвод топлива; 2 – регистр; 3 – пламенная труба; 4 – смеситель; 5 – зона смешения; 6 – зона горения; 7 – корпус; 8 – топливораздающее устройство (форсунка)

*Fig. 1.* The simplest combustion chamber: 1 – fuel inlet; 2 – register; 3 – a fire tube; 4 – mixer; 5 – mixing zone; 6 – combustion zone; 7 – housing; 8 – fuel infusion device (injector)

Секционные (многотрубчатые) камеры сгорания представляют собой конструкцию, в которой объединены несколько (6–16) параллельно работающих цилиндрических камер (секций), часто связанных между собой пламяпередающими патрубками. Секция многотрубчатой камеры сгорания, представленная на рис. 2, состоит из пламенной трубы и кожуха. Пламенная труба включает в себя головку (лопаточный завихритель плюс тарелки и конус) и корпус, состоящий из цилиндрической части и двух конических участков, соединенных между собой конусным кольцом.



Рис. 2. Секция многотрубчатой камеры сгорания: 1 – входной кожух; 2 – тарелка; 3 – лопаточный завихритель; 4 – конус; 5 – цилиндрическая часть; 6 – конусное кольцо; 7 – пламенная труба; 8 – кожух

Fig. 2. Section of plenty-of-pipes combustion chamber: 1 – inlet casing; 2 – plate;
3 – vaned swirler; 4 – cone; 5 cylindrical portion; 6 – cone ring;
7 – fire tube; 8 – a casing

Секционные камеры сгорания отличаются компактностью, обеспечиваются высокую полноту сгорания топлива и устойчиво работают в различных

эксплуатационных условиях. Недостатком их являются сравнительно большие потери давления (2,5–7,5 %).

В кольцевых камерах сгорания (рис. 3) зона горения I имеет форму кольцевой полости обычно шириной 150–200 м, которая образуется цилиндрами 1 и 2. Два других соосно расположенных цилиндра составляют кожух камеры. Первичный воздух через воздухопроводящее устройство поступает в зону горения I. Вторичный воздух направляется по кольцевым зазорам и к смесительным насадкам, через которые поступает в зону II, где смешивается с продуктами сгорания, понижая тем самым их температуру. В воздухоподводящем устройстве на входе в зону горения I по всей окружности расположены форсунки. За счет этого обеспечиваются хорошее перемешивание топлива с воздухом и горение по всему кольцевому пространству. Число форсунок может достигать 10–20, но иногда это бывает одна вращающаяся форсунка.

Объемная теплонапряженность у кольцевых камер примерно такая же, как и у секционных, а потери давления несколько больше (до 10 %). По сравнению с секционными камерами они имеют меньший рабочий объем и более равномерное поле температур газа на выходе. Зато кольцевые камеры сложнее в изготовлении и доводке, труднодоступны для осмотра в ходе эксплуатации.



Рис. 3. Секция кольцевой камеры сгорания: 1, 2 – цилиндр; 3 – форсунка;
 4 – воздухопроводящее устройство; 5 – смесительная насадка;
 6, 7 – кольцевой зазор; 8, 9 – соосный цилиндр

Fig. 3. A section of an annular combustion chamber: 1, 2- cylinder; 3 - injectors;
4 - air duct device; 5 - mixing nozzle;
6, 7 - annulus; 8,9 - coaxial cylinder

Трубчато-кольцевая камера сгорания (рис. 4) представляет собой конструктивное совмещение элементов секционной и кольцевой камер. Так же как и у кольцевой камеры, кожух ее образуется наружным и внутренним соосно расположенными цилиндрами. А в кольцевом пространстве между этими цилиндрами размещается ряд отдельных пламенных труб, снабженных форсунками. Трубы соединяются друг с другом пламяпередающими патрубками, которые предназначены для передачи пламени, зажигания и выравнивания давления между трубами. Трубчато-кольцевые камеры имеют теплонапряженность и потери давления приблизительно такие же, как и секционные камеры. Они компактнее кольцевых камер и более просты в доводке. Небольшие размеры пламенных труб упрощают их изготовление и разборку [1].



*Puc. 4.* Трубчато-кольцевая камера сгорания *Fig. 4.* Tubular-annular combustion chamber

## Проблемы и пути их решения

Проблемы, связанные с эксплуатацией камер сгорания, поставили перед исследователями задачи, цель которых – повышение надежности конструкции камер сгорания и увеличение срока их службы.

От качества изготовления камеры сгорания зависит качественный состав поступающей в нее смеси газа с кислородом, что является одним из важнейших факторов для достижения максимального КПД турбины. Срок службы камеры сгорания определяется:

• температурой сгорания топливно-воздушной смеси;

• надежностью системы охлаждения стенок жаровой трубы;

• высокой термической устойчивостью материалов, из которых она изготовлена.

Снижение температурных нагрузок на стенки жаровой трубы и сопловый аппарат турбины обусловлено применяемыми технологиями горения (охлаждение стенки камер сгорания, понижение температуры продуктов сгорания, снижение температуры горения и уровня эмиссии различных веществ в камерах сгорания). Надежная система охлаждения стенки жаровой трубы определяется используемыми схемами охлаждения, размерами отверстий для воздушного потока, поступающего в зону разбавления, и порядком их размещения. Конструирование высокотемпературных деталей машин и механизмов неразрывно связано с созданием новых материалов, к которым относятся стойкие к термоударам покрытия, выполненные на подложках из жаростойких сплавов.

Немаловажное влияние оказывают своевременные осмотры, диагностика и ремонты, а также современные оборудование и технологии. Важными являются снижение образования  $NO_x$  при сжигании природного газа в камерах сгорания ГТУ, разработка новых видов горелочных устройств, реконструкция камер сгорания и горелочных устройств, направленных на увеличение КПД, снижение расхода топлива и увеличение полноты сгорания топлива за счет уменьшения объема горения с максимальным уровнем температуры, химические методы очистки дымовых газов. Этот вывод подтверждается результатами многочисленных исследований режимов работы ГТУ на магистральных газопроводах [2, 3].

В связи с тем что агрегаты ГТУ работают в течение многих сотен и тысяч часов без остановки, большое значение имеет диагностика состояния отдельных узлов этих агрегатов, т. е. оценка текущего состояния и предсказание хода изменения их основных характеристик на перспективу. Одним из основных узлов ГТУ, как уже отмечалось ранее, является камера сгорания, от надежности работы которой зависит надежность работы всего агрегата. Согласно теории горения, при фиксированных внешних условиях процесс горения может протекать в стационарном режиме, когда основные характеристики (скорость реакции горения, мощность тепловыделения, температура газа и состав продуктов) не изменяются во времени, либо в периодическом режиме, когда эти характеристики колеблются около своих средних значений. Вследствие явно выраженной нелинейной зависимости скорости реакции от температуры горение отличается высокой чувствительностью к внешним условиям [4]. Нелинейная теория разрушения нержавеющих сталей, работающих при повышенных температурах, показывает, что одной из причин их разрушения являются термофлуктуации [5].

Из сказанного следует, что чем выше стабильность горения в камере сгорания, тем меньшим разрушениям она подвергается. Существует много способов контроля режима горения в ГТУ. Наиболее близким аналогом по совокупности существенных признаков является способ контроля изменения концентрации окислов азота в выхлопных газах ГТУ по патенту РФ № 2006751 [6]. Этот патент авторы статьи выбрали за прототип. Недостатками прототипа являются: недостаточная точность, поскольку не учитывается разброс параметров газов для разных типов двигателей, а также концентрация газов, которая вычисляется по определенной формуле, а не измеряется непосредственно. Необходимо создание простого, точного и не требующего установки дополнительного оборудования способа диагностики камеры сгорания ГТУ на установившемся режиме.

## Методики проведения экспериментов и обработки опытных данных

Для решения поставленной задачи при проведении диагностики камеры сгорания ГТУ на установившемся режиме: измеряют параметры газов в выхлопной шахте, проводят обработку результатов измерений с помощью методов математической статистики, судят о состоянии камеры сгорания по отклонению этих результатов от эталонных величин. В качестве параметров газов в выхлопной шахте выбирают температуру газов и концентрацию в них продуктов сгорания [7]. Методика позволяет при обработке результатов измерений определять стандартные отклонения температуры газов и концентраций продуктов сгорания, а в качестве эталонной величины для сравнения выбирать значение стандартных отклонений температуры газов и концентраций продуктов сгорания, которое предлагается определять по результатам измерений этих величин для каждого типа двигателя от начала его эксплуатации до завершения. Дополнительным отличием является то, что при расчете концентраций продуктов сгорания предлагается определять концентрации оксида углерода и оксидов азота в течение 20 мин, проводя последовательно пять измерений.

## Результаты исследования и их анализ

В течение года выполнялись экологические измерения на установившихся режимах работы ГПА в соответствии с Инструкцией ОАО «Газпром» по проведению контрольных измерений вредных выбросов газотурбинных установок на компрессорных станциях [7]. Для этих целей используются газоанализаторы Testo 350 или Testo 350XL, позволяющие проводить измерения концентрации кислорода, оксидов азота, оксида углерода и температуры в точке пробоотбора ГПА. Собрано большое количество результатов измерений вредных выбросов для разных видов ГТУ. В результате их анализа выявлено, что оценку стабильности горения можно производить по отклонению концентраций продуктов сгорания от средних концентраций этих продуктов за определенный промежуток времени. Удобно такое отклонение оценивать, пользуясь методами математической статистики, которые представлены в табл. 1.

Таблица 1

$\overline{x} = (1/n) \sum_{i=1}^{n} x_i$	Среднее арифметическое результатов отдельных измерений <i>x<sub>i</sub></i>
$D = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})^2}{n - 1}$	Дисперсия
$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})^2}{n-1}}$	Стандартное отклонение единичного определения
$t = (x - \mu)/S$	Критерий Стьюдента,
( , )	µ – истинное значение параметра
$\delta = \frac{tS}{\sqrt{n}},$ при <i>n</i> = 5 и 95 % доверительной вероятности <i>t</i> = 2,78, тогда $\delta = \frac{2,78}{\sqrt{5}} xS = 1,24S,$ $\overline{x} - \frac{tS}{\sqrt{n}} \le \mu \le \overline{x} + \frac{tS}{\sqrt{n}}$ или $\overline{x} - 1,24S \le \mu \le \overline{x} + 1,24S$	Размеры доверительного интервала

## Математическая обработка результатов измерений Mathematical processing of measurement results

Предлагаемый способ осуществляют следующим образом:

• предварительно для каждого типа двигателей ГТУ на основании собранных статистических данных вычисляются эталонные значения стандартных отклонений температур и концентраций продуктов сгорания;

 производятся в течение 20 мин пять последовательных измерений концентраций продуктов сгорания (оксида углерода и оксидов азота) и температуры в выхлопной шахте ГПА с применением переносного газоанализатора Testo 350XL или аналога;

 определяются стандартные отклонения состава продуктов сгорания и температуры от их среднего значения за 20-минутный интервал;

• производится сравнение полученных стандартных отклонений с эталонными значениями стандартных отклонений.

Для газотурбинной установки критериями установившегося режима являются:

• частота вращения газогенератора и силовой турбины (отличается на ±20 об/мин);

• температура газа газогенератора и силовой турбины (отличается на ±3 °C с выдержкой по времени 20–30 мин) [8–10].

Концентрации оксида углерода и оксидов азота для анализа стабильности продуктов сгорания выбраны как наиболее быстро меняющиеся составляющие выхлопных газов и сильно зависящие от температуры в камере сгорания, а также от изменений в ней. Стабильность температуры в камере сгорания идентична стабильности температуры в выхлопной шахте, так как при установившемся потоке выхлопных газов и стабильности внешних метеорологических параметров, что обусловливается 20-минутным интервалом проведения измерений, приводит к стабильности тепловых потерь при движении газового потока от камеры сгорания до точки пробоотбора на выхлопной шахте.

Математическая обработка результатов измерений – нахождение среднего значения параметра, дисперсии, стандартного отклонения, выбор критерия Стьюдента и определение размеров доверительного интервала (табл. 1) – позволяет в течение 10 мин (длительность ввода результатов пяти измерений) получать набор стандартных отклонений по продуктам сгорания и температуре газов в выхлопной шахте. Стандартное отклонение для анализа стабильности выбирали произвольным образом. Оно, в отличие от дисперсии, позволяет умножением ее на коэффициент 1,24 (пять измерений и 95%-я доверительная вероятность) получить численное значение величины отклонения. Например, если St = 1,00, то колебание температуры газа в выхлопной шахте и в камере сгорания около среднего значения за 20-минутный период составит ±1,24 °C.

В течение года проводили измерения вредных выбросов от ГПА типа Solar со стационарным двигателем Таурус-60С на разных режимах работы осевого компрессора. Первые измерения выполняли после регламентных работ по техническому обслуживанию (РТО). Результаты расчетов стандартных отклонений по оксиду углерода  $S_{\rm CO}$ , оксидам азота  $S_{\rm NOx}$  и темпера-

туре  $S_T^{\circ}$  в зависимости от времени наработки двигателя и оборотов осевого компрессора в процентах от номинального значения  $n_{\rm ok}$  для ГПА № 1, 2, 3 представлены в табл. 2–4 соответственно.

Таблица 2

#### Стандартные отклонения по оксиду углерода S<sub>CO</sub>, оксидам азота S<sub>NOx</sub> и температуре S<sub>T</sub>° в зависимости от времени наработки двигателя и оборотов осевого компрессора для ГПА Solar № 1

The standard deviation in $S_{CO}$ carbon monoxide, $S_{NOx}$ nitrogen oxides
and $S_T^{\circ}$ temperature depending on the operating time
of the engine and the speed of the axial compressor for ΓΠA Solar No 1

Обороты	Наработка двигателя, ч											
осевого компрес-		23200			25300			26800			27700	
сора <i>n</i> <sub>ок</sub> , %	S <sub>CO</sub>	$S_{NOx}$	$S_T^{\circ}$	S <sub>CO</sub>	$S_{NOx}$	$S_T^{\circ}$	$S_{\rm CO}$	$S_{NOx}$	$S_T^{\circ}$	S <sub>CO</sub>	$S_{NOx}$	$S_T^{\circ}$
90	0,78	0,73	0,63	0,34	0,87	1,00	0,82	0,48	1,00	0,83	0,49	0,79
91				0,64	0,28	0,95	0,53	0,90	1,06			
92				0,48	0,62	0,64	0,96	0,37	0,60			
93				0,87	0,90	0,73	0,82	0,69	0,78			
94				0,46	0,37	0,81	0,90	0,43	0,86			
95	0,56	0,92	0,84	0,45	0,68	1,10	0,88	0,73	1,21	0,95	1,16	1,56
96				0,78	0,39	1,23	0,99	0,78	1,46			
97				0,88	0,92	0,83	1,03	1,19	1,31			
98				0,76	0,96	1,18	1,22	1,34	1,09			
99	0,19	0,89	0,90	0,96	0,89	1,32	0,98	1,00	1,24	1,12	1,26	1,34

Таблица 3

Стандартные отклонения по оксиду углерода  $S_{CO}$ , оксидам азота  $S_{NOx}$  и температуре  $S_T^{\circ}$  в зависимости от времени наработки двигателя и оборотов осевого компрессора для ГПА Solar № 2

The standard deviation in  $S_{\rm CO}$  carbon monoxide,  $S_{\rm NOx}$  nitrogen oxides and  $S_T^{\,\circ}$  temperature depending on the operating time of the engine and the speed of the axial compressor for  $\Gamma\Pi A$  Solar No 2

Обороты	Наработка двигателя, ч												
осевого компрес-		24600			26100			27300			28500	8500	
сора <i>n</i> <sub>ок</sub> , %	$S_{\rm CO}$	$S_{NOx}$	$S_T^{\circ}$	S <sub>CO</sub>	$S_{NOx}$	$S_T^{\circ}$	$S_{\rm CO}$	$S_{NOx}$	$S_T^{\circ}$	S <sub>CO</sub>	$S_{NOx}$	$S_T^{\circ}$	
90	0,68	0,60	0,46	0,84	0,71	0,69	0,56	0,70	0,80	0,72	0,49	0,57	
91				0,71	0,00	0,39	0,74	0,56	0,86				
92				0,56	0,56	1,00	0,41	0,68	0,70				
93				0,84	0,66	1,13	0,62	0,78	0,72				
94				0,52	0,24	1,12	0,78	0,65	0,81				
95	0,72	0,86	0,92	0,80	0,38	0,82	0,84	0,79	0,78	0,48	0,70	0,88	
96				0,76	0,68	0,70	0,48	0,82	0,70				
97				0,50	0,78	1,00	0,56	0,72	1,00				
98	0,80	0,48	0,64	0,00	0,90	1,00	0,69	0,90	0,96				
99				0,72	0,58	1,18	0,78	0,81	0,82	0,86	0,56	0,78	

#### Стандартные отклонения по оксиду углерода $S_{CO}$ , оксидам азота $S_{NOx}$ и температуре $S_T^{\circ}$ в зависимости от времени наработки двигателя и оборотов осевого компрессора для ГПА Solar № 3

Обороты	Наработка двигателя, ч											
осевого компрес-		22800	)		24900			26200		26300		
сора <i>n</i> <sub>ок</sub> , %	$S_{\rm CO}$	$S_{NOx}$	$S_T^{\circ}$	$S_{\rm CO}$	$S_{\rm NC}$	$S_T^{\circ}$	$S_{\rm CO}$	$S_{NOx}$	$S_T^{\circ}$	$S_{\rm CO}$	$S_{NOx}$	$S_T^{\circ}$
90	0,88	0,78	1,12	0,82	0,82 0,78		1,26	1,20	1,13			
91				0,80	1,12	0,83	1,14	0,91	1,88	0,64	0,42	0,54
92				1,06	0,86	1,10	0,82	0,88	1,12			
93				0,94	0,78	1,00	0,72	1,49	1,37			
94				0,78	0,74	0,88	0,98	0,85	1,24			
95	0,90	0,76	0,85	1,08	1,02	0,82	1,27	1,36	1,04	0,56	0,48	0,65
96				0,96	0,68	1,14	0,94	0,89	1,98			
97				1,11	0,98	1,27	0,86	1,14	1,38			
98	0,83	0,68	1,20	0,80	0,90	1,18	0,99	1,00	1,27			
99				0,92	1,02	1,17	1,22	1,37	1,69	0,33	0,61	0,43

The standard deviation in S <sub>CO</sub> carbon monoxide, S <sub>NOx</sub> nitrogen oxides
and $S_T^{\circ}$ temperature depending on the operating time of the engine
and the speed of the axial compressor for ΓΠA Solar No 3

Анализ стандартных отклонений для ГПА № 1 показывает, что после 23200 ч наработки двигателя значения всех стандартных отклонений на всех режимах работы двигателя меньше 1,0. После наработки 25300 ч на режимах  $n_{\text{ок}}$  более 95 % стандартные отклонения по температуре выхлопных газов становятся больше 1,0. Наработка двигателя в 26800 ч приводит к появлению значений стандартных отклонений по оксидам азота и оксиду углерода и температуры при  $n_{\text{ок}}$  более 97 %, больших 1,0. При наработке 27700 ч полученные закономерности сохраняются, продолжается дальнейший рост всех стандартных отклонений. На основании этого анализа можно дать рекомендации: эксплуатировать ГПА № 1 на режимах работы осевого компрессора 90–93 % до проведения РТО представителями фирмы Solar.

Для ГПА № 2 стандартные отклонения по оксиду углерода и оксидам азота за все время эксплуатации от 24600 до 28500 ч не превышали 1,0, по температуре незначительные превышения наблюдались при наработке 26100 ч. Выводы: ГПА № 2 в проведении РТО не нуждается, эксплуатировать можно на всех режимах.

Для ГПА № 3 стандартные отклонения по температуре, большие 1,0, наблюдались при наработке двигателя 22800 ч. При наработке 24900 ч стандартные отклонения, большие 1,0, наблюдались по всем контролируемым параметрам. При наработке 26200 ч произошел дальнейший рост стандартных отклонений по оксидам углерода, они на отдельных режимах достигли 1,3, по оксидам азота – 1,5, по температуре – 2,0. При наработке 26300 ч провели РТО, и стандартные отклонения по всем параметрам стали меньше 1,0.

На основании полученных данных по стабильности продуктов сгорания и температуры для ГПА типа Solar можно рекомендовать в качестве эталонных значений:

Таблица 4

• все стандартные отклонения *S* меньше 1,0, состояние камеры сгорания и газовоздушного тракта хорошее, значения *S* по температуре больше 1,0, по оксиду углерода и оксидам азота близки к 1,0 – состояние хорошее, но следует увеличить частоту контроля вредных выбросов и применить другие методы диагностики;

• значения *S* по температуре, оксиду углерода и оксидам азота больше 1,0, но меньше 1,3 – состояние удовлетворительное, следует проводить эксплуатацию на отдельных режимах;

• значения *S* по температуре близки к 2,0, по оксиду углерода и оксидам азота – к 1,5 – состояние неудовлетворительное, следует проводить РТО.

Результаты расчетов стандартных отклонений по оксиду углерода  $S_{CO}$ , оксидам азота  $S_{NO,x}$  и температуре  $S_T^{\circ}$  в зависимости от времени наработки стационарного двигателя с начала эксплуатации, после последнего капитального ремонта и с момента проведения РТО, для числа оборотов турбины низкого давления  $N_{\text{тнд}}$  для ГПА типа ГТК-5 № 1, 2, 3, 4 представлены в табл. 5.

Таблица 5

# Стандартные отклонения по оксиду углерода $S_{\rm CO}$ , оксидам азота $S_{\rm NOx}$ и температуре $S_T$ ° в зависимости от времени наработки двигателя и оборотов турбины низкого давления для ГПА типа ГТК-5

The standard deviation in  $S_{\rm CO}$  carbon monoxide,  $S_{\rm NOx}$  nitrogen oxides and  $S_T^{\circ}$  temperature depending on the operating time of the engine a nd the speed of the low pressure turbine for  $\Gamma\Pi\Lambda$   $\Gamma\Gamma K-5$ 

		$S_{CO}$	$S_{NOx}$	$S_T^{\circ}$	$S_{\rm CO}$	$S_{NOx}$	$S_T^{\circ}$	$S_{\rm CO}$	$S_{NOx}$	$S_T^{\circ}$	$S_{\rm CO}$	$S_{NOx}$	$S_T^{\circ}$			
ГПА	$N_{\rm THJ}$	Нара	Наработка двигателя с начала эксплуатации/после капремонта/после РТО, ч													
		44	4000/50	)/0	4600	0/2100	/500	4770	0/3900	)/300	5050	50500/6700/100				
	4400							0,58	0,51	1,67	1,10	1,12	1,47			
No 1	4600				0,56	0,84	1,18	0,83	0,56	0,86	0,44	1,16	1,63			
JN <u>0</u> I	4800	0,68	0,64	0,98				1,00	1,00	1,65	1,00	1,12	1,12			
	5000	0,43	0,31	1,00												
		6290	0/3100	/100	660	0/6200/	/300	6840	00/8000	)/900	70500/10100/150					
	4400	1,06	0,92	0,84	0,64	1,04	1,32				0,56	1,16	1,58			
№ 2	4600	0,76	0,97	1,28	0,62	0,67	1,54	0,90	0,73	1,71	1,12	0,81	1,75			
	4800	1,08	0,33	1,62	0,86	1,14	1,39	1,51	1,33	1,84	0,87	1,24	1,85			
	5000							1,00	1,00	1,69						
		49	200/60	0/0	5080	0/2200	/500	5280	00/4200	)/600	54600/6000/200					
	4400	0,74	0,44	1,16							0,69	0,27	1,39			
Nº 3	4600	0,50	0,44	1,23	0,64	0,57	1,15	1,15	1,14	1,62	0,56	0,44	1,14			
	4800	0,48	0,73	1,17	0,84	0,81	1,68	0,74	0,94	1,78	0,86	0,54	1,25			
	5000	0,52	0,39	1,20	0,59	0,60	1,27	0,72	0,65	1,29	0,78	0,62	1,61			
		650	000/150	0/0	6700	0/3500	/100	6890	00/5400	)/100	7060	0/7100	/400			
	4400	0,82	0,54	0,98	0,74	0,45	1,06	0,78	1,07	1,28	1,18	0,84	1,76			
<u>№</u> 4	4600	0,62	0,68	1,06	0,62	0,64	1,06	0,92	0,97	1,37	0,73	0,72	1,32			
	4800	0,57	0,64	1,17	0,72	0,83	1,12	1,17	0,68	1,00	0,86	1,11	1,78			
	5000	0,73	0,59	0,91	0,38	0,49	0,93	0,82	0,85	1,34	1,06	0,74	1,84			

Для всех ГПА независимо от времени эксплуатации и времени, прошедшего с последнего капитального ремонта или с проведения РТО, характерным является постепенное возрастание стандартного отклонения по температуре выхлопных газов от 1,0 до 1,8. Стандартные отклонения по оксиду углерода и оксидам азота при эксплуатации до 3000 ч после капитального ремонта имеют значения меньше единицы, после 3000 ч возрастают больше единицы и на отдельных режимах работы двигателя достигают 1,3, и значения выше этой величины не наблюдается. Также для двигателей данного типа при наработке более 6000 ч отмечается стабильность величины стандартного отклонения по температуре выхлопных газов, поэтому решение о времени выполнения ТО или капитального ремонта по анализу стабильности продуктов сгорания и температуры затруднено. Тем не менее проведение анализа и получение указанных значений будут свидетельствовать о нормальном состоянии ГПА.

Результаты расчетов стандартных отклонений по оксиду углерода  $S_{\rm CO}$ , оксидам азота  $S_{\rm NOx}$  и температуре  $S_T^{\circ}$  в зависимости от времени наработки и мощности авиационного двигателя марки ПС-90ГП-2 для ГПА-16 «Урал» представлены в табл. 6.

Таблица б

Стандартные отклонения по оксиду углерода  $S_{CO}$ , оксидам азота  $S_{NOx}$  и температуре  $S_T^{\circ}$  в зависимости от времени наработки авиационного двигателя марки ПС-90ГП-2 и мощности W для ГПА-16 «Урал»

The standard deviation in S <sub>CO</sub> carbon monoxide, S <sub>NOx</sub> nitrogen oxides
and $S_T^{\circ}$ temperature depending on operating time of aircraft engine
(brand ПС-90ГП-2 and W power) for the ГПА-16 ("Ural")

Продолжительность эксплуатации ГПА/наработка двигателя/с послед- него РТО, ч	W, %	S <sub>CO</sub>	S <sub>NOx</sub>	$S_T^{\circ}$										
<b>№</b> 1		4100	/4100	/150	18500	/18500	)/1100	192	200/63	0/0	8500	/8500/	100	
95										0,44	0,27	0,55		
85				0,86	1,00	1,96	1,67	2,74	2,11	0,73	0,48	0,47		
75	0,58	0,73	1,36	0,92	0,98	1,76	2,93	6,89	3,63	0,41	0,32	0,27		
65	0,64	0,55	1,12	1,12	1,23	2,42	1,70	2,04	4,54	0,38	0,49	0,66		
55							2,12	5,12	2,97	0,64	0,61	0,58		
<u>№</u> 2		2500/2500/0			9700	/9700/	1100	145	500/10	0/0	21000/6400/900			
95										0,63	0,68	1,23		
85				1,24	1,27	1,68	0,55	0,38	0,88	0,48	0,97	1,34		
75	0,58	0,43	0,76	0,89	1,39	2,02	0,67	0,68	0,59	0,49	1,08	1,60		
65	0,63	0,33	0,48	1,28	1,68	2,67	0,48	0,42	0,62	0,72	0,58	1,14		
55							0,43	0,61	0,75	1,04	0,64	1,28		
<u>№</u> 3		5000/	5000/	1200	9000	)/9000	/510	12600	)/1260	0/200	16900	/16900	/700	
95										0,92	0,81	1,51		
85				0,63	0,72	1,14	0,62	0,68	1,56	0,96	0,76	1,32		
75	0,56	0,84	0,87	0,91	0,46	1,64	0,98	0,53	1,82	1,08	1,15	1,64		
65	0,72	0,65	1,34	0,46	0,43	1,08	0,71	0,89	1,32	0,84	1,20	1,80		
55							0,86	0,76	1,27	0,79	0,82	1,38		
<u>№</u> 4		2500	/2500	/900	3700	0/1200	/150	8500	)/4800	/700	17700	)/9300/	600	
95										0,86	0,74	1,86		
85				0,52	0,64	0,84	0,62	0,97	1,37	0,73	0,72	1,32		
75	1,57	2,64	3,17	0,72	0,83	0,56	1,02	0,68	1,00	0,86	1,11	1,83		
65	1,73	1,59	1,91	0,48	0,49	0,93	0,82	0,75	1,34	1,00	0,74	1,44		
55														

При наработке двигателя для ГПА № 1 18500 ч произошло разрушение камеры сгорания. Значения стандартных отклонений, полученные при последних измерениях на этом ГПА, для оксида углерода достигает 3,0, для оксидов азота – 7,0, для температуры – 4,5. При наработке 8500 ч значения *S* по оксидам азота и углерода на одном из режимов становятся больше 1,0, а по температуре выхлопных газов – от 2,0 до 2,5. При эксплуатации ГПА 4100 ч значение *S* по оксидам азота и углерода меньше 1,0, а по температуре выхлопных газов – от 2,0 до 2,5. При эксплуатации ГПА 4100 ч значение *S* по оксидам азота и углерода меньше 1,0, а по температуре выхлопных газов больше 1,0.

Разрушение камеры сгорания двигателя ГПА № 2 и его замена произошли при наработке 14400 ч. Имеются результаты измерений продуктов сгорания при наработке двигателя 9700 ч. Расчет стандартных отклонений дает значения по оксидам азота от 1,3 до 1,7, по оксиду углерода – от 0,9 до 1,3, по температуре выхлопных газов – от 1,7 до 2,7. Стандартные отклонения при наработке двигателя 2500 ч по всем параметрам меньше 1,0. Новый двигатель при его эксплуатации 6400 ч имеет значение *S* по оксидам азота и оксиду углерода на отдельных режимах значения немногим больше 1,0, а по температуре – от 1,1 до 1,6.

Двигатель ГПА № 3 при эксплуатации 16900 ч имеет значение *S* по оксидам азота от 0,8 до 1,2, по оксиду углерода – от 1,3 до 1,1, по температуре выхлопных газов – от 1,3 до 1,8. При наработке двигателя до 12600 ч значения *S* по оксидам азота и оксиду углерода меньше 1,0, по температуре выхлопных газов – от 1,3 до 1,8.

Двигатель ГПА № 4 при наработке 2500 ч имеет значения S по оксидам азота до 2,6, по оксиду углерода – 1,7, по температуре – более 3; был заменен на новый из-за разрушения камеры сгорания. При наработке 9300 ч новый двигатель имел значения S по оксиду углерода не более 1,0, по оксидам азота – не более 1,1, по температуре – от 1,3 до 1,9.

Анализ стабильности продуктов сгорания от авиационных двигателей марки ПС-90ГП-2 для ГПА-16 «Урал» показывает возможность проведения ТО не по времени наработки, а по состоянию двигателя. Эталонные значения стандартных отклонений продуктов сгорания и температуры выхлопных газов, характеризующих состояние двигателя, приведены в табл. 7.

Таблица 7

#### Эталонные значения стандартных отклонений продуктов сгорания и температуры выхлопных газов, характеризующих состояние двигателя марки ПС-90ГП-2 для ГПА-16 «Урал»

The reference values of standard deviations of the combustion product	lS
and exhaust temperature characterizing the condition of the engine	
(brand ПС-90ГП-2 for the ГПА-16 "Ural")	

Эталонные значения стандартных отклонений			Состояние двигателя,
S <sub>CO</sub>	S <sub>NOx</sub>	$S_T^{\circ}$	частота обследования
Менее 1,0	Менее 1,0	Менее 1,0	Хорошее, 1500 ч
Менее 1,0	Менее 1,0	Более 1,3	Хорошее, 1000 ч
1,0–1,3	1,0–1,3	1,3–1,8	Удовлетворительное, 500 ч
1,3–3,0	1,3–3,0	1,8–3,0	Условно-удовлетворительное, 250 ч
Более 3,0	Более 3,0	Более 3,0	Неудовлетворительное

350

#### выводы

1. Рассмотрены основные типы камер сгораний, их преимущества и недостатки. Проведено исследование газоперекачивающего агрегата на разных режимах. Анализ состояния двигателя проведен путем сравнения эталонных значений стандартных отклонений по оксиду углерода, оксидам азота и температуре выхлопных газов со стандартными отклонениями, полученными при диагностическом обследовании.

 Предлагаемый способ удобен для практического применения, потому что:

• диагностика оборудования по предлагаемому способу может проводиться непосредственно персоналом компрессорной станции после прохождения небольшого обучения;

• легко реализуем, что связано с использованием простого, доступного и относительно недорогого оборудования;

 позволяет получить необходимый набор статистических данных, на основании которых возможно быстро сделать диагностические выводы об эффективности работы газоперекачивающего агрегата и дать рекомендации о режимах его использования;

• в связи с отсутствием жестких требований в использовании высококвалифицированных специалистов комплексное использование предлагаемого способа с имеющимися выводами по вибро- и параметрической диагностике позволит значительно увеличить надежность заключений о состоянии газоперекачивающего агрегата, сократить количество аварий, перейти от эксплуатации газоперекачивающего агрегата с его техническим обслуживанием на эксплуатацию данного агрегата «по состоянию», а это существенно снизит трудозатраты.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Пономарев, П. С. Вопросы рациональной эксплуатации газотурбинных установок / П. С. Пономарев. Уфа: ГОУ ВПО УГНТУ, 2003. 88 с.
- 2. Козаченко, А. Н. Энергетика трубопроводного транспорта газов / А. Н. Козаченко, В. И. Никишин, Б. П. Поршаков. М.: Нефть и газ, 2001. 400 с.
- Газотурбинные установки на газопроводах / Б. П. Поршаков [и др.]. М: Нефть и газ, 2004. 216 с.
- Калинин, А. Ф. Технологии промысловой подготовки и магистрального транспорта природного газа / А. Ф. Калинин. М.: МПА-ПРЕСС, 2007. 323 с.
- Энергосберегающие технологии при магистральном транспорте природного газа / Б. П. Поршаков [и др.]. М.: МПА-ПРЕСС, 2006. 311 с.
- Способ контроля изменения концентрации окислов азота в выхлопных газах газотурбинной установки: пат. № 2006751 РФ: МПК F23N5/24 / В. А. Щуровский, Ю. Н. Синицын, В. И. Корнеев, Е. Д. Никандров; дата публ.: 30.01.1994.
- Инструкция по проведению контрольных измерений вредных выбросов газотурбинных установок на компрессорных станциях: СТО Газпром 2-3.5-038–2005. М., 2005.

- 8. Костюк, А. Г. Газотурбинные установки: учеб. пособие для вузов / А. Г. Костюк, А. Н. Шерстюк. М.: Высш. шк., 1979. 254 с.
- 9. Белоконь, Н. И. Газотурбинные установки на компрессорных станциях магистральных газопроводов / Н. И. Белоконь, Б. П. Поршаков. М.: Недра, 1969. 112 с.
- Поршаков, Б. П. Газотурбинные установки: учеб. для вузов / Б. П. Поршаков. М.: Недра, 1992. 238 с.

Поступила 05.02.2016 Подписана в печать 04.04.2016 Опубликована онлайн 03.08.2016

#### REFERENCES

- 1. Ponomarev P. S. (2003) *Problems of the Rational Operation of Gas Turbine Plants*. Ufa: GOU VPO USPTU. 88 (in Russian).
- Kozachenko A. N., Nikishin V. I., Porshakov B. P. (2001) Energy of a Pipeline Transport of Gases. Moscow, "Neft i Gaz" [Oil and Gas] Publishing House. 400 (in Russian).
- 3. Porshakov B. P., Apostolov A. A., Nikishin V. I. (2004) *Gas Turbines for Gas Pipelines*. Moscow, "Neft i Gaz" Publishing House. 216 (in Russian).
- Kalinin A. F. (2007) Technology of Processing and Pipeline Transmission of Natural Gas. Moscow, MPA-PRESS. 323 (in Russian).
- Porshakov B. P., Kalinin A. F., Kuptsov S. M., Lopatin A. S., Shotidi K. Kh. (2006) Power Saving Technologies for Main Pipeline Transport of Natural Gas. Moscow, MPA-PRESS. 311 (in Russian).
- Shchurovskii V. A., Sinitsyn Iu. N., Korneev V. I., Nikandrov E. D. (1994) A Method for Controlling Changes in the Concentration of Nitrogen Oxides in Exhaust Gases of the Gas Turbine Plant. Russian Federation Patent No 2006751 (in Russian).
- Standard of Gazprom Organization 2-3.5-038–2005. Instructions for Conducting the Checking Measurements of Hazardous Emissions of Gas Turbine Units at Compressor Plants. Moscow, 2005. 14 (in Russian).
- 8. Kostyuk A. G., Sherstyuk A. N. (1979) *Gas Turbine Units: Manual for Universities*. Moscow, Vysshaya Shkola. 254 (in Russian).
- 9. Belokon N. I., Porshakov B. P. (1969) *Gas Turbine Units at Compressor Plants of Main Gas Pipelines*. Moscow, Nedra. 112 (in Russian).
- 10. Porshakov B. P. (1992) Gas Turbine Units. Moscow, Nedra. 238 (in Russian).

Received: 05.02.2016

Accepted: 04.04.2016

Published online: 03.08.2016

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-4-353-361

УДК 533.601

# Конвективный теплообмен в циклонных рециркуляционных нагревательных устройствах

## С. В. Карпов<sup>1)</sup>, А. А. Загоскин<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова (Архангельск, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2016 Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Настоящая работа посвящена исследованию конвективного теплообмена пустотелого цилиндра или садки из нескольких заготовок, загруженных в циклонное устройство с новым принципом организации внешней рециркуляции газов. При этом транспортировка теплоносителя с боковой поверхности камеры, где температура его наиболее высокая, в приосевую область осуществляется за счет перепада давления между пристенной и приосевой зонами циклонного потока. Выполнен анализ зависимостей средних и локальных коэффициентов теплоотдачи от режимных и геометрических параметров, предложены обобщающие уравнения подобия для их расчета. Показано, что в случае загрузки циклонной камеры садкой из нескольких заготовок использование рассматриваемой схемы внешней рециркуляции из-за особенностей аэродинамики практически не приводит к заметному изменению интенсивности конвективного теплообмена. В работе использовались как экспериментальные данные, так и результаты численного моделирования, полученные с помощью платформы OpenFOAM. Выполненные исследования позволят расширить область применения циклонных нагревательных устройств.

Ключевые слова: циклонная камера, внешняя рециркуляция, конвективный теплообмен

Для цитирования: Карпов, С. В. Конвективный теплообмен в циклонных рециркуляционных нагревательных устройствах / С. В. Карпов, А. А. Загоскин // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 4. С. 353–361

## **Convective Heat Transfer in Cyclone Device with External Gas Recirculation**

## S. V. Karpov<sup>1)</sup>, A. A. Zagoskin<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>M. V. Lomonosov Northern (Arctic) Federal University (Arkhangelsk, Russian Federation)

**Abstract.** The article considers the convective heat transfer on the surface of a hollow cylinder or several billets in a cyclone device with the new principle of external gas recirculation. According

Адрес для переписки	Address for correspondence
Карпов Сергей Васильевич	Karpov Sergiey V.
Северный (Арктический) федеральный	M. V. Lomonosov
университет имени М. В. Ломоносова	Northern (Arctic) Federal University
наб. Северной Двины, 17,	17 Northern Dvina Embankment
163002, г. Архангельск, Российская Федерация	163002, Arkhangelsk, Russian Federation
Тел.: +7921 679-96-41	Tel.: +7921 679-96-41
s.karpov@narfu.ru	s.karpov@narfu.ru

to this principle, transport of coolant from the lateral surface of the chamber, where the temperature is the highest, in the axial region is being fulfilled due to the pressure drop between the wall and axial areas of cyclonic flow. Dependency analysis of average and local heat transfer coefficients from operational and geometrical parameters has been performed; the generalized similarity equations for the calculation of the latter have been suggested. It is demonstrated that in case of download of a cyclone chamber with several billets, the use of the considered scheme of the external recirculation due to the specific characteristics of aerodynamics practically does not lead to noticeable changes in the intensity of convective heat transfer. Both experimental data and the numerical simulation results obtained with the use of OpenFOAM platform were used in the work. The investigations fulfilled will expand the area of the use of cyclone heating devices.

Keywords: cyclone device, external gas recirculation, convective heat transfer

**For citation:** Karpov S. V., Zagoskin A. A. (2016) Convective Heat Transfer in Cyclone Device with External Gas Recirculation. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (4), 353–361 (in Russian)

Подробное изучение аэродинамики и конвективного теплообмена в циклонных нагревательных устройствах позволило выявить некоторые их недостатки [1, 2]. Так, из-за особенностей обтекания закрученным потоком садки из нескольких изделий и переизлучения теплоты с обмуровки печи возникает ощутимая неравномерность нагрева по периметру изделия: на поверхностях, обращенных к оси камеры, интенсивность подвода теплоты меньше, чем на обращенных к периферии. В работах, посвященных изучению аэродинамики циклонных камер, загруженных пустотелыми вставками [3], показаны слабая проточность приосевой зоны и наличие значительного осевого обратного течения, представляющего собой подсасываемые из газоотводящего тамбура охлажденные газы, приводящие к уменьшению температурного напора во внутренней области.

Устранить данные недостатки предлагается [4, 5] с помощью нового принципа организации внешней рециркуляции газов в циклонных устройствах (топках, печах и др.), при котором транспортировка теплоносителя с боковой поверхности циклонной камеры, где температура его наиболее высокая, в приосевую область осуществляется за счет перепада давления между пристенной и приосевой зонами циклонного потока (рис. 1). В отличие от известного принципа, предложенного в [6] для нагревательных печей, новый способ организации внешней рециркуляции позволяет оптимизировать движение газов внутри рабочего пространства циклонного нагревательного устройства без изменения схемы подготовки греющей среды.

В циклонных устройствах тангенциальная компонента скорости течения газов в пределах ядра закрученного потока наибольшая, и поэтому ее следует считать основной. Из уравнения радиального равновесия можно сделать вывод, что необходимым условием существования плоского кругового течения является равенство центробежной силы и радиального градиента давления, имеющего направление от оси к боковой стенке камеры. Если в конструкции циклонного устройства предусмотреть канал, соединяющий боковую стенку и приосевую зону (рис. 1), можно за счет перепада давления в циклонной камере создавать рециркуляционный переток газов.





a – longitudinal section: 1 – cyclone chamber; 2 – inlet channels; 3 – outlet channel;
 4 – insertion; 5 – mixing chamber; 6 – external recirculation channel;
 b – cross section, the cyclone device loaded with the hollow cylinder;
 c – cross section, cyclone device loaded with a charge of multiple billets

При экспериментальном исследовании [4] конвективного теплообмена к пустотелому цилиндру с безразмерным внешним  $\overline{d}_{\text{в внешн}} = d_{\text{в.внешн}}/D_{\text{к}} =$ = 0,64 ( $D_{\kappa}$  = 201 мм – внутренний диаметр устройства) и внутренним  $\overline{d}_{\text{в внутр}} = d_{\text{в.внутр}}/D_{\text{к}} = 0,34$  диаметрами установлено, что использование внешней рециркуляции газов сравнительно слабо влияет на интенсивность конвективного теплообмена. Наибольшее изменение теплоотдачи наблюдалось на внутренней поверхности вставки при безразмерном диаметре выходного отверстия  $\overline{d}_{\text{вых}} = d_{\text{вых}}/D_{\text{к}} = 0,2$  и составляло 13 %. Наименьшее влияние внешней рециркуляции отмечалось при  $\overline{d}_{\text{вых}} = 0,2$  на внешней поверхности цилиндра: в диапазоне коэффициента рециркуляции  $k_c = 0-0,35$  $(k_{\rm c} = Q_{\rm peu}/Q_{\rm BX})$ , где  $Q_{\rm peu}$ ,  $Q_{\rm BX}$  – объемные расходы через систему рециркуляции и общий на установку соответственно) происходило снижение уровня чисел Nu<sub>в.внешн</sub> =  $\alpha d_{\text{в.внешн}}/\lambda$  и Nu<sub>в.внутр</sub> =  $\alpha d_{\text{в.внутр}}/\lambda$  ( $\alpha$ ,  $\lambda$  – коэффициенты теплоотдачи и теплопроводности соответственно) в пределах 2 %. Теплоотдача на обеих поверхностях пустотелой цилиндрической вставки при  $\overline{d}_{\text{вых}} =$ = 0,3-0,4 и  $k_c = 0-0,25$  также изменяется незначительно (менее 5 %).

В результате обработки полученных экспериментальных данных по теплоотдаче конвекцией рекомендованы следующие обобщающие зависимости [4]:

$$Nu_{B,BHYTP} = 0,023 \,Re_{BX}^{0,74} \,Ko_1,$$
(1)

где Ko<sub>1</sub> =  $\left( \left( 0,38 \frac{d_{\text{в.внутр}}}{d_{\text{вых}}} \right)^{4,5} + 1 \right) (1 - k_c^2); \text{ Re}_{\text{вх}} = w_{\text{вх}} D_{\text{к}} / v - \text{входное число Рей-$ 

нольдса; *w*<sub>вх</sub> – скорость потока во входных каналах; v – кинематическая вязкость воздуха;

$$Nu_{\text{B,BHEIIIH}} = 0,19 \,\text{Re}_{\text{BX}}^{0,57} \,\text{Ko}_2,$$
(2)  
$$Ko_2 = \left(1,18 - \left(0,14 \frac{d_{\text{B,BHYTP}}}{d_{\text{BAX}}}\right)^{2,4}\right) (1 - 0, 2k_c).$$

Зависимости (1), (2) являются осредненными и не позволяют судить о равномерности распределений теплового потока на внешней и внутренней поверхностях пустотелого цилиндра. Поэтому в настоящей работе дополнительно выполнено численное моделирование конвективного теплообмена на платформе OpenFOAM. Использовалась модель турбулентности k- $\omega$ -SST-RC, гексаэдральная расчетная сетка с пристенным измельчением, алгоритм PIMPLE и схемы дискретизации дифференциальных уравнений второго порядка точности. Полученные распределения теплового потока qпо длине внешней и внутренней поверхностей цилиндра, отнесенные к их средним значениям  $q_{cp}$ , приведены на рис. 2.

Как видно из рисунка, на внешней поверхности цилиндрической вставки неравномерность распределения относительно невелика (не более  $\pm 10$  %), и ею можно пренебречь. На внутренней поверхности минимальный и максимальный тепловые потоки могут различаться до 40 %, а изменение  $q/q_{cp}$  по длине пустотелого цилиндра качественно подобно теплообмену при закрученном течении газа в трубе: по мере приближения к диафрагмированному торцу относительный тепловой поток монотонно убывает до координаты  $z/d_{в.внутр} = 2,5-3,0$ , после чего возрастает вследствие подкручивающего воздействия потока в области между торцом вставки и выходным каналом.

Экспериментальное исследование конвективного теплообмена садки из нескольких заготовок выполнено датчиком теплового потока Captec с вольт-ваттной характеристикой 0,136 мкВ/(Вт/м<sup>2</sup>). На калориметре для установки датчика сделана специальная выемка, и он закреплялся заподлицо с поверхностью. Распределения местных коэффициентов теплоотдачи на поверхности одной из заготовок с безразмерным диаметром  $\overline{d}_{\rm B} = d_{\rm B}/D_{\rm K} =$ = 0,16 и диаметром центров вставок  $\overline{d}_{\rm c} = d_{\rm c}/D_{\rm K} = 0,5$ , отнесенных к их средним значениям в циклонных камерах с внешней рециркуляцией и без нее, показаны на рис. 3.


*Рис. 2.* Распределение теплового потока по поверхностям пустотелого цилиндра при  $k_c = 0,33$ : а – внешней,  $\overline{d}_{_{\text{в.внешн}}} = 0,53$  и  $\overline{d}_{_{\text{в.внутр}}} = 0,51$ ;  $1 - \overline{d}_{_{\text{вых}}} = 0,3$ ; 2 - 0,4; b – внутренней,  $\overline{d}_{_{\text{в.внешн}}} = 0,64$  и  $\overline{d}_{_{\text{в.внутр}}} = 0,34$ ;  $1 - \overline{d}_{_{\text{вых}}} = 0,2$ ; 2 - 0,3; 3 - 0,4

*Fig.* 2. The distribution of heat flow over the surfaces of the hollow cylinder at  $k_c = 0.33$ : a – external surface;  $\overline{d}_{\text{external}} = 0.53$  and  $\overline{d}_{\text{internal}} = 0.51$ ;  $1 - \overline{d}_{\text{outlet}} = 0.3$ ;  $2 - \overline{d}_{\text{outlet}} = 0.4$ ; b – internal surface,  $\overline{d}_{\text{external}} = 0.64$  and  $\overline{d}_{\text{internal}} = 0.34$ ;  $1 - \overline{d}_{\text{outlet}} = 0.2$ ;  $2 - \overline{d}_{\text{outlet}} = 0.3$ ;  $3 - \overline{d}_{\text{outlet}} = 0.4$ 





Fig. 3. The distribution of local heat transfer circumferentially of an insertion at different Reynolds numbers (Re<sub>BX</sub>) in a cyclone chamber:
 a – with external gas recirculation; b – without external gas recirculation

Нулевой угол отсчитывали от точки, ближайшей к оси циклона, вставка с установленным датчиком поворачивалась против часовой стрелки. Значками показаны распределения  $\alpha/\alpha_{cp}$  при различных значениях числа Рейнольдса  $\operatorname{Re}_{Bx} = 1.8 \cdot 10^5 - 3.8 \cdot 10^5$ , линией – осредненные значения.

Как видно из рис. 3, интенсивность конвективного теплообмена по периметру заготовки меняется более чем в два раза, наблюдались два максимума коэффициента теплоотдачи: первый при угле 150°, соответствующий точке присоединения закрученного потока во внешней области, и второй – при угле 30°, соответствующий точке присоединения индуцированного приосевого вихря. Из-за особенностей аэродинамики, отмеченных в [5], распределение местных коэффициентов теплоотдачи практически совпадает в камере с внешней рециркуляцией и без нее. Объяснить данный факт можно следующим образом: как было показано при исследовании незагруженных циклонных камер, использование рассматриваемого типа внешней рециркуляции газов уменьшает радиальный перенос количества вращательного движения из периферийной области в приосевую, что снижает в последней уровень тангенциальных скоростей. Садка из нескольких заготовок обладает сильным раскручивающим воздействием, что приводит к низкой интенсивности вращательного движения в приосевой области. Поэтому уменьшение радиального переноса при использовании внешней рециркуляции газов не приводит к каким-либо существенным изменениям поля скоростей или аэродинамических характеристик.

Таким образом, расчет конвективного теплообмена садки из нескольких заготовок в циклонных рециркуляционных устройствах следует производить по методикам, разработанным для обычных камер [3, 7]. В данном случае внешняя рециркуляция может с успехом применяться для выравнивания температурного поля и повышения температуры греющей среды, теплового потока по периметру заготовок в садке за счет организации перетока горячих газов из периферийной области нагревательной печи в приосевую зону.

При исследовании аэродинамики циклонного устройства, загруженного пустотелым цилиндром, установлено, что во внешней области закрученного потока наблюдается течение, характерное для загрузки сплошными цилиндрическими вставками, во внутренней области – для потока в трубе с закруткой. Для расчета интенсивности конвективного теплообмена на внешней поверхности пустотелого цилиндра можно рекомендовать зависимости [7, 8]:

$$Nu_{RBHeIIIH} = 0,064 Ko(\eta_{R}) Re_{0m}^{0.74}$$

при

$$Re_{\phi m} = w_{\phi m 1} d_{\text{B,BHeIIIH}} / \nu = 4,5 \cdot 10^4 - 1,7 \cdot 10^5;$$
(3)  
$$Nu_{\text{B,BHEIIIH}} = 0,464 \text{Ko}(\eta_{\text{B}}) Re_{\phi m}^{0,556}$$

при

$$Re_{om} = 8,5 \cdot 10^3 - 4,5 \cdot 10^4, \tag{4}$$

где Ко( $\eta_{\rm B}$ ) = 1 –  $k_{\rm B}\eta_{\rm B}^m$ ;  $k_{\rm B}$ , m – коэффициенты, зависящие от безразмерного радиуса вставки  $\eta_{\rm B} = r_{\rm B.BHeIIIH}/r_{\phi m}$ ;  $w_{\phi m1}$  – максимальное значение тангенциальной скорости во внешней области потока;  $r_{\phi m}$  – радиус положения максимума  $w_{\phi m1}$ ;  $r_{\rm B.BHeIIIH}$  – внешний радиус пустотелого цилиндра.

Сопоставление экспериментальных данных с уравнениями (3), (4) выполнено на рис. 4. Как видно, отклонение опытных точек от расчетной кривой не превышает  $\pm 7,5$  %.



*Рис. 4.* Обобщение опытных данных по конвективному теплообмену на внешней поверхности пустотелого цилиндра: значки – экспериментальные данные; линия – расчет по (3), (4)

*Fig. 4.* Generalization of convective heat transfer experimental data on external surface of the hollow cylinder: the marks indicate – experimental data; the line features – the data calculated by the formulas (3), (4)

Для расчета интенсивности конвективного теплообмена на внутренней поверхности вставки рекомендована следующая корреляционная зависимость:

$$Nu_{z,B,BHVTD} = 0,0065 \operatorname{Re}_{z,0}^{0,84} \operatorname{Pr}^{0,4} \varepsilon_T,$$
(5)

где Nu<sub>z,в.внутр</sub> =  $\alpha z/\lambda$  – число Нуссельта; Re<sub>z,φ</sub> =  $w_{\phi m2}z/\nu$  – то же Рейнольдса, построенное по максимальной тангенциальной скорости на входе во внутреннюю область пустотелого цилиндра  $w_{\phi m2}$  и продольной координате z;

Pr – то же Прандтля;  $\varepsilon_T = \left(\frac{2}{\sqrt{T_c/T_B}+1}\right)^{1,6}$  – функция неизотермичности;

*T*<sub>с</sub>, *T*<sub>в</sub> – температуры стенки и потока соответственно.

Сопоставление выражения (5) и данных, полученных численным моделированием, показано на рис. 5. Отклонение точек от расчетной кривой не превышает  $\pm 15$  %.







## выводы

1. Экспериментально и численно исследован конвективный теплообмен пустотелого цилиндра и садки из нескольких заготовок, загруженных в циклонное рециркуляционное нагревательное устройство. Выполнен анализ зависимостей средних и локальных коэффициентов теплоотдачи от режимных и геометрических параметров, предложены обобщающие уравнения подобия для их расчета.

2. Показано, что в случае загрузки циклонной камеры садкой из нескольких заготовок использование рассматриваемой схемы внешней рециркуляции практически не приводит к заметному изменению аэродинамических характеристик и интенсивности конвективного теплообмена. Данная схема рециркуляции может использоваться для выравнивания температурного поля по сечению печи и обеспечения равномерности нагрева изделий.

## ЛИТЕРАТУРА

- Загоскин, А. А. Экспериментальное исследование конвективного теплообмена пустотелого цилиндра в циклонном рециркуляционном устройстве / А. А. Загоскин, С. В. Карпов // Вестник Череповецкого государственного университета. 2015. № 2 (63). С. 9–14.
- Сабуров, Э. Н. Циклонные нагревательные устройства с интенсифицированным конвективным теплообменом / Э. Н. Сабуров. Архангельск: Сев.-Зап. кн. изд-во, 1995. 341 с.
- Обтекание и теплоотдача группы цилиндров, расположенных симметрично относительно оси циклонного потока / Ю. Л. Леухин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2008. № 11–12. С. 48–60.
- Карпов, С. В. Высокоэффективные циклонные устройства для очистки и теплового использования газовых выбросов / С. В. Карпов, Э. Н. Сабуров; под ред. Э. Н. Сабурова. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2002. 504 с.

- 5. Карпов, С. В. К методике аэродинамического расчета циклонных устройств с внешней рециркуляцией газов / С. В. Карпов, А. А. Загоскин // Вестник Череповецкого государственного университета. 2014. № 3 (56). С. 8–12.
- 6. Пуговкин, А. У. Рециркуляционные пламенные печи в машиностроении / А. У. Пуговкин. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1987. 158 с.
- Карпов, С. В. Конвективный теплообмен в циклонной загруженной камере / С. В. Карпов,
   Э. Н. Сабуров // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 1993. № 1–2. С. 80–84.
- Карпов, С. В. Аэродинамика и конвективный теплообмен в циклонной камере при близких к предельным условиях ввода и вывода газов / С. В. Карпов, Э. Н. Сабуров, А. В. Быков // Вестник Череповецкого государственного университета. 2007. № 3 (14). С. 127–134.

Поступила 02.11.2015 Подписана в печать 21.01.2016 Опубликована онлайн 03.08.2016

## REFERENCES

- Zagoskin A. A., Karpov S. V. (2015) Experimental Investigation of Convective Heat Transfer of a Hollow Cylinder in Cyclone Device with External Recirculation. *Vestnik Cherepovetskogo Gosudarstvennogo Universiteta* [Bulletin of the Cherepovets State University], 63 (2), 9–14 (in Russian).
- 2. Saburov E. N. (1995) Cyclone Heating Devices with Intensified Convective Heat Transfer. Arkhangelsk, North-West Publ. 341 (in Russian).
- 3. Leuhin Yu. L., Saburov E. N., Usachev I. A., Garen V. (2008) Flow and Heat Transfer of a Group of Cylinders Arranged Symmetrically About the Axis of the Cyclone Flow. *Izvestiia Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Problemy Energetiki* [Proc. of Higher Schools. Problems of Power Engineering], (11–12), 48–60 (in Russian).
- Karpov S. V., Saburov E. N. (2002) High Efficiency Cyclone Device for Cleaning Gas and Heat Recovery. Arkhangelsk: ASTU. 504 (in Russian).
- Karpov S. V., Zagoskin A. A. (2014) Towards the Method of Calculating the Aerodynamic Cyclone Device with External Recirculation. *Vestnik Cherepovetskogo Gosudarstvennogo Universiteta* [Bulletin of the Cherepovets State University], 3 (56), 8–12 (in Russian).
- Pugovkin A. U. (1987) Flaming Furnace with External Gas Recirculation. Leningrad, Mashinostroenie. 158 (in Russian).
- Karpov S. V., Saburov E. N. (1993) Convective Heat Transfer in Cyclone Device. *Energetika*. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG* [Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.], 1–2, 80–84 (in Russian).
- Karpov S. V., Saburov E. N., Bykov A. V. (2007) Aerodynamics and Convective Heat Transfer in Cyclone Chamber under Conditions of Input and Output Gases that Are Close to the Limiting Onest. *Vestnik Cherepovetskogo Gosudarstvennogo Universiteta* [Bulletin of the Cherepovets State University], 14 (3), 127–134 (in Russian).

Received: 02.11.2015

Accepted: 21.01.2016

Published online: 03.08.2016

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-4-362-375 УДК 621.311.22:621.175

# Совершенствование систем технического водоснабжения с градирнями с целью улучшения технико-экономических показателей тепловых электростанций

Часть 2

## Ю. А. Зенович-Лешкевич-Ольпинский<sup>1)</sup>, Н. В. Широглазова<sup>2)</sup>, А. Ю. Зенович-Лешкевич-Ольпинская<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Филиал «Гомельская ТЭЦ-2» РУП «Гомельэнерго» (Гомель, Республика Беларусь), <sup>2)</sup>Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого (Гомель, Республика Беларусь),

<sup>(1)</sup> Омель, геспублика Беларусь), <sup>3)</sup> РУП «БелНИПИэнергопром» (Минск, Республика Беларусь)

1 5 11 (Desiriti information promposition)

© Белорусский национальный технический университет, 2016 Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Разработана методика расчета экономической эффективности, которая может быть универсальной и использоваться для технико-экономического обоснования модернизации оросительной и водораспределительной систем градирен. Данная методика учитывает эффект от снижения давления отработавшего пара в конденсаторе за счет снижения температуры охлаждающей воды на выходе из градирни с целью улучшения технико-экономических показателей тепловых электростанций. Приведены практические результаты модернизации оросительной и водораспределительной систем градирни. Как результат, применение новой оросительной и водораспределительной систем градирни позволило увеличить охлаждающую эффективность более чем на 4 °C и соответственно получить экономию топлива за счет улучшения вакуума в конденсаторах турбин. Кроме того, повышается располагаемая мощность ТЭЦ в летний период. Результаты работы, опыт модернизации оросительной и водораспределительной систем градирни Гомельской ТЭЦ-2 и методика расчета ее эффективности могут быть учтены при модернизации аналогичных объектов на электростанциях Белорусской энергосистемы. Предложены мероприятия по совершенствованию оборотных систем градирен и их конструкций, которые позволят значительно повысить надежность и эффективность систем технического водоснабжения тепловых электростанций.

Ключевые слова: система технического водоснабжения, градирни, водораспределительные устройства, температура охлажденной воды, охлаждающая эффективность, экономический эффект, срок окупаемости, компьютерная математическая модель градирни, ограничения мощности

Для цитирования: Зенович-Лешкевич-Ольпинский, Ю. А. Совершенствование систем технического водоснабжения с градирнями с целью улучшения технико-экономических показателей тепловых электростанций. Ч. 2 / Ю. А. Зенович-Лешкевич-Ольпинский, Н. В. Широглазова, А. Ю. Зенович-Лешкевич-Ольпинская // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 4. С. 362–375

Адрес для переписки	Address for correspondence
Зенович-Лешкевич-Ольпинский Юрий Аркадьевич	Zenovich-Leshkevich-Olpinskiy Yury A.
Филиал «Гомельская ТЭЦ-2»	Branch "Gomel CHP-2" of the "Gomel-
РУП «Гомельэнерго»,	yenergo" Republican Unitary Enterprise,
просп. Энергостроителей, 2,	2 Energostroyiteleyi Ave.,
247010, г. Гомель, Республика Беларусь	247010, Gomel, Republic of Belarus
Тел.: +375 232 42-77-88	Tel.: +375 232 42-77-88
y.leshkevich@gomelenergo.by	y.leshkevich@gomelenergo.by

# Improvement of Systems of Technical Water Supply with Cooling Towers for Heat Power Plants Technical and Economic Indicators Perfection

Part 2

## Yu. A. Zenovich-Leshkevich-Olpinskiy<sup>1)</sup>, N. V. Shiroglazova<sup>2)</sup>, A. Yu. Zenovich-Leshkevich-Olpinskaya<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Branch "Gomel CHP-2" of the "Gomelyenergo" Republican Unitary Enterprise (Gomel, Republic of Belarus),

<sup>2)</sup>Gomel State Technical University Named after P. O. Sukhoi (Gomel, Republic of Belarus), <sup>3)</sup>"BelNIPIenergoprom" Republican Unitary Enterprise (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The method of calculation of economic efficiency that can be universal and is suitable for feasibility study of modernization of irrigation and water distribution system of cooling towers has been developed. The method takes into account the effect of lower pressure exhaust steam in the condenser by lowering the temperature of the cooling water outlet of a cooling tower that aims at improvement of technical and economic indicators of heat power plants. The practical results of the modernization of irrigation and water distribution system of a cooling tower are presented. As a result, the application of new irrigation and water distribution systems of cooling towers will make it possible to increase the cooling efficiency by more than 4 °C and, therefore, to obtain the fuel savings by improving the vacuum in the turbine condensers. In addition, the available capacity of CHP in the summer period is increased. The results of the work, the experience of modernization of irrigation and water distribution systems of the gomel CHP-2 cooling towers system, as well as the and methods of calculating of its efficiency can be disseminated for upgrading similar facilities at the power plants of the Belarusian energy system. Some measures might significantly improve the reliability and efficiency of technical water supply systems of heat power plants.

**Keywords:** technical water supply system, cooling towers, water distribution systems, cooled water temperature, cooling efficiency, economic impact, payback period, computer mathematical model of the cooling tower, capacity restrictions

**For citation:** Zenovich-Leshkevich-Olpinskiy Yu. A., Shiroglazova N. V., Zenovich-Leshkevich-Olpinskaya A. Yu. (2016) Improvement of Systems of Technical Water Supply with Cooling Towers for Heat Power Plants Technical and Economic Indicators Perfection. Part 2. *Energetika*. *Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (4), 362–375 (in Russian)

## Расчетное сравнение разных типов оросителей

Для сравнения характеристик градирен с различными типами оросителей выполнены расчеты температуры охлажденной воды на выходе градирни с применением стандартного асбоцементного и современного полимерного сетчатого оросителей [1–9]. Исследования проводились с помощью специально разработанной компьютерной программы. В ее основу была заложена математическая модель градирни (рис. 1). Программа разрабатывалась как инструмент для исследования режимов работы градирни, поиска резервов в повышении ее охлаждающей способности. Для подтверждения достоверности расчетов результаты компьютерной модели проверялись по результатам натурных испытаний градирни. Для расчета температуры воды на выходе из градирни используются следующие режимные и метеорологические параметры:

- расход циркуляционной воды Q, м<sup>3</sup>/ч;
- температура воды на входе в градирню  $t_1$ , °С;
- перепад температуры воды в градирне  $\Delta t$ , °C;
- температура воздуха по сухому термометру  $\theta$ , °C;
- относительная влажность воздуха  $\phi,$  %;
- скорость ветра на высоте 2 м над поверхностью земли w, м/с.

В результате расчета определяли удельную тепловую нагрузку на градирню U, Мкал/(ч·м<sup>2</sup>), и температуру охлаждающей воды на выходе из нее  $t_2$ , °C, с учетом поправок на перепад температур и скорость ветра.



*Puc. 1.* Компьютерная модель градирни *Fig. 1.* A computer model of the cooling tower

Расчеты выполняли при постоянном расходе воды на градирню  $Q_{\rm rp}$ , неизменных метеорологических факторах и различных тепловых нагрузках  $\Delta t$ . Результаты расчетов охлаждающего эффекта градирни с разными типами оросителей приведены в табл. 1.

Yu. A. Zenovich-Leshkevich-Olpinskiy, N. V. Shiroglazova, A. Yu. Zenovich-Leshkevich-Olpinskaya	
Improvement of Systems of Technical Water Supply with Cooling Towers for Heat	365

Таблица	1
1 aominia	1

								,
	Градирня с оросителем							
параметра	полимерным высотой 0,9 м		T	типовым асбестоцементным высотой 2,5 м				
Перепад температуры воды в градирне $\Delta t$ , °С	9	11	13	15	9	11	13	15
Температура воздуха по «су- хому» термометру θ, °С	18,6							
Температура воздуха по «влажному» термометру т, °С	14,9							
Относительная влажность воздуха ф, %	60,0							
Расход воды на градирню $Q_{\rm rp}$ , м $^{3/4}$	23500,0							
Расчетная температура охла- жденной воды в градирне, °С	24,2	24,9	25,4	25,8	26,2	27,6	28,8	29,9

График зависимости температуры охлажденной воды в градирнях от типа оросителя и величины тепловой нагрузки приведен на рис. 2.



*Рис. 2.* Зависимость температуры охлажденной воды от тепловой нагрузки в градирнях с оросителем: 1 – асбестоцементным высотой 2, 5 м; 2 – полимерным высотой 0,9 м

*Fig.* 2. The temperature dependence of the cooled water upon the heat load in cooling towers with the sprinkler: 1 - asbestos-cement of 2.5 m height; 2 - a polymer of 0.9 m height

Сравнительные расчеты охлаждающего эффекта градирни с разными типами оросителей при одинаковых метеорологических факторах показали, что полимерный ороситель более эффективен по сравнению с асбоцементным и эффективность оросителя увеличивается при повышении нагрузки на градирню. Так, при перепаде температур воды 9 °C разница в температуре охлажденной воды в градирне составляет 2,0 °C, а при перепаде температур 15 °C данный показатель равен 4,1 °C.

# Экономическое обоснование установки новых оросительной и водораспределительной систем

Результаты расчета экономической целесообразности замены асбоцементного оросителя на полимерный ороситель сетчатой конструкции NC20 для башенной градирни площадью орошения  $F = 3200 \text{ м}^2$  Гомельской ТЭЦ-2 приведены в табл. 2.

Таблица 2

Наименование показателя	Обозначе- ние	Расчетная формула	Значение			
Площадь орошения градирни, м <sup>2</sup>	F <sub>op</sub>	Задана	3200			
Температура воздуха по «сухому» термометру, °С	θ	Задана	21,7			
Температура воздуха по «влажно- му» термометру, °С	$q_{\scriptscriptstyle {\rm B}{ m J}}$	Задана	19,2			
Относительная влажность воздуха, %	φ	Задана	75			
Скорость ветра, м/с	w	Задана	2,5			
Расход пара в конденсатор, т/ч	$D_k$	Фактические данные	348			
Разность теплосодержаний отработавшего пара и конденсата, ккал/кг	Δi	550–570 – для конденса- торов современных турбин с промежуточным перегре- вом пара и параметрами свежего пара 130–240 кгс/см <sup>2</sup>	560			
Расход циркуляционной воды, м <sup>3</sup> /ч	Q	Фактические данные	19150			
Нагрев воды в конденсаторе, °С	$\Delta t$	Фактические данные	10,2			
Удельная тепловая нагрузка градирни, Мкал/(ч·м <sup>2</sup> )	и	$q{\cdot}\Delta i$	61,2			
Асбоцементный ороситель						
Температура охлажденной воды, °С	$t'_{2a}$	Математическая модель гра- дирни	29,65			
Поправка на перепад температуры воды, °С	$\delta_\Delta$	Математическая модель гра- дирни	-0,03			
Поправка на скорость ветра, °С	$\Delta_w$	Математическая модель гра- дирни	0,03			
Нормативная температура охлажденной воды, °С	$t_{2a}$	$t'_{2c} + \delta_{\Delta} + \Delta_w$	29,65			
Температурный напор конденсатора, °С	δt	$\Delta t/(e^n-1)$	3,57			
Показатель степени	п	Расчет конденсатора	1,35			
Температура насыщения, °С	$t_s$	$t_{2a} + \delta t + \Delta t$	43,42			
Давление в конденсаторе, кгс/см <sup>2</sup>	$p_{2a}$	Таблицы воды и водяного пара	0,0901			
Сетчатый ороситель						
Температура охлажденной воды, °С	$t'_{2c}$	Математическая модель градирни	27,30			

Yu. A. Zenovich-Leshkevich-Olpinskiy, N. V. Shiroglazova, A. Yu. Zenovich-Leshkevich-Olpinskaya	
Improvement of Systems of Technical Water Supply with Cooling Towers for Heat	367

Окончание табл. 2

	05		
Наименование показателя	Обозначе- ние	Расчетная формула	Значение
Поправка на скорость ветра. °С	$\Delta_{m}$	Математическая модель	
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	W	градирни	0,03
Нормативная температура			
охлажденной воды, °С	$t_{2c}$	$t'_{2c} + \Delta_w$	27,33
Температурный напор			
конденсатора, °С	δt	$\Delta t/(e^n-1)$	3,57
Показатель степени	n	Расчет конденсатора	1,35
Температура насыщения, °С	t <sub>sc</sub>	$t_{2c} + \delta t + \Delta t$	41,10
Давление в конденсаторе, кгс/см <sup>2</sup>	$p_{2c}$	Таблицы воды и водяного пара	0,0798
Снижение давления отработавшего			
пара после внедрения оросителей	$\Delta p_2$	$p_{2a} - p_{2c}$	0,0103
Изменение мощности турбины при	• -	x 24 x 20	
изменении вакуума в конденсаторе		Энергетическая характери-	
на 1 %, кВт	$\Delta N_{0,01}$	стика турбины	1060
Увеличение мощности турбоагрегата			
за счет снижения давления			
отработавшего пара	$\Delta N$	$\Delta N = \Delta N_{0,01} \Delta p_2 \cdot 10^{-2}$	1091,8
Среднее количество часов работы			
градирни за межотопительный			
период, ч	Т	Фактические данные	4392
Дополнительная выработка			
электроэнергии, кВт.ч	ΔЭ	$\Delta \Im = \Delta NT$	4795185
Удельный расход топлива			
на отпуск электроэнергии			
от замыкающей КЭС, г у. т./(кВт·ч)	$b_{_{3\mathrm{a}\mathrm{M}}}$	Фактические данные	319,1
Количество сэкономленного			
топлива, т у. т.	$\Delta B$	$\Delta B = \Delta \Im b_{3\mathrm{a}\mathrm{M}} \cdot 10^{-\mathrm{o}}$	1530,1
Топливная составляющая			
себестоимости	_	_	
электроэнергии, дол./(кВт·ч)	$S_m$	Принятые данные	0,0350
Эффект от снижения вакуума	~		=
в конденсаторе, дол./год	Эв	$\Delta \Im S_m$	167831
Норма дохода на капитал	$E_{\scriptscriptstyle \mathrm{H}}$	Принятые данные	0,20
Затраты на реконструкцию			
водоохлаждающего устройства			
градирни, дол.	K	Ориентировочные данные	850000
Годовой экономический			
эффект, дол.	ΔЭ	$Эв - E_{\rm H}K$	37831
Срок окупаемости, год	Т	$K/\Im_{\scriptscriptstyle  m B}$	5,1

Расчеты экономического обоснования показывают, что в результате реконструкции градирни будет получена экономия топлива 1530 т у. т. в год, срок окупаемости составит 5,1 года.

## Результаты внедрения оросительной и водораспределительной систем при реконструкции градирни № 1 Гомельской ТЭЦ-2

В 2012–2013 гг. на Гомельской ТЭЦ-2 проведена работа по реконструкции оросительной и водораспределительной систем градирни № 1 (проект – РУП «БелНИПИэнергопром», монтаж тепломеханической части оборудования и КИПиА – ЗАО «Белспецэнерго» и ОАО «Белэнергоремналадка», наладка и испытание оборудования – ЧАО «Техэнерго»).

При реконструкции градирни № 1 проведены следующие работы.

1. Для обеспечения снижения температуры охлажденной воды после градирен на 4 °C выполнена замена существующего асбестоцементного оросителя на современный высокоэффективный полимерный решетчатый ороситель типа NC20 высотой 0,9 м. Применение такого оросителя позволило выровнять расходы воздуха по сечению градирни для обеспечения максимальной эффективности ее работы. Это достигалось укладкой оросителя с различной высотой слоя. Например, для выравнивания расходов воздуха в радиальном сечении градирни толщина слоя увеличена в направлении от центра градирни к периферии.

2. Установлены низконапорные водоразбрызгивающие сопла с разбрызгиванием вниз, что позволило при низких напорах воды перед ними обеспечить необходимую площадь орошения, эффективность разбрызгивания, предотвратить отложения в водоподводящих трубах.

3. Для обеспечения равномерного водораспределения произведена замена рабочих и магистральных трубопроводов.

4. Для уменьшения неравномерности распределения потоков воды между охладителями и сливными магистральными циркводоводами выполнена перемычка D<sub>v</sub> 1600.

5. По периметру градирни на уровне верха входного окна трубопровода произведена прокладка противообледенительной водяной завесы диаметром 500 мм пропускной способностью до 30 % от номинального расхода, равного 22000  $\text{m}^{3}/\text{ч}$ .

После завершения монтажа технологической части и пуска градирни проведены ее гарантийные испытания с целью определения соответствия фактической охлаждающей способности гарантийным обязательствам. Сравнение характеристик работы градирни № 1 показало, что в результате выполнения реконструкции водоохлаждающего устройства обеспечено абсолютное снижение температуры охлажденной циркуляционной воды на 4,16 °C (табл. 3), что соответствует гарантийным показателям (4 °C). Градирня № 1 при температурах наружного воздуха от 15 до 20 °C обеспечила работу двух энергоблоков с суммарной электрической мощностью 378–354 МВт при средней величине теплофикационного отбора 100 Гкал/ч [10–15].

Yu. A. Zenovich-Leshkevich-Olpinskiy, N. V. Shiroglazova, A. Yu. Zenovich-Leshkevich-Olpinskaya	
Improvement of Systems of Technical Water Supply with Cooling Towers for Heat	369

					Таблица 3
II	Номер опыта				
наименование показателя	1	2	3	4	5
Суммарная электрическая мощность двух энергоблоков ΣN, MBт	378	378	365	362	354
Суммарный теплофикационный отбор теплоты ΣG <sub>теп</sub> , Гкал/ч	100	96	94	103	103
Температура воздуха по «сухому» термо- метру θ, °C	15,01	15,66	15,29	17,46	20,02
Температура воздуха по «влажному» тер- мометру τ, °C	9,96	12,71	13,31	14,29	13,62
Барометрическое давление <i>p</i> <sub>6</sub> , мм рт. ст.	747,75	748,16	753,75	751,3	749,85
Относительная влажность воздуха ф, %	52,10	71,57	80,33	71,03	48,40
Скорость воздуха на высоте 2 м от поверхности земли w, м/с	3,64	3,21	1,60	1,85	1,93
Расход воды на градирню $G_{\rm rp}$ (% $G_{\rm Hom}$ ), м <sup>3</sup> /ч	25401 (1,08)	24894 (1,06)	24398 (1,04)	24372 (1,04)	24234 (1,03)
Средневзвешенная температура воды на входе в градирню <i>t</i> <sub>1</sub> , °C	39,96	41,55	40,86	41,38	41,02
Средняя температура воды на выходе из градирни <i>t</i> <sub>2</sub> , °C	26,32	26,85	26,14	26,97	26,96
Перепад температуры воды в градир- не $\Delta t = t_1 - t_2$ , °С	13,64	14,70	14,72	14,41	14,06
Расчетная температура охлажденной воды в градирне, определенная по гарантийной характеристике градирни $t_2^p$ , °C	25,7	27,0	26,8	27,6	27,7
Недоохлаждение воды в градирне $\Delta = t_2 - t_2^p, \ ^{\circ}C$	0,62	-0,15	-0,66	-0,63	-0,74
Среднее недоохлаждение воды в градирне относительно гарантийной характеристи- ки $\Delta_{cp}$ , °C	-0,31				
Расчетная температура охлажденной воды для градирни с асбестоцементным ороси- телем <i>t</i> <sub>p.a3</sub> , °C	30,25	31,34	30,45	30,95	31,05
Фактическое снижение температуры охла- жденной воды по сравнению с градирней с асбестоцементным оросителем $\Delta t_{\text{рек}} = t_2 - t_{\text{p.a3}}$ , °C	3,93	4,49	4,31	3,98	4,09
Среднее снижение температуры охлажден- ной воды в сравнении с градирней с асбе- стоцементным оросителем $\Delta t_{pek}$ , °С			4,16		

Результаты фактической экономической эффективности градирни № 1 после реконструкции представлены в табл. 4.

Таблииа 4

			,
Наименование показателя	Обозна-	Расчетная	Значе-
	чение	формула	ние
Число часов работы энергоблоков станции		Фактические	
в межотопительный период, ч/год	τ	данные	7556
Изменение мощности турбоагрегата		Энергетическая	
в зависимости от изменения давления		характеристика	
в конденсаторе на 0,01 кгс/см <sup>2</sup> , МВт	$\Delta N_{0.01}$	турбины	1,06
Температура насыщения отработавшего пара			
в конденсаторе турбины, °С:			
до реконструкции	ť.	Фактинаскиа	28.9
после реконструкции	<i>t</i> ,	Фактические	26.4
	12	данные	, -
Абсолютное давление отработавшего пара			
в конденсаторе турбины, кгс/см <sup>2</sup> :			
до реконструкции	$p'_1$	Таблица волы	0,0406
после реконструкции	$p'_2$	и водяного пара	0,0351
Снижение давления отработавшего пара			
после реконструкции, кгс/см <sup>2</sup>	$\Delta p_2$	$\Delta p_2 = p'_2 - p'_1$	0,0055
Увеличение мощности турбоагрегата за счет			
снижения давления отработавшего пара, МВт	$\Delta N$	$\Delta N = \Delta N_{0,01} \Delta p_2 \cdot 10^2$	0,5867
Дополнительная выработка электроэнергии			
за счет повышения охлаждающей эффектив-			
ности водоохлаждающего устройства			
градирни, МВт·ч	ΔЭ	$\Delta \Im = \Delta NT$	4433
Удельный расход топлива на отпуск электро-		Фактические	
энергии от замыкающей КЭС, г у. т./(кВт.ч)	$b_{3am}$	данные	319,1
Годовая экономия топлива, т у. т.	$\Delta B$	$\Delta B = \Delta \Im b_{3\rm am} \cdot 10^{-3}$	1414

Высокая охлаждающая эффективность градирни № 1 после ее реконструкции позволила получить экономию топлива 1414 т у. т. в год за счет снижения температуры охлаждающей воды на выходе из градирни и улучшения вакуума в конденсаторах турбин, а также обеспечила возможность дополнительного включения в работу одного турбоагрегата типа Т-180/210-130 в конденсационном режиме в летний период года. Результаты проведенных исследований показывают высокую сходимость показателей натурных испытаний с результатами расчетов компьютерной модели градирни для различных типов оросителей.

## Снижение ограничения мощности тепловых электростанций

Ограничения мощности тепловых электростанций представляют собой серьезную проблему в процессе производства электрической энергии и не только как фактор, уменьшающий установленную мощность генерирующего агрегата (электростанции), но и как одна из причин, снижающая надежность и ухудшающая экономичность работы всего оборудования ТЭС. Большие значения ограничений мощности в общей их структуре имеются из-за недостаточного промышленного теплопотребления, количества охлаждающей воды и высоких значений ее температуры. Ограничения из-за недостаточного теплопотребления, по существу, зависят от циркуляционных систем технического водоснабжения, так как часто охлаждение и конденсация неиспользуемого в регулируемых отборах пара и дополнительная выработка электроэнергии в конденсационном режиме не обеспечены охлаждающей водой. Недостаток воды и высокие значения ее температуры, как правило, одновременно ухудшают вакуум в конденсаторах и снижают экономичность оборудования в эксплуатационных режимах [3]. Наибольшие ограничения появляются в неотопительный период, в период снижения теплопотребления, когда возникает необходимость выработки электроэнергии в конденсационном режиме или режиме с малым объемом регулируемых отборов пара.

Например, в 2014 г. по ГПО «Белэнерго» из 8994,45 МВт установленной мощности ограничения неотопительного периода (для самого жаркого периода лета) составили 1697,3 МВт, в том числе из-за недостаточного теплопотребления – 228,6 МВт, из-за отсутствия или недостаточной охлаждающей эффективности градирен – 985,0 МВт, или 58,0 % от всех ограничений (рис. 3).





Fig. 3. The structure of the capacity limitations of UPS of Belarus in July 2014:
1 – the available power – 7297.15 MW; 2 – inadequate output of cooling towers – 985;
3 – degraded vacuum – 0; 4 – lack of heat consumption for turbine type "R" – 228.6;
5 – reduced options – 5; 6 – other station's loss 478.7 MW

Кроме того, уменьшение размеров ограничений мощности, весьма актуальное в условиях ограниченных возможностей строительства новых ТЭС, может быть достигнуто усовершенствованием работающих градирен путем применения новых технических решений, в частности заменой физически и морально устаревших элементов градирен на более эффективные. Применение описанных выше технологий позволит значительно снизить такие ограничения. Особенно это актуально в связи с вводом Белорусской АЭС, когда потребуются резервные мощности.

По результатам модернизации водоохлаждающего устройства градирни № 1 Гомельской ТЭЦ-2 получены следующие результаты в части снижения ограничения мощности в летний период года:

• увеличилась располагаемая мощность ТЭЦ примерно на 40 МВт в сравнении с состоянием до модернизации (рис. 4), при смешанном режиме работы трех энергоблоков (один – с теплофикационным отбором 100 Гкал/ч и два – с конденсационным) при значениях температуры наружного воздуха 18,6 °С и его относительной влажности 70 % (средне-

месячные метеофакторы для самого жаркого месяца года – июля). При более высоких температурах наружного воздуха (до 30 °C) и условиях, указанных выше, прирост располагаемой мощности ТЭЦ или уменьшение величины ограничения мощности достигает 52 МВт. Охлаждающая способность градирен соответствует фактической;

 при среднемесячных значениях метеофакторов для самого жаркого месяца года и совместной работе двух энергоблоков (одного в конденсационном и одного в теплофикационном режиме (100 Гкал/ч)) ограничений мощности не происходит [10].



Puc. 4. Параметры работы ТЭЦ в зависимости от температуры воздуха *Fig.* 4. Parameters of the operation of the CHP plant depending on the air temperature

## Совершенствование оборотных систем, градирен и их конструкций

Совершенствование оборотных систем, градирен и их конструкций должно производиться комплексно по следующим направлениям.

1. Обеспечение комплексного, эффективного взаимодействия всех элементов циркуляционных систем при различных вариантах работающего оборудования и сочетаний внешних атмосферных факторов при установленной мощности.

2. Разработка и внедрение высокоэффективных градирен нового поколения индивидуально применительно к конкретным системам электростанций и метеорологическим условиям их расположения. Градирни нового поколения должны:

• проектироваться на конкретные метеорологические условия;

• обеспечивать работу электростанций с полной конденсационной нагрузкой в любых климатических зонах;

• обеспечивать температурные значения воды согласно требованиям обеспечения заданной заводом-изготовителем глубины вакуума в конденсаторах паровой турбины;

• изготавливаться из современных конструкционных материалов (предпочтительно из полипропилена);

• иметь большую технологическую оснащенность, позволяющую безаварийно эксплуатировать градирни в различных климатических зонах;

• иметь автоматическое управление работой градирни;

• иметь меньшие значения потерь оборотной воды.

3. Утилизация и использование низкопотенциальной теплоты, непроизводительно выбрасываемой гидроохладителями в атмосферу.

4. Перевод электростанций с прямоточных систем на оборотные с искусственными гидроохладителями-градирнями.

5. Автоматизация и дистанционное управление распределением воды и процессами тепломассообмена в гидроохладителях [3, 11].

6. Разработка и внедрение высокоэффективных мероприятий по противонакипной обработке воды и борьбе с биообрастанием поверхностей теплообмена, с применением современных антисколянтов.

7. Применение малозатратной технологии – дифференцированная плотность орошения при реконструкции и строительстве новых градирен для более равномерного распределения потоков воздуха (за счет применения водоразбрызгивающих сопел разного диаметра выходного отверстия, различная высота полимерного оросителя по сечению градирни и др.).

8. Создание автоматизированных систем управления процессами распределения потоков воздуха в зависимости от эксплуатационных режимов и метеорологических условий (вертикальные жалюзи облегченной конструкции вместо поворотных щитов, возможность их управления в автоматическом режиме, создание метеорологического пункта возле градирен с возможностью измерений метеорологических параметров – скорости и направления ветра, влажности, барометрического давления).

9. Создание и использование компьютерных математических моделей градирен для повышения эффективности работы систем технического водоснабжения ТЭС с целью улучшения их технико-экономических показателей.

Таким образом, только комплексный подход, основанный на анализе и статистике результатов эксплуатации систем технического водоснабжения многих электростанций, позволит повысить надежность и улучшить технико-экономические показатели ТЭС, рационально расходовать денежные средства, оздоровить экологическую ситуацию, снизить потребление невосполняемых энергетических ресурсов, внедрить новые энерго- и ресурсосберегающие технологии в области потребления воды [11].

## выводы

1. В настоящее время высокоэффективные водоохлаждающие устройства градирен полипропиленовой конструкции успешно эксплуатируются по всему миру, в том числе на электростанциях Франции (градирни для АЭС фирмы EDF), России (Нововоронежская и Ростовская АЭС), Украины (Зуевская ТЭС), Беларуси (Гомельская ТЭЦ-2) и т. д.

2. Внедрение нового водоохлаждающего устройства градирни № 1 Гомельской ТЭЦ-2 позволило увеличить охлаждающую эффективность на 4,16 °C за период года с положительными температурами наружного воздуха, дополнительно выработать 4,433 млн кВт·ч электроэнергии в год и соответственно получить экономию топлива 1414 т у. т. за счет улучшения вакуума в конденсаторах турбин.

3. Увеличилась располагаемая мощность ТЭЦ в летний период на 40 МВт, что обеспечило возможность дополнительно включить в работу один турбоагрегат типа T-180/210-130 в конденсационном режиме в летний период года.

4. Результаты работы, опыт реконструкции и модернизации водоохлаждающего устройства градирни № 1 Гомельской ТЭЦ-2 и методика расчета его эффективности могут быть учтены как при реконструкции существующих, так и при строительстве новых вентиляторных и башенных градирен не только на электростанциях Белорусской энергосистемы, но и на других аналогичных объектах промышленных предприятий Республики Беларусь.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1. Берман, Л. Д. Испарительное охлаждение циркуляционной воды / Л. Д. Берман. М.: Госэнергоиздат, 1957. 318 с.
- 2. Кравченко, В. П. Сопоставление охлаждающей способности асбоцементного и сетчатого оросителя башенных градирен / В. П. Кравченко, Е. Н. Морозов, М. П. Галацан // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2011. Т. 2, № 8 (50). С. 13–16.
- Мошкарин, А. В. Современные основы технического перевооружения систем технического водоснабжения тепловых электростанций / А. В. Мошкарин, В. А. Калатузов // Вестник ИГЭУ. 2008. Вып. 2. С. 1–5.
- Зенович-Лешкевич-Ольпинский, Ю. А. Создание и эффективность автоматической системы шариковой очистки конденсатора 180-КЦС-1 турбины Т-180/210-130-1 ЛМЗ.
   Ч. 2 / Ю. А. Зенович-Лешкевич-Ольпинский, А. Ю. Наумов, А. Ю. Зенович-Лешкевич-Ольпинская // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2015. № 4. С. 74–85.
- 5. Методика построения нормативных характеристик градирен испарительного типа: СО 34.22.302–2005. М.: СПО ОРГРЭС, 2005. 15 с.
- Руководство по оптимизации оборотной системы водоснабжения электростанций с градирнями. М.: Минэнерго СССР, 1981. 44 с.
- 7. Бененсон, Е. И. Теплофикационные паровые турбины / Е. И. Бененсон, Л. С. Иоффе. М.: Энергия, 1976. 270 с.
- 8. Ильченко, О. Т. Тепло- и массообменные аппараты ТЭС и АЭС / О. Т. Ильченко. Киев: Вища шк., 1992. 207 с.
- 9. Пономаренко, В. С. Градирни промышленных и энергетических предприятий: справ. пособие / В. С. Пономаренко, Ю. И. Арефьев. М.: Энергоатомиздат, 1998. 376 с.
- 10. Гарантийные испытания градирни № 1 и определение ограничений электрической мощности Гомельской ТЭЦ-2 со стороны системы охлаждения после реконструкции градирни № 1: техн. отчет, № 13.09.92–01. Львов: ЧАО «Техэнерго», 2013.
- 11. Калатузов, В. А. Основы технического перевооружения тепловых и атомных электростанций / В. А. Калатузов // Академия энергетики. 2009. № 4 (30). С. 92–95.
- 12. Дифференциальная модель тепломассообмена в испарительных градирнях / А. П. Солодов [и др.] // Вестник МЭИ. 2005. № 2. С. 43–53.

- Методические указания по определению обеспеченности электрической мощности электростанций циркуляционными системами водоснабжения: РД 153-34.1-22.508–2001. Введ. 01.09.2001. М.: СПО ОРГРЭС, 2001. 56 с.
- 14. Энергетические характеристики оборудования Гомельской ТЭЦ-2 и алгоритм определения нормативного удельного расхода топлива на отпущенную электрическую и тепловую энергии. Гомель: Гомельская ТЭЦ-2, 2008. Т. 2. 156 с.
- Указания по нормированию показателей работы гидроохладителей в энергетике. М.: СПО ОРГРЭС, 1981. 79 с.

Поступила 02.11.2015 Подписана в печать 22.01.2016 Опубликована онлайн 03.08.2016

#### REFERENCES

- 1. Berman L. D. (1957) *Evaporative Cooling of Circulating Water*. Moscow, Gosenergoizdat. 318 (in Russian).
- Kravchenko V. P., Morozov E. N., Galazan M. P. (2011) Comparison of the Cooling Ability of Asbestos Cement Sprinkler and Reticulated Sprinkler of Cooling Towers. *Vostochno-Evropeiskiy Zhurnal Peredovyjh Tekhnologiy* [East European Journal of Advanced Technologies], 2 (8), 13–16 (in Russian).
- Moshkarin A. V., Kalatuzov V. A. (2008) Modern Foundations of Technical Re-Equipment of Technical Water Supply Systems of Heat Power Plants. *Vestnik IGEU* [Herald of Ivanovo Power Engineering Institute], 2, 1–5 (in Russian).
- Zenovich-Leshkevich-Olpinsky Yu. A., Naumov A. Y., Zenovich-Leshkevich-Olpinsky A. Yu. (2015) Designing and Efficiency Effect of Automatic Ball-Cleaning System for Condenser 180-ktss-1 of Turbine T-180/210-130-1 LMZ. Part 2. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii I Energeticheskikh Obedinenii SNG* [Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.], (4), 74–85 (in Russian).
- 5. Standard of the Organization 34.22.302–2005. A method of Constructing the Normative Characteristics of Cooling Towers of Evaporative Type. Moscow, SPO ORGRES, 2005. 15 (in Russian).
- 6. *Manual on Optimizing of Circulating Water System of Power Plants with Cooling Towers*. Moscow: USSR Ministry of Energy, 1981. 44 (in Russian).
- 7. Benenson E. I., Ioffe L. S. (1976) *Central Heating Steam Turbine*. Moscow, Energiya. 270 (in Russian).
- 8. Ilchenko O. T. (1992) *Heat and Mass Transfer Devices of Heat and Nuclear Power Plants*. Kiev, Vysccha shkola. 207 (in Russian).
- 9. Ponomarenko V. S., Aref Yu. I. (1998) *Cooling Towers of industrial and Energy Companies: a Resource Book*. Moscow, Energoatomizdat. 376 (in Russian).
- Technical. Report No 13.09.92–01. Guarantee Tests of Cooling Tower No 1 and the Evaluation of Restrictions of Electric Power to the Gomel CHP-2 by the Cooling System after the Reconstruction of Cooling Tower No 1. Lviv, "Tekhenergo" JSC, 2013. (in Russian, Unpublished).
- 11. Kalatuzov V. A. (2009) Fundamentals of Technical Re-Equipment of Heat and Nuclear Power Plants. *Akademiya Energetiki* [Academy of Power Engineering], 30 (4), 92–95 (in Russian).
- Solodov A. P., Romanenko A. N., Egorova N. V., Ezhov E. V. (2005) Differential Model of Heat and Mass Transfer in Evaporative Cooling Towers. *Vestnik of MEI* [MPEI Vestnik], (2), 43–53 (in Russian).
- RD 153-34.1-22.508–2001. Procedural Guidelines for the Determination of Sufficiency of Electric Power for Circulating Water Supply Systems for Electric Power Plants. Moscow, SPO ORGRES, 2001. 56 (in Russian).
- 14. The Energy Characteristics of the Equipment of the Gomel CHP-2 and the Algorithm for Determining the Normative Specific Fuel Consumption for Delivered Electricity and Thermal Energy. Vol. 2. Gomel: Gomel CHP-2, 2008. 156 (in Russian, Unpublished).
- 15. The Instructions for Rationing the Performance Indicators of Water Coolers in the Energy Sector. Moscow, SPO ORGRES, 1981. 79 (in Russian).

Received: 02.11.2015

Accepted: 22.01.2016

Published online: 03.08.2016

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-4-376-390

УДК 621.311.22: 512.546

# Численное исследование тепловых схем ТЭЦ с помощью их топологических моделей

## В. Н. Романюк<sup>1)</sup>, А. А. Бобич<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь), <sup>2)</sup>РУП «БелТЭИ» (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. Дальнейшее совершенствование использования природного газа в энергетике связано с переходом к парогазовой технологии, прежде всего на теплоэлектроцентралях. Модернизацию технологии преобразования энергии топлива во вторичные энергопотоки эффективнее производить совместно с развитием тепловых схем ТЭЦ путем введения в их структуру тепловых аккумуляторов, абсорбционных бромисто-литиевых тепловых насосов, что обеспечивает не только улучшение энергетических, экономических и экологических показателей модернизации, но и развивает ТЭЦ в плане маневренности. Способность ТЭЦ обеспечивать тепловую нагрузку в полном объеме и без перерасхода топлива изменять мощность потока генерации электроэнергии чрезвычайно актуальна для энергосистемы, в которой доминируют тепловые электростанции и при этом происходит вытеснение из генерации традиционных регуляторов ее мощности. Выполнение подобных проектов требует развития методов расчета тепловых схем ТЭЦ и определения соответствующих показателей. Приведены результаты численного исследования энергетических характеристик ТЭЦ с помощью топологических моделей существующих тепловых схем ТЭЦ, в которые интегрированы абсорбционные бромисто-литиевые тепловые насосы для утилизации вторичных низкотемпературных тепловых потоков систем циркуляционного охлаждения. Приведены пример расчета, результаты оценки термодинамической эффективности ТЭЦ и изменение их энергетических характеристик для различных режимов работы в результате внедрения абсорбционных бромисто-литиевых тепловых насосов в состав ТЭЦ. Определены условия эффективного применения таких насосов, степень повышения термодинамической эффективности, изменения маневренности ТЭЦ повышенных начальных параметров и системная экономия природного газа в условиях Беларуси.

Ключевые слова: тепловые схемы, ТЭЦ, топологическая модель, термодинамическая эф-фективность, природный газ

Для цитирования: Романюк, В. Н. Численное исследование тепловых схем ТЭЦ с помощью их топологических моделей / В. Н. Романюк, А. А. Бобич // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 4. С. 376–390

## Numerical Study of Thermal Schemes of Thermal Power Plants Fulfilled with the Aid of their Topological Models

## V. N. Romaniuk<sup>1)</sup>, A. A. Bobich<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus), <sup>2)</sup>"BelTEI" Republican Unitary Enterprise (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Further improvement of natural gas usage in power industry is associated with transition to the combined-cycle gas technology, primarily at combined heat and power plants (CHP).

Адрес для переписки	Address for correspondence
Романюк Владимир Никанорович	Romaniuk Vladimir N.
Белорусский национальный технический университет	Belarusian National Technical University
просп. Независимости, 65/2,	65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, г. Минск, Республика Беларусь	220013, Minsk, Republic of Belarus
Тел.: +375 17 293-92-16	Tel.: +375 17 293-92-16
pte@bntu.by	pte@bntu.by

Renovation of technology of conversion of fuel energy into heat and electricity flows is effective while it is performed simultaneously with the elaboration of thermal circuits of CHP by insertion heat accumulators and absorption lithium bromide heat pumps (ALBHP) in the structure of CHP; the mentioned insertion amends thermodynamic as well as economic and environmental indicators of CHP renovation and also develops CHP maneuverability. The ability of CHP to provide heat in required quantity, their capacity to change electricity generation output without excessive fuel consumption is extremely relevant for the energy system that incorporates thermal power plants as dominating component. At the same time the displacement of traditional electrical power regulators take place. Implementation of projects of this kind requires the elaboration of CHP flow diagram calculation methods and determining relevant indicators. The results of the numerical study of the energy characteristics of CHP with the aid of the topological models of the existing heat flow diagrams of CHP that incorporate ALBHP for recovery of low-temperature waste of heat flows of systems of cooling water circulating are presented in the article. An example of calculation, the results of the CHP thermodynamic efficiency evaluation, the change of the energy characteristics for different modes of operation of CHP caused by implementation of ALBHP are shown. The conditions for the effective application of lithium bromide absorption heat pumps are specified, as well as the rate of increase of thermodynamic efficiency; the changes of maneuverability of CHP with high initial parameters are identified, the natural gas savings in The Republic of Belarus are determined.

**Keywords:** thermal schemes, combined heat and power plants (CHP), topological model, thermodynamic efficiency, natural gas

For citation: Romaniuk V. N., Bobich A. A. (2016) Numerical Study of Thermal Schemes of Thermal Power Plants Fulfilled with the Aid of their Topological Models. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (4), 376–390 (in Russian)

## Введение

Переход к парогазовым технологиям на ТЭЦ целесообразно осуществлять комплексно с одновременным совершенствованием тепловых схем с помощью мероприятий, обеспечивающих дальнейшее повышение степени использования природного газа и экономическую целесообразность всей модернизации. Одним из таких мероприятий является интеграция в тепловую схему ТЭЦ абсорбционных бромисто-литиевых тепловых насосов (АБТН) для утилизации низкотемпературных тепловых потоков системы циркуляционного охлаждения [1–5]. Кроме улучшения технико-экономических характеристик, установка АБТН на ТЭЦ приводит к повышению маневренности ТЭЦ при сохранении отпуска тепловой энергии, что в условиях, когда за счет резкого увеличения удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении имеет место вытеснение из генерации конденсационных мощностей, приобретает все большую значимость. Для использования современных вычислительных средств и программных пакетов расчета теплофизических свойств рабочих тел и теплоносителей с последующей автоматизацией определения комплекса энергетических характеристик ТЭЦ, условий эффективного применения АБТН необходим переход к использованию топологических моделей для численного исследования тепловых схем ТЭЦ.

## Топологические модели тепловых схем ТЭЦ

Основой топологического исследования является математическая модель, формализующая описание и расчет сложных систем, к которым относятся и ТЭЦ. Разработка математической модели осуществляется путем определения состава, структуры, совокупности режимных и конструктивных параметров, характеристик сырьевых потоков для расчета функции цели с учетом комплекса ограничений.

На начальном этапе создания модели определяются состав элементов и структура схемы [6, 7]. На следующем этапе на основании информации, полученной в результате предварительного обследования объекта моделирования (ТЭЦ с интеграцией в ее состав АБТН для утилизации низкотемпературных тепловых потоков системы циркуляционного охлаждения), формируется его расчетная технологическая схема (рис. 1), которую целесообразно представить в виде графической структуры в соответствии с положениями теории графов. Это позволяет осуществить математически строгое и достаточно наглядное рассмотрение структуры технологической схемы, в которой приняты следующие обозначения: ПКА – паровой котлоагрегат; РНП – расширитель непрерывной продувки; ОД – охладитель дренажа; ХВО – химводоподготовка; ПУВ – подогреватель умягченной воды; ДПСВ – деаэратор подпитки сетевой воды; ДПК – деаэратор подпитки конденсата; ЦВД – цилиндр высокого давления; ЦНД – цилиндр низкого давления; ПВД – подогреватель высокого давления; ПНД – подогреватель низкого давления; Д – деаэратор; К-р – конденсатор; ОСВ – обратная сетевая вода; ПСВ – прямая сетевая вода; СП1, СП2 – сетевые подогреватели; ДГ – дымовые газы; П – пар; ВП – влажный пар; К – конденсат; ЦВ – циркуляционная вода; МЭ – механическая энергия; ЭЭ – электроэнергия; ПВ – питательная вода; НЖ – насыщенная жидкость; НП – насыщенный пар; УВ – умягченная вода; СВ – сырая вода.

Первый шаг данного этапа – кодирование графа, для чего используются две матрицы: структурная и видов связей. В самом графе для этого нумеруются вершины и дуги графа. Для обозначения вершин, например, могут быть использованы римские цифры (I, II и т. д.), для дуг – арабские (1, 2 и т. д.). В итоге расчетная технологическая схема исследуемой системы оказывается представленной в виде ориентированного потокового графа (рис. 2). Упомянутая структурная матрица полностью отображает структуру графа технологической схемы системы и позволяет формализовать перевод ее на математический язык. Далее с помощью того же графа составляется матрица смежности, которая фиксирует наличие связей между элементами рассчитываемой системы и в результате ее математической обработки позволяет установить число контуров схемы и их элементный состав. На следующих шагах разработки топологической модели составляются матрицы процессов и контуров, которые используются для анализа схем: с помощью матрицы процессов устанавливается принадлежность элемента схемы к тому или иному контуру и, в конечном итоге, определяется последовательность расчета схемы; матрица контуров позволяет определить алгоритм расчета.



379



Затем для каждого элемента системы записываются уравнения:

- баланса энергии *k*-го элемента

$$\sum_{J=1}^{N_K} (\gamma Gh)_j + \sum_{n=1}^{P_k} (\gamma E)_n = 0, \qquad (1)$$

где G – расход энергоносителя; h – энтальпия энергоносителя; E – мощность электрической или механической связи; у – коэффициент, учитывающий потери потока в окружающую среду;

- материального баланса для *i*-го энергоносителя в *k*-м элементе

$$\sum_{j=1}^{N_{ki}} G_j = 0.$$
 (2)

В итоге составляется система балансовых уравнений и производится анализ функциональных связей ее параметров. Число параметров в этой системе, как правило, намного превышает количество уравнений. Однако при заданных производительности, конструкции, термодинамических и расходных параметрах установки, избыточных по отношению к числу уравнений, расчет такой системы дает однозначное действительное решение. При этом конкретный допустимый состав совокупности независимых параметров для теплотехнической системы определяется с помощью матрицы функциональных связей, согласно которой для каждого *n*-го уравнения k-го элемента системы оставляется один такой зависимый параметр, определяемый из этого уравнения, который не может быть найден из уравнения балансов для соседнего элемента. Тем самым обеспечивается совместимость уравнений по отдельным элементам и в целом по системе.

Сокращенная система балансовых уравнений имеет следующий вид:

$$\begin{cases} aV_0G_2 + G_2 - G_3 = 0; \\ G_{10} - G_4 - k_1G_{10} = 0; \\ aV_0G_2h_1 + \gamma_2G_2(Q_n^p + h_2) + G_{10}h_{55} - G_4h_4 - G_3h_3 - k_1G_{10}h_{60} = 0; \\ G_4 - G_5 - G_6 - G_7 - G_8 - G_{52} - G_{20} - G_{81} = 0; \\ G_4h_4 - G_5h_5 - G_6h_6 - G_7h_7 - G_8h_7 - G_{52}h_7 - G_{20}h_7 - G_{81}h_7 - E_{42} = 0; \\ G_{52} - G_{13} - G_{16} - G_{24} - G_{26} - G_{27} - G_{30} - G_{43} - G_{44} = 0; \\ G_{52}h_{52} - G_{13}h_{13} - G_{16}h_{16} - G_{24}h_{24} - G_{26}h_{26} - G_{27}h_{27} - G_{30}h_{30} - G_{43}h_{43} - G_{44}h_{44} - E_{40} = 0; \\ E_{40} + E_{42} - E_{41} = 0; \\ G_{20}h_7 - G_{20}h_{20} - Q_{54} = 0; \\ G_{44}h_{44} - G_{44}h_{46} + G_{45}h_{47} - G_{45}h_{45} = 0; \\ G_{45}h_{49} - G_{45}h_{47} + G_{43}h_{43} - G_{43}h_{48} = 0; \\ G_{43} + G_{44} - G_{21} = 0; \\ G_{43}h_{46} + G_{44}h_{48} - G_{21}h_{21} = 0; \end{cases}$$

381

$$\begin{cases} k_2G_{45} + G_{51} - G_{45} = 0; \\ k_2G_{45}h_{50} + G_{51}h_{51} - G_{45}h_{49} = 0; \\ G_{38}h_{38} - G_{38}h_{39} + G_{33}h_{32} - G_{33}h_{37} = 0; \\ G_{34}h_{36} - G_{34}h_{32} - Q_{55} = 0; \\ G_{31}h_{51} + G_{33} - G_{44} - G_{75} = 0; \\ G_{30}h_{51} + G_{33} - G_{44} - G_{75} = 0; \\ G_{30}h_{51} + G_{33} - G_{24} - G_{75} = 0; \\ G_{30}h_{50} + G_{27} - G_{23} = 0; \\ G_{30}h_{50} + G_{27}h_{28} + G_{23}h_{29} - G_{31}h_{31} = 0; \\ G_{27}h_{27} - G_{27}h_{28} + G_{23}h_{29} - G_{23}h_{25} = 0; \\ G_{17} + G_{24} - G_{22} = 0; G_{17}h_{17} + G_{24}h_{24} + G_{23}h_{25} - G_{22}h_{22} - G_{23}h_{23} = 0; \\ G_{19}h_{9} + G_{20}h_{20} + G_{21}h_{21} + G_{22}h_{22} + G_{23}h_{23} - G_{12}h_{18} + G_{81}h_{81} = 0; \\ G_{19}h_{19} + G_{20}h_{20} + G_{21}h_{21} + G_{12}h_{12} = 0; \\ G_{13}h_{15} + G_{16}h_{16} - G_{17}h_{17} + G_{12}h_{18} - G_{12}h_{14} = 0; \\ G_{13}h_{15} - G_{17}h_{17} + G_{12}h_{12} = 0; \\ G_{8}h_{7} + G_{8}h_{78} - G_{9} = 0; \\ G_{8}h_{7} + G_{9}h_{9} + G_{11}h_{11} + G_{12}h_{12} - G_{10}h_{10} = 0; \\ G_{7} + G_{58}h_{58} - G_{9}h_{9} + G_{10}h_{10} - G_{10}h_{59} = 0; \\ G_{6}h_{6} + G_{5}h_{56} - G_{58}h_{38} + G_{10}h_{59} - G_{10}h_{57} = 0; \\ G_{6}h_{5} - G_{58}h_{38} + G_{10}h_{59} - G_{10}h_{57} = 0; \\ G_{6}h_{5} - G_{58}h_{58} - G_{6}h_{5} - G_{58}h_{58} - G_{6}h_{5} = 0; \\ G_{6}h_{6} - G_{17}h_{17} - G_{61}h_{59} - G_{10}h_{57} = 0; \\ G_{6}h_{6} - G_{17}h_{17} - G_{61}h_{61} = 0; \\ G_{6}h_{60} - G_{11}h_{11} - G_{61}h_{61} = 0; \\ G_{6}h_{60} - G_{10}h_{10} - G_{10}h_{59} = 0; \\ G_{6}h_{61} - G_{62} - G_{63} = 0; \\ G_{63}h_{63} - G_{63}h_{64} + G_{50}h_{69} - G_{50}h_{50} = 0; \\ G_{63}h_{63} - G_{68}h_{66} + G_{50}h_{69} - G_{50}h_{50} = 0; \\ G_{62}h_{62} + G_{73}h_{52} + G_{74}h_{70} - G_{19}h_{19} = 0; \\ G_{62}h_{62} - H_{73}h_{26} + H_{74}h_{70} - G_{19}h_{19} = 0; \\ G_{62}h_{62} - H_{73}h_{56} + G_{4}h_{70}h_{70} - G_{9}h_{19} = 0; \\ G_{62}h_{62} - H_{73}h_{56} + G_{7}h_{70}h_{70} - G_{75}h_{52} + G_{81}h_{7} - G_{81}h_{81} = 0; \\ \mu(G_{81}h_{7} - G_{81}h_{81}) - k_{3}G_{51}h_{$$

где  $\alpha$  – коэффициент расхода воздуха;  $V_0$  – теоретический расход воздуха для сжигания единицы топлива, кг/кг;  $G_2$  – расход природного газа, кг/с;

 $G_3$  – то же дымовых газов, кг/с;  $G_4$ ,  $G_5$ ,  $G_6$ ,  $G_7$ ,  $G_8$ ,  $G_{11}$ ,  $G_{13}$ ,  $G_{16}$ ,  $G_{24}$ ,  $G_{26}$ ,  $G_{27}$ , G<sub>30</sub>, G<sub>43</sub>, G<sub>44</sub>, G<sub>52</sub>, G<sub>62</sub>, G<sub>72</sub>, G<sub>73</sub>, G<sub>82</sub> - то же пара, кг/с; G<sub>9</sub>, G<sub>12</sub>, G<sub>17</sub>, G<sub>20</sub>, G<sub>21</sub>,  $G_{22}, G_{23}, G_{58}, G_{81}$  – то же конденсата, кг/с;  $G_{10}$  – то же питательной воды, кг/с;  $G_{19}$ ,  $G_{50}$  – то же подпиточной воды, кг/с;  $G_{31}$ ,  $G_{33}$ ,  $G_{34}$ ,  $G_{75}$  – то же циркуляционной воды, кг/с; G<sub>38</sub> - то же масла, кг/с; G<sub>45</sub>, G<sub>51</sub>, G<sub>77</sub>, G<sub>78</sub> - то же сетевой воды, кг/с;  $G_{60}$ ,  $G_{61}$ ,  $G_{63}$  – то же насыщенной воды, кг/с;  $G_{65}$  – то же сырой воды, кг/с;  $G_{68}$ ,  $G_{71}$ ,  $G_{74}$  – то же умягченной воды, кг/с;  $h_1$  – энтальпия воздуха, кДж/кг;  $h_2$  – то же природного газа, кДж/кг;  $h_3$  – то же дымовых газов, кДж/кг; h<sub>4</sub>, h<sub>5</sub>, h<sub>6</sub>, h<sub>7</sub>, h<sub>11</sub>, h<sub>13</sub>, h<sub>16</sub>, h<sub>24</sub>, h<sub>26</sub>, h<sub>27</sub>, h<sub>30</sub>, h<sub>43</sub>, h<sub>44</sub>, h<sub>62</sub>,  $h_{82}$  – то же пара, кДж/кг;  $h_9$ ,  $h_{12}$ ,  $h_{14}$ ,  $h_{15}$ ,  $h_{17}$ ,  $h_{18}$ ,  $h_{20}$ ,  $h_{21}$ ,  $h_{22}$ ,  $h_{23}$ ,  $h_{25}$ ,  $h_{28}$ ,  $h_{29}$ ,  $h_{46}, h_{48}, h_{56}, h_{58}, h_{81}$  – то же конденсата, кДж/кг;  $h_{10}, h_{55}, h_{57}, h_{59}$  – то же питательной воды, кДж/кг;  $h_{19}$ ,  $h_{50}$ ,  $h_{69}$  – то же подпиточной воды, кДж/кг;  $h_{31}$ ,  $h_{32}, h_{36}, h_{37}$  – то же циркуляционной воды, кДж/кг;  $h_{38}, h_{39}$  – то же масла, кДж/кг; h<sub>45</sub>, h<sub>47</sub>, h<sub>49</sub>, h<sub>51</sub>, h<sub>77</sub>, h<sub>80</sub> – то же сетевой воды, кДж/кг; h<sub>60</sub>, h<sub>61</sub>,  $h_{63}$  – то же насыщенной воды, кДж/кг;  $h_{64}$  – то же воды в дренаж, кДж/кг;  $h_{65}, h_{66}$  – то же сырой воды, кДж/кг;  $h_{70}$  – то же умягченной воды, кДж/кг; ту;  $E_{40}$ ,  $E_{41}$ ,  $E_{42}$  – мощность, кВт;  $Q_{35}$ ,  $Q_{54}$  – тепловая нагрузка, кВт;  $Q_{\rm H}^{\rm p}$  – теплота сгорания, кДж/кг;  $k_1$  – доля продувки;  $k_2$  – то же подпитки теплосети; k<sub>3</sub> – то же сетевой воды на АБТН; µ – отопительный коэффициент АБТН.

Для расчета термодинамических свойств воды и водяного пара и определения их энтальпий использовали уравнения Международной ассоциации по свойствам воды и водяного пара (система уравнений IAPWS-IF97 для вычисления термодинамических свойств воды и водяного пара в промышленных расчетах для давлений от 0 до 100 МПа и температур от 0 до 2273,15 К) [8, 9]. Для расчета процессов, протекающих в паровой турбине, использовали проектно-расчетные данные паровой турбины ПТ-60-130 с учетом реальных энергетических характеристик на различных режимах работы и поправочных коэффициентов конкретной ТЭЦ (рис. 3). В качестве исходных данных задаются тепловая нагрузка, параметры пара, температуры прямой и обратной сетевой воды и др.

В результате решения системы балансовых уравнений вычисляются параметры и расходы потоков в характерных узлах тепловой схемы. Определяются расходы пара, топлива на котел и мощность турбоустановки. Учитываются собственные нужды станции и рассчитывается комплекс энергетических характеристик: удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении ТЭЦ, электрический абсолютный КПД, электрический КПД, коэффициент полезного использования топлива, удельный расход условного топлива (УРТ) на отпуск электроэнергии при заданном УРТ на отпуск тепловой энергии [10].

На основании топологических моделей проведена оценка энергетической эффективности ТЭЦ для двух вариантов тепловых схем: с АБТН и без него.



а – Светлогорская ТЭЦ; b – Бобруйская ТЭЦ-2



## Оценка энергетической эффективности ТЭЦ

Для оценки эффективности комбинированной выработки энергии на ТЭЦ используется комплекс энергетических характеристик, в состав которого включены [10]:

1) абсолютный электрический КПД

$$\eta_{\mathfrak{H},abc} = W_{\mathfrak{H}}/Q_{\text{топл}},\tag{3}$$

где  $W_3$  – производство электроэнергии, ГДж;  $Q_{\text{топл}}$  – теплота процесса горения топлива, ГДж;

2) коэффициент полезного использования топлива

$$\eta_{\rm WT} = (W_{\rm y} + Q_{\rm T})/Q_{\rm TOUL}, \qquad (4)$$

где  $Q_{\rm T}$  – отпуск тепловой энергии, ГДж;

3) термодинамическая эффективность комбинированной системы генерации энергопотоков, которая оценивается эксергетическим КПД [11]:

$$\eta_{\rm e} = (W_{\rm p} + E_a'')/E', \tag{5}$$

где  $E''_q$  – эксергия выходных потоков используемой тепловой энергии, ГДж; E' – эксергетический вход системы, ГДж. Для оценки комбинированной выработки энергии применяются и другие энергетические характеристики, которые вытекают из соотношений (3), (4);

4) электрический КПД

$$\eta_{2} = W_{2}/(Q_{\text{топл}} - Q_{\text{T}}) = \eta_{2,\text{abc}}/(1 - \eta_{\text{ит}} + \eta_{2,\text{abc}});$$
(6)

5) удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении

$$\omega_{\mathfrak{H},q} = W_{\mathfrak{H}}/Q_{\mathrm{T}} = \eta_{\mathfrak{H},\mathrm{adc}}/(\eta_{\mathrm{HT}} - \eta_{\mathfrak{H},\mathrm{adc}}). \tag{7}$$

При рассмотрении перечисленных энергетических характеристик ТЭЦ удобно обратиться к графическому пояснению (рис. 4).



Рис. 4. Сравнение двух источников с комбинированной выработкой энергии при одинаковом коэффициенте использования топлива и различном электрическом абсолютном КПД

*Fig. 4.* Comparison of the two sources with the combined energy production at the same fuel utilization factor and different absolute electrical efficiency

При одинаковом коэффициенте использования топлива совершеннее оказывается ТЭЦ с более высоким электрическим абсолютным КПД;

6) расход топлива для выработки тепловой и электрической энергии на ТЭЦ определяется известным соотношением

$$B = Q_{\text{топл}} / Q_{\text{H}}^{\text{p}}, \tag{8}$$

где  $Q_{\rm H}^{\rm p}$  – низшая теплота сгорания топлива, ГДж/кг.

Необходимость разделения технологического расхода топлива на тепловую и электрическую энергию связана с практикой оценки комбинированного источника по УРТ на выработку электроэнергии, определяемому по физическому методу. В этом случае одним из условий получения правильного результата является использование во всех сравниваемых вариантах одной и той же величины договорного расхода топлива на тепловую энергию независимо от технологического расхода топлива. Тогда можно определить суммарную экономию топлива по изменению УРТ на выработку электроэнергии, для чего рассчитываются следующие показатели;

7) расход топлива на выработку тепловой энергии

$$B_{\rm T} = b_{\rm T} Q_{\rm T},\tag{9}$$

где  $b_{\rm r}$  – удельный расход топлива на выработку тепловой энергии, одинаковый для всех альтернативных вариантов, кг/ГДж;

8) удельный расход топлива на выработку электроэнергии

$$b_{\rm g} = (B - B_{\rm T})/W_{\rm g}.$$
 (10)

После математических преобразований несложно установить связь УРТ на выработку электроэнергии с двумя относительными характеристиками: электрическим абсолютным КПД, коэффициентом полезного использования топлива и договорного УРТ на отпуск тепловой энергии, приведенными ранее (η<sub>ит</sub> и η<sub>э.абс</sub>):

$$b_{\mathfrak{H}} = 1/\eta_{\mathfrak{H}, abc} \ [1/Q_{\mathfrak{H}}^{\mathfrak{p}} - b_{\mathfrak{T}} (\eta_{\mathfrak{H}} - \eta_{\mathfrak{H}, abc})].$$
(11)

Дополняет оценку вариантов расчет термодинамического КПД с помощью соотношения, использующего понятия транзитной эксергии:

$$\eta_e = (\sum E'' - E'') / (\sum E' - E'') = 1 - \sum D / (\sum E' - E'') = E_{\text{ucn}} / E_{\text{pacn}},$$
(12)

где  $\Sigma E''$  – эксергетический выход системы, ГДж; E'' – транзитная эксергия (не претерпевающая ни количественных, ни качественных изменений в технической системе), ГДж;  $\Sigma E'$  – эксергетический вход системы, ГДж;  $\Sigma D$  – суммарные потери эксергии;  $E_{исп}$  – полезная эксергия, ГДж;  $E_{pacn}$  – располагаемая эксергия, ГДж (рис. 5).

Эксергетическая оценка эффективности не нашла широкого применения в энергетике, поскольку для систем производства электроэнергии положения максимумов эксергетического и энергетического КПД совпадают [12].



*Puc. 5.* Схема эксергетических потоков технической системы (TC) *Fig. 5.* Diagram of the exergy flows of the technical system (TS)

Вместе с тем для сравнения вариантов ТЭЦ она полезна наряду с получившей более широкое применение оценкой по суммарному годовому расходу топлива в системе «ТЭЦ – замещающая КЭС – замещающая водогрейная котельная» [13].

# Результаты расчетов энергетических характеристик ТЭЦ с применением топологических моделей

На базе разработанных топологических моделей и приведенной методики оценки энергетической эффективности ТЭЦ проведены расчеты для различных тепловых нагрузок ТЭЦ, в тепловую схему которой интегрирован АБТН. Полученные результаты сравнивались с существующими энергетическими показателями ТЭЦ без АБТН. Результаты расчета даны на рис. 6.

В результате использования АБТН эксергетический, электрический КПД ТЭЦ, коэффициент полезного использования топлива увеличиваются (рис. 6). При этом снижаются: УРТ на отпуск электроэнергии – на 30–50 г/(кВт·ч), расход условного топлива на ТЭЦ – на 2,1–3,2 т/ч, электрическая мощность ТЭЦ – на 4,8–9,3 МВт и удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении ТЭЦ – до 85 кВт·ч/Гкал, что отвечает требованиям энергосистемы в обеспечении нагрузок в ближайшей перспективе с вводом Белорусской АЭС.

387





*Fig. 6.* Comparison of the energy characteristics of CHP of the existing thermal scheme (1) after implementation of the absorption bromine-lithium heat pump (2) (the indications are increasing)

При минимально допустимом пропуске пара в конденсатор, т. е. при постоянном отпуске тепловой энергии от АБТН, эксергетический, электрический КПД, коэффициент полезного использования топлива возрастают, и по мере роста тепловых нагрузок темп роста КПД снижается из-за уменьшения вклада АБТН.

Из приведенной информации следует, что установка АБТН на ТЭЦ целесообразна энергетически и экономически при системной экономии природного газа, что доказано в [1, 3–5].

### выводы

1. Расчеты тепловых схем и их автоматизация для осуществления численного исследования наименее затратно реализовывать на базе топологических моделей.

2. Полученные результаты доказывают существенное улучшение энергетических характеристик ТЭЦ в результате утилизации низкотемпературных тепловых потоков системы охлаждения циркуляционной воды с помощью абсорбционных бромисто-литиевых тепловых насосов, интегрируемых в состав тепловой схемы станции.

### ЛИТЕРАТУРА

- 1. Романюк, В. Н. Абсорбционные или парокомпрессионные тепловые насосы в схемах ТЭЦ / В. Н. Романюк, А. А. Бобич, С. В. Мальков // Энергия и Менеджмент. 2013. № 4–5. С. 7–10.
- 2. Абсорбционные тепловые насосы в тепловой схеме ТЭЦ для повышения ее энергетической эффективности / В. Н. Романюк [и др.] // Энергия и Менеджмент. 2013. № 1. С. 14–19.
- 3. Романюк, В. Н. Абсорбционные тепловые насосы на ТЭЦ Белорусской ОЭС на примере Мозырской ТЭЦ / В. Н. Романюк, А. А. Бобич // Энергия и Менеджмент. 2015. № 1. С. 13–20.
- Романюк, В. Н. Развитие тепловых схем ТЭЦ в условиях Объединенной энергосистемы Беларуси / В. Н. Романюк, А. А. Бобич // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2015. № 4. С. 31–43.
- 5. Романюк, В. Н. Обоснование параметров АБТН для утилизации ВЭР на ТЭЦ с помощью пассивного эксперимента и определение соответствующих изменений различных оценок работы энергосистемы / В. Н. Романюк, А. А. Бобич // Энергия и Менеджмент. 2016. № 1. С. 14–23.
- Попырин, Л. С. Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок / П. С. Попырин. М.: Энергия, 1978. 342 с.
- Седнин, В. А. Моделирование, оптимизация и управление теплотехническими системами: учеб. метод. пособие по курсовому проектированию для студ. энергетич. специализаций по спец. Т.01.02 «Теплоэнергетика» / В. А. Седнин. Минск: БГПА, 2001. 65 с.
- Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam [Электронный ресурс] // International Association for the Properties of Water and Steam. 2014. Режим доступа: http://www.lanomixsoftware. com/steam. Дата доступа: 08.07.2014.
- 9. Александров, А. А. Система уравнений IAPWS-IF97 для вычисления термодинамических свойств воды и водяного пара в промышленных расчетах. Ч. 1: Основные уравнения / А. А. Александров // Теплоэнергетика. 1999. № 9. С. 69–77.
- Андрющенко, А. И. Показатели эффективности сложных систем энергоснабжения и взаимосвязь между ними / А. И. Андрющенко // Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности: материалы IV Рос. науч.-техн. конф., Ульяновск, 24–25 апр. 2003 г. / Ульяновский государственный технический университет. Ульяновск, 2003. С. 12–14.
- 11. Бродянский, В. М. Эксергетический метод и его приложения / В. М. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек. М.: Энергоатомиздат, 1998. 288 с.
- 12. Бродянский, В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа / В. М. Бродянский. М.: Энергия, 1973. 296 с.
- Дудолин, А. А. Исследование влияния климатических условий и типа ГТУ на выбор структуры тепловых схем парогазовых ТЭЦ утилизационного типа / А. А. Дудолин. М.: МЭИ, 2004. 20 с.

Поступила 19.04.2016 Подписана в печать 20.06.2016 Опубликована онлайн 03.08.2016

#### REFERENCES

- Romaniuk V. N., Bobich A. A., Malkov S. V. (2013) Absorption or Vapor Compression Heat Pumps in the Schemes of Thermal Power Plants. *Energiya i Menegment* [Power and Management], 4–5, 7–10 (in Russian).
- Romaniuk V. N., Muslina D. B., Bobich A. A., Kolomytskaia N. A., Bubyr T. V., Malkov S. V. (2013) Absorption Heat Pumps in the Thermal Scheme of a Thermal Power Plant Aimed at the Increase of its Power Efficiency. *Energiya i Menegment* [Power and Management], 1, 14–19 (in Russian).
- 3. Romaniuk V. N., Bobich A. A. (2015) Absorption Heat Pumps at a Thermal Power Plant of the United Power System on the Behalf of the Mozyr Thermal Power Plant. *Energiya i Menegment* [Power and Management], 1, 13–20 (in Russian).
- 4. Romaniuk V. N., Bobich A. A. (2015) Development of the Chp-Thermal Schemes in Contexts of the Consolidated Energy System of Belarus. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii I Energeticheskikh Obedinenii SNG* [Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.], 4, 31–43 (in Russian).
- Romaniuk V. N., Bobich A. A. (2016) Justification of ABTN Parameters for Disposal of Secondary Energy Resources in CHP at Thermal Power Plants by Means of a Passive Experiment and Determining the Appropriate Changes in the Various Estimates of the Power System. *Energiya i Menegment* [Power and Management], 1, 14–23 (in Russian).
- 6. Popyrin P. S. (1978) Mathematical Modeling and Optimization of Thermal Power Plants. Moscow, Energiya. 342 (in Russian).
- 7. Sednin V. A. (2001) *Modeling, Optimization and Control of Thermal Systems.* Minsk, BSPA. 65 (in Russian).
- 8. Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam (2014). *International Association for the Properties of Water and Steam*. Available at: http://www.lanomixsoftware.com/steam. (Accessed 08 June 2014).
- 9. Aleksandrov A. A. (1998) The IAPWS-IF97 Formulation for the Thermodynamic Properties of Water and Steam for Industrial Use. Part 1: Basic Equations. *Teploenergetika* [Heat Power Engineering], 9, 69–77 (in Russian).
- 10. Andryuschchenko A. I. (2003) Indicators of Efficiency of Complex Systems of Energy Supply and the Relationship Between them. *Energosberezhenie v Gorodskom Khoziaistve, Energetike, Promyshlennosti: Materialy IV Ros. Nauch.-Tekhn. Konf.* [Power Saving in Municipal Econome, Power Enginering and Industry. Materials of the IV Russian Scientific-and-Practical Conference]. Ulyanovsk State Technical University. Ulyanovsk, 12–14 (in Russian).
- 11. Brodyansky V. M., Fratcher V., Mihalek K. (1998) *Exergy Method and its Applications*. Moscow, Energoatomizdat. 288 (in Russian).
- 12. Brodyansky V. M. (1973) *Exergy Method of Thermodynamics Analysis*. Moscow, Energiya. 296 (in Russian).
- 13. Dudolin A. A. (2004) Study of the Influence of Climatic Conditions and Type of Gas Turbines to the Choice of the Structure of Thermal Combined-Cycle Recycling-Type CHP. Moscow: Moscow Power Engineering Institute. 20 (in Russian).

Received: 19.04.2016

Accepted: 20.06.2016

Published online: 03.08.2016

### К 100-летию со дня рождения

# Профессор Григорий Ефимович ПОСПЕЛОВ (1916–2013)

11 сентября 2016 года исполняется 100 лет со дня рождения видного ученого в области электрических сетей и энергетических систем, заслуженного деятеля науки и техники Белорусской ССР, доктора технических наук, профессора Григория Ефимовича Поспелова.

Григорий Ефемович родился в г. Бежецке Тверской губернии (ныне Тверская область) России и был первенцем в многодетной семье. В 1923 г. семья переехала на жительство в г. Ташкент (Узбекистан).

В 1940 г. Григорий Ефимович с отличием окончил Среднеазиатский индустриальный институт (энергетический факультет) и был оставлен в нем для дальнейшей работы – вначале в должности старшего лаборанта, а затем ассистента кафедры «Техника высоких напряжений». Также он работал в пусконаладочных бригадах на каскаде Чирчикских гидроэлектростанций под Ташкентом.



С начала Великой Отечественной войны и до мая 1946 г. Г. Е. Поспелов находился в рядах действующей армии и прошел с боями путь от Москвы, Сталинграда, Курска до Вены в составах Западного, Донского, Степного, 2-го и 3-го Украинских фронтов. После демобилизации из армии он вернулся к научно-педагогической деятельности в Ташкентском политехническом институте, где сочетал педагогическую работу с глубокими научными исследованиями, общественной и административной работой, по совместительству работал научным консультантом среднеазиатских отделений институтов «Энергосетьпроект» и «Гидроэнергопроект».

В 1950 г. Г. Е. Поспелов защитил кандидатскую, а в 1961 г. – докторскую диссертации.

В 1961–1963 гг. был заведующим кафедрой «Электрические системы, сети и техника высоких напряжений» Ташкентского политехнического института, а в 1963 г. был приглашен для работы в Белорусский политехнический институт (БПИ, г. Минск), где организовал кафедру «Электрические сети и системы», бессменным заведующим которой оставался до 1990 г. В период становления кафедры в условиях острейшего дефицита кадров Г. Е. Поспелов проявил незаурядные организаторские способности при формировании научнопедагогического коллектива, пригласив на работу перспективных специалистов – выпускников не только БПИ, но и других вузов, уже работавших в производственной сфере. Смог увлечь их научно-педагогической деятельностью, создать атмосферу целеустремленности, творчества, дружелюбия. Прилагал максимум усилий для их научного роста и педагогического мастерства. С момента образования кафедры Григорий Ефимович создал уникальную систему подготовки научных кадров. Впервые на энергетическом факультете БПИ была открыта аспирантура в области электроэнергетических систем и сетей.

Следует отметить широкий спектр тематики диссертационных исследований и особый стиль руководства аспирантами. Григорий Ефимович генерировал идеи и будил творческую мысль аспирантов для развития этих идей, показывал возможности теоретических изысканий и практического приложения результатов исследований. Он обладал талантом видения актуальных перспектив и тенденций науки и одновременно даром распознавания возможностей и развития способностей своих учеников, в которых бесконечно верил и которым во всем старался помочь. Авторитет Григория Ефимовича как научного руководителя привлекал к нему в аспирантуру инженеров и специалистов не только из Беларуси, но и из других республик Советского Союза и стран дальнего зарубежья.

Профессор Г. Е. Поспелов – автор более 500 опубликованных научных и методических работ, в том числе 27 монографий, учебников и учебных пособий, более 20 изобретений, которые находят практическое применение. Известен в научном сообществе оригинальными работами по технико-экономическим проблемам транспорта электроэнергии. В течение 15 лет руководил одним из научных направлений межвузовской комплексной научной программы «Экономия электроэнергии» Минвуза СССР, координируя деятельность в этой области 40 вузов СССР. Участвовал в экспертизе Госплана СССР проектов дальних электропередач. Был членом рабочей группы Советского национального комитета СИГРЭ, членом Научно-методического совета по электроэнергетическому образованию Минвуза БССР, членом секции «Электротехника и энергетика» научно-технического совета Минвуза БССР, членом редколлегии журнала «Энергетика – Известия вузов».

В течение 10 лет Г. Е. Поспелов возглавлял Совет по присуждению ученых степеней по энергетическим специальностям при БПИ, длительное время был главным редактором межведомственного сборника «Электроэнергетика». Он – основатель школы по подготовке инженерных кадров, специалистов высшей квалификации с учеными степенями кандидата и доктора наук в области электроэнергетических систем и электрических сетей в Республике Беларусь. Под его руководством подготовлено более 2000 высококвалифицированных специалистов, инженеров-электриков, которые занимают ведущие посты в министерствах, ведомствах, производственных организациях, проектных и научно-исследовательских институтах, университетах в Республике Беларусь, странах СНГ и дальнего зарубежья. Профессор непосредственно поставил такие основополагающие дисциплины, как «Электрические системы и сети», «Переходные электромеханические процессы в электрических системах», «Дальние электропередачи», «Энергетические системы».

Г. Е. Поспелов создал в Беларуси научную школу в области электроэнергетических систем и систем передачи электроэнергии с широким спектром деятельности. Основными направлениями этой научной школы являются: построение единой теории передачи электрической энергии и энергоэкономический анализ систем электропередач, разработка эффективных методов их расчета и создание новых; разработка новых способов и средств передачи электроэнергии; разработка принципов построения сверхпроводящих систем передачи и накопления электроэнергии; оптимизация параметров и режимов электрических систем и сетей и путей обеспечения качества электроэнергии; развитие научных основ экономии электроэнергии; разработка концептуальных основ, моделей, методов, алгоритмов и программ для оценки режимов, нормирования, снижения и управления уровнем потерь электроэнергии в электрических сетях; совершенствование эксплуатации распределительных сетей, оптимизация систем технического обслуживания и ремонта электрических сетей; улучшение противоаварийного и диспетчерского управления энергосистемами; разработка гибких межсистемных связей на базе электромеханических преобразователей частоты; разработка нормативной базы в области стандартизации систем высшего образования.

Научная работа выполнялась в содружестве с многочисленными научными и учебными организациями, такими как институт «Энергосетьпроект», Всесоюзный НИИ электроэнергетики, Энергетический институт имени Г. М. Кржижановского, Московский энергетический институт, Исследовательский центр проблем качества и подготовки специалистов (г. Москва), Киевский политехнический институт, Сибирский НИИ энергетики, Приазовский государственный технический университет, Институт тепло- и массообмена Академии наук Белоруссии, Белостокская политехника (Польша), Словацкий технический университет (г. Братислава), Университет г. Камагуэй (Куба) и др.

В рамках научной школы подготовлен 81 кандидат наук, из которых впоследствии семеро стали докторами наук. Непосредственно под руководством Г. Е. Поспелова 56 аспирантов из Беларуси, России, Украины, Узбекистана, Казахстана, Германии, Болгарии, Сирии, Иордании, Вьетнама подготовили и защитили кандидатские диссертации.

За боевые заслуги и плодотворную научную и педагогическую деятельность профессор Г. Е. Поспелов награжден орденами Красной Звезды, Отечественной войны 2-й степени и 12 медалями, многочисленными почетными грамотами Министерства энергетики Республики Беларусь, Министерства образования Республики Беларусь, Белорусского национального технического университета, знаками «Отличник энергетики Республики Беларусь», «Почетный энергетик Республики Беларусь», «80 лет плана ГОЭЛРО».