



Ивановский государственный энергетический университет

Вестник Ивановского государственного энергетического университета (Вестник ИГЭУ)

Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta (Vestnik IGEU)

Журнал издается с 2001 года

ISSN 2072-2672

Индекс 18079

Вып. 2 /2021

Учредитель: ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

С.В. Тарарыкин, д-р техн. наук (Иваново)
(главный редактор)
Е.Р. Пантелеев, д-р техн. наук (Иваново)
(зам. главного редактора)
Е.Н. Бушуев, д-р техн. наук (Иваново)
А.Р. Гайдук, д-р техн. наук (Таганрог)
В.П. Жуков, д-р техн. наук (Иваново)
Ю.Б. Казаков, д-р техн. наук (Иваново)
С.В. Ключина (Иваново)
А.Р. Колганов, д-р техн. наук (Иваново)
С.В. Косяков, д-р техн. наук (Иваново)
В.В. Курейчик, д-р техн. наук (Таганрог)
В.Е. Мизонов, д-р техн. наук (Иваново)
М.Ш. Мисриханов, д-р техн. наук (Москва)
В.Ф. Очков, д-р техн. наук (Москва)
А.И. Тихонов, д-р техн. наук (Иваново)
В.А. Шуин, д-р техн. наук (Иваново)

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

D. Antić, профессор (Сербия)
H. Berthiaux, профессор (Франция)
H. Otwinowski, доктор (Польша)
K. Tannous, профессор (Бразилия)
J.-C. Vannier, профессор (Франция)

Над номером работали:

Ответственные за выпуск: Е.Н. Бушуев, В.А. Шуин,
А.И. Тихонов, А.Р. Колганов, В.Е. Мизонов, С.В. Косяков

Начальник УИУНЛ
Технический редактор
Редактор

С.В. Ключина
Н.В. Королева
С.М. Коткова

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

А.А. Надеев, А.В. Бараков, Д.А. Прутских, В.Ю. Дубанин, А.М. Наумов. Экспериментальное исследование конвективной сушки с центробежным псевдоожиженным слоем.....**5**

И.И. Комаров, Д.М. Харламова, А.Н. Вегера, В.Ю. Наумов. Исследование влияния CO₂ разбавителя на горение топлива в метан-кислородных камерах сгорания..... **14**

В.А. Горбунов, С.Г. Андрианов, С.С. Коновальцева. Оценка влияния радиационного теплообмена на параметры температурных полей твэлов различного конструктивного исполнения.....**23**

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

И.М. Богачков, Р.Н. Хамитов. Алгоритм выбора класса напряжения для системы электроснабжения газового месторождения...**32**

А.В. Гусенков, А.А. Дьячков, В.Д. Лебедев, А.М. Соколов, Т.Е. Шадриков. Комплексная методика расчета несинусоидальных систем переменного тока повышенной частоты.....**40**

МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Ю.Д. Кутумов, В.Е. Мизонов, Т.Ю. Шадрикова, А.И. Тихонов. Ячеечная модель переходных тепловых процессов в подземном электрическом кабеле и окружающем грунте.....**55**

В.П. Жуков, А.Е. Барочкин, М.С. Боброва, А.Н. Беляков, С.И. Шувалов. Матричный метод решения обратной задачи теплопередачи в теплообменных аппаратах.....**62**

С.К. Улыбышев, Б.А. Староверов. Имитационная модель перераспределения тепловых потоков в системе управления отоплением в здании.....**70**

Журнал «Вестник Ивановского государственного энергетического университета» включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, утвержденных ВАК Министерства образования и науки РФ для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук и ученой степени доктора наук по следующим группам специальностей: 05.09.00 – Электротехника; 05.13.00 – Информатика, вычислительная техника и управление; 05.14.00 – Энергетика.

Предоставляется информация об опубликованных статьях в систему РИНЦ согласно договору № 580-12/2012 ЛО от 13 декабря 2012 г. с ООО «Научная электронная библиотека».

Журнал зарегистрирован в базе данных Ulrich's (США).



Ivanovo State Power Engineering University

Bulletin of the Ivanovo State Power Engineering University (Bulletin ISPEU)

The Journal has been published since 2001

ISSN 2072-2672

Issue 2 / 2021

Founder: Federal State-Financed Educational Institution of Higher Professional Education «Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin»

EDITORIAL BOARD:

S.V. Tararykin, Doctor of Engineering (Ivanovo)
(Chief Editor)
E.R. Panteleev, Doctor of Engineering (Ivanovo)
(Chief Editor Assistant)
E.N. Bushuyev, Doctor of Engineering (Ivanovo)
A.R. Gaiduk, Doctor of Engineering (Taganrog)
V.P. Zhukov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
Yu.B. Kazakov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
S.V. Klyunina (Ivanovo)
A.R. Kolganov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
S.V. Kosyakov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
V.V. Kureychik, Doctor of Engineering (Taganrog)
V.E. Mizonov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
M.Sh. Misrikhanov, Doctor of Engineering (Moscow)
V.F. Ochkov, Doctor of Engineering (Moscow)
A.I. Tikhonov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
V.A. Shuin, Doctor of Engineering (Ivanovo)

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD:

D. Antić, Professor (Serbia)
H. Berthiaux, Professor (France)
H. Otwinowski, Doctor (Poland)
K. Tannous, Professor (Brazil)
J.-C. Vannier, Professor (France)

The issue is prepared by:

Responsible people for the issue: E.N. Bushuyev,
V.A. Shuin, A.I. Tikhonov, A.R. Kolganov, V.E. Mizonov,
S.V. Kosyakov

Chief of Educational and Scientific
Literature Publishing Office
Technical Editor
Editor

S.V. Klyunina
N.V. Koroleva
S.M. Kotkova

CONTENT

HEAT AND POWER ENGINEERING

A.A. Nadeev, A.V. Barakov, D.A. Prutskikh, V.Y. Dubanin, A.M. Naumov. Experimental study of convective dryer with centrifugal fluidized bed.....**5**

I.I. Komarov, D.M. Kharlamova, A.N. Vegera, V.Y. Naumov. Study on effect CO₂ diluent on fuel combustion in methane-oxygen combustion chambers.....**14**

V.A. Gorbynov, S.G. Andrianov, S.S. Konovaltseva. Assessment of radiation heat transfer influence on parameters of temperature fields of various design fuel rods.....**23**

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

I.M. Bogachkov, R.N. Khamitov. Algorithm to select the voltage class for the gas field electricity supply system.....**32**

A.V. Gusenkov, A.A. Dyachkov, V.D. Lebedev, A.M. Sokolov, T.E. Shadrikov. Integrated methodology to calculate nonsinusoidal AC systems of high frequency.....**40**

METHODS OF MATHEMATICAL SIMULATION

Y.D. Kutumov, V.E. Mizonov, T.Y. Shadrikova, A.I. Tikhonov. Cell model of transient heat processes in underground electric cable and surrounding ground.....**55**

V.P. Zhukov, A.Ye. Barochkin, M.S. Bobrova, A.N. Belyakov, S.I. Shuvalov. Matrix method to solve the inverse problem of heat transfer in heat exchangers.....	62
S.K. Ulybyshev, B.A. Staroverov. Imitation model of heat flows distribution in building heating control system	70

The Journal «Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University» is included in the List of Leading Reviewed Scientific Journals and Publications, which are approved by the State Commission for Academic Degrees and Titles for publishing the main scientific results of the dissertations on the candidate and doctoral degrees for the following groups of specialities: 05.09.00 – Electrical Engineering; 05.13.00 – Informatics, Computer Science and Management; 05.14.00 – Power Engineering.

Information about published articles is sent to the Russian Science Citation Index by agreement with «Scientific Electronic Library» Ltd. No. 580-12/2012 LO of December 13, 2012.

The journal is registered in the foreign database Ulrich's Periodicals Directory.

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 66.096.5

Александр Александрович Надеев

ФГБОУВО «Воронежский государственный технический университет», кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и промышленной теплоэнергетики, Россия, Воронеж, e-mail: anadeev@cchgeu.ru

Александр Валентинович Бараков

ФГБОУВО «Воронежский государственный технический университет», доктор технических наук, профессор кафедры теоретической и промышленной теплоэнергетики, Россия, Воронеж, e-mail: abarakov@cchgeu.ru

Дмитрий Александрович Прутских

ФГБОУВО «Воронежский государственный технический университет», кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и промышленной теплоэнергетики, Россия, Воронеж, e-mail: dprutskikh@cchgeu.ru

Владимир Юрьевич Дубанин

ФГБОУВО «Воронежский государственный технический университет», кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и промышленной теплоэнергетики, Россия, Воронеж, e-mail: vdubanin@cchgeu.ru

Александр Михайлович Наумов

ФГБОУВО «Воронежский государственный технический университет», кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и промышленной теплоэнергетики, Россия, Воронеж, e-mail: anaumov@cchgeu.ru

Экспериментальное исследование конвективной сушилки с центробежным псевдоожиженным слоем

Авторское резюме

Состояние вопроса. Среди всех тепломассообменных установок, применяемых в настоящее время в промышленности, особое место занимают аппараты с псевдоожиженным слоем. В первую очередь это связано с высокоразвитой поверхностью взаимодействия между оживающим агентом (воздухом) и дисперсными материалами в таких аппаратах, их небольшим гидравлическим сопротивлением, относительно простой конструкцией и малыми габаритами. При этом особый интерес представляют аппараты с центробежным псевдоожиженным слоем, который формируется в кольцевом канале рабочей камеры при подаче оживающего агента в слой под фиксированным углом. В настоящее время известно ограниченное количество экспериментальных и теоретических исследований гидродинамики и тепломассообмена в таком слое. Кроме того, эти исследования проводились в основном применительно к регенеративным теплообменным аппаратам и абсорберам. В связи с этим продолжение таких исследований применительно к аппаратам другого назначения, например сушилкам, представляется весьма актуальным. Результаты этих исследований являются научной базой для разработки инженерной методики расчета таких установок и их конструирования.

Материалы и методы. Исследование выполнено на экспериментальной установке с использованием средств измерения температуры, относительной влажности воздуха, дифференциального давления, скорости воздуха, влажности твердых веществ. В качестве вторичного прибора использован

ПИД-регулятор TPM 148. Регистрация экспериментальных данных осуществлена в SCADA-системе MasterSCADA. Их обработка проведена с помощью интерполяции кубическими сплайнами.

Результаты. Подробно описана экспериментальная установка, позволяющая проводить полнофакторный эксперимент по исследованию гидродинамических и тепловых параметров конвективной сушилки с центробежным псевдооживленным слоем. Приведены результаты предварительной серии экспериментов, в которых в качестве дисперсного материала использовался силикагель. В результате визуальных наблюдений за дисперсным материалом в рабочей камере определены значения минимальной и максимальной скорости сушильного агента. Получены графические зависимости гидравлического сопротивления рабочей камеры и высоты слоя материала от скорости сушильного агента и массы материала, а также температуры и влажности материала и сушильного агента от времени сушки.

Выводы. Полученные результаты позволяют определить конструктивные и эксплуатационные параметры сушильной установки с центробежным псевдооживленным слоем и выбрать вентилятор для подачи сушильного агента.

Ключевые слова: дисперсный материал, псевдооживленный слой, теплоноситель, гидродинамика, тепломассообмен, экспериментальное исследование

Aleksandr Aleksandrovich Nadeev

Voronezh State Technical University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Theoretical and Industrial Heat Power Engineering Department, Russia, Voronezh, e-mail: anadeev@cchgeu.ru

Aleksandr Valentinovich Barakov

Voronezh State Technical University, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Theoretical and Industrial Heat Power Engineering Department, Russia, Voronezh, e-mail: abarakov@cchgeu.ru

Dmitry Aleksandrovich Prutskikh

Voronezh State Technical University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Theoretical and Industrial Heat Power Engineering Department, Russia, Voronezh, e-mail: dprutskikh@cchgeu.ru

Vladimir Yurievich Dubanin

Voronezh State Technical University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Theoretical and Industrial Heat Power Engineering Department, Russia, Voronezh, e-mail: vdubanin@cchgeu.ru

Aleksandr Mikhailovich Naumov

Voronezh State Technical University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Theoretical and Industrial Heat Power Engineering Department, Russia, Voronezh, e-mail: anaumov@cchgeu.ru

Experimental study of convective dryer with centrifugal fluidized bed

Abstract

Background. Nowadays, the units with a fluidized bed hold a special place among all heat-mass transfer plants currently used in industry. First of all, it is due to the highly developed surface of interaction between the fluidizing agent (air) and dispersed materials in such units, their low hydraulic resistance, relatively simple design and small sizes. At the same time, the units with a centrifugal fluidized bed, which is formed in an annular channel of the working chamber when a fluidizing agent is added under the fixed angle, are of particular interest. Currently, a limited number of experimental and theoretical studies of hydrodynamics and heat-mass transfer in a fluidized bed are known. Besides, these studies were carried out mainly in respect to regenerative heat exchangers and absorbers. In this regard, such studies in respect to the devices for other purposes, such as dryers, seem to be relevant. The results of these studies are the scientific background for development of an engineering calculation methodology of such units and their design.

Materials and methods. The study has been carried out based on an experimental plant using means for measuring temperature, relative air humidity, differential pressure, air velocity, and moisture content of solids. A TPM 148 PID controller has been used as a secondary device. Experimental data have been recorded in MasterSCADA SCADA system. Data processing has been carried out using interpolation by cubic splines.

Results. The article describes in detail an experimental plant that allows carrying out a full factor experiment to study the hydrodynamic and thermal parameters of a convective dryer with a centrifugal fluidized bed. The article presents the results of a preliminary series of experiments in which silica gel is used as a dispersed material. As a result of visual observations over the dispersed material in the working chamber, the values of the minimum and maximum speed of the drying agent have been determined. The graphic relationship of the hydraulic resistance of the working chamber and the height of the material layer are obtained depending on

the speed of the drying agent and the mass of the material, as well as the temperature and moisture content of the material and the drying agent depending on the drying time.

Conclusions. The results obtained make it possible to determine the design and operational parameters of the centrifugal fluidized bed drying plant and select a fan to supply the drying agent.

Key words: dispersed material, fluidized bed, heat-transfer agent, hydrodynamics, heat-mass transfer, experimental study

DOI: 10.17588/2072-2672.2021.2.005-013

Введение. Среди всех установок, применяемых в промышленности для организации процессов тепло- и массообмена, важное место занимают аппараты с псевдооживленным слоем. Это связано с высокой интенсивностью межфазного теплообмена в таких аппаратах, их небольшим гидравлическим сопротивлением, малыми габаритами и относительно простой конструкцией [1, 2]. Все вышеперечисленное обусловило, в частности, наличие в промышленности широкого модельного ряда сушилок дисперсных материалов, реализующих данный технологический принцип [3, 4]. Поэтому разработка и исследование новых, энергоэффективных конструкций и протекающих в них процессов является актуальной задачей, имеющей теоретическое и прикладное значение.

Методы исследования. На рис. 1 приведена схема лабораторного сушильного аппарата, реализующего данный теплотехнологический принцип. Его особенностью является применение одного из видов псевдооживленного слоя – центробежного, который формируется в кольцевом канале аппаратов, имеющих цилиндрическое поперечное сечение, при подаче воздуха в слой под заданным углом к горизонтальной плоскости. Воздействие на частицы материала центробежных сил приводит к дополнительной интенсификации процессов тепло- и массообмена, в том числе, за счет разрушения возникающих в слое газовых пузырьков [5, 6]. Кроме этого, применение такого слоя позволяет упростить конструкцию самого аппарата за счет исключения специального механизма для перемещения дисперсного материала.

Рабочая камера 1 аппарата имеет диаметр и высоту 0,4 м. Кольцевой канал, в котором осуществляется формирование центробежного псевдооживленного слоя, образуется корпусом рабочей камеры и ее внутренней конической стенкой 2, имеющей диаметр основания 0,2 м. Для визуального наблюдения за процессом псевдо-

оживления часть корпуса выполнена из органического стекла.

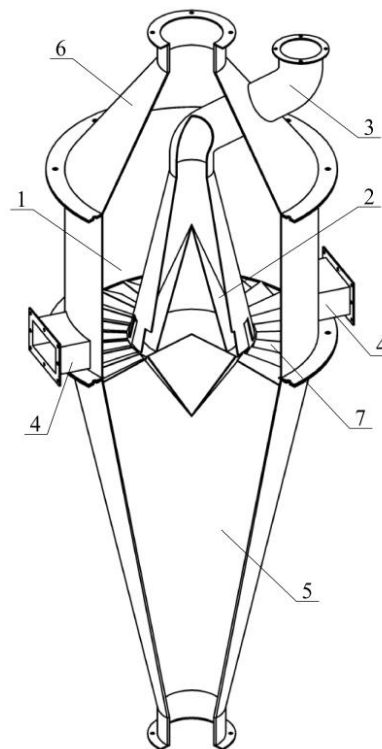


Рис. 1. Схема лабораторного аппарата с центробежным псевдооживленным слоем: 1 – рабочая камера; 2 – внутренняя стенка; 3 – загрузочное устройство; 4 – разгрузочные окна; 5, 6 – газовые камеры; 7 – газораспределительное устройство

Аппарат работает по принципу периодического чередования циклов сушки. Процесс полной загрузки рабочей камеры исходным дисперсным материалом производится через загрузочное устройство 3. Процесс полной выгрузки обработанного материала осуществляется через разгрузочные окна 4, оснащенные перегородками. Газовые камеры 5 и 6 служат для подачи и отвода теплоносителя соответственно.

Газораспределительное устройство 7 аппарата представляет собой жалюзийную решетку, изготовленную из листового металла в виде сплошного диска толщиной 0,7 мм. Ее схема приведена на рис. 2.

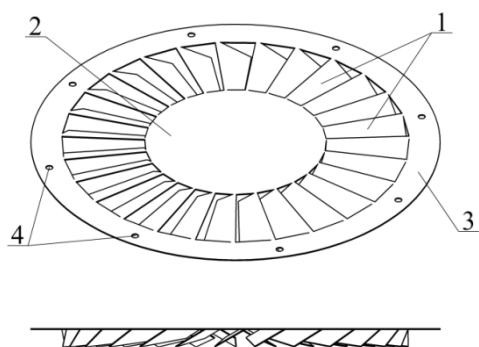


Рис. 2. Схема газораспределительного устройства: 1 – лопатки; 2 – центральная часть; 3 – периферийная часть; 4 – крепежные отверстия

В металлическом диске устройства выполнены лопатки 1, соединяющие его периферийную часть 3 с центральной частью 2. На периферийной части выполнены отверстия 4 для крепления решетки к аппарату. Решетка имеет 32 лопатки длиной 200 мм, наклоненные к горизонтальной плоскости на угол 20° . Для предотвращения провала частиц в газовую камеру над газораспределительной решеткой устанавливается металлическая сетка с площадью ячейки 1 мм^2 .

Поскольку ранее в основном широко исследовались регенеративные теплообменные аппараты и абсорберы с центробежным псевдоожиженным слоем [5–7],

нами были проведены экспериментальные исследования гидродинамики сушильного аппарата и процесса теплообмена между материалом и теплоносителем.

Для проведения экспериментальных исследований был создан испытательный стенд, принципиальная схема которого представлена на рис. 3.

Для подачи теплоносителя (воздуха) в аппарат 1 применяется центробежный вентилятор 2 типа Ц10-28 №4. В соединяющем их воздуховоде 3 установлен электрокалорифер 4 типа СФОЦ-25/0,5, предназначенный для нагрева холодного воздуха до рабочей температуры. Его мощность регулируется автоматически с помощью твердотельного реле 5, подключенного к ПИД-регулятору 6 типа ТРМ 148. Для плавного управления производительностью вентилятора служит частотный преобразователь 7 типа Delta VFD150E43A. Для измерения скорости теплоносителя служит термоанемометр 8 типа ТТМ-2/4-06. Его первичный преобразователь ТТМ-2-04 установлен в канале воздуховода 3. Скорость воздуха перед газораспределительной решеткой определяется через уравнение неразрывности потока (постоянства расхода).

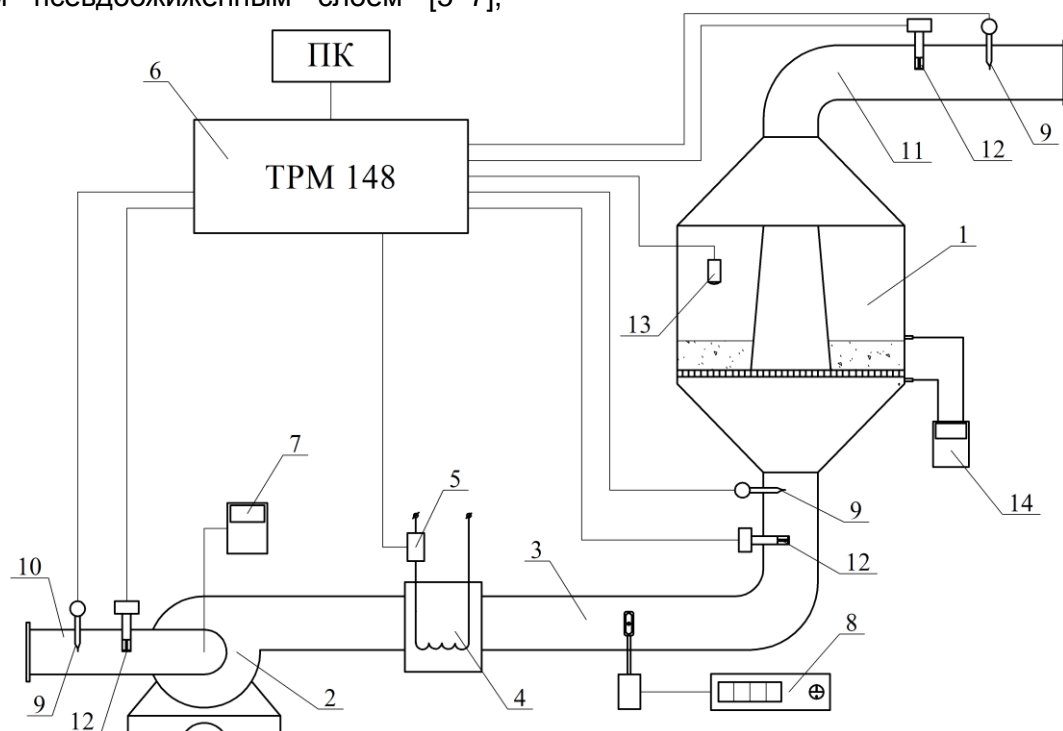


Рис. 3. Схема испытательного стенда: 1 – сушильный аппарат; 2 – вентилятор; 3 – воздуховод; 4 – электрокалорифер; 5 – реле; 6 – ПИД-регулятор; 7 – частотный преобразователь; 8 – термоанемометр; 9 – датчики температуры; 10 – всасывающий патрубок; 11 – воздуховод; 12 – датчики влажности; 13 – ИК-датчик температуры; 14 – микроманометр

Для измерения температуры воздуха применяются термоэлектрические преобразователи 9 типа ТП-2088. Они установлены во всасывающей патрубке вентилятора 10, в воздуховоде 3 и в воздуховоде 11, который предназначен для выброса отработанного воздуха в окружающую среду. Аналогично установлены датчики влажности 12 типа Galltec+Mela FRC 3/5, предназначенные для измерения относительной влажности воздуха. В рабочей камере аппарата над газораспределительной решеткой установлен инфракрасный датчик температуры 13 типа MoreSunsDIY, предназначенный для измерения температуры поверхности дисперсного материала.

Все датчики температуры и влажности подключены к ПИД-регулятору 6. Регистрация опытных данных осуществляется с помощью персонального компьютера в SCADA-системе MasterSCADA. Периодичность опроса всех датчиков – 1 секунда.

Дифференциальный микроманометр 14 типа ДМЦ-01М предназначен для измерения гидравлического сопротивления рабочей камеры. Всего по диаметру рабочей камеры установлено 3 микроманометра. Измеряемые ими значения перепада давления усреднялись.

Пределы суммарной абсолютной погрешности измерения температуры и влажности (датчик + ПИД-регулятор) составляют: для температуры воздуха $\Delta t_b = \pm 2,7^\circ\text{C}$; для влажности воздуха $\Delta \varphi = \pm 2,2\%$; для температуры материала $\Delta t_r = \pm 2,1^\circ\text{C}$. Погрешность измерения перепада давления составляет $\Delta p = \pm 2,0\text{ Па}$.

Результаты исследования. Целью первой серии экспериментов являлось исследование гидравлического сопротивления аппарата. Основные потери давления приходятся на рабочую камеру. Они состоят из потерь давления на газораспределительном устройстве и потерь при прохождении теплоносителя через слой дисперсного материала. В общем случае при одинаковой скорости теплоносителя суммарные потери давления являются простой суммой этих величин [4].

Данные эксперименты проводились на «холодной» модели (без нагрева воздуха) для нескольких дисперсных материалов, имеющих шарообразную форму. Основные измерения произведены с использованием сухого силикагеля, имеющего средний эквивалентный диаметр частиц

3,8 мм и плотность 780 кг/м^3 . В общей сложности было проведено 7 экспериментов, которые отличались массой дисперсного материала в рабочей камере M_r , кг. Отдельно проведено измерение гидравлического сопротивления газораспределительного устройства.

Результаты экспериментального исследования гидравлического сопротивления рабочей камеры аппарата ΔP , Па, при разных значениях скорости воздуха перед газораспределительным устройством v_b , м/с, приведены на рис. 4.

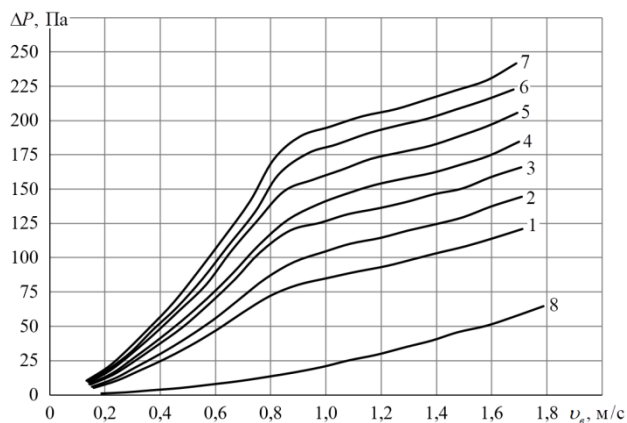


Рис. 4. Гидравлическое сопротивление рабочей камеры: 1 – $M_r = 0,6\text{ кг}$; 2 – $M_r = 0,8\text{ кг}$; 3 – $M_r = 1,0\text{ кг}$; 4 – $M_r = 1,2\text{ кг}$; 5 – $M_r = 1,4\text{ кг}$; 6 – $M_r = 1,6\text{ кг}$; 7 – $M_r = 1,8\text{ кг}$; 8 – без материала

Анализ полученных результатов (рис. 4) показывает, что увеличение скорости воздуха и массы материала приводит к увеличению гидравлического сопротивления рабочей камеры. Излом кривых 1–7 при $v_b = 0,8\text{ м/с}$ соответствует началу вибрации частиц материала. При этом также наблюдалось перемещение некоторых частиц из глубины слоя к его поверхности. Скорость воздуха, при которой формируется стабильный центробежный псевдоожиженный слой, равна примерно $1,4\text{ м/с}$ для каждого исследованного режима. Унос самых мелких и поврежденных частиц начинается при скорости воздуха $1,7\text{ м/с}$.

Таким образом, в диапазоне существования центробежного псевдоожиженного слоя гидравлическое сопротивление рабочей камеры не превышает 250 Па при максимальной массе материала $1,8\text{ кг}$.

Газораспределительное устройство (рис. 4, кривая 8) обладает небольшим гидравлическим сопротивлением, не превышающим 75 Па при максимальной ско-

рости воздуха, соответствующей началу уноса частиц.

Помимо гидравлического сопротивления в данных экспериментах фиксировалась высота слоя дисперсного материала H , мм, являющаяся одной из важнейших его характеристик. Для этого на части корпуса рабочей камеры, выполненной из оргстекла, нанесены отметки. С учетом достаточно ровной поверхности центробежного слоя [7, 8] погрешность измерения высоты (уровня) визуальным методом составляет $\pm 2,0$ мм. Изменение высоты центробежного слоя показано на рис. 5.

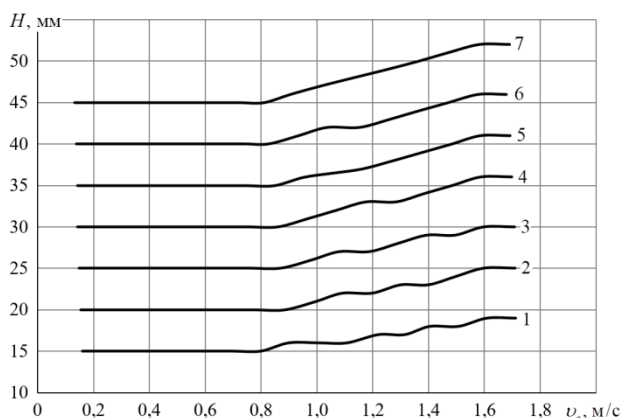


Рис. 5. Высота слоя дисперсного материала: 1 – $M_T = 0,6$ кг; 2 – $M_T = 0,8$ кг; 3 – $M_T = 1,0$ кг; 4 – $M_T = 1,2$ кг; 5 – $M_T = 1,4$ кг; 6 – $M_T = 1,6$ кг; 7 – $M_T = 1,8$ кг

Анализ полученных результатов (рис. 5) показывает, что до скорости воздуха 0,8 м/с слой находится в неподвижном состоянии. Постепенное увеличение скорости воздуха выше данного значения приводит к расширению слоя и его переходу в псевдоожиженное состояние, причем чем выше начальная высота слоя, тем больше он расширяется к началу уноса частиц. Например, при $M_T = 0,6$ кг высота слоя в неподвижном состоянии составляет $H_0 = 15$ мм, в псевдоожиженном состоянии – $H_{пс} = 19$ мм, т.е. высота увеличилась на 4 мм. При $M_T = 1,8$ кг высота слоя составляет $H_0 = 45$ мм, $H_{пс} = 52$ мм, т.е. высота увеличилась на 7 мм. Следует отметить, что максимальная высота центробежного псевдоожиженного слоя, согласно исследованиям [7, 8], не может превышать 15 см, что связано с уменьшением центробежных сил с высотой слоя.

Целью второй серии экспериментов являлось получение экспериментальных данных по интенсивности тепломассообмена и кинетике сушки в исследуемом аппара-

те. Основными параметрами, позволяющими судить об интенсивности процесса сушки, а также составляющими математическое описание данного процесса [9, 10], являются: начальная температура (t'_r , °C) и влажность (ϕ' , %) теплоносителя; конечные температура (t''_r , °C) и влажность (ϕ'' , %) теплоносителя; температура (t_m , °C) и влагосодержание (u , кг/кг) материала.

В качестве дисперсного материала в данной серии экспериментов применялся предварительно увлажненный силикагель. В [11] отмечено, что в аппаратах с высокой интенсивностью тепломассообмена можно производить сушку (восстановление, регенерацию) силикагелей в низкотемпературном режиме. Поэтому, а также исходя из условий эксплуатации используемых датчиков влажности, максимальная начальная температура теплоносителя в данном исследовании составляла 55 °C.

Порядок проведения данной серии экспериментов следующий. Сначала сушильный аппарат выводился на рабочий режим с заданной начальной температурой и скоростью теплоносителя. Затем в рабочую камеру аппарата загружался влажный дисперсный материал, имеющий начальную массу M_{T0} , кг, и начальное влагосодержание u_0 , кг/кг. В процессе сушки из рабочей камеры через заданные интервалы времени отбирались небольшие пробы материала (5–10 грамм). Влагосодержание каждой пробы измерялось с помощью анализатора влажности. Остальные параметры процесса фиксировались в SCADA-системе. Время сушки во всех режимах составляло от 25 до 30 мин, после чего осуществлялась выгрузка высушенного материала.

Всего было исследовано и обработано 15 режимов работы аппарата с температурой теплоносителя $t'_r = 35; 40; 45; 50; 55$ °C и его скоростью $v_{r0} = 1,4; 1,5; 1,6$ м/с. Начальные параметры силикагеля для каждого режима следующие: $M_{T0} = 1,0; 1,2; 1,4$ кг; $u_0 = 0,32; 0,53; 0,82$ кг/кг. Также с помощью датчиков, установленных во всасывающей трубке вентилятора, фиксировались температура (t_0 , °C) и влажность (ϕ_0 , %) воздуха в помещении. Для всех режимов работы аппарата температура t_0 изменялась в диапазоне от 24 до 28 °C, влажность ϕ_0 – в диапазоне от 25 до 35 %. Обработка данных по кинетике сушки осуществлялась

по методике, описанной в [12]. Для проверки воспроизводимости опытных данных каждый режим работы аппарата исследовался не менее трех раз.

На рис. 6, 7, 8 показано протекание процесса сушки силикагеля с $M_{т0} = 1,0$ кг и $u_0 = 0,82$ кг/кг для трех режимов $v_{т0} = 1,4$ м/с; $t'_r = 35; 45; 55$ °С. Продолжительность процесса $\tau = 25$ мин.

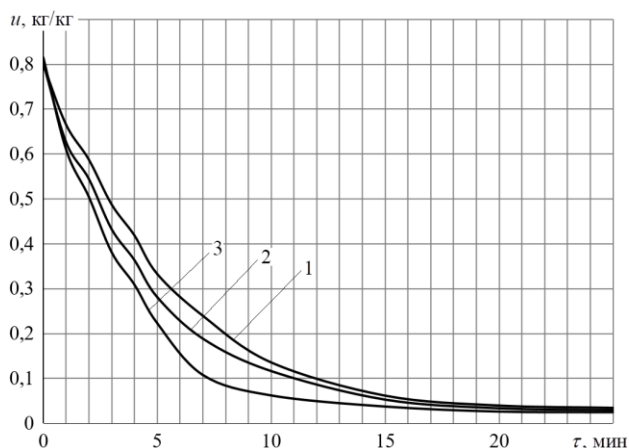


Рис. 6. Изменение влагосодержания дисперсного материала: 1 – $t'_r = 35$ °С; 2 – $t'_r = 45$ °С; 3 – $t'_r = 55$ °С

На рис. 6 показано изменение влагосодержания силикагеля в процессе высушивания (кривые сушки материала).

Анализ полученных кривых (рис. 6) показывает, что для первого режима ($t'_r = 35$ °С) процесс удаления влаги завершается к 17-й минуте, для второго режима ($t'_r = 45$ °С) – к 15-й минуте, для третьего режима ($t'_r = 55$ °С) – к 13-й минуте. Конечное (равновесное) влагосодержание материала u_p практически не изменяется и равно 0,035 кг/кг.

На рис. 7 показано изменение температуры теплоносителя и материала. На кривых нагрева материала можно выделить три периода [2]. Начальный период соответствует прогреву силикагеля, его продолжительность для рассматриваемых режимов составляет 30–40 секунд. В этом периоде происходит понижение температуры материала t_r до температуры мокрого термометра t_m , равной 13–15 °С. Значительное понижение температуры материала обусловлено явлением испарительного охлаждения. Возникновение данного явления связано с высоким начальным влаго-

содержанием силикагеля и интенсивным удалением влаги из него [13].

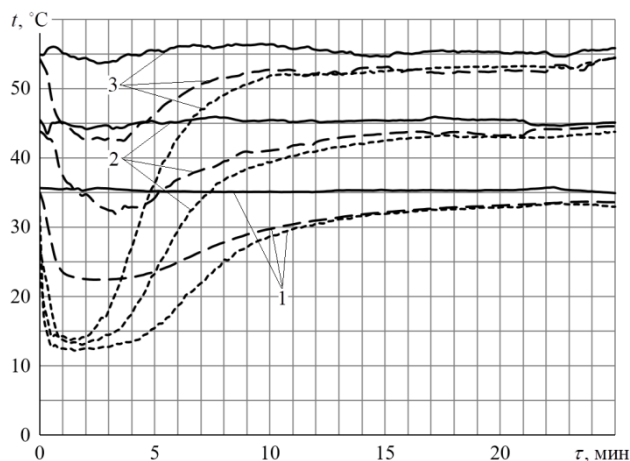


Рис. 7. Изменение температуры теплоносителя и материала: — — — — t'_r ; — — — — t_r ; - - - - t'' ; 1 – $t'_r = 35$ °С; 2 – $t'_r = 45$ °С; 3 – $t'_r = 55$ °С

Характерным признаком периода постоянной скорости сушки (первый период) является постоянство температуры материала, его продолжительность составляет от 2 до 3 минут для рассматриваемых режимов. В этом периоде наблюдается снижение конечной температуры теплоносителя t'' (рис. 7) и увеличение его конечной влажности φ'' (рис. 8).

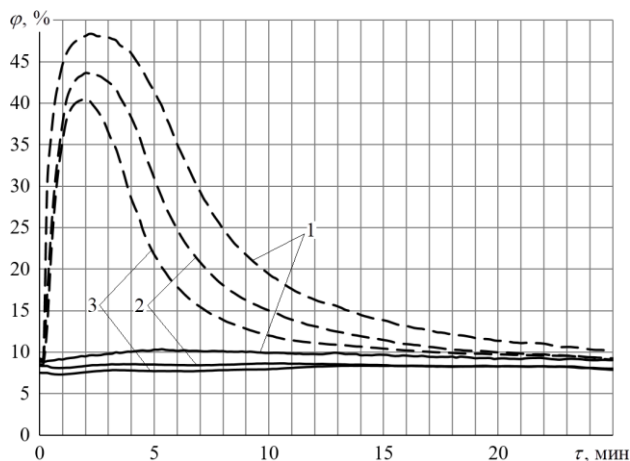


Рис. 8. Изменение влажности теплоносителя (воздуха): — — — — φ' ; — — — — φ'' ; 1 – $t'_r = 35$ °С; 2 – $t'_r = 45$ °С; 3 – $t'_r = 55$ °С

Для подачи теплоносителя (воздуха) в аппарат 1 применяется центробежный вентилятор 2 типа Ц10-28 №4. В соединяющем их воздуховоде 3 установлен электрокалорифер 4 типа СФОЦ-25/0,5, пред-

назначенный для нагрева холодного воздуха до рабочей температуры. Его мощность регулируется автоматически с помощью твердотельного реле 5, подключенного к ПИД-регулятору 6 типа ТРМ 148. Для плавного управления производительностью вентилятора служит частотный преобразователь 7 типа Delta VFD150E43A. Для измерения скорости теплоносителя служит термоанемометр 8 типа ТТМ-2/4-06. Его первичный преобразователь ТТМ-2-04 установлен в канале воздуховода 3. Скорость воздуха перед газораспределительной решеткой определяется через уравнение неразрывности потока (постоянства расхода).

Критическое влагосодержание материала, соответствующее переходу из первого периода во второй, для первого режима имеет значение $u_{кр} = 0,47$ кг/кг, для второго режима $u_{кр} = 0,52$ кг/кг. Следует отметить, что вид кривой сушки (рис. 6) характерен для капиллярно-пористых тел, к которым относится силикагель [2, 11].

Анализ данных режимов работы аппарата показал, что увеличение температуры теплоносителя приводит к возрастанию интенсивности удаления влаги из материала, а также уменьшению продолжительности первого периода сушки и всего цикла. Увеличение начальной массы материала в рабочей камере приводит к увеличению продолжительности цикла сушки и небольшому снижению ее интенсивности. Снижение начальной влажности материала приводит к уменьшению продолжительности цикла.

Выводы. Экспериментально доказано, что скорость сушильного агента (ожигающего газа) в аппарате с центробежным псевдооживленным слоем применительно к силикагелю лежит в диапазоне от 1,4 до 1,6 м/с, при этом гидравлическое сопротивление рабочей камеры не превышает 250 Па. Это позволяет использовать для подачи сушильного агента низконапорные вентиляторы. Полученные результаты удовлетворительно совпадают с аналогичными данными других авторов [7, 8].

Эксперименты подтвердили гипотезу об интенсивности процессов межфазного тепло- и массообмена между дисперсным материалом и сушильным агентом (около 200 Вт/(м²·К)). Это позволяет снизить температуру сушильного агента, что особенно

важно при сушке термолабильных материалов.

Полученные зависимости и рекомендации являются новыми и могут быть использованы для расчета и конструирования сушильных установок с центробежным псевдооживленным слоем дисперсного материала.

Список литературы

1. **Handbook** of Industrial Drying / Edited by A.S. Mujumdar. – Boca Raton: CRC Press, 2015. – 1352 p.
2. **Муштаев В.И., Ульянов В.М.** Сушка дисперсных материалов. – М.: Химия, 1988. – 352 с.
3. **Handbook** of Fluidization and Fluid-Particle Systems / Edited by W.-C. Yang. – New York: Marcel Dekker, Inc., 2003. – 1868 p.
4. **Романков П.Г., Рашковская Н.Б.** Сушка во взвешенном состоянии. – М.: Химия, 1979. – 272 с.
5. **Фалеев В.В., Бараков А.В.** Исследование межфазного теплообмена в регенеративном теплообменнике с дисперсной насадкой // Промышленная энергетика. – 2003. – № 6. – С. 35–37.
6. **Агапов Ю.Н., Медведев Д.И.** Экспериментальное исследование теплообмена в центробежном псевдооживленном слое // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2003. – № 7.3. – С. 153–158.
7. **Боев С.В., Агапов Ю.Н., Стогней В.Г.** Экспериментальное исследование гидродинамики аппарата для очистки газов с центробежным слоем насадки // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2009. – Т. 5, № 5. – С. 22–24.
8. **Экспериментальное** исследование гидродинамики регенеративного воздухоподогревателя для котлоагрегата малой производительности / Ю.Н. Агапов, В.Г. Стогней, М.А. Хаустов, С.И. Некрасов // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2010. – Т. 6, № 5. – С. 11–13.
9. **The asymptotic** solution of model equations for heat capacities of fluidized bed phases / A.V. Barakov, A.P. Byrdin, V.Yu. Dubanin, A.A. Nadeev // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 891. – P. 012325. DOI: 10.1088/1742-6596/891/1/012325.
10. **Бырдин А.П., Надеев А.А., Сидоренко А.А.** Двухпараметрическая асимптотика для модели процессов обмена в динамическом слое // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2015. – Т. 11, № 4. – С. 115–118.
11. **Pramuang S., Exell R.H.B.** The regeneration of silica gel desiccant by air from a solar heater with a compound parabolic concentrator //

Renewable Energy. – 2007. – V. 32(1). – P. 173–182. DOI: 10.1016/j.renene.2006.02.009.

12. **Methods** for processing experimental drying kinetics data / I.C. Kemp, B.C. Fyhr, S. Laurent, et al. // *Drying Technology*. – 2001. – Vol. 19 (1). – P. 15–34. DOI: 10.1081/DRT-100001350.

13. **Trojosky M.** Rotary drums for efficient drying and cooling // *Drying Technology*. – 2019. – Vol. 37(5). – P. 632–651. DOI: 10.1080/07373937.2018.1552597.

References

1. Mujumdar, A.S. *Handbook of Industrial Drying*. Boca Raton: CRC Press, 2015. 1352 p.

2. Mushtaev, V.I., Ul'yanov, V.M. *Sushka dispersnykh materialov* [Drying of dispersed materials]. Moscow: Khimiya, 1988. 352 p.

3. Yang, W.-C. *Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems*. New York: Marcel Dekker, Inc, 2003. 1868 p.

4. Romankov, P.G., Rashkovskaya, N.B. *Sushka vo vzveshennom sostoyanii* [Drying in a suspended state]. Moscow: Khimiya, 1979. 272 p.

5. Faleev, V.V., Barakov, A.V. Issledovanie mezhfaznogo teploobmena v regenerativnom teploobmennike s dispersnoy nasadkoy [Investigation of interphase heat transfer in a regenerative heat exchanger with dispersed packing elements]. *Promyshlennaya energetika*, 2003, no. 6, pp. 35–37.

6. Agapov, Yu.N., Medvedev, D.I. Eksperimental'noe issledovanie teploobmena v tsentrobeznom psevdoozhizhennom sloe [Experimental study of heat transfer in a centrifugal fluidized bed]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2003, no. 7.3, pp. 153–158.

7. Boev, S.V., Agapov, Yu.N., Stogney, V.G. Eksperimental'noe issledovanie gidrodinamiki aparata dlya ochistki gazov s tsentrobezhnym sloem

nasadki [Experimental study of the hydrodynamics of a gas purifier with a centrifugal layer of packing elements]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2009, vol. 5, no. 5, pp. 22–24.

8. Agapov, Yu.N., Stogney, V.G., Khaustov, M.A., Nekrasov, S.I. Eksperimental'noe issledovanie gidrodinamiki regenerativnogo vozdukhopodogrevatelya dlya kotloagregata maloy proizvoditel'nosti [Experimental study of the hydrodynamics of a regenerative air heater for a low-capacity boiler unit]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2010, vol. 6, no. 5, pp. 11–13.

9. Barakov, A.V., Byrdin, A.P., Dubanin, V.Yu., Nadeev, A.A. The asymptotic solution of model equations for heat capacities of fluidized bed phases. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 891, pp. 012325. DOI: 10.1088/1742-6596/891/1/012325.

10. Byrdin, A.P., Nadeev, A.A., Sidorenko, A.A. Dvukhparametricheskaya asimptotika dlya modeli protsessov obmena v dinamicheskom sloe [Two-parameter asymptotics for the model of exchange processes in the dynamic layer]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2015, vol. 11, no. 4, pp. 115–118.

11. Pramuang, S., Exell, R.H.B. The regeneration of silica gel desiccant by air from a solar heater with a compound parabolic concentrator. *Renewable Energy*, 2007, vol. 32 (1), pp. 173–182. DOI: 10.1016/j.renene.2006.02.009.

12. Kemp, I.C., Fyhr, B.C., Laurent, S., Roques, M.A., Groenewold, C.E., Tsotsas, E., Sereno, A.A., Bonazzi, C.B., Bimbenet, J.-J., Kind, M. Methods for processing experimental drying kinetics data. *Drying Technology*, 2001, vol. 19(1), pp. 15–34. DOI: 10.1081/DRT-100001350.

13. Trojosky, M. Rotary drums for efficient drying and cooling. *Drying Technology*, 2019, vol. 37(5), pp. 632–651. DOI: 10.1080/07373937.2018.1552597.

УДК 662.611.2

Иван Игоревич Комаров

ФГБОУВО «Национальный исследовательский университет “МЭИ”», кандидат технических наук, доцент кафедры инновационных технологий наукоемких отраслей, Россия, Москва, e-mail: komarovii.mpei@gmail.com

Дарья Михайловна Харламова

ФГБОУВО «Национальный исследовательский университет “МЭИ”», аспирант кафедры инновационных технологий наукоемких отраслей, Россия, Москва, e-mail: daria-rostov@yandex.ru

Андрей Николаевич Вегера

ФГБОУВО «Национальный исследовательский университет “МЭИ”», аспирант кафедры инновационных технологий наукоемких отраслей, Россия, Москва, e-mail: vegeraan@gmail.com

Владимир Юрьевич Наумов

ФГБОУВО «Национальный исследовательский университет “МЭИ”», инженер кафедры инновационных технологий наукоемких отраслей, Россия, Москва, e-mail: naumovvu@mpei.ru

Исследование влияния CO₂ разбавителя на горение топлива в метан-кислородных камерах сгорания¹

Авторское резюме

Состояние вопроса. Замкнутые газотурбинные циклы на сверхкритическом диоксиде углерода – перспективное направление развития энергетики с точки зрения повышения энергетической эффективности и минимизации выбросов парниковых газов. Горение метана с кислородом в камере сгорания происходит не в среде азота атмосферного воздуха, а в среде углекислого газа – рабочего тела цикла, который является ингибитором химических реакций. Большое массовое содержание подобного разбавителя реагирующей смеси в объеме камеры приводит к рискам возникновения значительного химического недожога, снижению КПД камеры сгорания и цикла в целом. Цель исследования – изучение кинетических параметров горения метана с кислородом в среде сверхкритического CO₂ разбавителя для обеспечения надежного и стабильного горения топлива путем оценки степени ингибирующего воздействия CO₂ и определения его допустимого количества в зоне активного горения камеры сгорания.

Материалы и методы. Исследование проведено методом численного моделирования турбулентно-кинетических процессов горения метана в камере сгорания с использованием редуцированного механизма горения метана в программном комплексе Ansys Fluent.

Результаты. Проведено исследование влияния CO₂ разбавителя на горение топлива в метан-кислородных камерах сгорания. Установлено, что стабилизация факела в объеме камеры сгорания происходит при массовой доле CO₂ разбавителя, подаваемого в смеси с окислителем, не более 0,46–0,5, добавление дополнительного CO₂ разбавителя формирует локальные зоны с пониженной температурой, что приводит к торможению процессов горения. При этом должны быть исключены подмеси охлаждающего CO₂ в зону стабилизации факела.

Выводы. Полученные результаты позволяют сформулировать следующие рекомендации по организации процесса горения в камере сгорания: в камеру сгорания должно подаваться не более 20 % от общего содержания углекислого газа; для стабилизации факела и сокращения его длины необходима установка лопаток для завихрения топлива и окислителя в смеси с CO₂ на входе в камеру сгорания; подача CO₂ на охлаждение должна осуществляться не менее чем в 130 мм от устья горелки.

Ключевые слова: Цикл Аллама, газотурбинный цикл, диоксид углерода, камера сгорания, химическая кинетика, нормальная скорость распространения пламени, реакционный механизм, стабилизация пламени, устойчивое горение

Ivan Igorevich Komarov

National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of Innovative Technologies for High-Tech Industries Department, Russia Moscow, e-mail: komarovii.mpei@gmail.com

¹ Исследование выполнено в НИУ “МЭИ” при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № FSWF-2020-0020.

This study conducted by Moscow Power Engineering Institute was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FSWF-2020-0020).

Daria Mikhajlovna Kharlamova

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Postgraduate of Innovative Technologies for High-Tech Industries Department, Russia Moscow, e-mail: daria-rostov@yandex.ru

Andrej Nikolaevich Vegera

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Postgraduate of Innovative Technologies for High-Tech Industries Department, Russia Moscow, e-mail: vegeraan@gmail.com

Vladimir Yurevich Naumov

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Engineer of Innovative Technologies for High-Tech Industries Department, Russia Moscow, e-mail: naumovvy@mpei.ru

Study on effect CO₂ diluent on fuel combustion in methane-oxygen combustion chambers

Abstract

Background. Studying closed gas turbine cycles on supercritical carbon dioxide is currently a promising issue in the development of power energy sector in terms of increasing energy efficiency and minimizing greenhouse gas emissions into the atmosphere. Combustion of methane with oxygen in the combustion chamber occurs not in the nitrogen environment, but in the environment of carbon dioxide, that is the working fluid of the cycle, which is an inhibitor of chemical reactions. A large mass content of such a diluent of the reaction mixture in the volume of the chamber leads to the risks of significant chemical underburning, efficiency decrease of the combustion chamber and the cycle as a whole. The aim of the research is to study the kinetic parameters of the combustion of methane with oxygen in a supercritical CO₂ diluent medium to ensure reliable and stable combustion of fuel by assessing the degree of the inhibitory effect of CO₂ and determining its permissible amount in the active combustion zone of the combustion chamber.

Materials and methods. The research method is a numerical simulation of turbulent-kinetic processes of methane combustion in the combustion chamber using the reduced methane combustion mechanism. Ansys Fluent software package has been used.

Results. The authors have studied the impact of CO₂ diluent on fuel combustion in methane-oxygen combustion chambers. It is found that the combustor flame stabilization takes place if the content of CO₂ diluent supplied to the mixture with oxidizer is 0,46–0,5 of mass fraction; additional CO₂ diluent forms local low temperature zones which slow down the combustion process. When this happens, adding cooling CO₂ into the flame stabilization zone should be eliminated.

Conclusions. The study has found that no more than 20 % of the total carbon dioxide content should be supplied to the combustion chamber; to stabilize the flame and reduce its length, it is necessary to install blades to swirl the fuel and oxidizer mixed with CO₂ at the inlet of the combustion chamber; CO₂ supply for cooling should be carried out not less than 130 mm away from the burner mouth.

Key words: Allam cycle, gas turbine cycle, carbon dioxide, combustor, chemical kinetics, normal flame propagation velocity, reaction mechanism, flame stabilization, stable combustion

DOI: 10.17588/2072-2672.2021.2.014-022

Введение. Энергетически эффективное и экологически безопасное производство электроэнергии – одна из важнейших задач XXI века. Основная доля электроэнергии производится за счет сжигания органического топлива на тепловых электрических станциях, работающих по циклам Ренкина, Брайтона и Брайтона-Ренкина. Продукты горения топливно-воздушной смеси, содержащие большое количество парниковых газов, выбрасываются в окружающую среду, способствуя росту их концентрации в атмосфере Земли. К тому же присутствие атмосферного азота в зоне горения приводит к образованию токсичных

выбросов (оксидов азота), снижение которых до около нулевых значений является труднодостижимой задачей для классической энергетики [1, 2]. Решить проблему выбросов вредных веществ в атмосферу при производстве электроэнергии на ТЭС можно за счет создания замкнутых термодинамических циклов с кислородным сжиганием топлива (кислородно-топливных энергетических комплексов). Отличительной особенностью и вместе с тем основным преимуществом данных технологий производства электроэнергии, по сравнению с традиционными, является кислородное сжигание органического топлива, со-

проводящееся образованием водяного пара и углекислого газа. Дioxid углерода может быть отделен от пара с минимальными затратами энергоресурсов путем конденсации последнего.

Цикл Аллама, принципиальная схема которого представлена на рис. 1, на сегодняшний день является одним из наиболее перспективных кислородно-топливных энергетических циклов с точки зрения достижения максимальной энергетической эффективности и экологичности [3, 4].

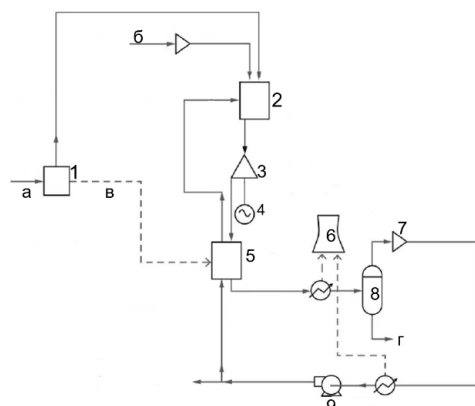


Рис. 1. Принципиальная тепловая схема цикла Аллама на природном газе: 1 – установка разделения воздуха; 2 – камера сгорания; 3 – турбина; 4 – электрогенератор; 5 – теплообменник; 6 – охлаждение; 7 – компрессор CO₂; 8 – сепаратор воды; 9 – насос CO₂; а – воздух; б – природный газ; в – тепло от воздухоразделительной установки; г – H₂O

Для внедрения кислородно-топливных энергетических комплексов (КТЭК) необходимо решить целый ряд научно-технических задач, включая разработку теоретических основ создания энергетического оборудования, работающего на сверхкритическом диоксиде углерода, в частности конструкции камеры сгорания (КС). Исследование влияния диоксида углерода одновременно со сверхкритическим давлением на входе в КС на стабильность процесса горения необходимо для разработки принципиального дизайна камеры, так как от этого напрямую зависит надежность ее работы, тепловая экономичность кислородно-топливного цикла и объем накапливающихся в рабочем теле неконденсирующихся газов, в частности CO, O₂, H₂, радикалов Н, ОН и других веществ, являющихся продуктами неполного сгорания топлива.

Изменение компонентного состава и термодинамических параметров рабочей

среды предопределяет изменение характера процесса горения. В камере сгорания КТЭК горение природного газа с кислородом происходит в среде CO₂ разбавителя при давлении 300 бар, что сильно отличает условия работы от классических камер сгорания ГТУ, где давление не превышает 30 бар и разбавителем является атмосферный азот.

Согласно литературным данным [5], углекислый газ является ингибитором химических реакций, скорость распространения пламени в среде O₂-CO₂ меньше, чем в смеси O₂-N₂ при одинаковой концентрации разбавителя и прочих равных условиях. Эффект торможения реакций горения в среде CO₂ разбавителя обусловлен отличием его физических свойств от N₂, который также выступает разбавителем в камерах сгорания, но не оказывает столь сильного ингибирующего воздействия. Влияние изменения разбавителя на процесс горения объясняется отличиями в свойствах веществ, таких как удельная теплоемкость, теплопроводность, вязкость, коэффициент диффузии (табл. 1). Удельная теплоемкость CO₂ выше теплоемкости N₂ при сопоставимых температурах, поэтому для достижения одинаковой температуры пламени при сжигании в углекислотной среде требуется большая концентрация окислителя. Теплопроводность и вязкость CO₂ и N₂ при равных температурах близки, а коэффициент диффузии CO₂ примерно на 20 % ниже по сравнению с N₂, что приводит к ухудшению условий смесеобразования и диффузии компонентов реакций в среде CO₂ [6–9].

Таблица 1. Теплоемкость и коэффициент диффузии N₂ и CO₂

Параметр	N ₂		CO ₂	
Температура, °C	500	1000	500	1000
Удельная теплоемкость c_p , кДж/кг·°C	1,08	1,20	1,16	1,30
Коэффициент диффузии D , см ² /с	0,51	1,64	0,39	1,31
Коэффициент теплопроводности λ , Вт/м·К	39,0	68,6	33,3	69,1

Влияние давления на кинетику горения и скорость распространения пламени не однозначно. В [6] показано, что с повышением давления нормальная скорость распространения пламени линейно снижа-

ется. В [7, 8] установлено, что если скорость горения смеси при атмосферном давлении ниже 0,5 м/с, то с возрастанием давления она будет уменьшаться, если скорость горения при атмосферном давлении выше 0,5 м/с, то с возрастанием давления она будет увеличиваться. Причины неоднозначной зависимости скорости горения от давления на сегодняшний день малоизучены.

В [9] с использованием многореакционного механизма горения GRI-Mesh 3.0 выполнен комплекс теоретических исследований влияния параметров работы КТЭК, в частности массового содержания разбавителя в зоне активного горения $\text{CO}_2/(\text{CO}_2+\text{O}_2)$ γ , на основной параметр химической кинетики – нормальную скорость распространения пламени.

В ходе исследований определены основные зависимости физико-химических процессов окисления горючей смеси $\text{CH}_4\text{-O}_2$ в среде CO_2 разбавителя и сделаны следующие основные выводы:

- CO_2 разбавитель является ингибитором химических реакций. При прочих равных условиях скорость нормального распространения пламени в среде CO_2 разбавителя в 4 раза меньше скорости распространения пламени в среде N_2 разбавителя (рис. 2);
- сверхкритическое давление в камере сгорания приводит к снижению нормальной скорости распространения пламени (рис. 3);
- сокращение количества CO_2 разбавителя в зоне активного горения на 20 % позволяет повысить нормальную скорость распространения пламени более чем в 8 раз при прочих равных условиях (рис. 4).

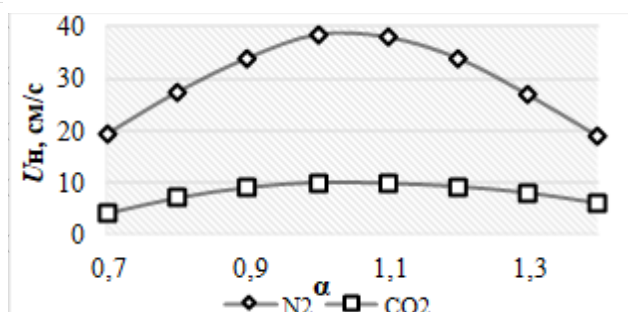


Рис. 2. Нормальная скорость распространения пламени в среде N_2 и CO_2 разбавителей ($\gamma = 0,79$) при атмосферном давлении и $T_{\text{твс}} = 300 \text{ K}$

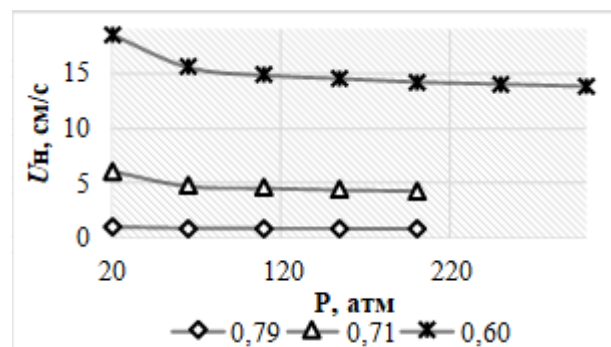


Рис. 3. Нормальная скорость распространения пламени от давления и массовой концентрации CO_2 разбавителя γ при $T_{\text{твс}} = 300 \text{ K}$

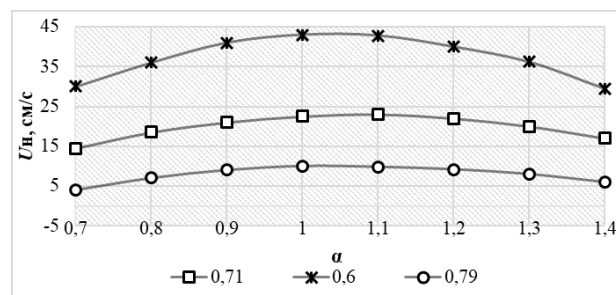


Рис. 4. Нормальная скорость распространения пламени от содержания CO_2 разбавителя при атмосферном давлении ($T_{\text{твс}} = 300 \text{ K}$)

Отметим, что детальное исследование химии процессов горения проводится с использованием моделей реакторов идеального смешения. В реальных камерах сгорания идеальное перемешивание компонентов труднодостижимо, поэтому в условиях, когда необходимо полагаться на движения газов, т. е. на крупные вихри и турбулентность, для эффективного перемешивания компонентов реакции данный подход может давать некорректные результаты.

Целью данного исследования является изучение совместного влияния давления и изменения типа разбавителя в условиях турбулентно-кинетического взаимодействия реагирующих сред для предоставления информации о структуре и форме факела в объеме камеры сгорания.

Объект исследования. Объектом исследования является камера сгорания кислородно-топливного энергетического цикла.

Для определения массовой доли CO_2 разбавителя в камере сгорания КТЭК необходимо определить расход топлива, требуемый для догрева углекислого газа от тем-

пературы 660 до 1083 °С, как того требует рассматриваемый цикл.

Расход топлива можно определить исходя из простого уравнения теплового баланса:

$$Q_{\text{физ}}^{\text{CO}_2} + Q_{\text{физ}}^{\text{O}_2} + Q_{\text{хим}}^{\text{CH}_4} = Q_{\text{физ}}^{(\text{CO}_2 + \text{ПГ})}, \quad (1)$$

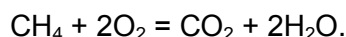
где $Q_{\text{физ}}^{\text{CO}_2}$ – физическая теплота углекислого газа на входе в камеру сгорания, кВт; $Q_{\text{физ}}^{\text{O}_2}$ – физическая теплота кислорода, кВт; $Q_{\text{хим}}^{\text{CH}_4}$ – теплота сгорания метана, кВт; $Q_{\text{физ}}^{(\text{CO}_2 + \text{ПГ})}$ – физическая теплота CO_2 и продуктов горения метана в кислороде.

Физическая теплота определяется по уравнению

$$Q_{\text{физ}}^{\text{эл-та}} = c_k t_k G_k, \quad (2)$$

где c_k – теплоемкость при заданном давлении и температуре, кДж/кг·°С; t_k – температура, °С; G_k – расход, кг/с.

Для определения количества требуемого метана необходимо знать удельные выходы продуктов горения при горении 1 кг топлива. Для этого составим уравнение горения метана с кислородом:



С учетом мольной массы каждого из элементов получаем, что на 1 кг метана требуется 4 кг кислорода (O_2), при этом образуется 2,75 кг CO_2 и 2,25 кг H_2O . Необходимый расход топлива составляет 0,015 кг CH_4 на 1 кг CO_2 . На расчетные 560 кг CO_2 требуется всего 8,1 кг CH_4 и 32,4 кг O_2 .

В большинстве ГТУ используется несколько камер сгорания, однако массовое соотношение метана, кислорода и углекислого газа в каждой из камер сгорания сохраняется вне зависимости от принятого при проектировании числа КС (табл. 2).

Таблица 2. Массовое соотношение CH_4 , O_2 и CO_2 , подаваемых в область горения

Компонент	Массовое соотношение компонентов
CH_4	0,013
O_2	0,054
CO_2	0,933

Массовая доля разбавителя в камере сгорания КТЭК равна 0,945, что значительно выше, чем в стандартных ГТУ, работающих на воздухе. Учитывая ингибирующее воздействие углекислого газа на процесс

горения (в сочетании с повышенным давлением), весь объем CO_2 не целесообразно подавать в смеси с окислителем. Однако часть его необходимо подать в зону активного горения для снижения максимальной температуры и охлаждения металла жаровой трубы.

В связи с этим предложено углекислый газ разделить на два потока (рис. 5):

1) первый поток подается в область горения метана с кислородом;

2) второй поток – в камеру сгорания после области выгорания основной массы топлива для конвективного охлаждения и смешения с высокотемпературными продуктами горения.

Результаты исследования кинетики окисления метана [8] позволили определить отправные точки для формирования конструктивного облика камеры сгорания:

- в зону горения подается не более 20 % от общего количества CO_2 , участвующего в цикле, основной объем подмешивается в смесителе (при подмесе большего количества разбавителя величина скорости распространения пламени слишком мала);

- в смеси с кислородом во фронтное устройство подается не более 10 % от общего количества CO_2 разбавителя, что соответствует массовой доле γ не более 0,634;

- область стабилизации горения до подачи дополнительного CO_2 не менее 130 мм.

Объем жаровой трубы был определен по величине объемной теплонапряженности $Q_v = 700 \text{ кДж} / (\text{м}^3 \cdot \text{час} \cdot \text{Па})$ согласно выражению

$$Q_v = \frac{3600 G_T Q_{\text{хим}}^{\text{CH}_4} \eta_f}{V_{\text{ж}} P_k}, \quad (3)$$

где G_T – расход топлива, кг/с; $Q_{\text{хим}}^{\text{CH}_4}$ – теплота сгорания топлива, кДж/кг; η_f – полнота выгорания топлива; $V_{\text{ж}}$ – объем жаровой трубы, м^3 ; P_k – давление на выходе из камеры сгорания, Па.

Рекомендуемое соотношение высоты и диаметра камеры сгорания $L_{\text{ж}}/H = 2,5$.

Методы исследований. Моделирование горения метана с кислородом в углекислотной среде при сверхкритических давлениях проводилось в программном комплексе Ansys Fluent. Для учета турбулентно-кинетического взаимодействия были использованы модель горения Eddy Dis-

sipation and Finite Rate Chemistry и трехступенчатый механизм окисления метана. При проведении расчетов были сделаны следующие допущения:

- окислителем выступает 100 % кислород (O_2);
- модель камеры сгорания не включает в себя зону смешения;
- кинетический механизм упрощен до 3-х глобальных реакций;

• скорость химических реакций определяется как минимальная, определенная по скорости образования/расходования веществ, и скорость химической реакции с константой скорости, определенной по уравнению Аррениуса:

$$R = \min(R_{react}, R_{prod}), \quad (4)$$

где R_{react} , R_{prod} – скорости расходования исходных веществ и образования продуктов соответственно;

$$R = K(T) T^{\beta} (C_A)(C_B), \quad (5)$$

где T^{β} – температурный коэффициент; C_A , C_B – концентрации исходных компонентов;

$$K(T) = A e^{\left(\frac{-E_a}{RT}\right)}, \quad (6)$$

где A – предэкспоненциальный множитель; E_a – энергия активации.

Для снижения времени расчетов задача была разделена на две:

1) моделирование подачи компонентов в горелочное устройство, их смешение и закрутка в целях подбора оптимального диаметра сопел подачи кислорода для равномерного смешения с CO_2 , получения эпюр концентраций компонентов на выходе;

2) моделирование горения в объеме камер сгорания с добавлением дополнительного CO_2 для конвективного охлаждения стен (при этом была рассмотрена только область горения, без зоны смешения).

Рис. 5 символично иллюстрирует предварительный дизайн внутреннего объема камеры сгорания, который включает в себя сопло подачи газовой смеси, корпус камеры сгорания, отверстия для ввода CO_2 вдоль стен. Задание в качестве граничного условия теплового потока от стен имитирует наличие охлаждающего канала для конвективного охлаждения стен.

На входе в модель задан массовый расход смеси топлива с окислителем с концентрациями, полученными при моделировании горелочного устройства. Поток CO_2 на входе в отверстия системы охлаждения

задан с цилиндрическими координатами, моделирующими наклон сопел на 60° .

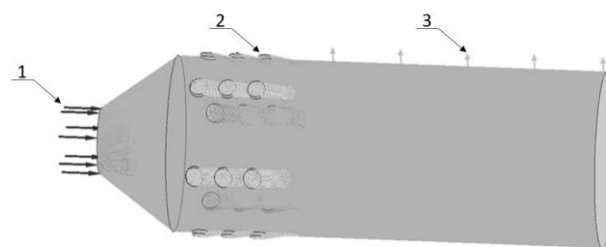


Рис. 5. Дизайн внутреннего объема камеры сгорания: 1 – подача топливо-воздушной смеси; 2 – подача CO_2 вдоль стен камеры сгорания; 3 – тепловой поток

Моделирование проводилось для двух величин наклона лопаток горелки – 30° и 45° и двух массовых концентраций разбавителя – 0,634 и 0,46.

В процессе численного моделирования основной задачей являлось получение объемных контуров распределения температуры и концентрации монооксида углерода для оценки наличия факела, стабилизирующегося в районе устья горелки.

Результаты исследования. Результаты моделирования показывают, что массовая концентрация CO_2 разбавителя в зоне активного горения, равная 0,634, оказывает подавляющее воздействие на процесс возгорания метана и стабилизации пламени. Имеет место локальное возгорание, однако факел не стабилизируется на выходе из горелки, и при достижении потоком области подачи вторичного CO_2 процесс горения прекращается. Об этом свидетельствуют величины химического недожога, равные 29 и 13 % для углов закрутки лопаток 30° и 45° (рис. 6).

В случае, когда $\gamma = 0,460$, факел стабилизируется у устья горелки при угле закрутки потока, равном 45° (на рис. 7, б четко видны области зажигания). Протяженность области активного горения для расчета составляет 40 % от общей длины камеры сгорания для угла закрутки 30° , при закрутке ТВС на 45° она сокращается до 20 % длины камеры сгорания, активное горение завершается до подачи вторичного CO_2 на охлаждение. Наличие конуса в начале камеры сгорания позволяет изолировать область стабилизации факела от вторичных токов охлаждающего CO_2 .

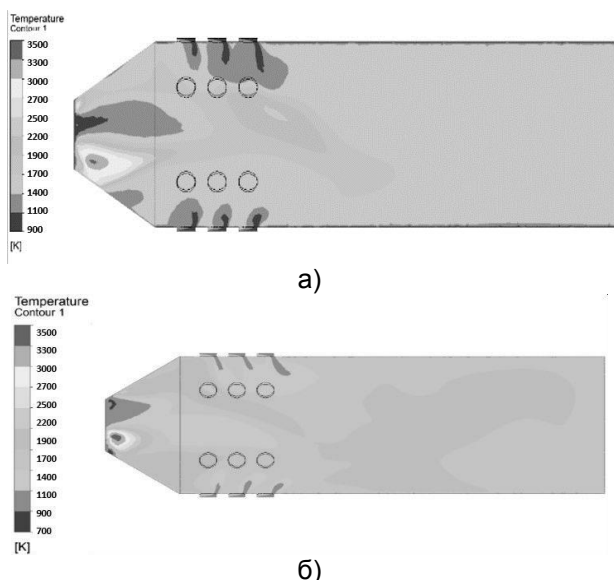


Рис. 6. Контуры температур в поперечном сечении камеры сгорания при $\gamma = 0,634$: а – угол поворота лопаток 30° , б – угол поворота лопаток 45°

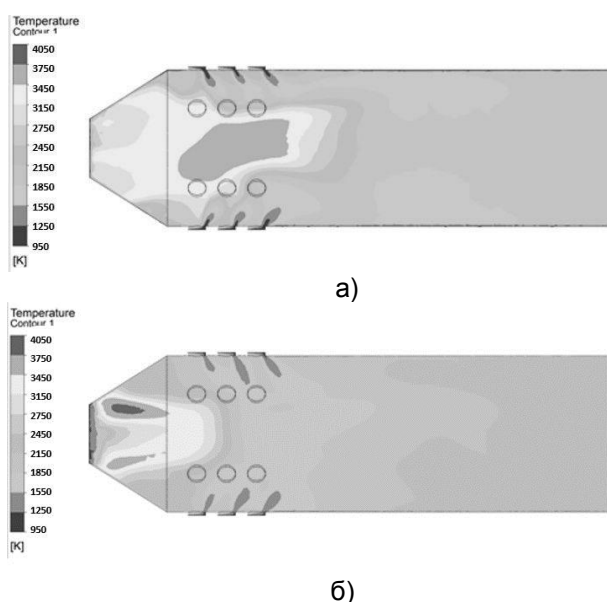


Рис. 7. Контуры температур в поперечном сечении камеры сгорания для $\gamma = 0,460$: а – угол поворота лопаток 30° , б – угол поворота лопаток 45°

В области, где струи CO_2 разбавителя проникают в поток, происходит снижение температуры, что тормозит процессы горения, поэтому подача дополнительного CO_2 разбавителя должна осуществляться после области стабилизации факела и основного горения.

Контуры молярной концентрации монооксида углерода и линии тока представлены на рис. 8, 9.

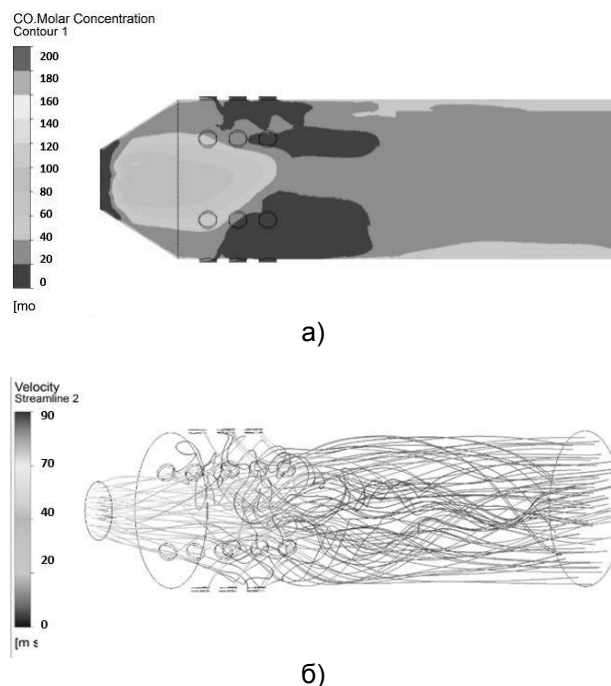


Рис. 8. Результаты моделирования при $\gamma_1 = 0,460$ и угле закрутки 30° : а – контур молярной концентрации CO_2 разбавителя в поперечном сечении; б – линии тока в объеме

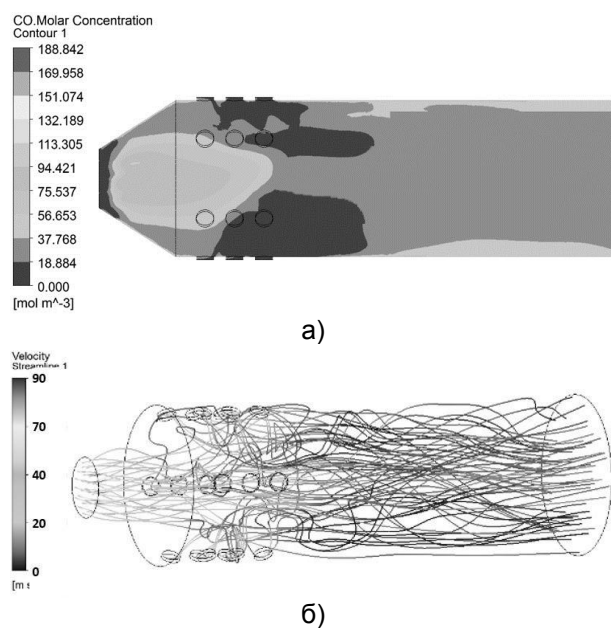


Рис. 9. Результаты моделирования при $\gamma_1 = 0,460$ и угле закрутки 45° : а – контур молярной концентрации CO_2 разбавителя поперечном сечении; б – линии тока в объеме

В результате данного исследования получены значения максимальной массовой концентрации ингибирующего разбавителя, не способствующие затуханию факела в объеме камеры сгорания. Величина должна составлять не более 50 %, причем для стабилизации пламени необходима интенсивная закрутка компонентов горения.

Таблица 3. Результаты моделирования горения $\text{CH}_4\text{-O}_2$ в среде углекислого газа при сверхкритическом давлении

Угол поворота лопаток	Массовая концентрация CO_2	Средне-массовая температура на выходе, °C	Недожог CH_4 на выходе, %	Концентрация CO_2 разбавителя на выходе, ppm
30	0,634	1270	29	80,4
30	0,460	1778	2	106,4
45	0,634	1391	17	95,2
45	0,460	1789	0,2	146

Выводы. На основе результатов численного моделирования в программном комплексе CFD были исследованы аэродинамика структуры потока, процессы смесеобразования и горения топлива в камере сгорания и сделаны следующие выводы:

1. Стабилизация факела в объеме камеры сгорания происходит при доле CO_2 разбавителя, подаваемого в смеси с окислителем не более 0,46–0,5, дальнейший прирост приводит к торможению процессов горения.

2. Закрутка потока способствует стабилизации факела и сокращению его длины.

3. Добавление дополнительного CO_2 разбавителя формирует локальные зоны с пониженной температурой, что приводит к торможению процессов горения.

4. В зону стабилизации факела должны быть исключены подмеси охлаждающего CO_2 .

5. В условиях стабильного горения профили температур и скорости на выходе из объема камеры сгорания равномерны.

На основе полученных результатов были сформулированы следующие рекомендации по организации процесса горения в камере сгорания:

1. В камеру сгорания должно подаваться не более 20 % от общего содержания углекислого газа, причем его необходимо разделять на два подпотока – в смеси с окислителем (массовая концентрация не более 0,5) и вдоль стен камеры сгорания для охлаждения. Подобная организация процесса горения позволяет брать за основу рекомендации по конструкции для классических ГТУ с внесением некоторых корректировок.

2. Для стабилизации факела и сокращения его длины необходима установка лопаток для завихрения топлива и окисли-

теля в смеси с CO_2 на входе в камеру сгорания.

3. Скорость подачи топлива и окислителя в смеси с CO_2 в камеру сгорания должна быть не более 20–25 м/с, скорость подачи охлаждающего CO_2 – не более 60 % от скорости подачи смеси топлива и окислителя.

4. Подача CO_2 на охлаждение должна осуществляться не менее чем в 130 мм от устья горелки. Область стабилизации факела должна быть изолирована от вторичных токов охлаждающего CO_2 .

Список литературы

1. **Weizhong F.** The research on design and technology of new high efficiency supercritical unit – a kind of cross-compound steam turbine generator unit in a manner of elevated and conventional layout // Proceedings of the 2-nd IEA CCC Workshop on Advanced Ultras-Supercritical Coal-Fired Power Plants. – Rome, Italy, 2014.

2. **Alenezi A., Kapat J.S.** Thermodynamic analysis of CO_2 Allam cycle for concentrated solar power complemented with oxy-combustion // Proceedings of AIAA Propulsion and Energy Forum, Indianapolis. – Indiana, USA, 2019.

3. **High** pressure combustion test of gas turbine combustor for 50MWth supercritical CO_2 demonstration power plant on Allam cycle / S. Suzuki, Y. Iwai, M. Itoh, et al. // Proceedings of the International Gas Turbine Congress. – Tokyo, Japan, 2019.

4. **Methane** oxy-combustion for low CO_2 cycles: Blowoff measurements and analysis / A.B. Amato, P.D. Hudak, D. Carlo, et al. // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 2011. – 133(6).

5. **Polezhaev I.L., Yu V.** Normal flame propagation speed and analysis of the influence of system parameters on it // Thermophysics of high temperatures. – 2005. – Vol. 43. – P. 933–942.

6. **Karpov V.L., Mostinsky I.L., Polezhaev Yu.V.** Laminar and turbulent regime of combustion of hydrogen flooded streams // High Temperature Thermal Physics. – 2005. – Vol. 43, no. 1. – P. 115.

7. **Lewis B., Elbe G.** Combustion, flame and explosions in gases: trans. from English. – New York; London, 1968. P. 592.

8. **Natural** Gas-Oxygen Combustion in a Super-Critical Carbon Dioxide Gas Turbine Combustor / I. Komarov, D. Kharlamova, B. Makhmutov, et al. // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 178. – P. 01027.

9. **USC Mech** Version II, High-temperature combustion reaction model of $\text{H}_2/\text{CO}/\text{C}_1\text{-C}_4$ compounds / H. Wang, X. You, A.V. Joshi, et al. 2007.

http://ignis.usc.edu/Mechanisms/USCMech%20II/USC_Mech%20II.htm.

References

1. Weizhong, F. The research on design and technology of new high efficiency supercritical unit – a kind of cross-compound steam turbine generator unit in a manner of elevated and conventional layout. In Proceedings of the 2-nd IEA CCC Workshop on Advanced Ultras-Supercritical Coal-Fired Power Plants. Rome, Italy, 2014.
2. Alenezi, A., Kapat, J.S. Thermodynamic analysis of CO₂ Allam cycle for concentrated solar power complemented with oxy-combustion. In Proceedings of AIAA Propulsion and Energy Forum, Indianapolis. Indiana, USA, 2019.
3. Suzuki, S., Iwai, Y., Itoh, M., Morisawa, Y., Jain, P., Kobayashi, Y. High pressure combustion test of gas turbine combustor for 50MWth supercritical CO₂ demonstration power plant on Allam cycle. In Proceedings of the International Gas Turbine Congress. Tokyo, Japan, 2019.
4. Amato, A.B., Hudak, P.D., Carlo, D., Noble, D., Scarborough, J., Seitzman, T., Lieuwen, T. Methane oxy-combustion for low CO₂ cycles: Blowoff measurements and analysis. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2011, 133 (6).
5. Polezhaev, I.L., Yu, V. Normal flame propagation speed and analysis of the influence of system parameters on it. Thermophysics of high temperatures, 2005, vol. 43, pp. 933–942.
6. Karpov, V.L., Mostinsky, I.L., Polezhaev, Yu.V. Laminar and turbulent regime of combustion of hydrogen flooded streams. High Temperature Thermal Physics, 2005, vol. 43, no. 1, pp. 115.
7. Lewis, B., Elbe, G. Combustion, flame and explosions in gases. 1968, p. 592.
8. Komarov, I., Kharlamova, D., Makhmutov, B., Shabalova, S., Kaplanovich, I. Natural Gas-Oxygen Combustion in a Super-Critical Carbon Dioxide Gas Turbine Combustor. E3S Web of Conferences, 2020, vol. 178, p. 01027.
9. Wang, H., You, X., Joshi, A.V., Davis, S.G., Laskin, A., Egolfopoulos, F., Law, C.K. USC Mech Version II, High-temperature combustion reaction model of H₂/CO/C₁-C₄ compounds, 2007. Available at: http://ignis.usc.edu/Mechanisms/USCMech%20II/USC_Mech%20II.htm.

УДК 621.039.517.5

Владимир Александрович Горбунов

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры атомных электрических станций, Россия, Иваново, e-mail: gorbynov.w@mail.ru

Сергей Геннадьевич Андрианов

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры атомных электрических станций, Россия, Иваново, e-mail: asg@iff.ispu.ru

Светлана Сергеевна Коновальцева

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры атомных электрических станций, Россия, Иваново, e-mail: svetlana2014konovaltseva@gmail.com

Оценка влияния радиационного теплообмена на параметры температурных полей твэлов различного конструктивного исполнения

Авторское резюме

Состояние вопроса. В реакторах ВВЭР-1000 используются гладкостержневые твэлы цилиндрической формы. Ранее была разработана и верифицирована модель для определения температурного поля твэла в двумерной постановке задачи. Однако принятые в модели допущения не учитывают влияния переменных теплофизических свойств, радиационного теплообмена и наличия отверстия в твэле на конечные параметры температурных полей. Оценка этого влияния является актуальной задачей для повышения экономической эффективности топливного цикла и мощности энергоблоков.

Материалы и методы. Для построения моделей и исследования особенностей энерговыделения в ядерных реакторах используется численный пакет теплофизического моделирования – программный комплекс COMSOL Multiphysics. Моделирование температурных полей выполняется на основе уравнения теплопроводности с внутренним источником тепловыделений при граничных условиях второго рода на торцах твэла и граничных условиях третьего рода на боковой поверхности стержня.

Результаты. Построена осесимметрическая модель в двумерной постановке задачи и трехмерная модель твэла. Методом конечных элементов определены поля распределения температуры. Приведены результаты расчетов для твэлов различного конструктивного исполнения, которые показали, что радиационный теплообмен существенно влияет на максимальную температуру топлива (UO_2). Определена степень влияния переменности теплофизических свойств и радиационного теплообмена. Установлено, что температурные характеристики при различных заданных условиях имеют разницу в диапазоне 15,5–282,0 К (0,8–14,4 %).

Выводы. Построенные модели достоверны и подтверждены ранее верифицированной моделью, характеристиками топливной сборки, применяемой на блоках ВВЭР-1000. Представленные результаты могут применяться для математического моделирования процессов теплообмена как при модернизации эксплуатируемого оборудования, так и в ходе разработки, проектирования и эксплуатации, что позволит повысить эффективность выработки электрической энергии на энергоблоке атомной станции.

Ключевые слова: твэл, температурное поле твэла, радиационный теплообмен, переменные свойства, энерговыделение, удельная мощность энерговыделения

Vladimir Alexandrovich Gorbunov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Nuclear Power Plants Department, Russia, Ivanovo, e-mail: gorbunov.w@mail.ru

Sergey Gennadievich Andrianov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of Nuclear Power Plants Department, Russia, Ivanovo, e-mail: asg@iff.ispu.ru

Svetlana Sergeevna Konovaltseva

Ivanovo State Power Engineering University, Post Graduate Student of Nuclear Power Plants Department, Russia, Ivanovo, e-mail: svetlana2014konovaltseva@gmail.com

Assessment of radiation heat transfer influence on parameters of temperature fields of various design fuel rods

Abstract

Background. VVER-1000 reactors use cylindrical smooth-core fuel rods. Previously, a model to determine the fuel rod temperature field in a two-dimensional problem statement has been developed and verified. However, modelling assumptions do not consider the influence of variable thermophysical properties, radiation heat transfer, and the opening in the fuel rod on the final parameters of the temperature fields. The impact assessment is an urgent task to improve the economic efficiency of the fuel cycle and the capacity of power units.

Materials and methods. To develop models and study the features of energy release in nuclear reactors, a numerical package of thermophysical modeling COMSOL Multiphysics software is used. The simulation of temperature fields is performed based on the heat equation with an internal heat source, under the boundary conditions of the second kind at the ends of the fuel rod and the boundary conditions of the third kind on the side surface of the rod.

Results. An axisymmetric model in two-dimensional problem statement and a three-dimensional model of the fuel rod are developed. The temperature distribution fields are determined by the finite element method. The results of calculations of various design fuel rods are presented. The results have shown that the radiation heat transfer significantly affects the maximum fuel temperature (UO_2). The impact degree of variability of thermophysical properties and radiation heat transfer is determined. It was found that the temperature characteristics under different specified conditions have a difference in the range of 15,5–282,0 K (0,8–14,4 %).

Conclusions. The developed models are reliable and confirmed by the previously verified model, the characteristics of the fuel assembly used on the VVER-1000 units. The results presented can be used for mathematical modeling of heat transfer processes, both during the modernization of the equipment in operation, and during the development, design, and operation, which will increase the efficiency of electric energy generation at the power unit of a nuclear power plant.

Key words: fuel rod, fuel rod temperature field, radiation heat transfer, variable properties, energy release, power density of energy release

DOI: 10.17588/2072-2672.2021.2.023-031

Введение. В настоящее время атомная энергия широко используется во всем мире. Проблема безопасной эксплуатации основного технологического оборудования ядерных объектов затрагивает как российские, так и зарубежные АЭС.

Общемировая тенденция повышения мощности действующего оборудования заставляет эксплуатирующие организации проводить мероприятия, направленные на оптимизацию используемого оборудования и изменение режимов его эксплуатации. Одним из важных направлений может служить проведение научных исследований всех протекающих процессов путем расчета, моделирования и исследования температурных полей, распределений энерговыделения в активной зоне реактора и т.д.

Анализ и повышение эффективности эксплуатации любого тепломеханического оборудования является сложной многофакторной задачей, в которой необходимо учесть особенности каждого элемента ядерного реактора.

Для первичного преобразования ядерной энергии в тепловую на АЭС широко используются водо-водяные энергетические реакторы (ВВЭР) [1]. Активная зона данного типа реакторов образована тепловыделяющими сборками, состоящими из стержневых твэлов. При расчете температурных полей внутри активной зоны реактора необходимо решать сопряженные задачи по определению внутреннего энерговыделения в твэле на основе нейтронно-физических характеристик.

В настоящее время широкое распространение получили численные пакеты теплофизического моделирования: Elcut, Flow Vision, Ansys Fluent, Comsol Multiphysics.

Ранее [2, 3] в программном комплексе COMSOL Multiphysics была разработана модель для определения температурного поля твэла в двумерной постановке задачи. Она показала хорошую верификацию полученных результатов по точному аналитическому решению уравнения теплопроводности. Принятые в модели допущения не учи-

тывают влияния переменных теплофизических свойств и радиационного теплообмена и наличия отверстия в твэле на конечные параметры температурных полей.

Целью исследования является оценка влияния радиационного теплообмена на параметры температурных полей твэлов различного конструктивного исполнения.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- построение осесимметрической модели в двумерной, трехмерной постановках задачи сплошного твэла;
- построение трехмерной модели твэла с отверстием диаметром 2,3 мм [4, 5] при соблюдении аналогичного конструктивного исполнения;
- проведение исследований и расчетов температурных полей с учетом радиационного теплообмена и переменных теплофизических свойств.

Методы исследования. В качестве методов исследования температурного поля твэла используются численные пакеты теплофизического моделирования. Для построения моделей и исследования особенностей энерговыделения в ядерных реакторах использовался программный комплекс COMSOL Multiphysics [6, 7].

Результаты исследования. В ходе исследований рассмотрены различные задачи.

Построена осесимметрическая модель, решенная на основе уравнения теплопроводности в двумерной постановке задачи с внутренним источником тепловыделений [8, 9] при граничных условиях второго рода на торцах твэла и граничных условиях третьего рода на боковой поверхности стержня, а также трехмерная модель при аналогичных условиях [10, 11].

Расчеты производятся в соответствии с требованиями технологического регламента по безопасной эксплуатации АЭС. Установлены максимально допустимая температура топливного сердечника 1690 °С (1963 К) [4, 12, 13] и максимальная температура оболочки твэла 350 °С (623 К). Существует также ограничение, влияющее на структуру твэла, связанное с температурой оболочки с внешней стороны и кризисом кипения теплоносителя. Это ограничение в данной статье не рассматривалось.

Основной функцией активной зоны ядерного реактора является генерация и передача тепловой энергии с поверхности

твэла к теплоносителю. В реакторах ВВЭР-1000 используются гладкостержневые твэлы цилиндрической формы [1]. Для однородного реактора мощность энерговыделения по объему пропорциональна плотности потока нейтронов и определяется выражением [14]:

$$Q(r, z) = Q_0 J_0 \left(\frac{2,405r}{R_3} \right) \cos \left(\frac{\pi z}{H_3} \right), \quad (1)$$

где Q_0 – максимальное значение энерговыделения в центре реактора, МВт; J_0 – функция Бесселя нулевого порядка; R_3 – эффективный радиус, м; H_3 – эффективная высота, м; r, z – координаты точки расчета по радиусу и высоте соответственно, м (рис. 1).

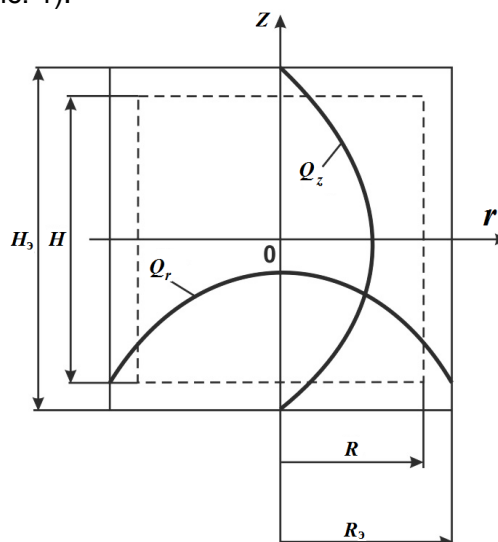


Рис. 1. Распределение энерговыделения по радиусу Q_r и высоте Q_z в однородной цилиндрической активной зоне

Рассмотрим сплошной твэл (рис. 2).

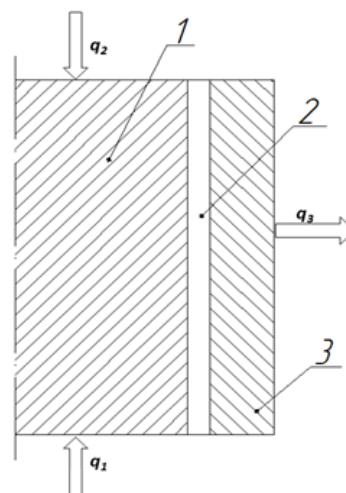


Рис. 2. Схематическое изображение сплошного твэла и граничных условий: 1 – топливо (UO_2); 2 – гелий (He); 3 – оболочка твэла (сплав циркония с ниобием)

В исследовании приняты начальные условия и геометрические параметры [2]: полудлина стержня $l = 1,84$ м; радиус топливного столба (UO_2) $R_0 = 0,0038$ м; радиус твэла $R = 0,00455$ м, а также следующие начальные и граничные условия, определяющие решение:

1) начальная температура стержня

$$T(r, z, 0) = T_0 = 578 \text{ K}, \quad r \in [0, R], \quad z \in [-l, l], \quad (2)$$

где $T(r, z, 0)$ – температура точек стержня с координатами (r, z) в момент времени $\tau = 0$;

2) температура окружающей среды $T_{\text{oc}} = 578 \text{ K}$;

3) граничные условия второго рода на торцах стержня (рис. 2):

$$q_1(r, -l, \tau) = 0, \quad r \in [0, R]; \quad (3)$$

$$q_2(r, l, \tau) = 0, \quad r \in [0, R], \quad (4)$$

где $q_1(r, -l, \tau)$ – тепловой поток на нижнем торце стержня в точке с координатой r в момент времени τ , Вт/м²; $q_2(r, l, \tau)$ – тепловой поток на верхнем торце стержня в точке с координатой r в момент времени τ , Вт/м²;

4) граничное условие третьего рода на боковой поверхности стержня

$$q_3(R, z, \tau) = \alpha(T(R, z, \tau) - T_{\text{oc}}), \quad z \in [-l, l], \quad (5)$$

где $q_3(R, z, \tau)$ – тепловой поток с боковой поверхности стержня, Вт/м² (рис. 2); α – коэффициент теплоотдачи от стенки оболочки к теплоносителю, Вт/(м²·К); $T(R, z, \tau)$ – температура точек боковой поверхности стержня в момент времени τ , К.

В расчетной модели [2] использовалось уравнение теплопроводности для твэла при постоянных теплофизических свойствах:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \Delta T + \frac{q}{c\rho}, \quad (6)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); T – температура, К; τ – время, с; c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); ρ – плотность материала стержня, кг/м³; q – удельная мощность энерговыделения одного стержня, Вт/м³; Δ – оператор Лапласа.

Рассмотрим уравнение теплопроводности для твэла при переменных свойствах в стационарном режиме нагрева:

$$q = -\text{div}(\lambda \nabla T), \quad (7)$$

где div – оператор дивергенции; ∇T – градиент температурного поля.

Граничное условие четвертого рода на внешней поверхности топлива (UO_2) имеет вид

$$q_4(R_0, z, \tau) = \lambda_r(T) \frac{\partial T}{\partial r}, \quad z \in [-l, l], \quad \tau \in [0, \infty], \quad (8)$$

где $q_4(R_0, z, \tau)$ – тепловой поток с внешней поверхности топлива (UO_2), Вт/м²; λ_r – коэффициент теплопроводности гелия, Вт/(м·К).

Граничное условие четвертого рода на внутренней поверхности оболочки твэла имеет вид

$$q_4(R_{01}, z, \tau) = \lambda_{\text{ц}}(T) \frac{\partial T}{\partial r}, \quad z \in [-l, l], \quad \tau \in [0, \infty], \quad (9)$$

где $q_4(R_{01}, z, \tau)$ – тепловой поток с внутренней поверхности твэла, Вт/м²; $\lambda_{\text{ц}}$ – коэффициент теплопроводности оболочки, Вт/(м·К); $R_{01} = 0,0038$ м – радиус внутренней поверхности оболочки.

В ходе исследования получены значения удельной мощности энерговыделения при постоянных и переменных свойствах. Параметры указаны в табл. 1 при достижении максимально допустимой температуры топлива $T_{\text{max}}^{\text{топливо}} = 1963 \text{ K}$ и максимально допустимой температуры оболочки $T_{\text{max}}^{\text{оболочка}} = 623 \text{ K}$.

Таблица 1. Значения удельной мощности энерговыделения при ограничениях по температуре оболочки и топлива в твэле

Теплофизические свойства	Удельная мощность энерговыделения q , МВт/м ³	
	при $T_{\text{max}}^{\text{оболочка}}$	при $T_{\text{max}}^{\text{топливо}}$
При постоянных свойствах	759,3	764,1
При переменных свойствах	482,2	706,4

Разрушение оболочки при переменных свойствах соответствует удельной мощности энерговыделения 482,2 МВт/м³. Различие между постоянными и переменными свойствами существенное. Наибольшая ошибка по удельной мощности при $T_{\text{max}}^{\text{оболочка}}$ составляет 36,5 %.

На рис. 3 показано температурное поле сплошного твэла. Отметим, что при переменных свойствах с удельной мощностью 764,1 МВт/м³ топливо и оболочка твэла разрушаются.

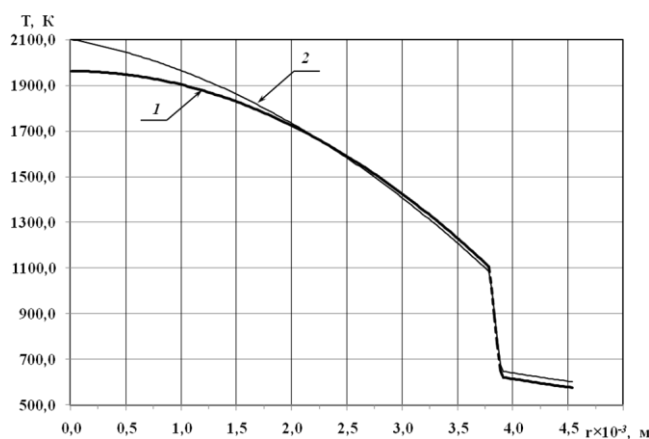


Рис. 3. Температурное поле сплошного твэла при удельной мощности энерговыделения $764,1 \text{ МВт/м}^3$: 1 – при постоянных свойствах; 2 – при переменных свойствах

При переменных свойствах температура самых разогретых точек равна $2101,7 \text{ К}$. Различие между переменными и постоянными свойствами по максимальной температуре топлива составляет $138,7 \text{ К}$ ($7,1 \%$). Это доказывает необходимость учета переменных теплофизических свойств.

В зазоре сплошного твэла между топливом и оболочкой находится гелий. Газ является прозрачной средой, в которой надо учитывать два вида теплообмена: конвективный и радиационный. Предварительные исследования показали, что учет конвективного теплообмена находится в пределах погрешности.

Радиационный теплообмен может существенно влиять на температурное поле твэла. Comsol Multiphysics позволяет учесть эту радиационную составляющую.

Для постановки задачи учитывался механизм передачи теплоты радиационным теплообменом от поверхности к окружающему пространству при следующих допущениях:

1. Окружающая среда имеет постоянную среднюю интегральную температуру T_{amb} , согласно методике, описанной в Comsol Multiphysics [6].

2. Окружающая среда имеет свойства черного тела, так как рассматриваемая среда абсолютно замкнута.

В связи со сложностью определения температуры окружающей среды, видимой поверхностью, эти предположения позволяют выразить падающий тепловой поток через среднюю интегральную температуру [6]:

$$E_{\text{пад}} = \sigma T_{\text{amb}}^4, \quad (10)$$

где $E_{\text{пад}}$ – падающий тепловой поток на поверхность, Вт/м^2 ; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – постоянная Стефана–Больцмана; T_{amb} – средняя интегральная температура окружающей среды, К .

Для учета радиационного теплообмена на границах с радиусами R_0 и R_{01} в дальнейших исследованиях будет рассматриваться сложный теплообмен.

Уравнение для поглощенного излучающего потока теплоты от внешней поверхности топлива (UO_2) к окружающему пространству имеет вид

$$q = \lambda_r(T) \frac{\partial T}{\partial r} + \varepsilon \sigma (T^4 - T_{\text{amb}}^4), \quad (11)$$

$$z \in [-l, l], \quad \tau \in [0, \infty],$$

где ε – коэффициент теплового излучения излучаемого тела; $T = T_0(R_0, z, \tau)$ – температура на внешней границе топлива (UO_2), К .

Уравнение для поглощенного излучающего потока теплоты от окружающего пространства к внутренней поверхности оболочки имеет вид

$$q = \lambda_c(T) \frac{\partial T}{\partial r} + \varepsilon \sigma (T_{\text{amb}}^4 - T^4), \quad (12)$$

$$z \in [-l, l], \quad \tau \in [0, \infty],$$

где $T = T_0(R_{01}, z, \tau)$ – температура на внутренней границе оболочки твэла, К .

Для оценки влияния в Comsol Multiphysics была построена трехмерная модель сплошного твэла на основе геометрических характеристик, которые были рассмотрены ранее, с учетом переменных теплофизических свойств.

В табл. 2 показаны значения удельной мощности энерговыделения без учета и с учетом радиационного теплообмена в зазоре. Параметры указаны при достижении ограничений по максимально допустимой температуре топлива $T_{\text{max}}^{\text{топливо}} = 1963 \text{ К}$ и максимально допустимой температуре оболочки $T_{\text{max}}^{\text{оболочка}} = 623 \text{ К}$.

Таблица 2. Значения удельной мощности энерговыделения без учета и с учетом теплового излучения в зазоре

Теплофизические свойства	Удельная мощность энерговыделения q , МВт/м^3	
	при $T_{\text{max}}^{\text{оболочка}}$	при $T_{\text{max}}^{\text{топливо}}$
Без учета радиационного теплообмена	482,2	706,4
С учетом радиационного теплообмена	492,7	712,4

Анализ данных табл. 2 показывает, что удельная мощность энерговыделения в твэле с зазором с учетом радиационного теплообмена выше. Наибольшая ошибка составляет 2,2 % и соответствует ограничению по температуре оболочки. Радиационный теплообмен оказывает влияние на температурное поле твэла.

На рис. 4 изображено температурное поле сплошного твэла при удельной мощности энерговыделения 706,4 МВт/м³ и наблюдается разница температур в области топлива.

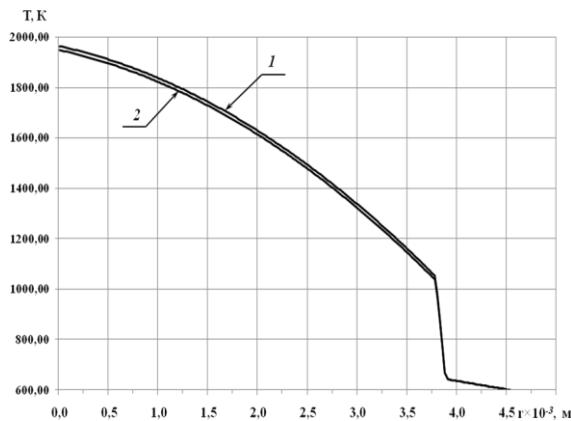


Рис. 4. Температурное поле сплошного твэла при удельной мощности энерговыделения 706,4 МВт/м³: 1 – при переменных свойствах; 2 – при переменных свойствах с учетом радиационного теплообмена

При удельной мощности энерговыделения 706,4 МВт/м³ при переменных свойствах температура самых разогретых точек твэла с зазором с учетом радиационного теплообмена ниже, чем без его учета, и составляет 1947,5 K. Температура топлива снижается на 15,5 K (0,8 %), что указывает на необходимость учета радиационного теплообмена в зазоре сплошного твэла.

Исследуем влияние радиационного теплообмена на температурные поля в отверстии и в зазоре твэла. Механизм передачи теплоты от поверхности к окружающему пространству описан ранее.

Рассмотрим трубку с зазором, состоящую из сплава циркония с ниобием, в которую помещены таблетки из диоксида урана, с отверстием диаметром 2,3 мм в середине.

Построена трехмерная модель твэла с отверстием, решенная на основе уравнения теплопроводности, с внутренним источником тепловыделений: при граничных условиях второго рода на торцах твэла;

граничных условиях третьего рода на боковой поверхности стержня; граничных условиях четвертого рода на внутренних поверхностях в зазоре и отверстии (рис. 5).

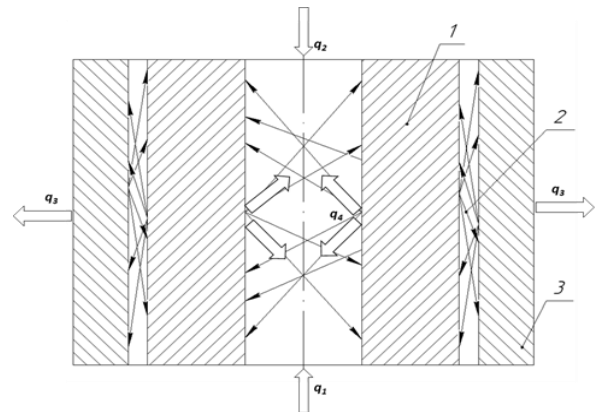


Рис. 5. Схематическое изображение твэла с отверстием и граничными условиями: 1 – топливо (UO₂); 2 – гелий (He); 3 – оболочка твэла (сплав циркония с ниобием)

Сравнение построенных температурных полей проводилось при одинаковой мощности энерговыделения. Благодаря геометрии твэла с отверстием, количество топлива снижается. Для перерасчета удельной мощности был использован расчетный коэффициент

$$k = \frac{V_{\text{спл}}}{V_{\text{отв}}}, \quad (13)$$

где $V_{\text{спл}}$ – объем сплошной топливной таблетки, м³; $V_{\text{отв}}$ – объем топливной таблетки с отверстием, м³.

Удельная мощность энерговыделения с учетом расчетного коэффициента находится по выражению

$$q_{\text{отв}} = q_{\text{спл}} k, \quad (14)$$

где $q_{\text{отв}}$ – удельная мощность энерговыделения твэла с отверстием, Вт/м³; $q_{\text{спл}}$ – удельная мощность энерговыделения сплошного твэла, Вт/м³.

В табл. 3 указаны параметры удельной мощности энерговыделения при достижении максимально допустимой температуры топлива $T_{\text{max}}^{\text{топливо}} = 1963$ K и максимально допустимой температуры оболочки $T_{\text{max}}^{\text{оболочка}} = 623$ K.

Различие между удельными мощностями для сплошного твэла и твэла с отверстием с учетом радиационного теплообмена в зазоре составило 151,1 МВт/м³. Наступление ограничения по максималь-

ным температурам топлива и оболочки происходит позднее в твэле с отверстием.

Таблица 3. Значения удельной мощности энерговыделения

№ исследования	Удельная мощность энерговыделения q , МВт/м ³	
	при T_{\max} оболочка	при T_{\max} топливо
1. С учетом радиационного теплообмена в зазоре для сплошного твэла	492,7	712,4
2. С учетом радиационного теплообмена в зазоре для твэла с отверстием	519,7	949,8
3. С учетом радиационного теплообмена в зазоре и отверстия для твэла с отверстием	532,4	1163,3

Удельная мощность при $T_{\max}^{\text{топливо}}$ в твэле с учетом радиационного теплообмена в отверстии выше на 18,4 %, чем без его учета.

При построении графика температурного поля твэлов (рис. 6) было выбрано эталонное значение удельной мощности энерговыделения сплошного твэла 712,4 МВт/м³.

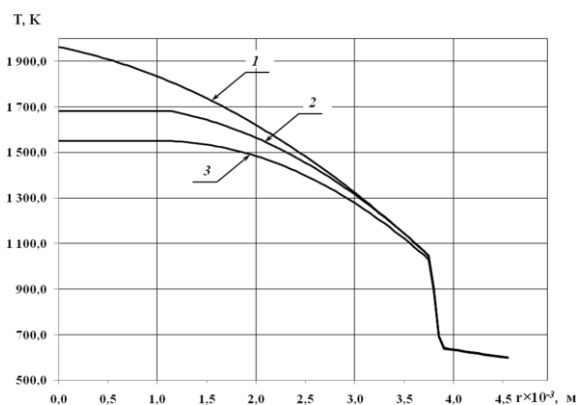


Рис. 6. Температурное поле сплошного твэла при удельной мощности 712,4 МВт/м³ и твэлов с отверстием при 783 МВт/м³: 1 — сплошной твэл с учетом радиационного теплообмена в зазоре; 2 — твэл с отверстием с учетом радиационного теплообмена в зазоре; 3 — твэл с отверстием с учетом радиационного теплообмена в зазоре и отверстия

Сравнительный анализ полученных данных (рис. 6) показывает, что геометрические характеристики твэла влияют на его температурное поле. Различие между

наиболее разогретыми точками составляет 282,0 К (14,4 %).

Анализ результатов расчета температурных полей твэла с отверстием показывает, что радиационный теплообмен в отверстии снижает температуру топлива. Различие между наиболее разогретыми точками составляет 131,9 К (7,8 %). Значение удельной мощности, при которой наступают ограничения по топливу и оболочке, увеличивается.

Выводы. В ходе работы в программном пакете Comsol Multiphysics удалось получить расчетные модели, обладающие достаточной точностью для инженерного анализа.

Определены и построены температурные поля твэлов при их различном конструктивном исполнении с учетом и без учета переменных теплофизических свойств и радиационного теплообмена.

На основе работы моделей получены следующие результаты.

1. Для поддержания целостности и эксплуатационных характеристик топлива и оболочки твэла важно учитывать переменные свойства, так как различие между температурами при постоянных и переменных свойствах существенное. Наибольшая ошибка по удельной мощности при $T_{\max}^{\text{оболочка}}$ составляет 36,5 %.

2. Радиационный теплообмен в зазоре сплошного твэла влияет на температурное поле. Наибольшая ошибка составляет 2,2 % по удельной мощности тепловыделения при ограничении по температуре оболочки.

3. При переменных теплофизических свойствах с учетом радиационного теплообмена в зазоре сплошного твэла происходит снижение температуры топлива. Различие по максимальной температуре топлива составляет 15,5 К (0,8 %).

4. Геометрические характеристики и радиационный теплообмен влияют на температурное поле твэлов. Различие между удельными мощностями для сплошного твэла и твэла с отверстием с учетом радиационного теплообмена в зазоре составляет 151,1 МВт/м³.

5. Радиационный теплообмен в отверстии твэла снижает температуру топлива. При этом значение удельной мощности увеличивается.

Представленные результаты расчета температурных полей и расчетные модели

могут применяться для математического моделирования процессов теплообмена в ядерных реакторах, а также для разработки, проектирования и эксплуатации атомных станций.

Список литературы

1. **Лескин С.Т., Шелегов А.С., Слободчук В.И.** Физические особенности и конструкция реактора ВВЭР-1000: учеб. пособие. – М.: НИЯУМИФИ, 2011. – 116 с.
2. **Разработка** модели по определению температурного поля твэла в двумерной постановке задачи / В.А. Горбунов, Н.Б. Иванова, Н.А. Лоншаков, Я.В. Белов // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2019. – № 2. – С. 174–184.
3. **Старков В.А., Марихин Н.Ю.** Методика и программа расчета стационарного температурного поля в системе многозонных цилиндрических ТВЭЛов // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2013. – № 1. – С. 54–62.
4. **Колпаков Г.Н., Селиваникова О.В.** Конструкции твэлов, каналов и активных зон энергетических реакторов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 118 с.
5. **Горбунов В.А.** Моделирование тепло-гидравлических процессов в ядерных реакторах в Comsol multiphysics: учеб. пособие / ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2019. – 180 с.
6. **Heat Transfer Module User's Guide, Version COMSOL 5.4, 2018.** – 702 с. URL: <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.heat/HeatTransferModuleUsersGuide.pdf>.
7. **Егоров В.И.** Применение ЭВМ для решения задач теплопроводности: учеб. пособие. – СПб.: НИУ ИТМО, 2006. – 77 с.
8. **Ушаков П.А., Субботин В.И.** Приближенные расчеты гидродинамических характеристик турбулентного потока жидкости в кольцевых каналах // Теплофизика высоких температур. – 1972. – Т. 10, № 5. – С. 1025–1030.
9. **Логинов В.С.** Приближенные методы теплового расчета активных элементов электрофизических установок. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 273 с.
10. **Горбунов В.А.** Моделирование теплообмена в конечно-элементном пакете FEMLAB: учеб. пособие / ГОУВПО «Ивановский государственный университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2008. – 216 с.
11. **Бирюлин Г.В.** Теплофизические расчеты в конечно-элементном пакете COMSOL/FEMLAB / СПбГУИ-ТМО. – СПб., 2006. – 76 с.
12. **Перимов Р.Р., Сорокин Г.А., Сорокина Т.В.** Моделирование теплотехнической

надежности твэла при различных вариантах изменения энерговыделения и температур // Промышленная теплотехника. – 2004. – Т. 26, № 5. – С. 150–153.

13. **Dolgov A.** Effective fuel solutions using SNF reprocessing // JSC “Tvel”, International Forum “AtomExpo”. – Moscow, May 31, 2016. URL: <http://2016.atomexpo.ru/mediafiles/u/files/materials/1/Dolgov.pdf>.

14. **Дементьев Б.А.** Ядерные энергетические реакторы. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.

References

1. Leskin, S.T., Shelegov, A.S., Slobodchuk, V.I. *Fizicheskie osobennosti i konstruktziya reaktora VVER-1000* [Physical features and design of the VVER-1000 reactor]. Moscow: NIYaUMIFI, 2011. 116 p.
2. Gorbunov, V.A., Ivanova, N.B., Lonshakov, N.A., Belov, Ya.V. *Razrabotka modeli po opredeleniyu temperaturnogo polya tvela v dvumernoy postanovke zadachi* [Development of model for determination of temperature fields of fuel rods in two-dimensional formulation of the problem]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika*, 2019, no. 2, pp. 174–184.
3. Starkov, V.A., Marikhin, N.Yu. *Metodika i programma rascheta statsionarnogo temperaturnogo polya v sisteme mnogozonnykh tsilindricheskikh TVELov* [Method and program of calculation of stationary temperature field in the system of multi-zone cylindrical fuel rods]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*, 2013, no. 1, pp. 54–62.
4. Kolpakov, G.N., Selivanikova, O.V. *Konstruktsii tvelov, kanalov i aktivnykh zon energeticheskikh reaktorov* [Designs of fuel rods, channels and cores of power reactors]. Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2009. 118 p.
5. Gorbunov, V.A. *Modelirovanie teplogidravlicheskikh protsessov v yadernykh reaktorakh v Comsol multiphysics* [Simulation of thermohydraulic processes in nuclear reactors in Comsol multiphysics]. Ivanovo, 2019. 180 p.
6. *Heat Transfer Module User's Guide, Version COMSOL 5.4, 2018.* – 702 p. URL: <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.heat/HeatTransferModuleUsersGuide.pdf>.
7. Egorov, V.I. *Primenenie EVM dlya resheniya zadach teploprovodnosti* [Application of computers for solving problems of thermal conductivity]. Saint-Petersburg: NIU ITMO, 2006. 77 p.
8. Ushakov, P.A., Subbotin, V.I. *Priblizhennyye raschety gidrodinamicheskikh kharakteristik turbulentnogo potoka zhidkosti v kol'tsevykh kanalakh* [Approximate calculations of hydrodynamic characteristics of turbulent fluid flow in ring channels]. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 1972, vol. 10, no. 5, pp. 1025–1030.

9. Loginov, V.S. *Priblizhennyye metody teplovogo rascheta aktivnykh elementov elektrofizicheskikh ustanovok* [Approximate methods of thermal calculation of active elements of electrophysical installations]. Moscow: FIZMATLIT, 2009. 273 p.

10. Gorbunov, V.A. *Modelirovanie teploobmena v konechno-elementnom pakete FEMLAB* [Heat transfer simulation in the finite element FEMLAB package]. Ivanovo, 2008. 216 p.

11. Biryulin, G.V. *Teplofizicheskie raschety v konechno-elementnom pakete COMSOL/FEMLAB* [Thermophysical calculations in the COMSOL/FEMLAB finite element package]. Saint-Petersburg, 2006. 76 p.

12. Perimov, R.R., Sorokin, G.A., Sorokina, T.V. *Modelirovanie teplotekhnicheskoy nadezhnosti*

tvela pri razlichnykh variantakh izmeneniya energovydeleniya i temperatur [Modeling of thermal-mechanical reliability of the fuel rod with different variants of change of energy release and temperatures]. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 2004, vol. 26, no. 5, pp. 150–153.

13. Dolgov, A. Effective fuel solutions using SNF reprocessing. JSC “Tvel”. International Forum “AtomExpo”. Moscow, 31 May, 2016. URL: <http://2016.atomexpo.ru/mediafiles/u/files/materials/1/Dolgov.pdf>.

14. Dement'ev, B.A. *Yadernye energeticheskie reaktory* [Nuclear power reactor]. Moscow: Energoatomizdat, 1990. 352 p.

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.315

Иван Михайлович Богачков

ООО «Газпром проектирование» Тюменский филиал, главный специалист электротехнического отдела, Россия, Тюмень, e-mail: Bogim83@mail.ru

Рустам Нуриманович Хамитов

Омский государственный технический университет, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электрической техники; Тюменский индустриальный университет, доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетики, Россия, Тюмень, e-mail: apple_27@mail.ru

Алгоритм выбора класса напряжения для системы электроснабжения газового месторождения

Авторское резюме

Состояние вопроса. Существующие алгоритмы и математические модели выбора класса напряжения с применением теории планирования эксперимента разработаны для промышленных предприятий (воздушные линии протяженностью до 10 км, мощность до 20 МВт, радиальная схема с трансформацией в конце линии). Они не учитывают особенностей газовых месторождений (воздушные линии протяженностью до 20 км и мощностью 1 МВт с прогнозируемым ростом до 10 МВт, магистральная схема с одной сквозной магистралью с трансформацией, распределенной по линии). Существующие решения для построения математической модели используют такие факторы, как: средняя длина линии электропередачи и суммарная нагрузка предприятия. Предлагаемые модели не позволяют количественно исследовать динамику системы электроснабжения газовых месторождений с учетом многократного роста электрической нагрузки в каждом периоде жизненного цикла. Целью данного исследования является разработка модели, решающей указанную проблему.

Материалы и методы. Исследование проведено с использованием экстремального эксперимента, на входе которого задаются: средняя длина линии электропередачи; количество газовых кустов; коэффициент прироста электрической нагрузки. Функцией отклика является оптимальный по минимуму дисконтированных затрат класс напряжения.

Результаты. Предложена регрессионная модель, отличительная особенность которой состоит в расщеплении фактора «суммарная нагрузка» на две составляющие – количество газовых кустов и коэффициент прироста электрической нагрузки. Предложен алгоритм выбора оптимального класса напряжения распределительной сети. Динамический эксперимент выполнен путем изменения фактора коэффициента прироста электрической нагрузки в регрессивной модели при неизменных других факторах. В итоге получен оптимальный минимум дисконтированных затрат класса напряжения для каждого периода жизненного цикла месторождения. Алгоритм реализован в программе

«ПРОН», с помощью которой исследованы распределительные сети ряда действующих газовых месторождений Западной Сибири.

Выводы. Установлен оптимальный класс напряжения распределительной сети газовых месторождений – 20 кВ. Достоверность результатов проверена эталонными моделями расчета дисконтированных затрат.

Ключевые слова: система электроснабжения, класс напряжения, дисконтированные затраты, теория планирования эксперимента, распределительная сеть

Ivan Mikhailovich Bogachkov

LLC "Gazprom proektirovanie", Tyumen office branch, Chief Specialist of Electrical Department, Russia, Tyumen, e-mail: bogim83@mail.ru

Rustam Nurimanovich Khamitov

Omsk State Technical University (OSTU), Doctor of Engineering Sciences, Professor of Electrical Engineering Department; Industrial University of Tyumen, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Power Engineering Department, Russia, Tyumen, e-mail: apple_27@mail.ru

Algorithm to select the voltage class for the gas field electricity supply system

Background. The current algorithms and mathematical models to select the voltage class based on the theory of experimental planning are developed for industrial enterprises (overhead lines with a length of up to 10 km, a power of up to 20 MV, a radial arrangement with a transformation at the end of the line). They do not consider the features of gas fields (overhead lines with a length of up to 20 km and a capacity of 1 MV with a projected growth of up to 10 MV, a transmission network with one pass-through trunk line with distributed transformation along the line). Currently, to develop a mathematical model, the following factors are considered: the average length of the power line and the total load of an enterprise. The proposed models do not allow us to quantify the dynamics of the gas fields power supply system considering the multiple growth of the electrical load in each period of the life cycle. The purpose of this study is to develop a model to solve this problem.

Materials and methods. An extreme experiment has been carried out during the research. The following input data are set: the average length of the power line; the number of gas clusters; the growth rate of the electric load. The response function is the voltage class that is optimal for the minimum discounted cost.

Results. The authors suggest the regression model. In this model the "total load" factor is split into two components, they are gas clusters and growth rate of electric loads. The algorithm to select the optimal voltage class of a distribution grid is proposed. The dynamic experiment is carried out and the growth rate of electric loads in the regressive model is being changed while other factors are being unchanged. As a result, the optimal minimum of the discounted costs of the voltage class for each period of the field life cycle is obtained. The algorithm is implemented in "PRON" software. With the help of "PRON" software, the distribution grids of several operating gas fields in Western Siberia have been investigated.

Conclusions. The optimal voltage class of a distribution grid of gas fields is 20 kV. The reliability of the results is verified by reference models of calculating discounted costs.

Key words: electricity supply system, voltage class, experiment planning theory, distribution network

DOI: 10.17588/2072-2672.2021.2.032-039

Введение. В период разработки проектной документации действующих газовых месторождений Западной Сибири (80–90-е гг. XX в.) не было опыта эксплуатации промыслов на завершающей стадии жизненного цикла, поэтому в настоящее время возникают проблемы, связанные с необходимостью серьезной реконструкции системы электроснабжения для обеспечения электроэнергией потребителей технологии распределенного компримирования газа, значительно влияющие на уровень

рентабельности добычи газа [1]. Так, например, на Ямбургском месторождении требуется построить 480 км воздушных линий электропередачи (ВЛ).

Полученный опыт эксплуатации месторождений на завершающем этапе жизненного цикла необходимо использовать при проектировании новых газовых месторождений.

Таким образом, одной из основных задач электроэнергетики газовой промышленности является создание оптимальной

системы электроснабжения на стадии проектирования с учетом перспективного роста электрических нагрузок.

Выбор класса напряжения является главным параметром системы электроснабжения, который необходимо изначально учитывать для всех периодов жизненного цикла месторождения.

Неправильно выбранный класс напряжения является тормозом развития газового месторождения в связи с ростом электрической нагрузки в процессе его жизненного цикла.

В настоящее время вопросу оптимизации параметров распределительных сетей среднего напряжения уделяется мало внимания [2].

Постановка задачи. В связи с вышесказанным актуальной является задача разработки алгоритма выбора оптимального класса напряжения для системы электроснабжения газового месторождения.

Найти оптимальный класс напряжения в системе электроснабжения газового месторождения означает найти тот класс напряжения, при котором система будет иметь минимальные дисконтированные затраты с учетом всего жизненного цикла месторождения.

Основная задача исследования – получение математической модели – функции отклика (уравнение регрессии), т. е. уровня связи выходного показателя объекта Y и входных независимых управляемых факторов x_1, x_2, \dots, x_n [3, 4, 5].

При этом находится совокупность варьируемых факторов, при которых выбранное уравнение регрессии принимает экстремальное значение:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) = b_0 + \sum_{i=1}^n b_{0i} x_i + \sum_{i,j} b_{ij} x_i x_j + \dots + \dots,$$

где b_0, b_i, b_{ij} – коэффициенты полинома.

Методы исследования. Особенности системы электроснабжения газовых месторождений приводят к невозможности проведения на них реальных исследований и натурных экспериментов. Поэтому изменения параметров этих систем проводятся с применением методов математического моделирования, в частности метода планирования эксперимента (полный факторный эксперимент), методов программирования на ЭВМ. В соответствии с принципа-

ми планирования эксперимента, значения учитываемых факторов варьируются по определенному плану.

Теоретическая часть. Электроснабжение кустов газовых скважин выполняется по третьей категории надежности².

При построении математической модели расчетная электрическая мощность одного куста в первый/второй период жизни принята 0,1 МВт, в третий – 1 МВт (за счет ввода мобильной компрессорной установки).

Метод определения оптимального напряжения состоит в планировании полного факторного эксперимента (ПФЭ) типа 2^k , где k – число рассматриваемых факторов.

Решение поставленной задачи связано с выбранным перечнем факторов, в различной степени влияющих на выбор класса напряжения.

Для каждого влияющего фактора в табл. 1 выбраны диапазоны изменения (варьирования), позволяющие охватить значительное число схем электроснабжения кустов газовых скважин.

Таблица 1. Основные уровни и интервалы варьирования факторов

Фактор	Наименование фактора	Нулевой уровень, x_0	Интервал варьирования, Δx	Верхний уровень, «+»	Нижний уровень, «-»
Распределительная сеть – магистральная схема с одной сквозной магистралью					
x_1	Количество газовых кустов N , шт.	9	7	16	2
x_2	Протяженность линии L , км	10,25	9,75	20	0,5
x_3	Коэффициент прироста электрической нагрузки $k_{пр}$, о.е.	5,5	4,5	10	1
x_4	Коэффициент распределения нагрузки по ВЛ $k_{расп}$, о.е.	0,7	0,15	0,85	0,55

² СТО Газпром 2-6.2-1028-2015. Категорийность электроприемников промышленных объектов ПАО «Газпром». – М., 2015. – 105 с.

При построении математических моделей для системы электроснабжения газовых месторождений использованы стандартные классы напряжения распределительной сети – 6, 10, 20, 35, 110 кВ. Для каждого класса напряжения построена своя схема электроснабжения. Общее количество построенных схем электроснабжения – 80.

Для нахождения оптимального напряжения указанных схем определены дисконтированные затраты при комплексном изменении всех влияющих на них факторов.

Расчет дисконтированных затрат схем электроснабжения выполнен в программе «ПРАДИЗ» [6].

При расчете дисконтированных затрат использовались такие параметры, как капитальные затраты, основные средства (стоимость оборудования, стоимость строительно-монтажных работ, коэффициент технологический, коэффициент удорожания), эксплуатационные затраты (тариф электроэнергии, расходы на оплату труда, общехозяйственные расходы, капитальный ремонт, расходы на техобслуживание и ремонт оборудования, сроки полезного использования основных фондов, налог на имущество, социальные выплаты, плата за землю, НДС, ставка дисконта), численность рабочего персонала, технологические показатели (потери электроэнергии, площадь землеотвода, численность рабочих и АУП).

Математическая модель расчета дисконтированных затрат (млн руб.) распределительной сети для напряжения 6 кВ имеет вид

$$R_{6кВ} = 506 + 275 \cdot x_1 + 450 \cdot x_2 + 334 \cdot x_3 + 117 \cdot x_4 + 241 \cdot x_1x_2 + 229 \cdot x_1x_3 + 311 \cdot x_2x_3 + 93 \cdot x_1x_4 + 112 \cdot x_2x_4 + 93 \cdot x_3x_4 + 210 \cdot x_1x_2x_3 + 89 \cdot x_1x_2x_4 + 67 \cdot x_1x_3x_4 + 88 \cdot x_2x_3x_4 + 66 \cdot x_1x_2x_3x_4. \quad (1)$$

Математическая модель расчета дисконтированных затрат (млн руб.) распределительной сети для напряжения 10 кВ имеет вид

$$R_{10кВ} = 399 + 202 \cdot x_1 + 353 \cdot x_2 + 252 \cdot x_3 + 133 \cdot x_4 + 176 \cdot x_1x_2 + 181 \cdot x_1x_3 + 239 \cdot x_2x_3 + 81 \cdot x_1x_4 + 130 \cdot x_2x_4 + 129 \cdot x_3x_4 + 169 \cdot x_1x_2x_3 + 78 \cdot x_1x_2x_4 + 77 \cdot x_1x_3x_4 + 126 \cdot x_2x_3x_4 + 74 \cdot x_1x_2x_3x_4. \quad (2)$$

Математическая модель расчета дисконтированных затрат (млн руб.) распределительной сети для напряжения 20 кВ имеет вид

$$R_{20кВ} = 226 + 86 \cdot x_1 + 152 \cdot x_2 + 86 \cdot x_3 + 12 \cdot x_4 + 43 \cdot x_1x_2 + 71 \cdot x_1x_3 + 44 \cdot x_2x_3 + 9,1 \cdot x_1x_4 + 10,5 \cdot x_2x_4 + 11,7 \cdot x_3x_4 + 41,8 \cdot x_1x_2x_3 + 7,68 \cdot x_1x_2x_4 + 8,83 \cdot x_1x_3x_4 + 10,1 \cdot x_2x_3x_4 + 7,34 \cdot x_1x_2x_3x_4. \quad (3)$$

Математическая модель расчета дисконтированных затрат (млн руб.) распределительной сети для напряжения 35 кВ имеет вид

$$R_{35кВ} = 296 + 103 \cdot x_1 + 152 \cdot x_2 + 74 \cdot x_3 + 11 \cdot x_4 + 12,3 \cdot x_1x_2 + 56,7 \cdot x_1x_3 + 12,3 \cdot x_2x_3 + 6,06 \cdot x_1x_4 + 1,23 \cdot x_2x_4 + 11,05 \cdot x_3x_4 + 12 \cdot x_1x_2x_3 - 4 \cdot x_1x_2x_4 + 5,95 \cdot x_1x_3x_4 + 1,11 \cdot x_2x_3x_4 - 3,94 \cdot x_1x_2x_3x_4. \quad (4)$$

Математическая модель расчета дисконтированных затрат (млн руб.) распределительной сети для напряжения 110 кВ имеет вид

$$R_{110кВ} = 661 + 279 \cdot x_1 + 202 \cdot x_2 + 242 \cdot x_3 + 25 \cdot x_4 - 18 \cdot x_1x_2 + 166 \cdot x_1x_3 - 16 \cdot x_2x_3 + 13 \cdot x_1x_4 - 12 \cdot x_2x_4 + 26 \cdot x_3x_4 - 18 \cdot x_1x_2x_3 - 25 \cdot x_1x_2x_4 + 13 \cdot x_1x_3x_4 - 12 \cdot x_2x_3x_4 - 25 \cdot x_1x_2x_3x_4. \quad (5)$$

Выбор оптимального напряжения при формировании общей модели осуществляется методом Лагранжа по трем точкам дисконтированных затрат.

Полученная математическая модель оптимального нестандартного напряжения (кВ) распределительной сети для системы электроснабжения газового месторождения имеет вид

$$U_{\text{опт}} = 18,04 + 3,48 \cdot x_1 + 6,62 \cdot x_2 + 6 \cdot x_3 + 2,41 \cdot x_4 + 2,54 \cdot x_1x_2 + 4,10 \cdot x_1x_3 + 6,22 \cdot x_2x_3 + 1,12 \cdot x_1x_4 + 2,05 \cdot x_2x_4 + 0,72 \cdot x_3x_4 + 4,56 \cdot x_1x_2x_3 + 0,99 \cdot x_1x_2x_4 - 0,59 \cdot x_1x_3x_4 + 0,62 \cdot x_2x_3x_4 - 0,49 \cdot x_1x_2x_3x_4. \quad (6)$$

Значение напряжения при расчете оптимального напряжения по математиче-

ской модели (6), как правило, получается нестандартным.

Стандартное напряжение сети трехфазного переменного тока – класс напряжения 6, 10, 20, 35, 110 кВ, который принят на территории Российской Федерации³ [7].

Ниже предложен алгоритм расчета оптимального стандартного напряжения с учетом всего жизненного цикла газового месторождения:

- определить исходные данные (количество кустов газовых скважин, расстояние от источника питания до потребителя, коэффициент прироста электрической нагрузки, коэффициент распределения нагрузки на линии электропередачи);

- рассчитать оптимальное нестандартное напряжение в первый период жизненного цикла месторождения по математической модели (6) – $U_{\text{опт1п.ж.}}$;

- в первый период жизненного цикла найти по шкале стандартных номинальных напряжений ближайшее большее ($U_{\text{б.б.1п.ж.}}$) и ближайшее меньшее ($U_{\text{б.м.1п.ж.}}$) стандартное напряжение;

- в первый период жизненного цикла рассчитать дисконтированные затраты по математическим моделям (1)–(5) для ближайших стандартных напряжений ($R_{\text{б.б.1п.ж.}}$, $R_{\text{б.м.1п.ж.}}$);

- определить оптимальное стандартное напряжение по минимальным дисконтированным затратам из ближайшего большего и ближайшего меньшего стандартного напряжения для первого периода жизненного цикла;

- рассчитать оптимальное нестандартное напряжение для третьего периода жизненного цикла по математической модели (6) – $U_{\text{опт3п.ж.}}$;

- в третий период жизненного цикла найти по шкале стандартных номинальных напряжений ближайшее большее ($U_{\text{б.б.3п.ж.}}$) и ближайшее меньшее стандартное напряжение ($U_{\text{б.м.3п.ж.}}$);

- в третий период жизненного цикла рассчитать дисконтированные затраты по математическим моделям (1)–(5) для ближайших стандартных напряжений ($R_{\text{б.б.3п.ж.}}$, $R_{\text{б.м.3п.ж.}}$);

- определить оптимальное стандартное напряжение по минимальным дисконтированным затратам из ближайшего большего и ближайшего меньшего стандартного напряжения для третьего периода жизненного цикла;

- найти разницу между дисконтированными затратами в третьем и первом периодах жизненного цикла оптимального класса напряжения первого периода жизненного цикла $\Delta R_{\text{допт.1п.ж.}} = R_{\text{допт.1п.ж.}} - R_{\text{3п.ж.}}$;

- найти разницу между дисконтированными затратами в третьем и первом периодах жизненного цикла оптимального класса напряжения третьего периода жизненного цикла $\Delta R_{\text{допт.3п.ж.}} = R_{\text{допт.3п.ж.}} - R_{\text{1п.ж.}}$;

- определить оптимальное стандартное напряжение с учетом всего жизненного цикла газового месторождения по минимальной разнице дисконтированных затрат.

Предложенный алгоритм с помощью языка программирования C# реализован в программе «ПРОН» [8].

Результаты экспериментальных исследований. В программе «ПРОН» исследованы существующие распределительные сети системы электроснабжения газовых месторождений Западной Сибири (первого, второго, четвертого, пятого участков ачимовских отложений Уренгойского месторождения, Юбилейного месторождения и Южно-Русского месторождения) по критерию оптимального класса напряжения с учетом прогнозируемого коэффициента прироста нагрузки $k_{\text{пр}} = 10$ о.е. в третьем периоде жизненного цикла месторождения.

Результаты расчетов дисконтированных затрат распределительной сети при классах напряжения 6, 10, 20, 35 и 110 кВ представлены на рис. 1–7 в виде зависимостей дисконтируемых затраты от класса напряжения $R(U)$.

³ГОСТ 721-77. Системы электроснабжения, сети, источники, преобразователи и приемники электрической энергии. Номинальные напряжения свыше 1000 В = Power supply systems, networks, sources, converters and receivers of electric energy. Rated voltages above 1000 V: межгосударственный стандарт: издание официальное: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 27 мая 1977 года № 1376: дата введения 1978-07-01 / разработан и внесен Министерством энергетики и электрификации СССР.

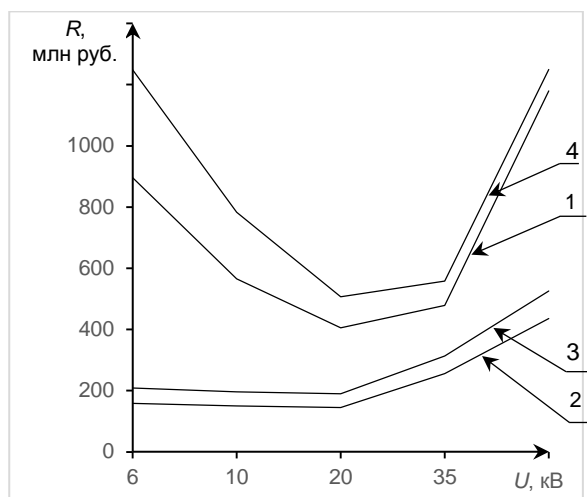


Рис. 1. Зависимость дисконтированных затрат от класса напряжения распределительной сети ВЛ (Юбилейное газовое месторождение): 1 – ВЛ «Куст №33», I и II периоды жизни с $k_{пр} = 1$; 2 – ВЛ «Куст №33», III период жизни с $k_{пр} = 10$; 3 – ВЛ «Куст №25», I и II периоды жизни с $k_{пр} = 1$; 4 – ВЛ «Куст №25», III период жизни с $k_{пр} = 1$

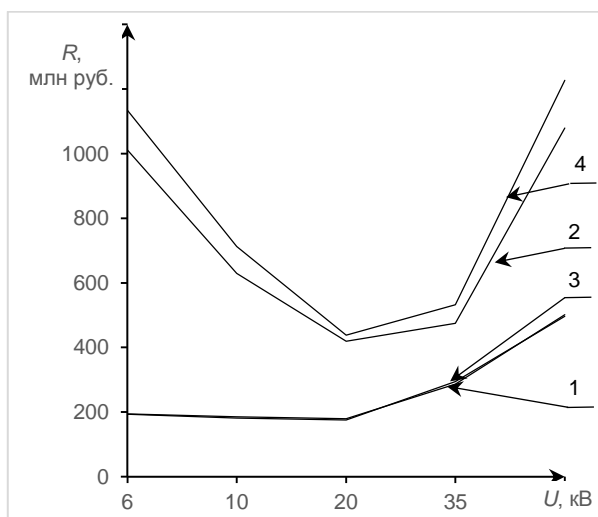


Рис. 2. Зависимость дисконтированных затрат от класса напряжения распределительной сети ВЛ УКПГ 22 (второй участок ачимовских отложений, Уренгойское газовое месторождение): 1 – ВЛ «Куст K2A06», I и II периоды жизни с $k_{пр} = 1$; 2 – ВЛ «Куст K2A06», III период жизни с $k_{пр} = 10$; 3 – ВЛ «Куст K2A32», I и II периоды жизни с $k_{пр} = 1$; 4 – ВЛ «Куст K2A32», III период жизни с $k_{пр} = 10$

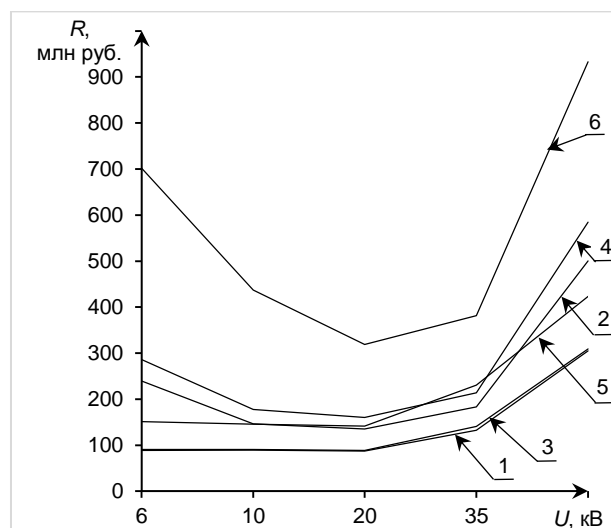


Рис. 3. Зависимость дисконтированных затрат от класса напряжения распределительной сети ВЛ УКПГ 21 (второй участок ачимовских отложений, Уренгойское газовое месторождение): 1 – ВЛ «Куст K2A30», I и II периоды жизни с $k_{пр} = 1$; 2 – ВЛ «Куст K2A30», III период жизни с $k_{пр} = 10$; 3 – ВЛ «Куст K2A34», I и II периоды жизни с $k_{пр} = 1$; 4 – ВЛ «Куст K2A34», III период жизни с $k_{пр} = 10$; 5 – ВЛ «Куст K2A01», I и II периоды жизни с $k_{пр} = 1$; 6 – ВЛ «Куст K2A01», III период жизни с $k_{пр} = 10$

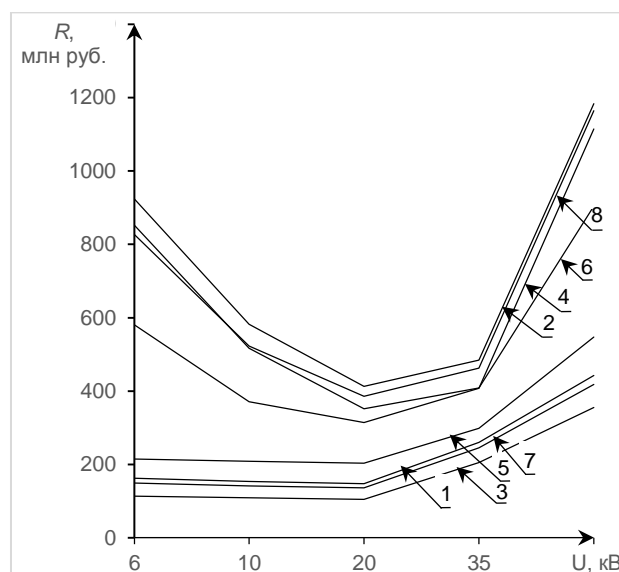


Рис. 4. Зависимость дисконтированных затрат от класса напряжения распределительной сети ВЛ (Южно-Русское газовое месторождение): 1 – ВЛ «Куст 38», I и II периоды жизни с $k_{пр} = 1$; 2 – ВЛ «Куст 38», III период жизни с $k_{пр} = 10$; 3 – ВЛ «Куст 18», I и II периоды жизни с $k_{пр} = 1$; 4 – ВЛ «Куст 18», III период жизни с $k_{пр} = 10$; 5 – ВЛ «Куст 23», I и II периоды жизни с $k_{пр} = 1$; 6 – ВЛ «Куст 23», III период жизни с $k_{пр} = 10$; 7 – ВЛ «Куст 39», I и II периоды жизни с $k_{пр} = 1$; 8 – ВЛ «Куст 39», III период жизни с $k_{пр} = 10$

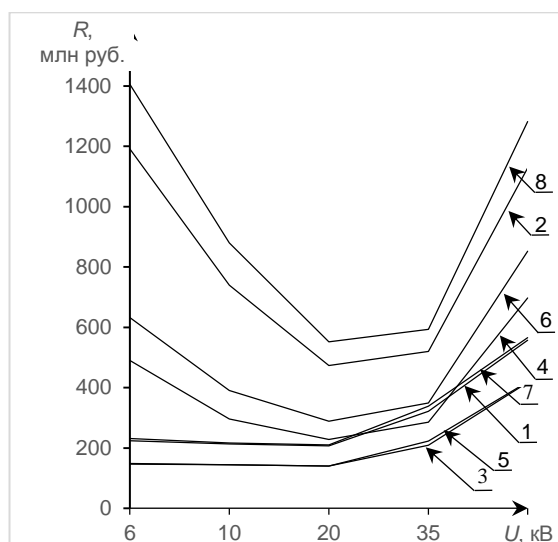


Рис. 5. Зависимость дисконтированных затрат от класса напряжения распределительной сети ВЛ УКПГ 31 (первый участок ачимовских отложений, Уренгойское газовое месторождение): 1 – ВЛ «Куст 1», I и II периоды жизни с $k_{пр} = 1$; 2 – ВЛ «Куст 1», III период жизни с $k_{пр} = 10$; 3 – ВЛ «Куст 18А», I и II периоды жизни с $k_{пр} = 1$; 4 – ВЛ «Куст 18А», III период жизни с $k_{пр} = 10$; 5 – ВЛ «Куст 3», I и II периоды жизни с $k_{пр} = 1$; 6 – ВЛ «Куст 3», III период жизни с $k_{пр} = 10$; 7 – ВЛ «Куст 32», I и II периоды жизни с $k_{пр} = 1$; 8 – ВЛ «Куст 32», III период жизни с $k_{пр} = 10$

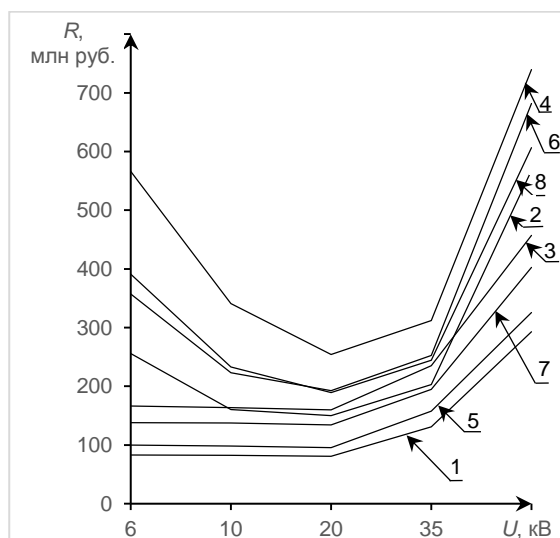


Рис. 6. Зависимость дисконтированных затрат от класса напряжения распределительной сети ВЛ УКПГ 41 (четвертый участок ачимовских отложений, Уренгойское газовое месторождение): 1 – ВЛ «Куст К4А01», I и II периоды жизни с $k_{пр} = 1$; 2 – ВЛ «Куст К4А01», III период жизни с $k_{пр} = 10$; 3 – ВЛ «Куст К4А07», I и II периоды жизни с $k_{пр} = 1$; 4 – ВЛ «Куст К4А07», III период жизни с $k_{пр} = 10$; 5 – ВЛ «Куст К4А18», I и II периоды жизни с $k_{пр} = 1$; 6 – ВЛ «Куст К4А18», III период жизни с $k_{пр} = 10$; 7 – ВЛ «Куст К4А25», I и II периоды жизни с $k_{пр} = 1$; 8 – ВЛ «Куст К4А25», III период жизни с $k_{пр} = 10$

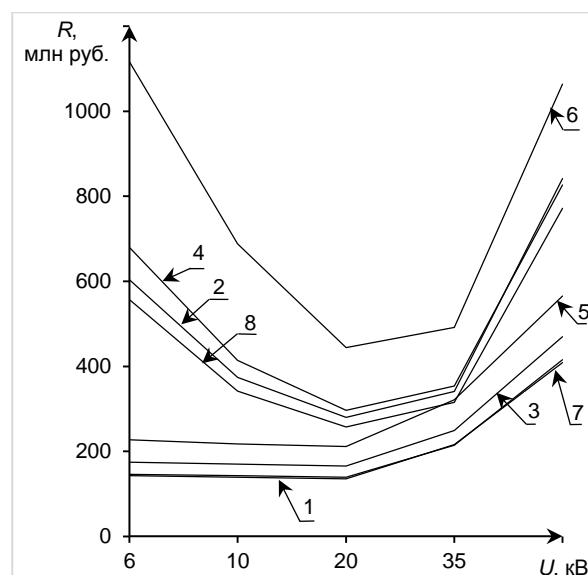


Рис. 7. Зависимость дисконтированных затрат от класса напряжения распределительной сети ВЛ УКПГ 51 (пятый участок Ачимовских отложений, Уренгойское газовое месторождение): 1 – ВЛ «Куст К-5А22», I и II периоды жизни с $k_{пр} = 1$; 2 – ВЛ «Куст К-5А22», III период жизни с $k_{пр} = 10$; 3 – ВЛ «Куст К-5А24», I и II периоды жизни с $k_{пр} = 1$; 4 – ВЛ «Куст К-5А24», III период жизни с $k_{пр} = 10$; 5 – ВЛ «Куст К-5А23», I и II периоды жизни с $k_{пр} = 1$; 6 – ВЛ «Куст К-5А23», III период жизни с $k_{пр} = 10$; 7 – ВЛ «Куст К-5А25», I и II периоды жизни с $k_{пр} = 1$; 8 – ВЛ «Куст К-5А25», III период жизни с $k_{пр} = 10$

Выводы. В результате выполненного исследования систем электроснабжения кустов газовых скважин ряда действующих газовых месторождений Западной Сибири по критерию оптимального класса напряжения установлено, что оптимальный класс напряжения для распределительной сети – 20 кВ. В этом классе напряжения при росте электрической нагрузки разница между значениями дисконтированных затрат минимальна.

Программный продукт «ПРОН» рекомендуется к внедрению в средства автоматизированного проектирования системы электроснабжения газовых месторождений.

Список литературы

1. **Применение** мобильных компрессорных установок на завершающей стадии разработки газовых залежей / В.З. Минликаев, Д.В. Дикамов, О.В. Арно и др. // Газовая промышленность. – 2015. – № 1(717). – С. 15–17.
2. **Reliability** improvement of radial distribution system with distributed generation / G.V.K. Murthy, Dr. S.Sivanagaraju, Dr. S.Satyana-rayana, B. Hanumantha Rao // International Jour-

nal of Engineering Science and Technology (IJEST). – 2012. – Vol. 4, No. 09, September.

3. **Ивоботенко Б.А., Ильинский Н.Ф., Копылов И.П.** Планирование эксперимента в электромеханике. – М.: Энергия, 1975. – 185 с.

4. **Федоров А.А., Никульченко А.Г., Садчиков С.В.** К вопросу оптимизации построения сети промышленного электроснабжения // Труды Московского энергетического института. – 1980. – Вып. 446. – С. 10–14.

5. **Мелентьев Л.А.** Методы математического моделирования в энергетике. – М.: СР АН СССР, 1966. – 260 с.

6. **Свидетельство** об официальной регистрации программы для ЭВМ 2020619917 Российская Федерация. Программа для расчета дисконтируемых затрат системы внешнего электроснабжения промышленных предприятий (ПРАДИЗ) / И.М. Богачков; заявитель и правообладатель Богачков И.М. (RU). – № 2020617970; заявл. 29.07.2020; опубл. 26.08.2020, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

7. **Шабад М.А.** Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. – 4-е изд., исп. и доп. – СПб.: ПЭИПК, 2010. – 296 с.

8. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ 2020662391 Российская Федерация. Программа для расчета оптимального класса напряжения системы внешнего электроснабжения (ПРОН) / И.М. Богачков, Д.Р. Валеева. – № 2020660176/69; опубл. 13.10.2020.

References

1. Minlikaev, V.Z., Dikamov, D.V., Arno, O.V., Merkulov, A.V., Kirsanov, S.A., Krasovskiy, A.V., Svetskiy, S.Yu., Kononov, A.V. Primenenie mobil'nykh kompressornykh ustanovok na zavershayushchey stadii razrabotki gazovykh zalezhey [Application of mobile compressor units at the final

stage of development of gas fields]. *Gazovaya promyshlennost'*, 2015, no. 1(717), pp. 15–17.

2. Murthy, G.V.K., Dr. S.Sivanagaraju, Dr. S.Satyanarayana, B. Hanumantha Rao. Reliability improvement of radial distribution system with distributed generation. *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, 2012, vol. 4, no. 09, September.

3. Ivobozhenko, B.A., Ilinskii, N.F., Kopylov, I.P. *Planirovanie eksperimenta v elektromekhanike* [Planning an experiment in electromechanics]. Moscow: Energiya, 1975. 185 p.

4. Fedorov, A.A., Nikul'chenko, A.G., Sadchikov, S.V. K voprosu optimizatsii postroeniya seti promyshlennogo elektrosnabzheniya [On the issue of optimizing the construction of an industrial power supply network]. *Trudy Moskovskogo energeticheskogo instituta*, 1980, issue 446, pp. 10–14.

5. Melent'ev L.A. *Metody matematicheskogo modelirovaniya v energetike* [Methods of mathematical modeling in power engineering]. Moscow: SR AN SSSR, 1966. 260 p.

6. Bogachkov, I.M. Programma dlya rascheta diskontiruemykh zatrat sistemy vneshnego elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy [Program for calculating discounted costs of the external power supply system for industrial enterprises]. *Svidetel'stvo ob ofitsial'noy registratsii programmy dlya EVM no. 2020619917* [Certificate of state registration of a computer program], 2020.

7. Shabad, M.A. *Raschety reley'noy zashchity i avtomatiki raspredelitel'nykh setey* [Calculations of relay protection and distribution networks automatization]. Saint-Petersburg: PEIPK, 2010. 296 p.

8. Bogachkov, I.M., Valeeva, D.R. Programma dlya rascheta optimal'nogo klassa napryazheniya sistemy vneshnego elektrosnabzheniya [Program for calculating the optimal voltage class of the external electricity supply system]. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM no. 2020662391* [Certificate of state registration of a computer program], 2020.

УДК 621.314

Алексей Васильевич Гусенков

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, проректор по учебной работе, заведующий кафедрой электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования, Россия, Иваново, e-mail: avgus@ispu.ru

Андрей Александрович Дьячков

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», учебный мастер кафедры высоковольтной электроэнергетики, электротехники и электрофизики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-23

Владимир Дмитриевич Лебедев

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, заведующий кафедрой автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: vd_lebedev@mail.ru

Александр Михайлович Соколов

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, доцент кафедры высоковольтной электроэнергетики, электротехники и электрофизики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-04, e-mail: alex2010fn@yandex.ru

Тимофей Евгеньевич Шадриков

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры высоковольтной электроэнергетики, электротехники и электрофизики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-04, e-mail: Pr3d37@gmail.com

Комплексная методика расчета несинусоидальных систем переменного тока повышенной частоты

Авторское резюме

Состояние вопроса. При исследовании и разработке принципиально новых электротехнических комплексов повышенной частоты выявлены проблемы с расчетами и моделированием режимов работы таких систем по методике Ю.М. Осипова. Применение методики дает результаты, значительно отличающиеся от экспериментальных. Целью исследования является совершенствование методики в направлении учета особенностей электротехнических комплексов повышенной частоты, их топологии и компонентов.

Материалы и методы. Исследование проведено на математической модели электротехнического комплекса повышенной частоты, включающей в себя источник питания, согласующие трансформаторы, кабельные линии и нагрузку. Источник питания моделируется в упрощенной форме с наличием внутреннего сопротивления транзисторов.

Результаты. Разработана аналитическая методика расчета и моделирования систем переменного тока повышенной частоты. Выведены аналитические выражения для расчета характеристик и параметров компонентов электротехнических комплексов повышенной частоты. Даны рекомендации по автоматизации разработанной методики с применением MATLAB, Python или Simulink. Выполнено сравнение результатов расчета и эксперимента в целях подтверждения их достоверности.

Выводы. Выполненные разработки могут быть использованы для моделирования и расчета систем переменного тока повышенной частоты в целях определения токовой загрузки, уровней напряжения, анализа перенапряжений и аварийных режимов.

Ключевые слова: частотный анализ, инвертор, двухпроводный кабель, напряжение повышенной частоты, преобразования Фурье, трансформаторы повышенной частоты, электротепловая обработка, электромобили

Alexey Vasilievich Gusenkov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, Academic Vice-Rector, Head of Electric Power Plants, Substations and Electrical Equipment Diagnostics Department, Russia, Ivanovo, e-mail: avgus@ispu.ru

Andrey Alexandrovich Dyachkov

Ivanovo State Power Engineering University, Training Master of High-Voltage Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electrophysics Department, Russia, Ivanovo, telephone: (4932) 26-97-23

Vladimir Dmitrievich Lebedev

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, Head of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: vd_lebedev@mail.ru

Alexander Mikhailovich Sokolov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor of High-Voltage Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electrophysics Department, Russia, Ivanovo, telephone: (4932) 26-99-04, e-mail: alex2010fn@yandex.ru

Timofey Evgenievich Shadrikov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of High-Voltage Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electrophysics Department, Russia, Ivanovo, telephone: (4932) 26-99-04, e-mail: Pr3d37@gmail.com

Integrated methodology to calculate nonsinusoidal AC systems of high frequency

Abstract

Background. During the research and development of fundamentally new AC systems of high frequency, the authors identified the problems of the calculations and modeling of the operating modes of such systems according to the method of Yu.M. Osipova. Application of the method gives results that are significantly different from the experimental ones. The aim of the study is to improve the methodology considering the features of high-frequency electrical systems, their topology, and components.

Materials and methods. The research has been carried out based on a mathematical model of an electrical system of high frequency, which includes a power supply, matching transformers, cable lines and a load. The power supply is modeled in a simplified form with the internal resistance of the transistors.

Results. An analytical technique for calculating and modeling high-frequency AC systems has been developed. Analytical expressions are presented to calculate the characteristics and parameters of the high frequency system components. Recommendations on automation of the developed technique using MATLAB, Python or Simulink are presented. Comparison of the results of calculation and the experiment is carried out to confirm the reliability.

Conclusions. The results of the research work can be used for modeling and calculating high frequency alternating current systems to determine the current load, voltage levels, analyze overvoltages and emergency modes.

Key words: frequency analysis, inverter, two-wire cable, high frequency, Fourier transform, high frequency transformers, electrothermal treatment, electric vehicles

DOI: 10.17588/2072-2672.2021.2.040-054

Введение. Разработка и применения систем переменного тока повышенной частоты с различной формой выходного напряжения в настоящее время является актуальной задачей. В основе таких систем лежит использование преобразователей напряжения (voltage source converter (inverter) VSC/VSI), выполненных на мощных полупроводниковых элементах – IGBT-транзисторах. Подобный подход лег в основу систем постоянного тока высокого напряжения (VSC HDVC).

В отличие от HVDC, системы переменного тока повышенной частоты и их компоненты имеют более широкие перспективы применения, в том числе вне

большой энергетики. К их числу можно отнести разработку и применение синхронных генераторов повышенной частоты с преобразователями напряжения [1–3], разработку блоков ПГУ с генераторами, производящими напряжение повышенной частоты [2–5], разработку зарядной инфраструктуры и сети зарядных станций для электробусов и электромобилей [6, 7], разработку композиционных материалов токами повышенной частоты [8, 9] систем освещения и др.

Опыт практического применения ЭТКПЧ показал [8], что подобные комплексы могут успешно применяться для целей термической (электротепловой) обработки

различных композиционных материалов и индукционного нагрева. В ходе НИОКР была выявлена острая необходимость в создании расчетной методики и математической модели, позволяющих описать ЭТКПЧ различной конфигурации. Необходимость разработки расчетной методики и модели продиктована широким использованием инструментов автоматизации с применением современного ПО (например, MATLAB, Simulink).

Ранее [10, 11] были выполнены исследования в разработке методов расчета и моделирования систем переменного тока повышенной частоты. Первоначально на основе частотного анализа [10] была разработана методика расчета электрических цепей, содержащих транзисторные преобразователи напряжения, позволяющая использовать метод частотного анализа на основе разложения воздействующего напряжения в ряд Фурье.

В дальнейших исследованиях было произведено совершенствование методики [11] в целях оптимизации процедуры вычислений на основе численного интегрирования и уточнения параметров расчета внутреннего сопротивления источника питания, выполненного на IGBT-транзисторах [12].

Ниже приводится обобщенная методика расчета несинусоидальных систем переменного тока повышенной частоты в установившемся режиме работы.

Методика включает в себя следующие этапы:

- составление и анализ схемы замещения сетей переменного тока повышенной частоты;
- определение параметров схемы замещения (в том числе, компонентов ЭТКПЧ);
- определение частотных эффектов и их влияния на характеристики компонентов (транзисторов, трансформаторов, кабелей и т.п.);
- определение особенностей применения частотного анализа для расчета установившихся режимов работы таких систем.

По результатам применения методики к конкретному комплексу повышенной частоты может быть построена математическая модель, пригодная для выполнения следующих процедур:

- *расчета токов и напряжений в узлах системы;*

- *определения минимальной и максимальной токовой нагрузки (режимов работы) и выбора соответствующих компонентов;*

- *анализа перенапряжений, резонансных эффектов и предельно допустимых режимов работы изоляции;*

- *расчета и анализа режимов холостого хода и короткого замыкания;*

- *гармонического анализа физических параметров (мощности, тока, напряжения);*

- *определения потерь мощности, КПД и анализа эффективности.*

Методика рассматривается применительно к варианту ЭТКПЧ магистрального типа и единичному устройству электротепловой обработки (ЭТО), как пример ЭТКПЧ в частной реализации.

Схема замещения. Для исследования режимов работы и анализа процессов, происходящих в ЭТКПЧ, необходимо правильно составить эквивалентную схему замещения с учетом конфигурации ЭТКПЧ и его отличительных особенностей.

В зависимости от способа применения комплекса повышенной частоты, были разработаны несколько его конфигураций:

- единичное устройство повышенной частоты (например, электротепловая обработка одного или нескольких конкретных изделий из композита на предприятиях малого бизнеса) (рис. 1,а);

- ЭТКПЧ радиального типа, предназначенный для организации электропитания с использованием кабельных линий высокого напряжения и значительного числа потребителей в виде объектов электротепловой обработки, подключенных на конце кабельной линии (рис. 1,б);

- ЭТКПЧ магистрального типа, предназначенный для организации электропитания с использованием кабельных линий высокого напряжения и наличием потребителей как в конце кабельной линии, так и в промежуточных точках (присоединения) (рис. 1,б).

Единичное устройство повышенной частоты для электротепловой обработки состоит из преобразователя на основе биполярных транзисторов и согласующего трансформатора повышенной частоты. Эквивалентная схема замещения (на рис. 1,а) показана на рис. 2.

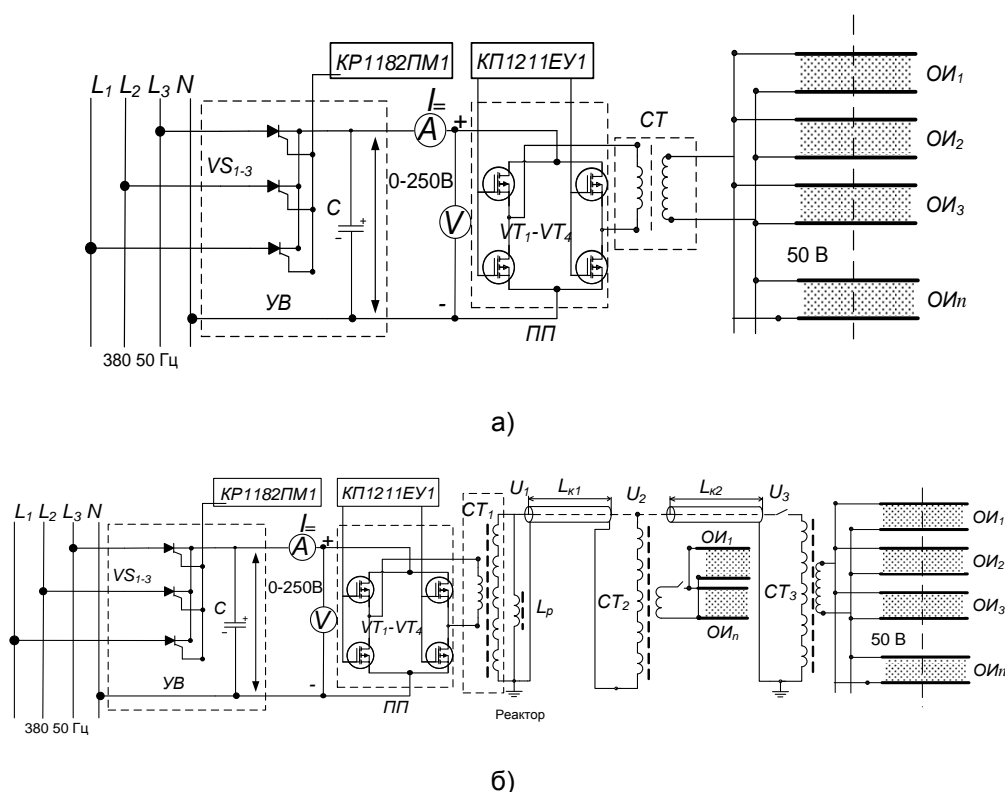


Рис. 1. Принципиальная схема устройства электротепловой обработки (а) и электротехнического комплекса повышенной частоты с различной конфигурацией (б): УВ – управляемый выпрямитель; ПП – полупроводниковый преобразователь; СТ – согласующий трансформатор; ОИ – обрабатываемое изделие; C – емкость на шинах постоянного тока; VT_1-VT_4 , VD_1-VD_4 – силовые транзисторы и диоды полупроводникового преобразователя; L_k – кабельная линии электропередачи; L_p – реактор

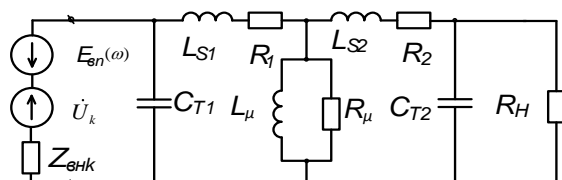


Рис. 2. Схема замещения ЭТПЧ (рис. 1,а): U_k – источник напряжения k -й гармоники, иллюстрирующий работу преобразователя напряжения; $E_{\text{вп}}$ – противо-ЭДС; $Z_{\text{внк}}$ – внутреннее сопротивление преобразователя напряжения, необходимое для учета зависимости сопротивления транзистора в открытом состоянии от частоты (будет показано далее); C_{T1} и C_{T2} – емкость обмоток низшего и высшего напряжения силового трансформатора; L_{S1} и L_{S2} – индуктивности рассеивания обмоток низшего и высшего напряжения силового трансформатора; R_1 и R_2 – активные сопротивления обмоток низшего и высшего напряжения силового трансформатора; R_H – активное сопротивление нагрузки; R_{μ} и L_{μ} – активное сопротивление и индуктивность ветви намагничивания трансформатора

При составлении общей эквивалентной схемы замещения ЭТПЧ может потребоваться использование эквивалентных схем замещения следующих компонентов [12, 13]:

- источника питания повышенной частоты;
- повышающих/понижающих трансформаторов;
- высоковольтной кабельной линии;
- нагрузки (как правило, носит чисто активный или активно-индуктивный характер).

В случае, если осуществляется централизованное электропитание множества точек ЭТО, необходимо использовать иной порядок составления схемы замещения (рис. 1,б). Необходимо также учитывать различия конфигураций радиального и магистрального комплексов (рис. 1).

ЭТПЧ, представленный на рис. 1,б, имеет в своем составе радиальную высоковольтную линию электроснабжения повышенной частоты с питанием от транзисторного преобразователя. Радиальная схема предполагает наличие в этой конфигурации одной включенной между источни-

Проведенные ранее исследования [16, 17, 21] показали наличие факта запаздывания появления тока коллектора относительно тока эмиттера в транзисторе и позволили получить основополагающее выражение для определения внутреннего сопротивления транзистора от кратности гармоники:

$$Z_{\text{внк}} = \frac{Z_{\text{вн0}}}{|\alpha(\omega)|} = Z_{\text{вн0}} \sqrt{1 + \left(\frac{kf_1}{f_a} m \right)^2}, \quad (1)$$

где $Z_{\text{вн0}} = \frac{\Delta U_T}{I_{k0}}$ – внутреннее сопротивление

транзистора в открытом состоянии при постоянном напряжении; k – 1,3,5... кратность гармоники (в кривой ЭДС присутствуют только нечетные гармоники [21]); f_1 – частота первой гармоники; f_a – предельная частота усиления (паспортное значение); $|\alpha(\omega)|$ – модуль коэффициента передачи транзистора по току; ΔU_T – падение напряжения на открытом транзисторе при постоянном токе I_{k0} (паспортные данные транзистора); m – поправочный коэффициент безразмерного характера.

В [11] показано, что для выполнения расчетов с достаточной сходимостью можно использовать величину $m = \sqrt{3}$.

В (1) используется следующее выражение для коэффициента передачи по току $\alpha(\omega)$:

$$|\alpha(\omega)| = \frac{\alpha_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_a} m \right)^2}} = \frac{\alpha_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{kf_1}{f_a} m \right)^2}}, \quad (2)$$

где $\alpha_0 \approx 1$ – коэффициент передачи по току на постоянном напряжении; f – произвольное значение частоты; $\omega = 2\pi f$, $\omega_a = 2\pi f_a$.

Путем математических преобразований и умножения (1) на ток коллектора получаем

$$\Delta U_T(\omega) = \Delta U_T \left(1 + j \frac{kf_1}{f_a} \right) + E_{\text{вн}}(\omega), \quad (3)$$

где $\Delta U_T(\omega)$ – падение напряжения на открытом транзисторе при произвольных значениях частоты напряжения и кратности гармоники; $E_{\text{вн}}(\omega)$ – противо-ЭДС, отражающее скорректированное значение внутреннего сопротивления (1):

$$E_{\text{вн}}(\omega) = jI_{k0} \cdot Z_{\text{вн0}} \frac{kf_1}{f_a} = j\Delta U_T \frac{kf_1}{f_a}. \quad (4)$$

Выражения (3) и (4) позволяют предложить новый вариант схемы замещения инвертора, представленный рис. 2, 3, в том случае, если для определения внутреннего сопротивления используется выражение (1).

В случае, если внутреннее сопротивление транзистора определяется с помощью формулы (1), в схеме замещения инвертора необходимо исключить противо-ЭДС.

Определение параметров силового трансформатора повышенной частоты. Применение трансформаторов повышенной частоты в составе ЭТКПЧ обусловлено, с одной стороны, необходимостью повышения/понижения величины рабочего напряжения, с другой стороны, необходимостью обеспечения безопасной величины напряжения на нагрузке согласно требованиям ПУЭ⁵.

Ниже приводится способ определения параметров схемы замещения повышающего силового трансформатора повышенной частоты. Базовые основы расчета и проектирования импульсных и силовых трансформаторов повышенной частоты приведены в [13, 14].

Такой трансформатор повышенной частоты обозначен на рис. 3 как T_1 . Конструкция трансформатора представлена на рис. 4. В целях уменьшения емкости трансформатора обмотка высшего напряжения выполнена секциями многослойного типа (рис. 4).

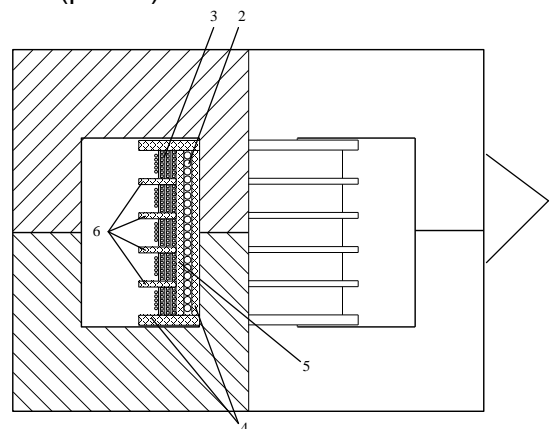


Рис. 4. Конструкция высоковольтного силового трансформатора повышенной частоты: 1 – ферритовый магнитопровод; 2 – обмотка НН; 3 – обмотка ВН; 4 – каркас; 5 – изоляция между обмотками ВН и НН; 6 – секционные прокладки обмотки ВН

⁵ Правила устройства электроустановок (ПУЭ). – 7-е изд. [Утверждены приказом Минэнерго Российской Федерации от 08.07.2002. № 204]. – М.: Омега-Л, 2012. – 272 с.

Для определения параметров схемы замещения трансформатора необходимо рассмотреть конструкцию его обмотки согласно методике [13].

В случае многослойной обмотки высшего напряжения конструкция трансформатора представлена на рис. 5.

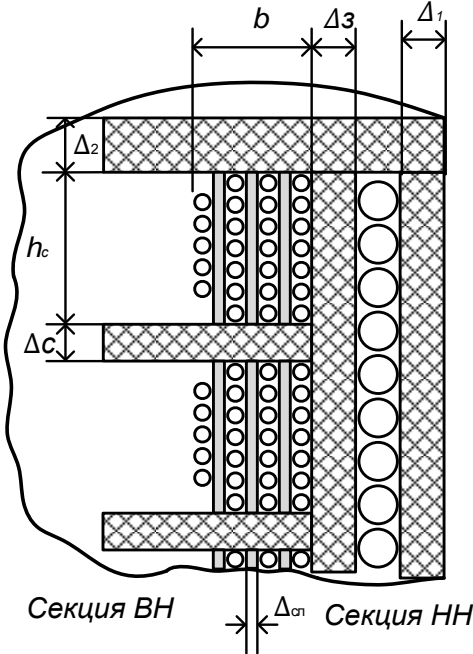


Рис. 5. Чертеж обмоток силового трансформатора повышенной частоты: ВН и НН – секции обмоток высшего и низшего напряжения трансформатора

Емкость обмотки низшего напряжения составляет

$$C_1 = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 l_{\text{CPB}} (h - 2\Delta_2)}{3\Delta_1}, \quad (5)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость материала изоляции; ε_0 – электрическая постоянная; h – высота секции в сечении; l_{CPB} – средняя длина витка (определяется с учетом типоразмера сердечника, каркаса и т.п.); Δ_3 – толщина изоляции между низковольтной и высоковольтной обмотками; Δ_1 и Δ_2 – толщины, определяемые конструктивным исполнением изоляционных прокладок (рис. 5).

Емкость обмотки высокого напряжения в общем случае зависит от числа секций (m) в составе обмотки. Вывод выражения для определения емкости C_2 обмотки высшего напряжения, состоящей из 5 секций (рис. 4), приведен в [13, 14].

Индуктивности рассеивания обмоток рассчитываются по формуле

$$L_{S1} = \frac{\mu_0 w_1^2 l_{\text{CPB}}}{n_{\text{CO}} h + \Delta_c (n_c - 1)} \left(\Delta_3 + \frac{d_1 + d_2}{3} \right), \quad (6)$$

где w_1 – число витков первичной обмотки; h – высота секции в сечении (рис. 5); d_1 – диаметр (высота) провода первичной обмотки; d_2 – диаметр (высота) провода вторичной обмотки; n_{CO} – число секций обмотки высшего напряжения.

Индуктивность высоковольтной обмотки определяется суммированием индуктивностей рассеивания всех секций обмотки:

$$L_{SB} = \frac{\mu_0 w_2^2 l_{\text{CPB}} n_{\text{CO}}}{h} (\Delta_3 + \frac{1}{m^2} \sum_{k=1}^{m-1} (\Delta_{\text{СЛТ}} (m-k)^2 + \frac{d_1}{3} + \frac{1}{3} \sum_{k=0}^{m-1} d_2 F(k, m)), \quad (7)$$

где m – число слоев обмотки в одной секции; $F(k, m)$ – функция числа слоев обмотки, определяемая по выражению

$$F(k, m) = 3 \left[\left(1 - \frac{k}{m} \right) \left(1 - \frac{k+1}{m} \right) + \frac{1}{m^2} \right]. \quad (8)$$

Индуктивность намагничивания определяется следующим выражением [13, 14]:

$$L_\mu = \frac{\mu \mu_0 w_1^2 S_c K_a}{l_\mu}, \quad (9)$$

где μ – относительная магнитная проницаемость магнитного материала магнитопровода (для ферритовых сердечников $\mu = 1700-1800$); $K_a \leq 1$ – коэффициент заполнения сечения магнитопровода (для ферритовых сердечников $K_a = 1$); l_μ – длина средней силовой линии магнитного поля в магнитопроводе.

Активные сопротивления первичной и вторичной обмоток определяются по выражению [13, 14]

$$R_{1,2} = \frac{4 l_{\text{CPB}} w_{1,2} \rho_M}{n_{\text{пр}} \pi d_{\text{пр}}^2}, \quad (10)$$

где $n_{\text{пр}}$ – число одинаковых, параллельно включенных проводов; $d_{\text{пр}}$ – диаметр проводников; ρ_M – удельное сопротивление материала проводника (меди); w – число витков обмотки ВН или НН соответственно.

Величина активного сопротивления, отражающего потери в магнитопроводе силового трансформатора, определяется по формуле

$$R_\mu = \frac{U_k^2}{1,64 \cdot 10^{-3} \cdot f_k^{1,31} B_k^{2,49} \delta V}, \quad (11)$$

где δ , V – плотность материала сердечника и объем магнитопровода соответственно; B_k – индукция магнитного поля в маг-

нитепроводе для k -й гармоники; f_k – частота k -й гармоники.

Указанные выше выражения могут быть применены и для других вариантов конструктивного исполнения трансформаторов повышенной частоты лишь с небольшими изменениями, используя способ и методику, изложенную в [13].

Определение параметров кабельных линий. Представленные на рис. 1, а и 2 схемы замещения единичного устройства электротепловой обработки не предполагают наличия в его составе кабельных линий повышенной частоты. В свою очередь, при реализации радиального или магистрального вариантов ЭТКПЧ для передачи и распределения энергии могут быть использованы кабельные линии высокого напряжения повышенной частоты.

Первоначально в методике, предложенной в [10, 11], рассматривалась возможность применения П-образной схемы замещения с сосредоточенными параметрами для моделирования кабельной линии повышенной частоты. Такое допущение возможно при длине кабельной линии не более 15–20 м, однако для расчета радиальных и магистральных ЭТКПЧ целесообразно использовать уравнения длинной линии [25, 26].

При выполнении расчетов для схемы замещения ЭТКПЧ магистрального типа (рис. 3), когда линия представлена объектом с распределенными параметрами, для описания этого элемента необходимо использовать уравнения длинной линии:

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= \dot{U}_2 \operatorname{ch} \gamma l_K + \dot{I}_2 z \cdot \operatorname{sh} \gamma l_K; \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_2 \operatorname{ch} \gamma l_K + \frac{\dot{U}_2}{z} \operatorname{sh} \gamma l_K; \\ \dot{U}_2 &= \dot{U}_1 \operatorname{ch} \gamma l_K - \dot{I}_1 z \cdot \operatorname{sh} \gamma l_K; \\ \dot{I}_2 &= \dot{I}_1 \operatorname{ch} \gamma l_K - \frac{\dot{U}_1}{z} \operatorname{sh} \gamma l_K,\end{aligned}\quad (12)$$

где \dot{U}_1 , \dot{I}_1 и \dot{U}_2 , \dot{I}_2 – значения напряжения и тока одной и той же гармоники в начале и в конце линии соответственно в комплексной форме; z – волновое сопротивление, определяемое по выражению

$$z = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}; \quad (13)$$

γ – коэффициент распространения волны в линии, определяемый по формуле

$$\gamma = \alpha + j\beta, \quad (14)$$

где α – коэффициент затухания волны в линии:

$$\alpha = 2\pi f_k \sqrt{L_0 C_0} \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{R_0}{2\pi f_k L_0} \right)^2} - 1 \right]};$$

β – коэффициент фазы:

$$\beta = 2\pi f_k \sqrt{L_0 C_0} \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{R_0}{2\pi f_k L_0} \right)^2} + 1 \right]},$$

где R_0 , L_0 и C_0 – погонные параметры линии: активное сопротивление, индуктивность и емкость изоляции

В случае применения кабелей коаксиальной конструкции (например, РК-50, РК-75) погонные реактивные характеристики (L_0 и C_0) могут быть определены посредством справочных (паспортных) данных, с применением эксперимента либо по методике, приведенной в [23].

Для снижения реактивной мощности в системах переменного тока повышенной частоты необходимо рассмотреть возможность внедрения двухпроводных кабельных линий с общим экраном (рис. 6). Такие кабельные линии могут быть выполнены с литой (твердой) или воздушной изоляцией, обладают большим волновым сопротивлением и меньшей погонной емкостью, что благоприятно сказывается на режимах работы ЭТКПЧ [22].

В случае использования такой линии для реализации управляемой электропередачи и с учетом фазового сдвига 180 градусов между напряжениями U_1 и U_2 погонную емкость можно определить с помощью следующего выражения [23–26]:

$$C_0 = \frac{\pi \varepsilon}{\ln \left(\frac{R_3^2 - d^2}{R_3^2 + d^2} \cdot \frac{2d}{r} \right)}. \quad (15)$$

Наиболее сложным вариантом определения параметров кабельной линии является случай, когда проводники двухпроводной линии имеют твердую изоляцию и расположены в заполненной воздухом проводящей оболочке (рис. 6, б). Дополнительно возможны случаи, когда проводники расположены прямо на экране (частный случай варианта схемы 6, б). Вывод формул погонных параметров с использованием потенциальных коэффициентов для таких случаев представлен в [27].

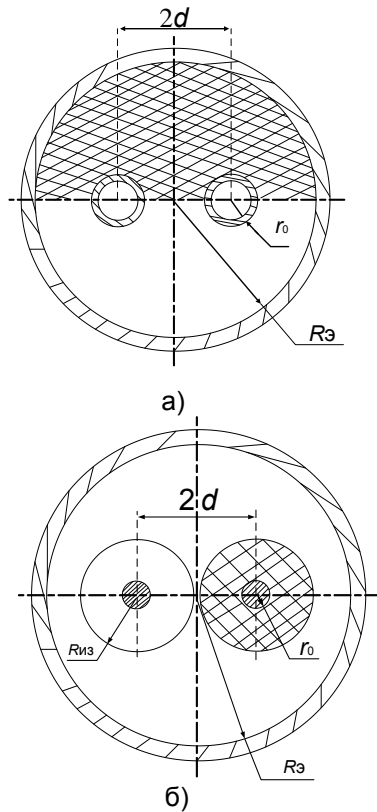


Рис. 6. Варианты двухпроводной кабельной линии

Методика частотного анализа. Для электрических цепей при воздействии синусоидальных периодических величин, как правило, используют комплексную форму записи. Для достижения максимальной передаваемой мощности в нагрузку в ЭТПЧ на выходе инвертора могут быть использованы различные формы воздействующей ЭДС, например прямоугольная форма, трапеция, трапеция с паузой. Последние две получаются естественным образом путем сглаживания прямоугольной формы при работе на индуктивную и емкостную нагрузку. Наличие паузы благоприятно сказывается на работе силовых транзисторов. Таким образом, форма напряжения «трапеция с паузой» является основной в ЭТПЧ [10, 11]. Указанные формы воздействующих ЭДС полупроводникового преобразователя в ЭТПЧ представлены на рис. 7.

При периодических несинусоидальных воздействиях необходимо использовать метод частотного анализа, т.е. выполнить разложение воздействующего на электрическую цепь напряжения (ЭДС) в ряд Фурье [23, 24].

Прямоугольная и трапециевидная форма ЭДС имеют готовые выражения для разложения в ряд Фурье [23], для тра-

пеции с паузой можно воспользоваться наработками в [24].

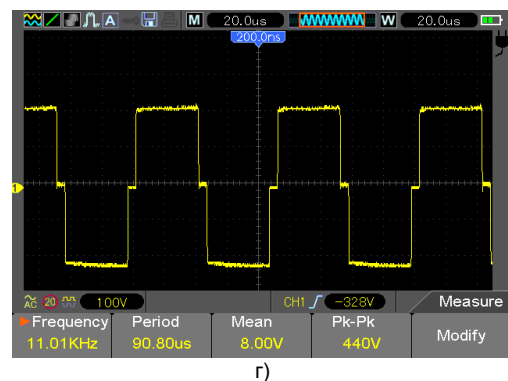
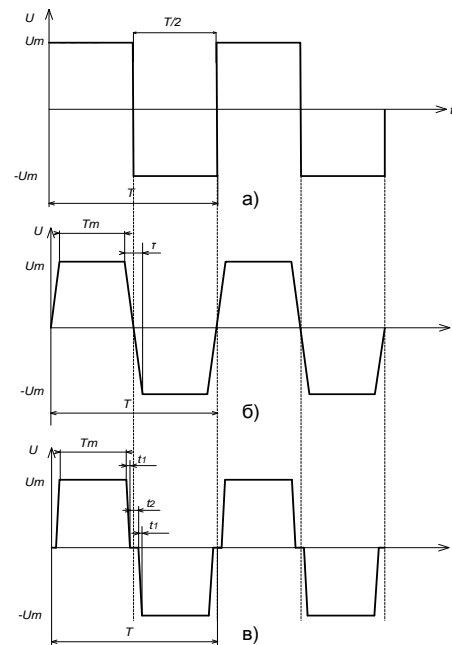


Рис. 7. Формы воздействующих ЭДС в ЭТПЧ: а–в – теоретические представления форм; г – реальная осциллограмма ЭДС в ЭТПЧ

Напряжение (рис. 7,г), получаемое с выхода транзисторного преобразователя (рис. 1, 2, 3) и подаваемое в кабельную линию, имеет разложение в ряд Фурье [22, 27]:

$$U(t) = \frac{4U_m}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(k\omega_1 t)}{k} = \quad (16)$$

$$= \sum_{k=1}^{\infty} U_k \sin(\omega_k t) = \sum_{k=1}^{\infty} U_k(t),$$

где $U_k = (4U_m)/\pi k$ – амплитуда k -й гармоники; $f_k = kf_1 = k/T_1$ и $\omega_k = 2\pi f_k$ – частота и угловая частота k -й гармоники; $k = 1, 3, 5, 7, \dots$ – кратность гармоники (присутствуют только нечетные гармоники).

Кривую на рис. 7,в можно рассматривать как функцию, имеющую точки разрыва и разбитую на участки (рис. 8).

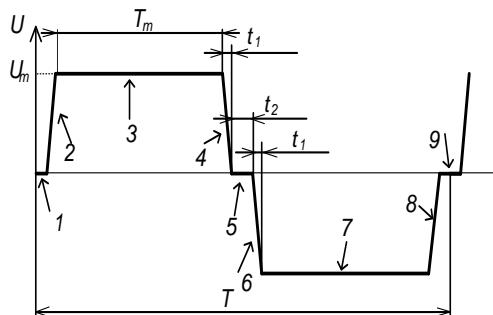


Рис. 8. Иллюстрация представления кривой ЭДС, разбитой на участки для выполнения интегрирования

Интеграл от такой функции определяется как сумма интегралов в пределах тех участков, где она остается непрерывной и может быть описана аналитически (рис. 8) [24, 25]. Кривую «трапеция с паузой» (рис. 7,в) можно представить в нескольких участках (рис. 8): нулевое значение, рост, время максимального значения, спад, нулевое значение и т.д.

$$U_k = \frac{2}{T} \int_0^T U(t) \cdot \sin(k\omega_1 t) dt = 2U_m f_1 \sum_{i=1}^n I_n. \quad (17)$$

Интеграл за один период изменения ЭДС (17) во времени необходимо представить как сумму всех слагаемых, каждое из которых соответствует одному из этих участков, полагая, что в течение паузы (рис. 7,в,г, рис. 8) значение ЭДС составляет $U(t) = 0$, на участках амплитуды $U(t) = U_m$ и $U(t) = -U_m$ соответственно, а на участках роста/спада имеет место изменение напряжения по линейному закону.

Полученные в [11] выражения позволяют при определении амплитуды гармоник ЭДС с помощью формулы (17) не выполнять численное интегрирование и ускорить вычисления при расчете установившихся режимов с помощью аналитических выражений.

При использовании частотного анализа для расчета установившегося режима ЭТКПЧ обязательно необходимо принять во внимание наличие поверхностного эффекта в проводниках обмоток силового трансформатора и жилах кабельной линии. Явление поверхностного эффекта оценивается величиной эквивалентной глубины проникновения электромагнитной волны в проводник при протекании по нему переменного тока (в случае ЭТКПЧ тока повышенной частоты). Величина эквивалентной глубины проник-

новения электромагнитной волны оценивается с помощью выражения

$$b_m = \sqrt{\frac{\rho_m}{\pi k f_1 \mu_0}}. \quad (18)$$

При этом должны быть скорректированы величины активных сопротивлений обмоток силового трансформатора и жилы кабельной линии (10) с учетом воздействующей частоты и глубины проникновения волны в проводнике:

$$\begin{cases} R_{T(n)} = \frac{4\rho_m l}{N \pi d^2} \text{ при } b_m \geq \frac{d}{2}, \\ R_{T(n)} = \frac{l \rho_m}{N \pi (d b_m - b_m^2)} \text{ при } b_m < \frac{d}{2}. \end{cases} \quad (19)$$

Дополнительно необходимо отметить, что выражения (1),(4),(11),(14) зависят от частоты гармоники, поэтому для корректной реализации метода частотного анализа расчет каждого параметра схемы замещения на каждой итерации должен учитывать влияние частоты.

Сопротивления остальных реактивных элементов схемы замещения (рис. 3) определяются как

$$\begin{aligned} jX_{Li} &= j\omega_k L_i = j2\pi k f_1 L_i, \\ jX_{Ci} &= \frac{1}{j\omega_k C_i} = \frac{1}{j2\pi k f_1 C_i}. \end{aligned} \quad (20)$$

Автоматизация методики расчета установившихся режимов ЭТКПЧ с помощью частотного анализа. Для выполнения автоматизации расчета установившихся режимов ЭТКПЧ могут быть применены MATLAB и Simulink.

При алгоритмизации в MATLAB выполняется вычисление амплитуды гармоник разложения Фурье для заданного варианта осциллограммы ЭДС (рис. 7) с увеличением времени начиная от нулевого значения. В каждый момент времени производится расчет токов и напряжений схемы замещения (рис. 3) ЭТКПЧ в комплексной форме для всех гармоник разложения [22]. С учетом модификации методики расчета [11] в настоящее время возможно использование ее без увеличения времени расчета более 3000 гармоник в целях преодоления эффекта Гиббса [23, 29]. При расчете происходит последовательное преобразование схемы замещения от конца к началу с применением классических методов расчета электрических цепей. После выполнения расчетов токов и напряжений в различных элементах схемы замещения и преобразования их

значения из комплексной формы в тригонометрическую можно выполнить построение графиков изменения напряжений и токов во времени:

$$U_j(t) = \sum_{k=1}^{k_{\max}} U_{kj} \sin(2\pi k f_1 t + \varphi_{kj}); \quad (21)$$

$$I_j(t) = \sum_{k=1}^{k_{\max}} I_{kj} \sin(2\pi k f_1 t + \phi_{kj}), \quad (22)$$

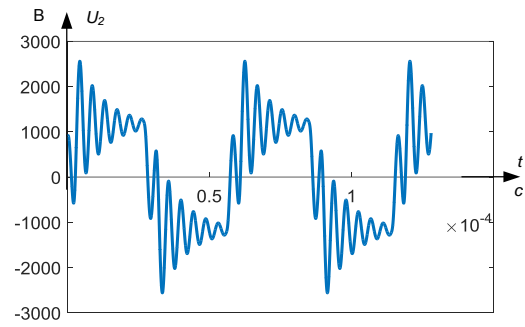
где j – индекс соответствующего напряжения или тока в схеме рис. 3; k_{\max} – число гармоник разложения в ряд Фурье, принятое в расчетах; φ_{kj} и ϕ_{kj} – фаза напряжения и тока k -й гармоники в рассматриваемой точке.

Результаты расчета установившегося режима ЭТКПЧ с использованием разработанной методики представлены на рис. 9, там же приведены опытные осциллограммы, полученные в ходе многочисленных экспериментов с частотой выходного напряжения преобразователя 13–18 кГц.

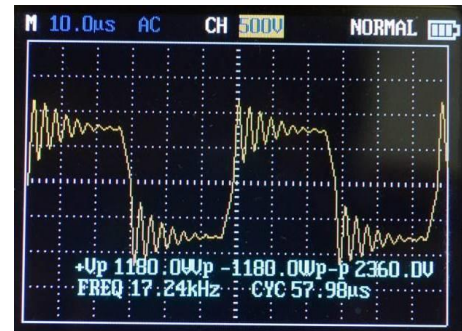
Анализ осциллограмм позволяет сравнить результаты расчета (рис. 9, а, в) и эксперимента (рис. 9, б, г) в режиме холостого хода (нагрузка на конце линии отсутствует) и под нагрузкой ЭТКПЧ в ходе электро-тепловой обработки мощностью 2 кВт. Нельзя не отметить, что имеет место хорошее, но неполное соответствие результатов расчета и эксперимента. Оно проявляется в наличии высокочастотных колебаний вблизи нулевого значения напряжения в момент изменения полярности переменного напряжения на расчетной осциллограмме, которые отсутствуют в экспериментальной осциллограмме (рис. 9, б, г) [10, 11].

Такое расхождение может быть обусловлено влиянием нелинейного характера реальной динамической петли гистерезиса материала (феррита) магнитопроводов силовых трансформаторов [14] (рис. 6), которое в расчетной методике в настоящее время не учитывается.

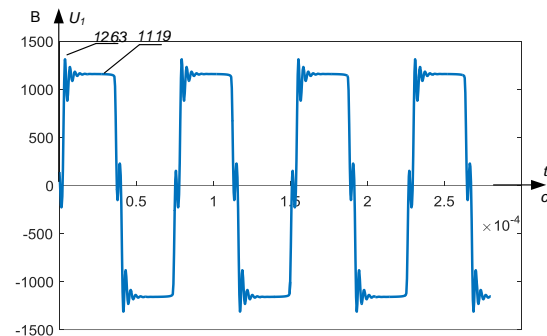
Одновременно этот фактор практически не оказывает влияния на параметры установившегося рабочего режима установки [24]. С другой стороны, в некоторых особых случаях, например в режиме холостого хода, игнорирование этого фактора может привести к погрешностям в вычислениях. Поэтому требуется дальнейшее развитие и уточнение методики расчета установившихся режимов ЭТКПЧ [18].



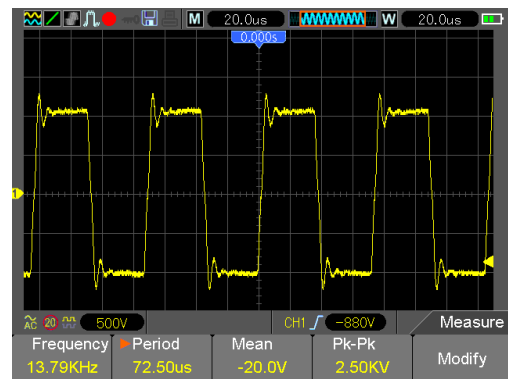
а)



б)



в)



г)

Рис. 9. Сравнение расчетных (а, в) и экспериментальных (б, г) осциллограмм напряжения в конце высоковольтной кабельной линии ЭТКПЧ (рис. 3) в режиме холостого хода (а, б) и под нагрузкой (в, г)

Следует отметить, что получение точной математической модели фактической динамической петли гистерезиса при-

менительно к конкретному ферромагнитному материалу и условий его работы представляет собой сложную задачу, которая потребует пересмотра и развития качественных представлений и количественного описания явлений магнетизма ферромагнитных материалов.

Получены результаты автоматизации методики (рис. 9) с применением MATLAB. В отсутствии последнего можно использовать Python. Для создания сложных моделей ЭТКПЧ целесообразно использовать методы имитационного моделирования с применением Simulink, решив при этом несколько дополнительных задач:

- создание программируемого источника ЭДС «трапеция с паузой», так как стандартная библиотека элементов Simulink не содержит блока источника с такой формой напряжения;

- учет влияния поверхностного эффекта в жилах кабельной линии и обмотках трансформатора повышенной частоты.

Выводы. Представленная комплексная методика расчета установившихся режимов несинусоидальных систем переменного тока с различной частотой используемого напряжения является удобным инструментом расчета установившихся режимов систем переменного тока, содержащих инверторы на базе IGBT.

Представленные дополнительные инструменты описания и расчета характеристик компонентов систем переменного тока могут использоваться как вместе, так и по отдельности: инвертор, двухпроводные кабельные линии, силовые трансформаторы повышенной частоты.

Простая и эффективная реализация методики в настоящее время доступна в среде MATLAB и средствами языков программирования (например, Python с пакетом Math), в то время как создание модели ЭТКПЧ в Simulink требует значительных доработок стандартных элементов библиотеки.

Целесообразно дальнейшее развитие и совершенствование методики расчета установившихся режимов ЭТКПЧ в области учета нелинейных характеристик сердечников силовых трансформаторов повышенной частоты.

Список литературы

1. Гольдштейн М.Е., Гаврилов А.И. Схемы выдачи мощности и присоединения к энергосистеме «малых» синхронных генераторов со скоростью вращения, варьируемой и не обеспечивающей синхронную частоту // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2018. – № 4. – С. 52–57.

2. Гольдштейн М.Е., Филатов К.Ю. Взаимосвязь параметров режима энергоблока с синхронным генератором повышенной частоты и полупроводниковым преобразователем частоты // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Энергетика. – 2005. – № 9(49). – С. 29–31.

3. Данилевич Я.Б., Сигаев В.Е. Электроэнергетические установки с синхронными генераторами нестандартной частоты // Электричество. – 2000. – № 5. – С. 26–32.

4. Быстроходный турбогенератор для систем нетрадиционной энергетики / Я.Б. Данилевич, И.Ю. Кручинина, В.А. Сапожников и др. // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2002. – № 5. – С. 98.

5. Сверхбыстроходный генератор-двигатель для газовых микротурбин / Я.Б. Данилевич, А.В. Иванова, И.Ю. Кручинина, Ю.Ф. Хозилов // Электротехника. – 2004. – № 5. – С. 25.

6. Разработка конструкции и методики проектирования высокочастотных трансформаторов с сердечником из аморфных сплавов / А.И. Тихонов, А.В. Стулов, И.В. Еремин, А.В. Подобный // Вестник ИГЭУ. – 2018. – № 6. – С. 57–65.

7. Разработка пожаробезопасных высокочастотных трансформаторов для зарядных станций мобильного электротранспорта / К.В. Семенова, А.И. Тихонов, А.В. Плаксин, А.А. Каржевин // Пожарная и аварийная безопасность: сб. материалов XIII Междунар. науч.-практ. конф., посвященной Году культуры безопасности. – Иваново, 2018. – С. 218–223.

8. Федосов С.В., Бобылев В.И., Соколов А.М. Электротепловая обработка бетона токами повышенной частоты на предприятиях сборного бетона. – Иваново, 2016. – 336 с.

9. Титов М.М. Технология предварительного электротеплового нагрева бетонной смеси с использованием современного оборудования // Известия вузов. Строительство. – 2009. – № 2. – С. 56–62.

10. Особенности применения частотного анализа при расчете электрических цепей с транзисторными преобразователями напряжения / А.В. Гусенков, В.Д. Лебедев, А.М. Соколов и др. // Электричество. – 2016. – № 1. – С. 4–12.

11. Повышение точности и сокращение времени расчета установившихся режимов электротехнических комплексов повышенной частоты / А. Танкой, Т.Е. Шадриков, А.В. Гусенков и др. // Вестник ИГЭУ. – 2019. – Вып. 3. – С. 22–31.

12. Танкой А., Лакеев Д.В. Определение частотных характеристик мощных IGBT транзисторов // (ПОИСК – 2017): межвуз. (с междунар.

участием) молодежная науч.-техн. конф. «Молодые ученые – развитию текстильно-промышленного кластера». Т. 2. Ч. 2. – Иваново, 2017. – С. 271–273.

13. **Методика** определения емкостных и индуктивных параметров силовых высоковольтных трансформаторов повышенной частоты / А.В. Гусенков, Т.Е. Шадриков, А.А. Дьячков, А.А. Симакова // Вестник ИГЭУ. – 2016. – Вып. 1. – С. 27–33.

14. **Вдовин С.С.** Проектирование импульсных трансформаторов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. – 208 с.

15. **Тихомиров П.М.** Расчет трансформаторов: учеб. пособие для вузов. – Изд. 5-е, перераб. и доп. – М.: Энергия, 1986. – 528 с.

16. **Evaluation of Frequency and Temperature Dependence of Power Losses Difference in Parallel IGBTs** / J. Yang, Y. Che, L. Ran, H. Jiang // IEEE Access. – 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2995971.

17. **Розанов Ю.К.** Основы силовой электроники. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 296 с.

18. **Zhao M.Z., Shi B.C., Zhu Y.C.** Control Technologies for Power Electronic Hybrid Systems in High-voltage High-power Applications: A Review // High Voltage Engineering. – 2017. – Vol. 45, no. 7. – P. 2017–2027.

19. **A 750V** recessed-emitter-trench IGBT with recessed-dummy-trench structure featuring low switching losses / Y. Yao, H. Luo, Q. Xiao, Ch. Zhu // IEEE 30th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD). – Chicago, IL, 2018. – P. 112–115. DOI: 10.1109/ISPSD.2018.8393615.

20. **Comparative** analysis of static characteristics of insulated gate bipolar transistors and thyristors with static induction / O.I. Bonomorskiy, A.S. Kyuregyan, A.V. Gorbatyuk, B.V. Ivanov // Russian Electrical Engineering. – 2015. – T. 86, № 2. – С. 93–97.

21. **Моделирование** статических и динамических потерь в MOSFET-ключах / В.П. Бабенко, В.К. Битюков, В.В. Кузнецов, Д.С. Симачков // Российский технологический журнал. – 2018. – Т. 6, № 1(21). – С. 20–39.22.

22. **Осипов Ю.М.** Частотный и временной анализ стационарных и переходных характеристик линейных электрических цепей: учеб. пособие по курсам электротехники и ТОЭ. Ч. 2. – СПб.: СПбГИТМО (ТУ), 2002. – 99 с.

23. **О возможности** и целесообразности физического моделирования электропередачи с нетрадиционными параметрами используемых токов и напряжений / А.В. Гусенков, В.Д. Лебедев, А.М. Соколов, Т.Е. Шадриков // Энергетик. – 2015. – № 4. – С. 29–32.

24. **Проектирование** линий электропередачи сверхвысокого напряжения / Г.Н. Александров, А.В. Горелов, В.В. Ершевич и др.; под ред. Г.Н. Александрова. – Л.: Энергоатомиздат, 1993. – 530 с.

25. **Александров Г.Н.** Передача электрической энергии переменным током. – М.: Знак, 1998. – 271 с.

26. **Исследование** характеристик двухпроводных высоковольтных кабелей для электротехнических комплексов повышенной частоты / Т.Е. Шадриков, А. Танкой, А.М. Соколов и др. // Электротехника. – 2019. – № 8. – С. 53–59.

27. **Спектральный** анализ электродвижущей силы электроустановки повышенной частоты / А.В. Гусенков, В.Д. Лебедев, А.М. Соколов и др. // Электричество. – 2018. – № 2. – С. 17–26.

28. **Стариков А.В., Кузнецов В.В., Рокало Д.Ю.** Анализ гармонического состава трапецеидального фазного напряжения, формируемого частотным преобразователем // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2017. – № 3(55). – С. 75–79.

29. **Зырянов В.М., Митрофанов Н.А., Соколовский Ю.Б.** Исследование гармонического состава напряжения преобразователя частоты // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2016. – № 9. – С. 34–40.

References

1. Gol'dshteyn, M.E., Gavrilov, A.I. Skhemy vydachi moshchnosti i prisoedineniya k energosisteme «malykh» sinkhronnykh generatorov so skorost'yu vrashcheniya, var'iruемой i ne obespechivayushchey sinkhronnyuyu chastotu [Schemes of power delivery and connection to the power system of “small” synchronous generators with a rotational speed that is variable and does not provide a synchronous frequency]. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont*, 2018, no. 4, pp. 52–57.

2. Gol'dshteyn, M.E., Filyaev, K.Yu. Vzaimosvyaz' parametrov rezhima energobloka s sinkhronnym generatorom povyshennoy chastoty i poluprovodnikovym preobrazovatelem chastoty [The relationship of the parameters of the power unit mode with a synchronous generator of increased frequency and a semiconductor frequency converter]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Energetika*, 2005, no. 9(49), pp. 29–31.

3. Danilevich, Ya.B., Sigaev, V.E. Elektroenergeticheskie ustanovki s sinkhronnymi generatorami nestandartnoy chastoty [Electric power plants with synchronous generators of non-standard frequency]. *Elektrichestvo*, 2000, no. 5, pp. 26–32.

4. Danilevich, Ya.B., Kruchinina, I.Yu., Sapozhnikov, V.A., Khozikov, Yu.F., Steinle, L.Yu. Bystrokhodnyy turbogenerator dlya sistem netraditsionnoy energetiki [High-speed turbine generator for non-traditional energy systems]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika*, 2002, no. 5, p. 98.

5. Danilevich, Ya.B., Ivanova, A.V., Kruchinina, I.Yu., Khozikov, Yu.F. Sverkhbystrokhodnyy generator-dvigatel' dlya gazovykh mikroturbin [Ultrafast generator – an engine for gas microturbines]. *Elektrotehnika*, 2004, no. 5, p. 25.
6. Tikhonov, A.I., Stulov, A.V., Eremin, I.V., Podobnyy, A.V. Razrabotka konstruktivnykh i metodiki proektirovaniya vysokochastotnykh transformatorov s serdechnikom iz amorfnykh splavov [Development of the design and design methodology for high-frequency transformers with amorphous alloy cores]. *Vestnik IGEU*, 2018, issue 6, pp. 57–65.
7. Semenova, K.V., Tikhonov, A.I., Plaksin, A.V., Karzhevin, A.A. Razrabotka pozharobezopasnykh vysokochastotnykh transformatorov dlya zaryadnykh stantsiy mobil'nogo elektrotransporta [Development of fire-safe high-frequency transformers for charging stations of mobile electric transport]. *Sbornik materialov XIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy Godu kul'tury bezopasnosti: «Pozharnaya i avariynaya bezopasnost'»* [Collection of materials of the XIII International Scientific and Practical Conference dedicated to the Year of Safety Culture: "Fire and emergency safety"]. Ivanovo, 2018, pp. 218–223.
8. Fedosov, S.V., Bobylev, V.I., Sokolov, A.M. *Elektrotermal'naya obrabotka betona tokami povyshennoy chastoty na predpriyatiyakh sbornogo betona* [Electrothermal treatment of concrete by currents of increased frequency at enterprises of precast concrete]. Ivanovo, 2016. 336 p.
9. Titov, M.M. Tekhnologiya predvaritel'nogo elektrorazogreva betonnoy smesi s ispol'zovaniem sovremennogo oborudovaniya [Technology of preliminary electric heating of concrete mix using modern equipment]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*, 2009, no. 2, pp. 56–62.
10. Gusenkov, A.V., Lebedev V.D., Sokolov, A.M., Shadrikov, T.E., Strakhov, A.S. Osobennosti primeneniya chastotnogo analiza pri raschete elektricheskikh tsepey s tranzistornymi preobrazovatelyami napryazheniya [Application of frequency analysis to calculate electrical circuits with transistor voltage converters]. *Elektrichestvo*, 2016, no. 1, pp. 4–12.
11. Tankoy, A., Shadrikov, T.E., Gusenkov, A.V., Lebedev, V.D., Sokolov, A.M. Povyshenie tochnosti i sokrashchenie vremeni rascheta ustanovivshikhsya rezhimov elektrotekhnicheskikh kompleksov povyshennoy chastoty [Improving the accuracy and time of calculating steady-state modes of increased frequency electrical systems]. *Vestnik IGEU*, 2019, issue 3, pp. 22–31.
12. Tankoy, A., Lakeev, D.V. Opredelenie chastotnykh kharakteristik moshchnykh IGBT tranzistorov [Determination of frequency characteristics of powerful IGBT transistors]. (*POISK – 2017*): *mezhvuzovskaya (s mezhdunarodnym uchastiem) molodezhnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Molodye uchenye – razvitiyu tekstil'no-promyshlennogo klastera»*. T. 2. Ch. 2 [(SEARCH – 2017): Interuniversity (with international participation) youth scientific and technical conference "Young scientists – the development of the textile and industrial cluster". Vol. 2. Part 2]. Ivanovo, 2017, pp. 271–273.
13. Gusenkov, A.V., Shadrikov, T.E., D'yachkov, A.A., Simakova, A.A. Metodika opredeleniya emkostnykh i induktivnykh parametrov silovykh vysokovol'tnykh transformatorov povyshennoy chastoty [Method for determining the capacitive and inductive parameters of high-frequency power transformers]. *Vestnik IGEU*, 2016, issue 1, pp. 27–33.
14. Vdovin, S.S. *Proektirovanie impul'snykh transformatorov* [Design of pulse transformers]. Leningrad: Energoatomizdat. Leningradskoe otdelenie, 1991. 208 p.
15. Tikhomirov, P.M. *Raschet transformatorov* [Calculation of transformers]. Moscow: Energiya, 1986. 528 p.
16. Yang, J., Che, Y., Ran, L., Jiang, H. Evaluation of Frequency and Temperature Dependence of Power Losses Difference in Parallel IGBTs. IEEE Access. 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2995971.
17. Rozanov, Yu.K. *Osnovy silovoy elektroniki* [Fundamentals of Power Electronics]. Moscow: Energoatomizdat, 1992. 296 p.
18. Zhao, M.Z., Shi, B.C., Zhu, Y.C. Control Technologies for Power Electronic Hybrid Systems in High-voltage High-power Applications: A Review. *High Voltage Engineering*, 2017, vol. 45, no. 7, pp. 2017–2027.
19. Yao Y., Luo H., Xiao Q., Zhu Ch. A 750 V recessed-emitter-trench IGBT with recessed-dummy-trench structure featuring low switching losses. 2018 IEEE 30th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD), Chicago, IL, 2018, pp. 112–115. DOI: 10.1109/ISPSD.2018.8393615.
20. Bonomorskii, O.I., Kyuregyan, A.S., Gorbatyuk, A.V., Ivanov, B.V. Comparative analysis of static characteristics of insulated gate bipolar transistors and thyristors with static induction. *Russian Electrical Engineering*, 2015, vol. 86, no. 2, pp. 93–97.
21. Babenko, V.P., Bitukov, V.K., Kuznetsov, V.V., Simachkov, D.S. Modelirovanie staticheskikh i dinamicheskikh poter' v MOSFET-klyuchakh [Modeling of static and dynamic losses in MOSFET switches]. *Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal*, 2018, vol. 6, no. 1(21), pp. 20–39.
22. Osipov, Yu.M. *Chastotnyy i vremennyy analiz statsionarnykh i perekhodnykh kharakteristik lineynykh elektricheskikh tsepey* [Frequency and time analysis of stationary and transient characteristics of linear electrical circuits]. Saint-Petersburg: SPbGITMO (TU), 2002. 99 p.
23. Gusenkov, A.V., Lebedev, V.D., Sokolov, A.M., Shadrikov, T.E. O vozmozhnosti i tselesoobraznosti fizicheskogo modelirovaniya elektroperedachi s netraditsionnymi parametrami

ispol'zuemykh tokov i napryazheniy [On Possibility and feasibility of physical modeling of power transmission with unconventional parameters of the used currents and voltages]. *Energetik*, 2015, no. 4, pp. 29–32.

24. Aleksandrov, G.N., Gorelov, A.V., Ershevich, V.V. *Proektirovanie liniy elektroperedachi sverkhvysokogo napryazheniya* [Design of ultra-high voltage power lines]. Leningrad: Energoatomizdat, 1993. 530 p.

25. Aleksandrov, G.N. *Peredacha elektricheskoy energii peremennym tokom* [Transmission of electrical energy by alternating current]. Moscow: Znak, 1998. 271 p.

26. Shadrikov, T.E., Tankoy, A., Sokolov, A.M., Gusenkov, A.V., D'yachkov, A.A., Lebedev, V.D. Issledovanie kharakteristik dvukhpроводnykh vysokovol'tnykh kabeley dlya elektrotekhnicheskikh kompleksov povyshennoy chastoty [Investigation of the characteristics of two-wire high-voltage cables for high-frequency electrical complexes]. *Elektrotekhnika*, 2019, no. 8, pp. 53–59.

27. Gusenkov, A.V., Lebedev, V.D., Sokolov, A.M., Shadrikov, T.E., Tankoy, A.

Spektral'nyy analiz elektrodvizhushchey sily elektroustanovki povyshennoy chastoty [Spectral analysis of the electromotive force of an electrical installation of increased frequency]. *Elektrichestvo*, 2018, no. 2, pp. 17–26.

28. Starikov, A.V., Kuznetsov, V.V., Rokalo, D.Yu. Analiz garmonicheskogo sostava trapetseidal'nogo faznogo napryazheniya, formiruемого chastotnym preobrazovatelem [Analysis of the harmonic composition of the trapezoidal phase voltage generated by the frequency converter]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya Tekhnicheskie nauki*, 2017, no. 3(55), pp. 75–79.

29. Zyryanov, V.M., Mitrofanov, N.A., Sokolovskiy, Yu.B. Issledovanie garmonicheskogo sostava napryazheniya preobrazovatelya chastoty [Investigation of the harmonic composition of the voltage of the frequency converter]. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont*, 2016, no. 9, pp. 34–40.

МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

УДК 66.011

Юрий Дмитриевич Кутумов

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: kutumov97@mail.ru

Вадим Евгеньевич Мизонов

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики, Россия, Иваново, e-mail: mizonov46@mail.ru

Татьяна Юрьевна Шадрикова

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45, e-mail: tanya-vinokurova@mail.ru

Андрей Ильич Тихонов

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, заведующий кафедрой физики, Россия, Иваново, e-mail: aitispu@mail.ru

Ячеечная модель переходных тепловых процессов в подземном электрическом кабеле и окружающем грунте¹

Авторское резюме

Состояние вопроса. Одним из наиболее существенных последствий коротких замыканий в кабельных сетях 6–10 кВ является нагрев изоляции с возможностью ее последующего возгорания и повреждения смежных объектов системы электроснабжения, что многократно увеличивает сопутствующий ущерб. Известны разнообразные (в том числе, основанные на нормативных документах) методы расчета теплового состояния подземных кабелей. Несмотря на то, что часть из них отличается избыточной сложностью и требует большого числа плохо идентифицируемых параметров, вопрос о точности расчетных прогнозов остается открытым. В связи с этим актуальной является задача разработки новых подходов к моделированию тепловых переходных процессов в кабеле, сочетающих предельную простоту и малое время расчета с разумной точностью прогнозирования тепловых параметров процесса.

Материалы и методы. Для решения поставленной задачи используется метод математического моделирования. Модель использует математический аппарат теории цепей Маркова. Она адаптирована к представляющей грунт многослойной среде, в отдельном слое которой может находиться нестаци-

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Ивановской области в рамках научного проекта № 20-48-370001.

The research is carried out with financial support of RFBR (Russian Foundation for Basic Research) and Ivanovo region within the framework of scientific project № 20-48-370001.

онарный тепловой источник. Перенос теплоты вглубь грунта описан теплопроводностью, а теплообмен с окружающим грунтом и окружающей средой – теплоотдачей. Изучение влияния параметров на протекание процесса выполнено численными методами. На данном этапе исследования экспериментальная верификация модели не предполагалась.

Результаты. Разработана математическая модель переходных тепловых процессов, позволяющая прогнозировать температуру в кабеле и окружающем его грунте в зависимости от мощности и глубины расположения теплового источника, определяемого величиной тока в кабеле. Полученные результаты численных экспериментов согласуются с физическими представлениями о процессе, обладают научной новизной, поскольку базируются на универсальном алгоритме моделирования и позволяют описывать переходные процессы в исследуемом объекте.

Выводы. Предложенный математический инструмент позволяет оперативно оценивать тепловое состояние подземного электрического кабеля в зависимости от тепловой мощности тока, глубины его расположения и теплофизического состояния грунта. Модель проста в работе и требует крайне малых затрат машинного времени. Она может быть легко использована в инженерной практике.

Ключевые слова: подземный электрический кабель, переходный процесс, тепловая мощность тока, ячеечная модель, теплопроводность, теплоотдача, распределение температуры

Yuri Dmitrievitch Kutumov

Ivanovo State Power Engineering University, PhD student of Automatic Control of Electrical Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: kutumov97@mail.ru

Vadim Evgenievich Mizonov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, e-mail: mizonov46@mail.ru

Tatiana Yurievna Shadrikova

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Control of Electrical Power Systems Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-45, e-mail: tanya-vinokurova@mail.ru

Andrey Ilyich Tikhonov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Head of Physics Department, Russia, Ivanovo, e-mail: aitispu@mail.ru

Cell model of transient heat processes in underground electric cable and surrounding ground

Abstract

Background. One of the most essential consequences of short circuits in underground cable networks of 6–10 kV is heating up the insulation with its possible inflammation and damage of adjacent objects of an electrical supply system that enlarge the concomitant damage many times as much. Various methods (including the methods, which are based on reference documents) to calculate the thermal state of underground cables are known. Despite the part of them are of extra complexity and require a lot of poorly identified parameters, the issue of the accuracy of forecasting calculations remains open. Hence, the issue of development of new approaches to model transient thermal processes in a cable, combining the simplicity, small computational time, and the reasonable accuracy of forecasting the process thermal parameters is an important one.

Materials and methods. The method of mathematical modeling is used to solve the problem. The model uses the mathematical tools of the Markov chains theory. It is adapted to the representation of ground as multilayer medium, and the non-stationary heat source may be placed in one of the layers. The heat transfer deep down into the ground is described by heat conduction, and the heat exchange with neighboring ground and environment is described by heat emission. The study of influence of the process parameters on the heat process behavior is carried out by numerical methods. The experimental validation of the model is not planned at the current stage of this investigation.

Results. The developed mathematical model allows predicting temperature in a cable and in surrounding ground depending on the heat capacity and depth of layout of the heat source, determined by the value of current in the cable. The results of numerical experiments come to agreement with the physical essence of the process. The obtained results have the scientific novelty as they are based on the universal algorithm of modeling and allow describing the transient processes in the object under consideration.

Conclusions. The authors have proposed a mathematical tool to estimate the heat state of an underground electric cable depending on the heat capacity of the current, its depth of location in the ground and the thermo-physical properties of the ground. The model is simple to operate and takes exceedingly small computational time. It can be easily used in engineering practice.

Key words: underground electric cable, transients, heat capacity of the current, cell model, heat conduction, heat emission, temperature distribution

DOI: 10.17588/2072-2672.2021.2.055-061

Состояние вопроса. Кабельные сети напряжением 6–20 кВ в настоящее время являются одной из основных частей систем городского и промышленного электроснабжения в Российской Федерации: через них распределяется более 50 % вырабатываемой в нашей стране электроэнергии². Согласно некоторым оценкам [1], общая протяженность кабельных сетей 6–20 кВ в системах городского и промышленного электроснабжения составляет более 240 тысяч километров, из них более 99 % составляют сети 6–10 кВ³.

Одной из проблем, связанных с эксплуатацией кабельных сетей 6–10 кВ, является пониженный уровень изоляции кабельных ЛЭП. На данный момент физический износ кабельных ЛЭП напряжением 6–10 кВ составляет от 40 до 95 % [1, 2], что обуславливает высокий уровень повреждаемости кабелей вышеуказанного класса напряжения. Наиболее распространенным типом электрических повреждений (до 70–90 % от общего количества) [3, 4] являются однофазные замыкания на землю (ОЗЗ), также имеют место междуфазные короткие замыкания (КЗ).

Одним из наиболее существенных последствий КЗ и ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ является нагрев изоляции кабельных ЛЭП с возможностью ее последующего возгорания и повреждения смежных объектов системы электроснабжения, что многократно увеличивает сопутствующий ущерб. Кроме того, стоит отметить, что нагрев и перегрев изолирующих оболочек кабельных ЛЭП является не только следствием различного рода электрических повреждений, но и одним из факто-

ров, обуславливающих увеличение повреждаемости данных элементов системы электроснабжения. Перегрев кабельных ЛЭП при токовых перегрузках приводит к ускоренному старению изоляции; аналогичным образом перегрев кабеля при ОЗЗ приводит к переходу его в междуфазное КЗ, которое, в отличие от ОЗЗ, требует максимально быстрого отключения кабельной ЛЭП штатным действием устройств релейной защиты.

В настоящее время существуют несколько нормативных документов, в которых приведены методики оценки температуры кабельных ЛЭП в нагрузочных режимах. Среди таких документов целесообразно выделить Циркуляр Ц-02-98(Э) «О проверке кабелей на невозгорание при воздействии тока короткого замыкания»⁴, в котором также содержатся методики расчета температуры кабеля в аварийном (короткое замыкание) режиме, и ГОСТ Р МЭК 60287-3-2-2011 «Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки».

Особенностью методик расчета температуры кабельной ЛЭП⁵ является отсутствие учета влияния окружающего пространства (грунта) на процессы нагрева и охлаждения кабеля, что значительно упрощает процесс расчета, но при этом может привести к существенным погрешностям.

Для решения данной проблемы существует сформулированный в 1950-е гг. [5] и описанный также в [6, 7] подход, согласно которому нагреваемая кабельная

² Файбисович Д.Л., Карапетян И.Г., Шапиро И.М. Справочник по проектированию электрических сетей. – М.: НЦ ЭНАС, 2012. – 376 с.

³ Лебедев Г.М. Повышение эффективности эксплуатации кабельных линий 6–10 кВ в системах электроснабжения на основе неразрушающей диагностики: дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2007. – 410 с.

⁴ Циркуляр Ц-02-98(Э). О проверке кабелей на невозгорание при воздействии тока короткого замыкания [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gostrf.com/normadata/1/4293828/4293828958.pdf> [Дата обращения 02.02.2021].

⁵ ГОСТ Р МЭК 60287-3-2-2011. Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Часть 3-2. Разделы, касающиеся условий эксплуатации. Экономическая оптимизация размера силовых кабелей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200086859> [Дата обращения 02.02.2021].

ЛЭП и окружающее ее пространство представляются в виде набора эквивалентных RC-звеньев, имитирующих процессы передачи и накопления тепла. Однако при формировании подобных моделей возникает проблема определения размеров расчетной области и приемлемой дискретности «единичных» RC-элементов.

Задача определения параметров расчетной области также остается актуальной и для моделей, составленных в современных программных комплексах (таких как ELCUT или COMSOL Multiphysics). Основная причина – завершённое программное обеспечение имеет достаточно ограниченные возможности для стороннего «вмешательства».

Одним из возможных вариантов решения вышеуказанной проблемы является применение имитационной модели кабельной ЛЭП и окружающего пространства, составленной на основе теории цепей Маркова, описанных в ряде источников (например, [8]). Модель нагрева кабельной ЛЭП и окружающего пространства на основе теории цепей Маркова позволит выявить качественные характеристики грунта как объекта, подвергающегося тепловому воздействию, а также обосновать зависимости температуры нагрева кабельной ЛЭП и грунта от различных аспектов/параметров (теплопроводность, теплоемкость, плотность, размер модели, размер ячейки цепи, глубина прокладки кабеля в грунте, тепловая мощность источника, вид граничных условий). При этом выявление конкретных количественных характеристик, связанных с распределением тепловой энергии при нагреве кабельной ЛЭП, может быть осуществлено в современных программных комплексах.

Материалы и методы. Объектом исследования является подземный электрический кабель, находящийся на определенной глубине под поверхностью грунта и размещенный параллельно его поверхности, и окружающий его элемент грунта. Если свойства грунта не меняются по длине кабеля, то достаточно достоверно можно предположить, что процесс может быть описан плоской моделью. В соответствии со стратегией ячейечного моделирования, исследуемый непрерывный объект следует разделить на большое число малых ячеек. Они обычно называются ячейками идеального перемешивания, потому что все характери-

зующие их свойства считаются равномерно распределенными по их сечению. Выбор конфигурации системы ячеек связан с допущениями, принимаемыми при построении модели. На данном этапе моделирования выбрана цепь ячеек, схематично показанная на рис. 1 (необходимо заметить, что реально ячейки вплотную примыкают друг другу, а на рисунке разнесены, чтобы отчетливо представить граф цепи Маркова).

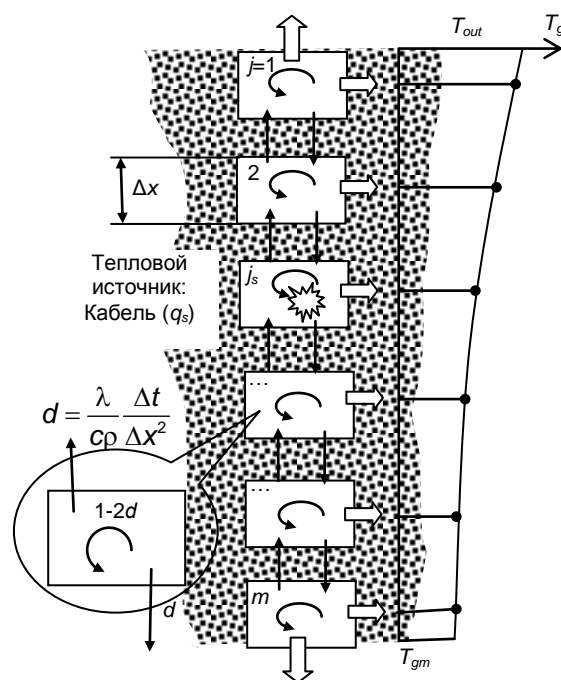


Рис. 1. Расчетная схема ячейечной модели и возможных переходов теплоты

Объектом моделирования является выделенный из грунта вертикальный столбик грунта, вдоль которого теплота может передаваться путем теплопроводности, а сверху, снизу и от боковой поверхности отводиться путем теплоотдачи. По высоте столбик разделен на m изотермических ячеек длиной Δx . Каждой ячейке соответствует номер $j = 1, 2, \dots, m$, являющийся ее дискретной (целочисленной) пространственной координатой. Состояние процесса регистрируется через малые промежутки времени Δt , а текущее время определяется по формуле $t_k = (k-1)\Delta t$, где k – номер временного перехода, являющийся дискретным (целочисленным) аналогом времени. Тепловое состояние цепи ячеек представлено векторами состояния – вектором-столбцом теплоты $\mathbf{Q}^k = \{Q_j^k\}$ и температуры $\mathbf{T}^k = \{T_j^k\}$. Через ячейку с номером j_s проходит электрический кабель, являющийся тепловым источником мощностью q_s . Считается, что

температура окружающего грунта убывает с глубиной по степенному закону

$$T_{gj} = T_{out} \left(\frac{T_m}{T_{out}} \right)^{\frac{j-1}{m-1}}, \quad (1)$$

где T_{out} – температура окружающей среды над поверхностью грунта.

Таким образом, моделируемый тепловой процесс состоит из следующих стадий: генерация теплоты тепловым источником от протекания электрического тока; распространение теплоты по цепи путем теплопроводности; теплоотдача от верхней ячейки к окружающей воздушной среде; теплоотдача от каждой ячейки к окружающему грунту с переменной по глубине температурой. Переходный процесс изменения теплового состояния цепи описывается рекуррентным матричным равенством

$$\mathbf{Q}^{k+1} = \mathbf{P}\mathbf{Q}^k - \Delta\mathbf{Q}_{out}^k - \Delta\mathbf{Q}_g^k + \Delta\mathbf{Q}_s^k, \quad (2)$$

где \mathbf{P} – матрица теплопроводности; $\Delta\mathbf{Q}_{out}^k$ – вектор теплообмена с окружающей воздушной средой; $\Delta\mathbf{Q}_g^k$ – вектор теплообмена с окружающим грунтом; $\Delta\mathbf{Q}_s^k$ – вектор теплоты, поступающей от теплового источника. Эти векторы содержат ненулевые элементы только для ячеек, где происходит теплообмен с внешними источниками.

Если считать ячейки квадратными со стороной Δx , то эти ненулевые элементы рассчитываются следующим образом⁶:

$$\Delta Q_{out}^k = \alpha_{out}(T_1^k - T_{out})\Delta x \Delta t, \quad (3)$$

$$\Delta Q_{gj}^k = \alpha_g(T_j^k - T_{gj})2\Delta x \Delta t, \quad j = 1, \dots, m-1; \quad (4)$$

$$\Delta Q_{gm}^k = \alpha_g(T_m^k - T_{gm})3\Delta x \Delta t, \quad (5)$$

$$\Delta Q_{js}^k = q_s \Delta t, \quad (6)$$

где α_{out} – коэффициент теплоотдачи от верхней ячейки цепи к воздуху; α_g – коэффициент теплоотдачи от ячеек цепи к окружающему грунту.

По известному распределению теплоты, распределение температуры рассчитывается по формуле

$$\mathbf{T}^k = \mathbf{Q}^k / \mathbf{c} \cdot \mathbf{p} / \Delta x^2, \quad (7)$$

где \mathbf{c} – вектор удельных теплоемкостей грунта; \mathbf{p} – вектор его плотностей; $/$ – оператор поэлементного деления векторов.

Матрица \mathbf{P} , описывающая перенос теплоты между ячейками за один временной переход, имеет следующий вид:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1-d & d & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ d & 1-2d & d & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d & 1-2d & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1-2d & d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & d & 1-2d & d \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & d & 1-d \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где

$$d = \frac{\lambda}{c_p} \frac{\Delta t}{\Delta x^2}, \quad (9)$$

где λ – коэффициент теплопроводности.

Таким образом, совокупность равенств (1)–(9) полностью описывает исследуемый процесс в рамках принятых допущений.

Результаты. Примеры численных экспериментов с разработанной моделью свидетельствуют о ее внутренней непротиворечивости.

Расчеты выполнены для следующих теплофизических свойств грунта: коэффициент теплопроводности $\lambda = 2$ Вт/м·град; его плотность $\rho = 1800$ кг/м³; его удельная теплоемкость $c = 2000$ Дж/кг·град; коэффициент теплоотдачи от верхней ячейки к воздуху $\alpha_{out} = 10$ Вт/(м²·град), от ячеек цепи к окружающему грунту $\alpha_g = 1$ Вт/(м²·град).

Эволюцию распределения температуры в цепи иллюстрирует рис. 2: до $k = 400$ в ячейке $j_s = 6$ действует стационарный тепловой источник мощностью $q_s = 2000$ Вт/м³ (выход на номинальный режим), а затем его мощность скачком изменяется до 10000 Вт/м³ (аварийный режим).

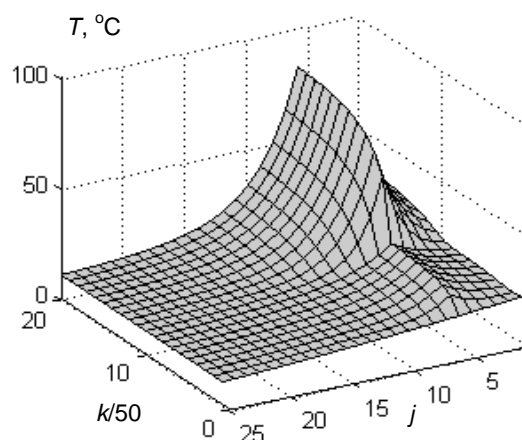


Рис. 2. Эволюция распределения температуры по ячейкам цепи при выходе на номинальный режим с последующим скачкообразным увеличением мощности теплового источника (аварийный режим)

⁶ Справочник по проектированию электрических сетей / под ред. Д.Л. Файбисовича. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: ЭНАС, 2017. – 376 с.

Изменение температуры в отдельных ячейках цепи при различной мощности теплового источника 5000, 10000 и 20000 Вт/м³ показано на рис. 3. Естественно, что с ростом этой мощности температура ячейки с кабелем (т. е. температура кабеля) существенно повышается.

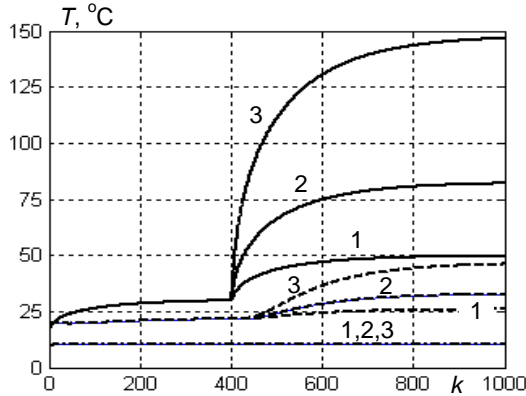


Рис. 3. Изменение температуры в отдельных ячейках цепи при различных значениях мощности теплового источника: 1 – 5000 Вт/м³; 2 – 10000 Вт/м³; 3 – 20000 Вт/м³ (сплошные линии – ячейка с источником; штриховые – верхняя ячейка; штрихпунктирная – нижняя)

В меньшей степени это отражается на температуре верхней ячейки, контактирующей с воздухом, а на температуре нижней, самой глубокой ячейки это повышение почти не отражается. Последнее является достаточно важным по следующей причине. В строгой постановке задачи краевое условие на нижней границе поставлено быть не может, так как задача ставится на полубесконечном домене. В ячейечной же модели число ячеек должно оставаться конечным. То, что принятая нижняя граница цепи «не видит» тепловых процессов в ее верхней части, свидетельствует о достаточной удаленности нижней границы от зоны, где протекают основные тепловые процессы. Тогда условия на ней можно приближенно считать соответствующим таковым на бесконечности.

Изменение во времени температуры в отдельных ячейках при различной глубине прокладки кабеля (номера ячейки с тепловым источником) показано на рис. 4.

Анализ графиков (рис. 4) показывает, что глубина прокладки кабеля не оказывает существенного влияния на температурный переходный процесс и на предельную температуру в кабеле (в ячейке с тепловым источником).

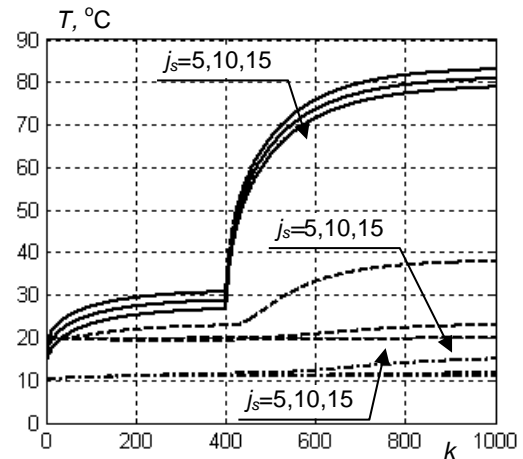


Рис. 4. Изменение температуры в отдельных ячейках цепи при различной глубине прокладки кабеля при $j_s = 10000$ Вт/м³: сплошные линии – ячейка с источником; штриховые – верхняя ячейка; штрихпунктирная – нижняя

Выводы. Предложенный математический инструмент позволяет оперативно оценивать тепловое состояние подземного электрического кабеля в зависимости от тепловой мощности тока, глубины его расположения и теплофизического состояния грунта. Результаты численных экспериментов непротиворечивы и качественно согласуются с физическими представлениями о процессе. В частности, показано, что глубина прокладки кабеля оказывает незначительное влияние на его предельную температуру в аварийных ситуациях. Однако точность расчетных прогнозов вряд ли может быть гарантирована, поскольку теплофизические свойства грунтов в справочной литературе даются с разбросом иногда на порядок, и в каждом конкретном случае требуется индивидуальное определение этих свойств.

Модель проста в работе и требует крайне малых затрат машинного времени. Она может быть легко использована в инженерной практике.

Список литературы

1. Боков Г.С. Техническое перевооружение российских электрических сетей. Сколько это может стоить? // Новости электротехники. – 2002. – № 2(14) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://news.elteh.ru/arh/> [Дата обращения 02.02.21].
2. Сибиркин Ю.Д., Яшков В.А., Курыло Д.А. Показатели надежности кабельных линий 6–10 кВ // Промышленная энергетика. – 1979. – № 7. – С. 27–28.

3. **Лихачев Ф.А.** Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. – М.: Энергия, 1971. – 152 с.

4. **Диагностика** и мониторинг кабельных сетей средних классов напряжения / К.П. Кадомская, В.Е. Качесов, Ю.А. Лавров и др. // Электротехника. – 2000. – № 11. – С. 48–51.

5. **Van Wormer F.H.** An Improved Approximate Technique for Calculating Cable Temperature Transients // AIEE Transactions. – 1955. – Vol. 74, part 3. – P. 277–281.

6. **Белоруссов Н.И.** Электрические кабели и провода. (Теоретические основы кабелей и проводов, их расчет и конструкции). – М.: Энергия, 1971. – 512 с.

7. **Ковригин Л.А.** Основы кабельной техники: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2006. – 94 с.

8. **Теоретическое** исследование нелинейной теплопроводности в многослойной среде с фазовыми переходами в слоях / В.Е. Мизонов, А.В. Митрофанов, Е.В. Басова, Е.А. Шуина // Вестник ИГЭУ. – 2020. – № 1. – С. 53–59. DOI: 10.17588/2072-2672.2020.1.053-059.

References

1. Bokov, G.S. Tekhnicheskoe perevooruzhenie rossiyskikh elektricheskikh setey. Skol'ko eto mozhetsia stoit'? [Technical reconstruction of Russian electrical systems. How much can it cost?]. *Novosti elektrotekhniki*, 2002, no. 2(14). Available at: <http://news.elteh.ru/arh/>. [Data obrasheniya 02.02.21]. (in Russian)

2. Sibirkin, Yu.D., Yashkov, V.A., Kurylo, D.A. Pokazateli nadezhnosti kabel'nykh liniy 6–10 kV [Reliability parameters of cable lines 6–10 kV].

Promyshlennaya energetika, 1979, no. 7, pp. 27–28. (in Russian)

3. Likhachev, F.A. *Zamykaniya na zemlyu i s kompensatsiyey emkostnykh tokov* [Earth fault in the networks with insulated neutral and compensation of capacitive current]. Moscow: Energiya, 1971. 152 p. (in Russian)

4. Kadomskaya, K.P., Kachesov, V.E., Lavrov, Yu.A., Ovsyannikov, A.G., Sahno, V.A. Diagnostika i monitoring kabel'nykh setey srednikh klassov napryazheniya [Diagnostics and monitoring of the cable lines of average voltage]. *Elektrotekhnika*, 2000, no. 11, pp. 48–51. (in Russian)

5. Van Wormer, F.H. An Improved Approximate Technique for Calculating Cable Temperature Transients. AIEE Transactions, 1955, vol. 74, part 3, pp. 277–281.

6. Belorussov, N.I. *Elektricheskie kabeli i provoda: (Teoreticheskie osnovy kabeley i provodov, ikh raschet i konstruktzii)* [Electrical cables and conductors. Theoretical foundations of cables and conductors, their calculation and design]. Moscow: Energiya, 1971. 512 p. (in Russian)

7. Kovrigin, L.A. *Osnovy kabel'noy tekhniki* [Foundations of cable technics]. Perm': Izdatel'stvo Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2006. 94 p. (in Russian)

8. Mizonov, V.E., Mitrofanov, A.V., Basova, E.V., Shuina, E.A. Teoreticheskoe issledovanie nelineynoy teploprovodnosti v mnogoslnoy srede s fazovymi perekhodami v sloyakh [Theoretical study of non-linear heat conduction in multi-layer medium with phase transformation in the layers]. *Vestnik IGEU*, 2020, issue 1, pp. 53–59. DOI: 10.17588/2072-2672.2020.1.053-059. (in Russian)

УДК 536.24.08

Владимир Павлович Жуков

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45, e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Алексей Евгеньевич Барочкин

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-13, e-mail: acorp27@yandex.ru

Мария Сергеевна Боброва

ФГБОУВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», магистрант, Россия, Иваново, e-mail: bobrova_m_s@mail.ru

Антон Николаевич Беляков

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, доцент кафедры прикладной математики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45, e-mail: ab_pm@mail.ru

Сергей Ильич Шувалов

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры тепловых электрических станций, Россия, Иваново, e-mail: ShuvalovS@rambler.ru

Матричный метод решения обратной задачи теплопередачи в теплообменных аппаратах

Авторское резюме

Состояние вопроса. Наряду с поверочными расчетами существующих конструкций теплообменных аппаратов, при разработке новых конструкций и технологий часто возникает необходимость проведения проектных расчетов, в ходе которых решаются обратные задачи по выбору оптимальных конструкций и режимов работы оборудования. В литературе рассмотрены постановка и решение обратных задач классификации и нестационарной теплопроводности, при этом обратные задачи теплопередачи при проектировании теплообменного оборудования в литературе представлены недостаточно. Разработка подходов к решению обратных задач при проектировании теплообменного оборудования является актуальной задачей, стоящей перед энергетикой.

Материалы и методы. Для постановки и решения обратных задач теплообменных систем используются матричные модели теплопередачи, построенные на уравнениях баланса массы и энергии. Для решения обратных и оптимизационных задач применяются методы математического программирования.

Результаты. Для проведения проектных расчетов предложен новый матричный метод решения обратных задач по выбору конструкции аппаратов и параметров теплоносителей, которые обеспечивают эффективную работу системы. Предложена новая формулировка обратной задачи теплопередачи для случая скользящей границы начала фазового перехода при противоточном характере движения теплоносителей.

Выводы. Полученные результаты могут быть использованы в энергетической, химической и пищевой отраслях промышленности для повышения эффективности проектирования и эксплуатации энергосберегающих технологий. Полученные решения могут быть реализованы на практике при разработке мероприятий по совершенствованию ресурсо- и энергосберегающих технологий.

Ключевые слова: поверочные расчеты, проектные расчеты, обратная задача теплопередачи, теплообменные аппараты, матричная модель теплопередачи, баланс энергии, баланс массы

Vladimir Pavlovich Zhukov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Postdoctoral degree), Head of Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-45, e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Aleksei Yevgenyevich Barochkin

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Heat Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-13, e-mail: acorp27@yandex.ru

Maria Sergeevna Bobrova

Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Master Degree student, Russia, Ivanovo, e-mail: bobrova_m_s@mail.ru

Anton Nikolaevich Belyakov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Associate Professor of Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, e-mail: ab_pm@mail.ru

Sergei Ilyich Shuvalov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Heat Power Plants Department, Russia, Ivanovo, e-mail: ShuvalovS@rambler.ru

Matrix method to solve the inverse problem of heat transfer in heat exchangers

Abstract

Background. Along with verification calculations of known designs of heat exchangers, in design engineering and when we develop new technologies, design calculations are necessary to solve the inverse problems of choosing the optimal designs and operating modes of equipment. Previously, the formulation and solution of inverse problems of classification and unsteady heat conduction have been considered, while the inverse problems of heat transfer in the design of heat exchange equipment are poorly presented in the literature. The development of methods to solve inverse problems in the design of heat exchange equipment is an urgent task of power industry.

Materials and methods. Matrix models of heat transfer based on mass and energy balance equations are used to formulate and solve inverse problems of heat exchange systems. Methods of mathematical programming are applied to solve inverse and optimization problems.

Results. For design calculations, a matrix method to solve inverse problems for choosing the design of devices and parameters of heat carriers that ensure the effective operation of the system is proposed. The inverse problem is formulated for the case of the sliding boundary of the beginning of the phase transition with the countercurrent type of movement of heat carriers.

Conclusions. The obtained results can be used in power energy, chemical and food industries to improve the efficiency of designing resource-and energy-saving technologies. The solutions obtained can be implemented when developing measures to improve resource and energy saving technologies.

Key words: verification calculations, design calculations, inverse problem of heat transfer, heat exchangers, matrix model of heat transfer, energy balance, mass balance

DOI: 10.17588/2072-2672.2021.2.062-069

Введение. По способу использования математических моделей в инженерной практике следует выделять прямые и обратные задачи. Прямые задачи обычно ориентированы на проведение поверочных расчетов, при выполнении которых предполагается подбор оборудования из стандартного ряда при фиксированных конструктивных параметрах, а возможности оборудования для конкретного случая [1–3] проверяются расчетом. В обратных задачах на основе математической модели реализуются, как правило, проектные расчеты, которые ориентированы на выбор конструктивных и режимных параметров, обеспечивающих эффективную работу оборудования [1]. Разработка адекватных методов расчета и их использование для решения обратных задач проектирования является актуальной задачей, стоящей перед энергетикой.

Объектом исследования являются системы теплообменных аппаратов [4–10]. В качестве предмета исследования рассматривается постановка и решение обратных задач проектирования одноступенчатых и многоступенчатых теплообменных систем, в которых реализуются прямоточные и противоточные режимы движения теплоносителей [2–3, 8–15].

Целью исследования является повышение эффективности проектирования и эксплуатации теплообменных систем путем постановки и решения обратных задач теплопередачи в теплообменных аппаратах.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- постановка и решение обратной задачи для прямоточных одноступенчатых систем при вариантном задании независимых параметров теплоносителей;

- постановка и решение обратной задачи для противоточных одноступенчатых систем при вариантном задании нормируемых параметров теплоносителей;

- постановка обратной задачи для противоточной системы при скользящей границе начала фазового перехода в теплоносителе.

Методы исследования. Для постановки и решения обратных задач теплообменных систем используются матричные модели теплопередачи, построенные на уравнениях баланса массы и энергии [7–9]. Для решения обратных и оптимизационных задач применяются методы математического программирования [16–19].

На первом этапе исследований решается обратная задача для прямоточного одноступенчатого теплообменного аппарата, конструкция которого с указанием схемы движения теплоносителей приведена на рис. 1,а. На рис. 1,б данный теплообменник представлен в виде четырехполюсника с указанием обозначений температур двух входных и двух выходных потоков горячего и холодного теплоносителей. Обычно при выполнении поверочного расчета конструкция аппарата и температуры горячего t_{10} и холодного t_{20} теплоносителей на входе в аппарат известны, а температуры горячего и холодного теплоносителей на выходе теплообменника t_1 , t_2 определяются. Нахождение выходных температур по заданной конструкции и известным входным температурам является по существу решением прямой задачи.

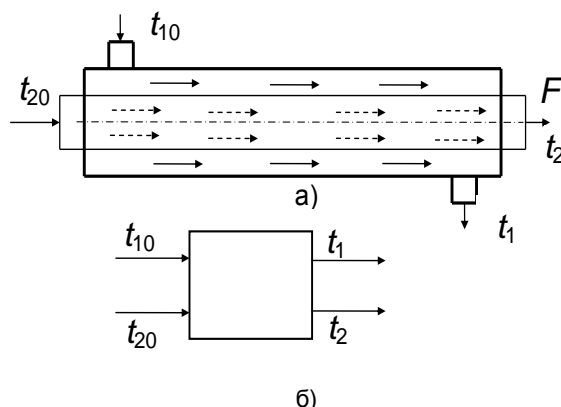


Рис. 1. Схема движения теплоносителей для прямоточного теплообменного аппарата (а) и модельное его представление в виде четырехполюсника (б)

Математическая модель теплопередачи в виде системы двух дифференци-

альных уравнений относительно температур горячего t_1 и холодного t_2 теплоносителей при отсутствии в них фазового перехода записывается в следующем виде [8]:

$$\begin{cases} \frac{dt_1}{dF} = -a_1(t_1 - t_2), \\ \frac{dt_2}{dF} = a_2(t_1 - t_2), \end{cases} \quad (1)$$

где $a_1 = \frac{k}{c_1 G_1}$, $a_2 = \frac{k}{c_2 G_2}$; k – коэффициент теплопередачи; c – удельная теплоемкость; G – расход теплоносителя; F – площадь поверхности теплообмена; индекс «1» относится к горячему, «2» – к холодному теплоносителю.

При начальных условиях $t_1|_{F=0} = t_{10}$, $t_2|_{F=0} = t_{20}$ решение (1) может быть записано в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & 0 \\ b_{21} & b_{22} & 0 & b_{24} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_{10} \\ t_{20} \\ t_1 \\ t_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где

$$b_{11} = \frac{a_2}{a_1} + e^{-(a_1+a_2)F}, \quad b_{12} = 1 - e^{-(a_1+a_2)F},$$

$$b_{13} = -(1 + \frac{a_2}{a_1}), \quad b_{21} = \frac{a_2}{a_1} (1 - e^{-(a_1+a_2)F}),$$

$$b_{22} = 1 + \frac{a_2}{a_1} e^{-(a_1+a_2)F}, \quad b_{24} = -(1 + \frac{a_2}{a_1}).$$

Система (2) из двух линейных уравнений записана относительно четырех температур, что позволяет, произвольно задавая две температуры, определять две другие из решения системы. Для унификации и автоматизации составления модели при произвольном задании двух независимых параметров система (2) дополняется двумя уравнениями связи, с помощью которых задаются известные значения параметров теплоносителей:

$$\begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & 0 \\ b_{21} & b_{22} & 0 & b_{24} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_{10} \\ t_{20} \\ t_1 \\ t_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \tilde{t}_{10} \\ \tilde{t}_{20} \end{pmatrix} \quad (3)$$

или

$$\mathbf{B} \times \mathbf{T} = \mathbf{T}_0. \quad (4)$$

Здесь

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & 0 \\ b_{21} & b_{22} & 0 & b_{24} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \mathbf{T} = \begin{pmatrix} t_{10} \\ t_{20} \\ t_1 \\ t_2 \end{pmatrix}, \mathbf{T}_o = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \tilde{t}_{10} \\ \tilde{t}_{20} \end{pmatrix},$$

где $\tilde{t}_{10}, \tilde{t}_{20}$ – численные значения задаваемых параметров.

Число вариантов задания независимых переменных равно числу сочетаний двух параметров из четырех [20], которое для нашего случая равно шести: а) $t_{10}t_{20}$; б) $t_{10}t_1$; в) $t_{10}t_2$; д) $t_{20}t_1$; е) $t_{20}t_2$; ф) t_1t_2 . Каждое из представленных сочетаний определяет вариант задания независимых данных или вариант постановки обратной задачи. Шесть моделей теплопередачи в ступени прямоточных теплообменных аппаратов представлены в таблице, что позволяет сформулировать в матричном виде обратную задачу и получить ее решение для шести возможных вариантов пар значений исходных данных. Следует отметить, что режим работы оборудования при постановке обратной задачи учитывается в модели через расход и теплоемкость теплоносителей, а конструкция аппарата – через площадь поверхности теплообмена и коэффициент переноса.

Решение вариантов системы линейных уравнений, представленных в таблице, получено для различных значений конструктивного параметра, в качестве которого выбрана площадь поверхности теплообмена. Результаты решения вариантов обратной задачи представлены на рис. 2.

Обозначения вариантов постановки обратной задачи, отмеченные на рис. 2 латинскими буквами, совпадают с обозначениями вариантов, представленными в таблице; задаваемые значения температуры для каждого варианта отмечены кружками, а определяемые параметры выводятся в виде зависимостей от площади поверхности теплообмена. Данное представление решения обратной задачи позволяет при заданном значении независимых параметров определить зависимости искомых параметров от площади поверхности теплообмена, которая обеспечивает реализацию эффективного процесса теплообмена.

Представленные графические зависимости позволяют при заданных значе-

ниях независимых переменных находить комплекс зависимых переменных и конструктивные параметры системы, которые реализуют эффективный теплообмен. При проведении проектных расчетов нужно иметь в виду, что не для всех вариантов исходных данных существует физически приемлемое решение задачи. Например, постановка задачи варианта ф в результате приводит к значениям температуры теплоносителей на входе в аппарат, которые при больших площадях поверхностей нагрева являются физически нереализуемыми, что необходимо учитывать при анализе результатов.

Варианты матричных моделей обратных задач теплопередачи

Варианты постановки задачи		$\mathbf{B} \times \mathbf{T} = \mathbf{T}_o$		
		\mathbf{B}, \mathbf{T}	\mathbf{T}_o	
а)	$t_{10}t_{20}$	$\begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & 0 \\ b_{21} & b_{22} & 0 & b_{24} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t_{10} \\ t_{20} \\ t_1 \\ t_2 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \tilde{t}_{10} \\ \tilde{t}_{20} \end{pmatrix}$	
б)	$t_{10}t_1$	$\begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & 0 \\ b_{21} & b_{22} & 0 & b_{24} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t_{10} \\ t_{20} \\ t_1 \\ t_2 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \tilde{t}_{10} \\ \tilde{t}_1 \end{pmatrix}$	
в)	$t_{10}t_2$	$\begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & 0 \\ b_{21} & b_{22} & 0 & b_{24} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t_{10} \\ t_{20} \\ t_1 \\ t_2 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \tilde{t}_{10} \\ \tilde{t}_2 \end{pmatrix}$	
д)	$t_{20}t_1$	$\begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & 0 \\ b_{21} & b_{22} & 0 & b_{24} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t_{10} \\ t_{20} \\ t_1 \\ t_2 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \tilde{t}_1 \\ \tilde{t}_{20} \end{pmatrix}$	
е)	$t_{20}t_2$	$\begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & 0 \\ b_{21} & b_{22} & 0 & b_{24} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t_{10} \\ t_{20} \\ t_1 \\ t_2 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \tilde{t}_2 \\ \tilde{t}_{20} \end{pmatrix}$	
ф)	t_1t_2	$\begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & 0 \\ b_{21} & b_{22} & 0 & b_{24} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t_{10} \\ t_{20} \\ t_1 \\ t_2 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \tilde{t}_1 \\ \tilde{t}_2 \end{pmatrix}$	

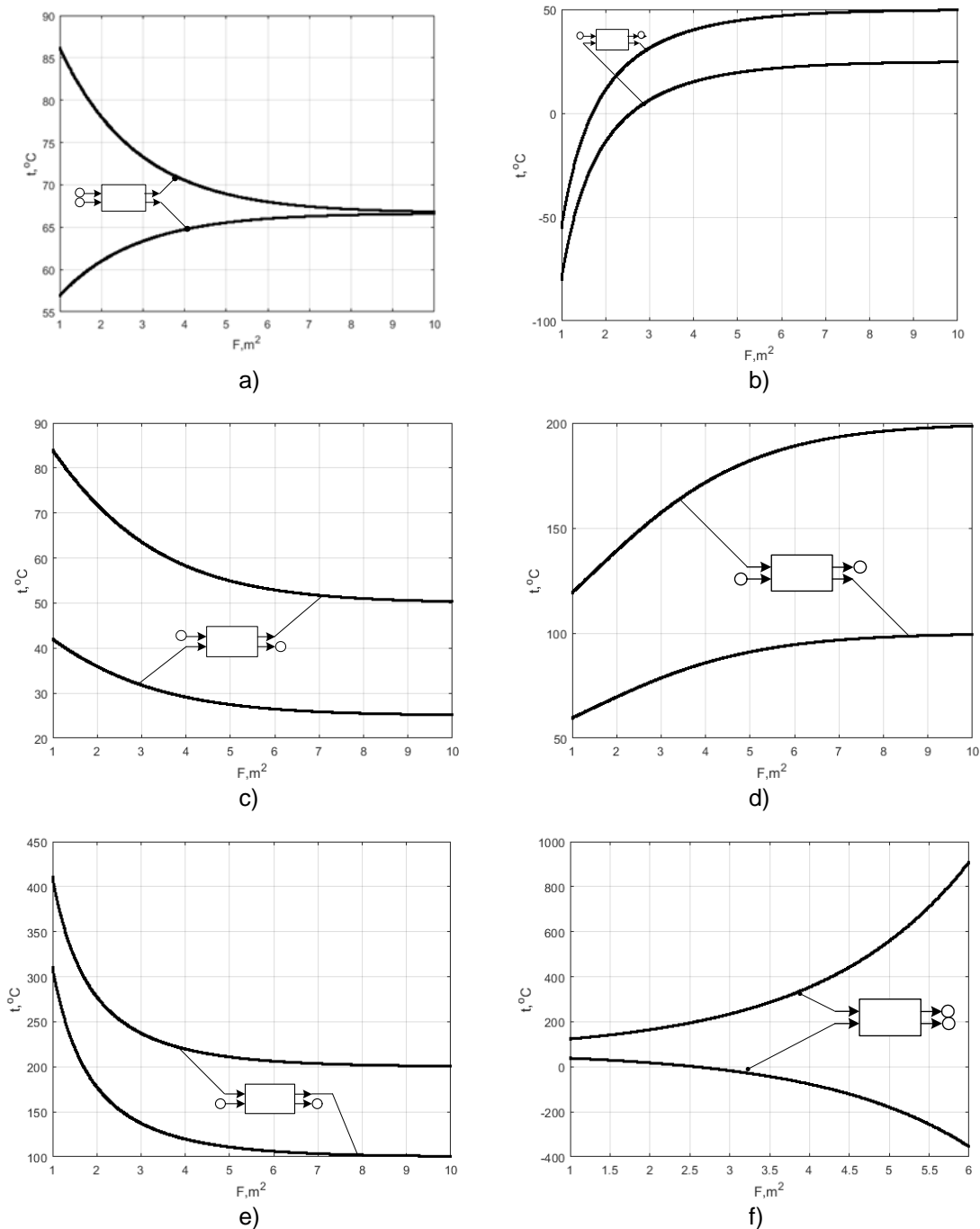


Рис. 2. Зависимости температур теплоносителей при прямоточном характере их движения от площади поверхности теплообмена при различных вариантах постановки обратной задачи теплопередачи: а) $t_{10} = 100^\circ C$; $t_{20} = 50^\circ C$; б) $t_{10} = 100^\circ C$; $t_1 = 50^\circ C$; в) $t_{10} = 100^\circ C$; $t_2 = 50^\circ C$; г) $t_{20} = 50^\circ C$; $t_1 = 100^\circ C$; д) $t_{20} = 50^\circ C$; $t_2 = 100^\circ C$; е) $t_2 = 50^\circ C$; $t_1 = 100^\circ C$

Для противоточного характера движения теплоносителей модель теплопередачи записывается аналогично (1), но для теплоносителя, который движется в направлении, противоположном направлению оси процесса F , правая часть уравнения умножается на минус единицу. В нашем случае против направления оси процесса движется холод-

ный теплоноситель. Для противоточного характера движения теплоносителей на рис. 3 в качестве примера представлен один вариант задания температур теплоносителей, остальные варианты постановки задачи записываются аналогично прямоточному характеру движения теплоносителей. Следует отметить, что для противоточного характера

движения теплоносителей общее число вариантов постановки задач тоже равно шести.

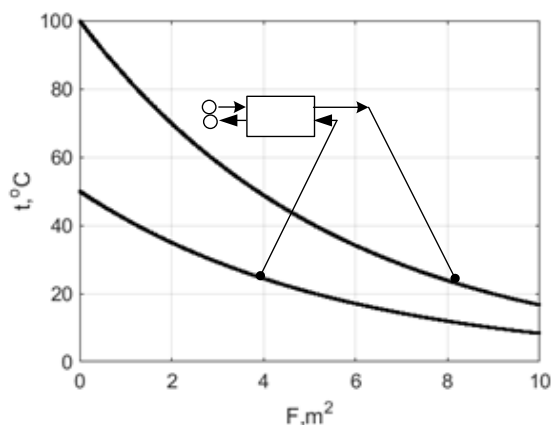


Рис. 3. Зависимости температуры теплоносителей при противоточном характере их движения от площади поверхности теплообмена при следующем задании независимых параметров: $t_{10} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_2 = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$

Наиболее интересный и сложный случай постановки обратной задачи при проведении проектных расчетов представляет вариант теплопередачи при наличии фазового перехода в одном или нескольких теплоносителях. При проведении расчетов обычно наперед неизвестно, в какой именно точке аппарата начинается фазовый переход в теплоносителе. В этом случае аппарат целесообразно разделить на подсистемы (зоны): зону с фазовым переходом и зону без фазового перехода в теплоносителях. Для моделирования процессов со скользящей границей фазовых переходов следует использовать модели, которые могут учитывать фазовый переход в одном или нескольких теплоносителях. Такие модели и алгоритмы их сшивки подробно описаны в [8] для прямоточного характера движения теплоносителей. В нашем случае формулируется обратная задача теплопередачи для противоточного характера движения теплоносителей. Математическая постановка обратной задачи представляется аналогично (4) для системы теплообменных аппаратов [8]. Структура и алгоритм составления матриц \mathbf{B} , \mathbf{T} , \mathbf{T}_0 подробно описаны в [8].

Порядок решения обратной задачи рассмотрим на примере противоточной схемы движения теплоносителей при наперед неизвестном положении границы фазового перехода. Пусть в качестве исходных данных заданы температуры горячего

и холодного теплоносителей на входе в аппарат. Для решения задачи предлагается использовать следующий алгоритм:

1. На первом этапе решается задача для одноступенчатой установки, в ходе решения которой определяется возможность достижения одним из теплоносителей температуры начала фазового перехода.

2. При выполнении условия начала фазового перехода система условно делится на две зоны (подсистемы) по границе начала фазового перехода. После этого формируется матрица для расчета двухступенчатого аппарата: одна ступень описывается моделью без учета, а вторая ступень – с учетом фазового перехода в теплоносителе.

3. Расчет по п. 2 повторяется при варьировании границы между зонами до достижения сходимости значения температуры теплоносителя на границе между зонами с температурой начала фазового перехода.

Наличие фазовых переходов в двух теплоносителях при заранее неопределенных границах этих переходов может быть реализовано по тому же принципу, но условия организации матрицы технологических процессов в данном случае алгоритмически реализуются значительно сложнее и в данном случае не рассматриваются.

Выводы. Полученные результаты решения обратной задачи теплопередачи в системе одноступенчатых и многоступенчатых теплообменных аппаратов для системы из двух теплоносителей могут быть использованы в энергетической [15], химической и пищевой [5, 6] отраслях промышленности для повышения эффективности ресурсо- и энергосберегающих технологий.

Список литературы

1. Майков В.П. Введение в системный анализ. – М.: МГУИЭ, 2005. – 100 с.
2. Цой П.В. Системные методы расчета краевых задач тепло-массопереноса. – М.: МЭИ, 2005. – 568 с.
3. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 416 с.
4. Разработка математической модели многопоточных теплообменных аппаратов с учетом фазового перехода в теплоносителях / К.А. Касаткин, А.Е. Барочкин, В.П. Жуков, Г.Г. Орлов // Вестник ИГЭУ. – 2018. – Вып. 5. – С. 61–67.

5. **Касаткин А.Г.** Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 2006. – 829 с.

6. **Комиссаров Ю.А., Гордеев Л.С., Вент Д.П.** Процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 2011. – 1230 с.

7. **Матричный** метод расчета сложных теплообменных систем с многокомпонентными теплоносителями / А.Е. Барочкин, В.П. Жуков, М.С. Шумилова и др. // Вестник ИГЭУ. – 2020. – № 1. – С. 59–68.

8. **Жуков В.П., Барочкин Е.В.** Системный анализ энергетических теплообменных установок. – Иваново, 2009. – 176 с.

9. **Жуков В.П., Барочкин А.Е., Беляков А.Н.** Исследование процесса теплопередачи в многопоточных теплообменных аппаратах // Известия высших учебных заведений. Сер. Химия и химическая технология. – 2011. – Т. 54, № 11. – С. 116–119.

10. **Разработка** конструкции печи для утилизации твердых отходов и оценка эффективности ее работы / Р.Н. Габитов, О.Б. Колибаба, А.И. Сокольский, А.В. Грошева // Вестник ИГЭУ. – 2019. – Вып. 5. – С. 23–30.

11. **Расчет** нестационарного теплообмена в многослойных средах с помощью теории цепей Маркова / А.В. Огурцов, Е.И. Крупнов, Е.Р. Кормашова, В.Е. Мизонов // Вестник ИГЭУ. – 2021. – Вып. 1. – С. 60–66.

12. **Ячеечная** модель теплопроводности в многослойной среде с переменным числом слоев / В.Е. Мизонов, А.В. Митрофанов, Е.В. Басова, Е.А. Шуина // Вестник ИГЭУ. – 2020. – Вып. 3. – С. 51–57.

13. **Еремин А.В., Губарева К.В.** Аналитический метод решения задач теплопроводности с граничными условиями третьего рода // Вестник ИГЭУ. – 2019. – Вып. 6. – С. 67–74.

14. **Соколов А.К., Якубина О.А.** Численно-аналитический метод расчета температурного поля полуограниченного тела с использованием показательных функций // Вестник ИГЭУ. – 2016. – Вып. 2. – С. 44–50.

15. **Шарапов В.И., Цюра Д.В.** Термические деаэраторы. – Ульяновск: УлГТУ, 2003. – 560 с.

16. **Вентцель Е.С.** Исследование операций: задачи, принципы, методология. – М.: Дрофа, 2004. – 207 с.

17. **Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике (для научных работников и инженеров). – М.: Высш. шк., 1973. – 500 с.

18. **Моисеев Н.Н.** Математические задачи системного анализа. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. – 488 с.

19. **Таха Х.** Введение в исследование операций. – М.: Вильямс, 2005. – 901 с.

20. **Вентцель Е.С.** Теория вероятностей. – М.: Наука, 2001. – 576 с.

References

1. Maykov, V.P. *Vvedenie v sistemnyy analiz* [Introduction to system analysis]. Moscow: MGUE, 2005. 100 p.

2. Tsoy, P.V. *Sistemnye metody rascheta krayevykh zadach teplomassoperenosa* [System methods for calculating boundary value problems of heat and mass transfer]. Moscow: MEI, 2005. 568 p.

3. Isachenko, V.P., Osipova, V.A., Sukomel, A.S. *Teploperedacha* [Heat transfer: a textbook for universities]. Moscow: Energoatomizdat, 1981. 416 p.

4. Kasatkin, K.A., Barochkin, A.E., Zhukov, V.P., Orlov, G.G. *Razrabotka matematicheskoy modeli mnogopotoknykh teplotobmennyykh apparatov s uchetom fazovogo perekhoda v teplonositelyakh* [Development of a mathematical model of multi-current heat exchangers taking into account phase transition in heat carriers]. *Vestnik IGEU*, 2018, issue 5, pp. 61–67.

5. Kasatkin, A.G. *Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii* [Basic processes and apparatuses of chemical technology]. Moscow: Khimiya, 2006. 829 p.

6. Komissarov, Yu.A., Gordeev, L.S., Vent, D.P. *Protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii* [Processes and devices of chemical technology]. Moscow: Khimiya, 2011. 1230 p.

7. Barochkin, A.E., Zhukov, V.P., Shumilova, M.S., Barochkin, E.V., Belyakov, A.N. *Matrichnyy metod rascheta slozhnykh teplotomassobmennyykh sistem s mnogokomponentnymi teplonositelyami* [The matrix method for calculating complex heat and mass transfer systems with multicomponent coolants]. *Vestnik IGEU*, 2020, issue 1, pp. 59–68.

8. Zhukov, V.P., Barochkin, E.V. *Sistemnyy analiz energeticheskikh teplotomassobmennyykh ustanovok* [System analysis of energy heat and mass exchange plants]. Ivanovo, 2009. 176 p.

9. Zhukov, V.P., Barochkin, A.E., Belyakov, A.N. *Issledovanie protsessa teploperedachi v mnogopotoknykh teplotobmennyykh apparatakh* [Study of heat transfer process in multi-stream heat exchangers]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2011, vol. 54, no. 11, pp. 116–119.

10. Gabitov, R.N., Kolibaba, O.B., Sokol'skiy, A.I., Grosheva, A.V. *Razrabotka konstruktii pechi dlya utilizatsii tverdykh otkhodov i otsenka effektivnosti ee raboty* [Development of the furnace design for solid waste utilization and evaluation of its operation efficiency]. *Vestnik IGEU*, 2019, issue 5, pp. 23–30.

11. Ogurtsov, A.V., Krupnov, E.I., Kormashova, E.R., Mizonov, V.E. *Raschet nestatsionarnogo teplotobmena v mnogosloynnykh sredakh s pomoshch'yu teorii tsepey Markova* [Calculation of non-stationary heat exchange in multi-layer media

by means of the theory of Markov chains]. *Vestnik IGEU*, 2021, issue 1, pp. 60–66.

12. Mizonov, V.E., Mitrofanov, A.V., Basova, E.V., Shuina, E.A. Yachechnaya model' teploprovodnosti v mnogosloynoy srede s peremennym chislom sloev [A cell model of heat conduction in multi-layer medium with variable number of the layers]. *Vestnik IGEU*, 2020, issue 3, pp. 51–57.

13. Eremin, A.V., Gubareva, K.V. Analiticheskiy metod resheniya zadach teploprovodnosti s granichnymi usloviyami tret'ego roda [Analytical solution of the problem of heat transfer using boundary conditions of the third kind]. *Vestnik IGEU*, 2019, issue 6, pp. 67–74.

14. Sokolov, A.K., Yakubina, O.A. Chislennno-analiticheskiy metod rascheta temperaturnogo polya poluogranichennogo tela s ispol'zovaniem pokazatel'nykh funktsiy [Numerical and analytical method of semi-limited body temperature field calculation by using exponential functions]. *Vestnik IGEU*, 2016, issue 2, pp. 44–50.

15. Sharapov, V.I., Tsyura, D.V. *Termicheskie deaeratory* [Deaerating heaters]. Ul'yanovsk: UIGTU, 2003. 560 p.

16. Venttsel', E.S. *Issledovanie operatsiy: zadachi, printsipy, metodologiya* [Operation Research: Objectives, Principles, Methodology]. Moscow: Drofa, 2004. 207 p.

17. Korn, G., Korn, T. *Spravochnik po matematike (dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov)* [Handbook of Mathematics (for Scientists and Engineers)]. Moscow: Vysshaya shkola, 1973. 500 p.

18. Moiseev, N.N. *Matematicheskie zadachi sistemnogo analiza* [Mathematical problems of system analysis]. Moscow: Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1981. 488 p.

19. Takha, Kh. *Vvedenie v issledovanie operatsiy* [Introduction to Operation Research]. Moscow: Vil'yams, 2005. 901 p.

20. Venttsel', E.S. *Teoriya veroyatnostey* [Probability theory]. Moscow: Nauka, 2001. 576 p.

УДК 681.3

Сергей Константинович УлыбышевФГБОУВО «Костромской государственный университет», аспирант, Россия, Кострома,
e-mail: ulybyshev@outlook.com**Борис Александрович Староверов**

ФГБОУВО «Костромской государственный университет», доктор технических наук, профессор кафедры автоматики и микропроцессорной техники, Россия, Кострома, e-mail: sba44@mail.ru

Имитационная модель перераспределения тепловых потоков в системе управления отоплением в здании

Авторское резюме

Состояние вопроса. Внедрение автоматических систем регулирования отопления позволяет снизить потребление тепловой энергии в жилом секторе до 10 %, в административных и учебных зданиях до 40 %. На текущий момент существуют системы управления отоплением, однако они применимы только к одноуровневой двухтрубной системе отопления. Разработка имитационной модели перераспределения потоков теплоносителя необходима для синтеза системы взаимосвязанного динамического управления отоплением здания.

Материалы и методы. В отличие от существующих решений, данная разработка учитывает проблему разбалансировки потоков теплоносителя в многоуровневой иерархической системе отопления. Расчет конвективного теплообмена в помещении производится исходя из предположения, что температура воздуха в каждый момент времени одинакова во всем объеме помещения. При определении теплообмена через наружные ограждения предполагается, что ограждение или его характерная часть имеет одинаковую температуру в плоскостях, перпендикулярных направлению потока воздуха. В этом случае процесс теплообмена описывается одномерным уравнением теплообмена.

Результаты. Разработана имитационная модель системы управления отоплением, позволяющая быстро подключать модули автоматического управления, вносить изменения в алгоритмы управления на этапе компиляции и в состояние системы во время процесса моделирования. По сравнению с возможными аналогами, построенными на базе систем моделирования AnyLogic или ANSYS, она функционирует как модель объекта управления, легко объединяется с моделями блоков автоматического управления и учитывает проблему разбалансировки тепловых потоков. Рассмотрен пример функциональной схемы локальной системы температурного контроля в зоне одной батареи отопления.

Выводы. Использование разработанной имитационной модели позволяет создать новый уровень контроля качества технологических процессов производства и потребления энергоресурсов с применением современных информационных технологий при синтезе системы взаимосвязанного динамического управления отоплением. Возможности такого моделирования ориентированы на построение системы бесперебойного и качественного теплоснабжения, поддержание энергоэффективных режимов работы, а также достижение реального экономического эффекта. Рассматриваемая модель позволяет имитировать перераспределение тепловых потоков в различных режимах работы системы отопления.

Ключевые слова: имитационная модель, тепловой поток, автоматическое управление, микроклимат

Sergey Konstantinovich Ulybyshev

Kostroma State University, Postgraduate Student, Russia, Kostroma, e-mail: ulybyshev@outlook.com

Boris Alexandrovich Staroverov

Kostroma State University, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Automation and Microprocessor Technology Department, Russia, Kostroma, e-mail: sba44@mail.ru

Imitation model of heat flows distribution in building heating control system

Abstract

Background. Implementation of automatic heating control systems allows us to reduce heat consumption by 10% in residential areas and 40% in office and educational buildings. Currently, there are heating control

systems, however, they are applied only to a single-level two-pipe heating system. Development of an imitation model of heat flows redistribution is necessary to synthesize the system of interconnected dynamic heating control of a building.

Materials and methods. Unlike existing solutions, this research work considers the problem of unbalanced heat flow in a multi-level hierarchical heating system. Calculation of convective heat transfer in the room assumes that the air temperature at any given time is the same throughout the entire room. When we determine heat transfer through walling, it is assumed that the walling or its part has the same temperature of the planes perpendicular to the direction of air flow. In this case, the heat transfer process is described by a one-dimensional heat transfer equation.

Results. The developed model of heating control systems allows us to connect the automatic control modules, change control algorithms at the compilation stage and in the system state during the simulation process. In comparison with possible analogue models based on AnyLogic or ANSYS modeling systems, the presented model is the model of controlled object. It is easily combined with models of automatic control units and considers the problem of imbalance of heat flows. An example of the functional scheme of the local temperature control system around one battery is considered.

Conclusions. Implementation of developed imitation model makes it possible to ensure a new level of quality control of technological processes of production and consumption of power energy resources by using modern information technologies and synthesizing a system of interconnected dynamic heating control. Possibilities of such modeling are focused on development of the uninterrupted and high-quality heat supply system, maintaining energy-efficient operating modes, as well as actual economic effect. The model under consideration allows us to simulate redistribution of heat flows in different operating modes of the heating system.

Key words: imitation model, heat flow, automatic control, microclimate

DOI: 10.17588/2072-2672.2021.2.070-079

Введение. В настоящее время 35–40 % общего потребления энергии и около 30 % общих выбросов парниковых газов производится в жилых, офисных и промышленных зданиях [1].

В связи с этим разработка внутренних систем управления микроклиматом, обеспечивающих комфортные условия жизни и работы при минимальном энергопотреблении, действительно актуальна в настоящее время [2, 3]. Одним из основных направлений развития энергосберегающих технологий, так называемого «умного дома», является обеспечение микроклимата с помощью энергосберегающего оборудования, технологий и социализированных подсистем управления [4]. При этом каждая из подсистем должна быть способна функционировать как во взаимосвязанном, так и в полностью автономном режиме [5, 6]. Таким образом, подсистемы автоматического мониторинга и управления должны оптимизировать функционирование климатического оборудования и быть легко интегрированы в систему диспетчеризации [7, 8].

Большой вклад в энергосбережение вносит система автоматического управления отоплением и горячим водоснабжением [9]. Например, установка системы автоматического регулирования на индивидуальном тепловом узле может снизить потребление тепла в административном

здании на 40 % и более в континентальных климатических условиях [10, 11]. Это связано, прежде всего, с графиком ежедневного и еженедельного использования площадей в административных зданиях. Когда такие помещения не используются, температура может понизиться до точки росы. Таким образом, это требует не только централизованного управления всем зданием, но и индивидуального динамического контроля температуры в каждом помещении в зависимости от графика его использования [8].

При централизованном управлении в индивидуальных тепловых узлах в основном регулируются два типа тепловой нагрузки: горячая вода и отопление. Для обоих типов тепловой нагрузки автоматическая система управления должна поддерживать заданные значения температуры горячей воды и воздуха в отапливаемых помещениях без изменений.

Отличительной особенностью управления отоплением является высокая тепловая инертность, в то время как инертность системы горячего водоснабжения значительно ниже [12, 13]. В связи с этим задача стабилизации температуры воздуха в отапливаемых помещениях значительно сложнее, чем задача стабилизации температуры горячей воды в системе горячего водоснабжения.

Основными возмущающими воздействиями являются внешние погодные условия: температура наружного воздуха, ветер, солнечная радиация.

Существуют следующие принципиально возможные схемы управления [14]:

- управление отклонением внутренней температуры помещений от заданного значения воздействием на поток воды, поступающей в систему отопления;

- контроль в зависимости от возмущения внешних параметров, приводящего к отклонению внутренней температуры от заданного значения;

- контроль в зависимости от изменения внешней и внутренней температуры (возмущения и отклонения).

При создании системы динамического отопления здания необходима разработка многоуровневой системы управления перераспределением потоков теплоносителя, что требует применения методов имитационного моделирования. Такая модель перераспределения потоков, имитирующая динамическую работу системы отопления, должна иметь возможность включения в эту модель динамических процессов изменения температуры отапливаемых помещений и функциональных блоков распределенной системы управления потоками теплоносителя и температурой помещений [14].

Методы исследования. При описании технологических процессов теплоснабжения используются расчетные схемы статики, описывающие начальные условия, и расчетные схемы динамики, описывающие переходные режимы. Расчетные схемы системы теплоснабжения определяют связи между входными и выходными воздействиями на объект регулирования при основных внутренних и внешних возмущениях.

Современное здание представляет собой сложную теплоэнергетическую систему, поэтому для описания температурного режима здания вводятся упрощающие допущения [15, 16]. Для высотных гражданских зданий существует локализация части здания, для которой выполняются расчеты. По мере изменения температурного режима в здании в зависимости от этажа, горизонтальной планировки помещений, вычисление температурного режима выполняется для одного или нескольких наиболее удачно расположенных помещений. Расчет конвективного теплообмена в помещении производится исходя из предпо-

ложения, что температура воздуха в каждый момент времени одинакова во всем объеме помещения. При определении теплообмена через наружные ограждения предполагается, что ограждение или его характерная часть имеют одинаковую температуру в плоскостях, перпендикулярных направлению потока воздуха. В этом случае процесс теплообмена через наружные ограждения описывается одномерным уравнением теплообмена.

Расчет теплообмена в помещении также позволяет сделать несколько упрощений [17]:

- воздух в помещении считается теплопроводящей средой;

- пренебрегается повторное отражение лучистых потоков от поверхностей;

- заменяются сложные геометрические формы на более простые.

При оценке параметров наружного климата необходимо учитывать следующее:

- если рассчитать температурный режим помещений при экстремальных значениях возможного наружного климата в данной местности, то тепловая защита стен здания и мощность системы управления микроклиматом обеспечат поддержание заданных условий;

- если будут приняты более мягкие требования, то в определенный момент времени в помещении будут наблюдаться отклонения от расчетных условий.

Продолжительность и инертность переходных процессов нагревания и охлаждения воздуха в элементах систем поддержания микроклимата оказывает существенное влияние на задержку температуры воздуха в помещении. Этот факт необходимо учитывать при проектировании алгоритмов автоматизированных систем управления микроклиматом. Зависимости переходных процессов в исследуемых элементах систем микроклимата в относительных значениях имеют характерный, не случайный вид и практически симметричны при нагреве и охлаждении воздуха [18]. Благодаря этому можно использовать регрессионный анализ экспериментальных данных для выявления функциональных зависимостей между различными параметрами. В свою очередь, это позволит реализовать следующий шаг построения системы управления – разработать специальную математическую модель того или иного исследуемого элемента системы поддержания микроклимата [19].

Основой для разработки имитационной модели перераспределения потоков теплоносителя является представление системы теплоснабжения здания в виде трехуровневой функциональной схемы (рис. 1), где $X_{вх}$, $X_{вых}$ – входные и выходные потоки от тепловой станции; $Y_{вх}$, $Y_{вых}$ – входные и выходные потоки во внутреннюю сеть от тепловой станции; $Z_{вхi}$, $Z_{выхi}$ ($i = 1, 2, \dots, N$) – входные и выходные потоки к отопительным радиаторам от стояков, которые далее распределяются по потокам отдельных отопительных радиаторов.

Функциональная схема системы теплоснабжения здания подробно представлена на рис. 2.

На схеме модели показаны 3 стояка с 3 батареями, соединенными параллельно друг другу. Данная модель представляет собой упрощенное описание потоков теплоносителя от трубопровода центрального отопления к каждому отопительному радиатору на любой из трех стояков в здании. Модель масштабируется на любое количество стояков и радиаторов отопления.

В установленном режиме действуют следующие соотношения:

$$Z_{вх1} = Z_{вх11} + Z_{вх12} + Z_{вх13}; \quad (1)$$

$$Z_{вх2} = Z_{вх21} + Z_{вх22} + Z_{вх23}; \quad (2)$$

$$Z_{вх3} = Z_{вх31} + Z_{вх32} + Z_{вх33}; \quad (3)$$

$$Z_{вых1} = Z_{вых11} + Z_{вых12} + Z_{вых13}; \quad (4)$$

$$Z_{вых2} = Z_{вых21} + Z_{вых22} + Z_{вых23}; \quad (5)$$

$$Z_{вых3} = Z_{вых31} + Z_{вых32} + Z_{вых33}; \quad (6)$$

$$Y_{вх} = Z_{вх1} + Z_{вх2} + Z_{вх3}; \quad (7)$$

$$Y_{вых} = Z_{вых1} + Z_{вых2} + Z_{вых3}; \quad (8)$$

$$X_{вх} + Y_{вых} = X_{вых} + Y_{вх}. \quad (9)$$



Рис. 1. Трехуровневая функциональная схема системы теплоснабжения здания

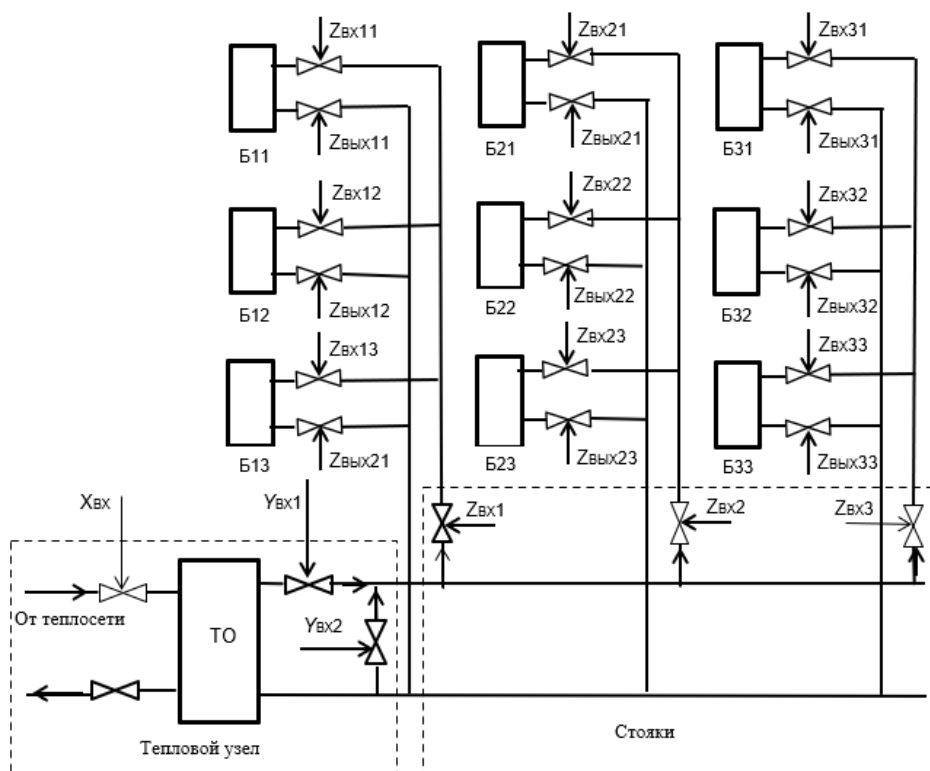


Рис. 2. Функциональная схема системы теплоснабжения здания в развернутом виде

Постоянные и переменные составляющие пропускной способности участка отопительной системы (трубопровод + батарея + запорно-регулирующая арматура – клапан) моделируются с помощью регулируемых и нерегулируемых клапанов в качестве основных параметров, например:

$$Z_{\text{вых11}} = Z_{\text{вх11с}} + Z_{\text{вх11д}} + Z_{\text{вх11в}}, \quad (10)$$

где $Z_{\text{вх11с}}$ – постоянная составляющая, определяемая статическим сопротивлением потоку; $Z_{\text{вх11д}}$ – переменная составляющая, определяемая динамической составляющей сопротивления потоку; $Z_{\text{вх11в}}$ – переменная или регулируемая составляющая.

Переменные или регулируемые значения производительности клапанов определяются воздействием системы управления.

Реализация имитационной модели была выполнена на языке Delphi, что позволяет создавать потоковые модели как модели объекта управления. Это дает преимущества по сравнению с возможными аналогами, например программными системами моделирования AnyLogic или ANSYS. Разработанная модель легко комбинируется с модулями автоматического управления и позволяет вносить измене-

ния в алгоритм управления на этапе компиляции, а также в состояние системы в процессе моделирования.

В приведенном фрагменте представлены элементы теплового узла: ввод теплового потока от централизованной системы теплоснабжения, мощность теплообменника, вывод охлажденной воды обратно в централизованную систему и входной поток от стояков. Каждый элемент имеет такие характеристики, как входной и выходной потоки (пропускная способность), которые могут быть изменены «на лету», и объем теплоносителя для элементов системы теплоснабжения, которые могут его набирать.

На рис. 3 показан полный интерфейс модели отопительной системы с 3 стояками и 3 батареями, подключенными параллельно. Рядом с заданным значением каждой характеристики отображается ее текущее значение, которое изменяется вследствие динамического процесса перераспределения потоков.

Важно отметить еще раз, что модель является масштабируемой и при необходимости можно увеличить количество регулируемых элементов.

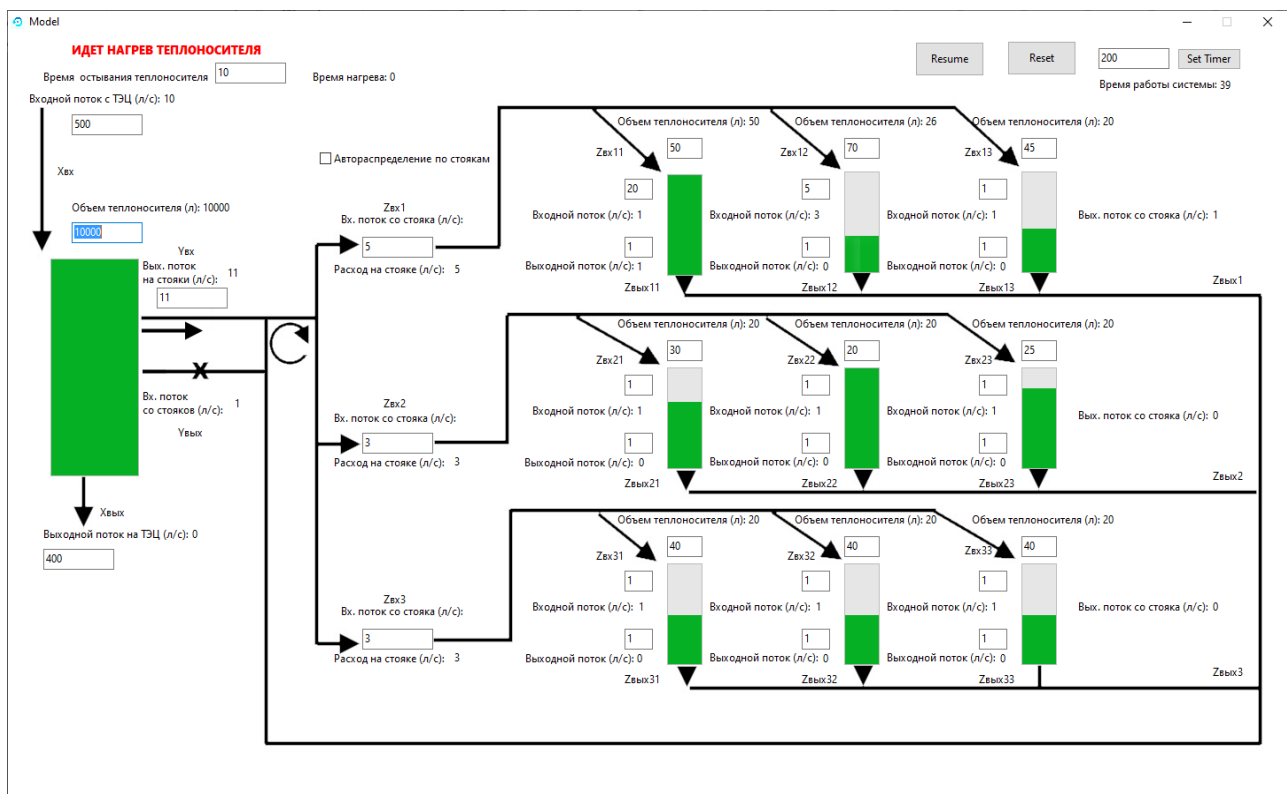


Рис. 3. Интерфейс имитационной модели перераспределения потоков теплоносителя

В верхней части экрана находятся следующие элементы: надпись «нагрев теплоносителя»/«охлаждение теплоносителя», в зависимости от процесса нагревания или охлаждения; характеристики «время охлаждения теплоносителя» (этот параметр показывает, за сколько циклов моделирования температура теплоносителя уменьшается до минимального уровня (значение динамически регулируется)) и «время нагрева» (рассчитывается автоматически, исходя из заданного объема теплоносителя в системе и мощности поступающего теплоносителя). В правом верхнем углу находится кнопка Start/Pause/Resume, которая запускает, приостанавливает и продолжает процесс моделирования. Кнопка Reset используется для сброса модели в состояние по умолчанию. Область ввода и кнопка Set Timer («Установить таймер») служат для установки времени системного цикла (по умолчанию интервал составляет 1000 мс). Ниже этого блока отображается время работы модели, измеренное в тактах.

Результаты исследования. Процесс имитационного моделирования происходит следующим образом. После того как система переключается в режим нагрева, таймер производит обратный отсчет. После того как система достигает нуля, она возвращается в режим охлаждения теплоносителем. Процесс заполнения определяется пропускными характеристиками стояков и радиаторов, а также мощностью радиаторов. Например, в случае превышения заданного суммарного расхода теплоносителя к радиаторам, который определяется выражением $Z_{вх11} + Z_{вх12} + Z_{вх13}$, скорость потока ограничивается пропускной способностью стояка.

После заполнения одного из радиаторов он переходит в режим прохождения потока теплоносителя через себя. Таким образом, поток теплоносителя для заполнения оставшихся панелей перераспределяется в зависимости от емкости оставшихся батарей. Кроме того, выходной поток от радиаторов идет на выходной поток в стояке, а затем в тепловой узел. Пока весь объем не будет заполнен теплоносителем, система будет находиться в режиме нагрева и принимать поток теплоносителя от внешней системы отопления $X_{вх}$.

После полного заполнения системы она переходит в режим охлаждения, время которого определено. В этот момент происходит внутренняя рециркуляция потока

теплоносителя, входной и выходной потоки стояков равны, забор и выход потока теплоносителя из резервуара теплового узла не осуществляется.

По окончании режима охлаждения система переходит в режим нагрева. Время работы этого режима определяется общим объемом теплоносителя внутри системы и характеристиками потока теплоносителя теплового узла.

На этом этапе модель начинает «забирать» нагретый теплоноситель из теплового узла и сбрасывать холодный. По окончании этого режима система возвращается в режим охлаждения и т.д.

Так как модель является динамической, то можно в любое время изменить характеристики потока и объем любого элемента системы. Эти изменения могут привести к преждевременному переходу в режим нагрева или охлаждения, что зависит от заданных характеристик. Как только баланс будет достигнут, система вернется к циклическому изменению режимов нагрева и охлаждения.

Кроме того, реализована возможность автоматического распределения потока теплоносителя по стоякам в зависимости от объема поступающего от теплового узла теплоносителя. Переключение этой функциональности реализуется с помощью переключателя «Автораспределение по стоякам». Когда система отопления полностью заполнена теплоносителем, она переключается в режим циклического нагрева/охлаждения, как описано выше.

Следует отметить, что включение автоматического перераспределения потоков по стоякам возможно в любой момент времени работы системы. В этом случае пропускная способность по водоразборным трубам изменится на оптимальную автоматически, в зависимости от текущего состояния системы.

Модель является открытой, поэтому можно ее дополнять модулями автоматического управления.

На рис. 4 представлен фрагмент модели локальной системы температурного контроля в зоне работы отопительной батареи, где T_z – сигнал задания требуемого значения температуры в зоне нагрева; T_k – комнатная температура; W – модель помещения (зоны нагрева), на которую влияет батарея и внешняя окружающая среда; SU – система управления температурой в помещении; Z_y – управляющий эффект.

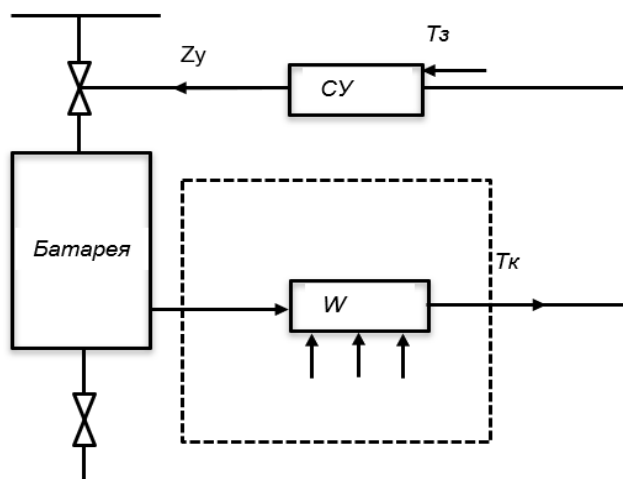


Рис. 4. Функциональная схема управления теплоснабжением в помещении

Согласно уравнениям теплового баланса для радиатора [8]:

$$T_H = \frac{(T_{ВХ} + T_{ВЫХ})}{2} - T_K; \quad (11)$$

$$P_{\text{бат}} = P_H \left(\frac{T_{\Phi}}{T_H} \right)^{1,3}. \quad (12)$$

С другой стороны,

$$Q = C m \Delta T = C V \rho (T_{ВХ} - T_{ВЫХ}); \quad (13)$$

$$P = \frac{Q}{t}. \quad (14)$$

В нашем случае можем принять

$$t = \frac{V}{Z}. \quad (15)$$

Тогда

$$P_H \left(\frac{T_{\Phi}}{T_H} \right)^{1,3} = \frac{C V \rho (T_{ВХ} - T_{ВЫХ})}{\frac{V}{Z}}; \quad (16)$$

$$P_H \left(\frac{T_{\Phi}}{T_H} \right)^{1,3} \frac{V}{Z} = C V \rho (T_{ВХ} - T_{ВЫХ}); \quad (17)$$

$$P_H \left(\frac{\frac{T_{ВХ} + T_{ВЫХ}}{2} - T_K}{T_H} \right)^{1,3} = C (T_{ВХ} - T_{ВЫХ}) Z; \quad (18)$$

$$\left(\frac{\frac{T_{ВХ} + T_{ВЫХ}}{2} - T_K}{T_H} \right)^{1,3} = K_{\text{бат}} Z (T_{ВХ} - T_{ВЫХ}). \quad (19)$$

Пусть

$$T_{\Phi} = \frac{T_{ВХ} + T_{ВЫХ}}{2}. \quad (20)$$

В результате преобразования получим зависимость

$$Z = \frac{\frac{T_{\Phi} - T_K}{T_H}}{K_{\text{бат}} (T_{ВХ} - T_{ВЫХ})}, \quad (21)$$

которую можно привести к виду

$$Z = \frac{T_{\Phi} - T_K}{K_{\text{бат}} T_H (T_{ВХ} - T_{ВЫХ})}, \quad (22)$$

где $T_{\Phi} = (T_{ВХ} + T_{ВЫХ})/2$ – фактическая температура теплового потока; T_K – температура в помещении; T_H – номинальная температура теплоносителя; Z – мощность радиатора; $T_{ВХ}/T_{ВЫХ}$ – входная/выходная температуры теплоносителя в батарее; $K_{\text{бат}}$ – коэффициент батареи.

Данные зависимости позволяют моделировать процесс нагрева помещения от одной отопительной батареи.

Выводы. В связи с масштабностью работ по модернизации существующего технологического и измерительного оборудования, реконструкции энергетических объектов и реализации программ энергосбережения актуальность и практическая значимость моделирования систем отопления зданиями для решения задач управления значительно возрастет.

Следует также учитывать, что широкий спектр вариантов эксплуатации технических устройств отопления является предметом различных исследований, что необходимо для обобщенного представления технологических вариантов эффективного управления микроклиматом помещений.

Использование предлагаемой имитационной модели позволяет создать новый уровень исследования технологических процессов динамического управления

отоплением задания. Рассматриваемая модель позволяет имитировать перераспределение тепловых потоков в различных режимах работы системы отопления как всего здания, так и при локальном управлении температурой отдельных помещений. Отличительной особенностью модели является ее открытость, т.е. возможность оперативно изменять моделирование процессов теплопередачи и подключать функциональные блоки распределенной системы управления.

Список литературы

1. **Распределяемая** энергия в России: Потенциал развития [Электронный ресурс] / А. Хохлов, Ю. Мельников, Ф. Веселови др. – Сколково, 2018. – 87 с. – Режим доступа: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/S_EneC/Research/SKOLKOVO_EneC_DER-3.0_2018.02.01.pdf (дата посещения: 01.10.2019).
2. **Alahakoon D., Yu X.** Smart electricity meter data intelligence for future energy systems: a survey // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2016. – Vol. 12, No. 1. – P. 425–436. DOI:10.1109/TII.2015.2414355
3. **Software-defined** industrial Internet of Things in the context of Industry 4.0 / J. Wan, S. Tang, Z. Shu, et al. // IEEE Sensors Journal. – 2016. – Vol. 16. – P. 7373–7380. DOI: 10.1109/JSEN.2016.2565621
4. **Jayaram A.** An IIoT quality global enterprise inventory management model for automation and demand fore-casting based on cloud // Proc. Int. Conf. on Computing, Communication and Automation (ICCCA). – Greater Noida, India, 2017. – P. 1258–1263. DOI: 10.1109/CCAA.2017.8230011
5. **Mudialba P.J.** The impact of cloud technology on the automation of businesses // Proc. Int. Conf. on Platform Technology and Service (PlatCon). 2016. DOI: 10.1109/PlatCon.2016.7456831
6. **Optimal** solutions for substation automation: integrated system ASDTM/AIMSCME // Energoekspert. – 2009. – № 6. – P. 25–28.
7. **Smart** meter data analytics for distribution network connectivity verification / W. Luan, J. Peng, M. Maras // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2015. – Vol. 6, No. 4. – P. 1964–1971. DOI: 10.1109/TSG.2015.2421304
8. **Букин А.В., Тихонов Е.И.** Автоматизированная система управления и диспетчеризации объектов теплоэнергетики в Санкт-Петербурге // Отраслевой научно-технологический журнал «ISUP». – 2012. – Вып. 6(42). Имеется по адресу: <https://isup.ru/articles/3/3322/> (дата посещения: 12.05.2019).
9. **Староверов Б.А., Гнатюк Б.А.** Повышение эффективности автоматизированного коммерческого учета энергопотребления за счет внедрения функций прогнозирования // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 6 – С. 10–15.
10. **Development** of a controller hardware-in-the-loop platform for microgrid distributed control applications / Y. Du, H. Tu, S. Lukic, et al. // IEEE Electronic Power Grid (eGrid). – 2018. DOI: 10.1109/eGRID.2018.8598696
11. **Староверов Б.А., Мозохин А.Е.** Структура и этапы построения автоматизированной системы управления электрическими сетями в масштабах региональной сетевой компании // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2018. – Вып. 3(84). – С. 55–62.
12. **Pongpun Urarungroj** – Low order boiler-turbine dynamic models and stress calculations in thermal power plant, January 1997. A thesis submitted to the University of New South Wales to fulfil the requirements for the degree of Master of Engineering. Available at National library of Australia, URL: <https://trove.nla.gov.au/>
13. **Chang Chen** – Dynamic modeling and control of hybrid ground source heat pump systems, May 2008. A thesis submitted to the Concordia University to fulfil the requirements for the degree of Master of Applied Science. Available at Library and Archives Canada, URL: <http://www.bac-lac.gc.ca>
14. **John Adam Dembecki.** Automatic Control of Hydro and Thermal Generation on a large Interconnected Power System (including continuous economic optimization), December 1964. A thesis submitted to the University of New South Wales to fulfil the requirements for the degree of Master of Engineering. Available at National library of Australia, URL: <https://trove.nla.gov.au/>
15. **Reference** architecture of smart grids. Version 2.0 [Electronic resource] // Microsoft Worldwide Group Power & Utilities. – 2013. – 320 p. – URL: http://d2_rus.cigre.ru/doc/SERA_v2_ru_v2.1.pdf (date accessed: 01.10.2019).
16. **Automation** of substations for the construction of intelligent power [Electronic resource] // CISCO SYSTEMS, 2010. 5 p. URL: cisco.com/web/RU/downloads/broch...podstanij.pdf (date accessed: 7.03.2020).
17. **Cloud** computing. Tadviser. State. Business. Information technology. – 2018. – 10 p. – URL: http://www.tadviser.ru/index.php/Cloud_Computing (date accessed: 09.10.2019).
18. **Моделирование** тепловых условий эксплуатации в тепловых скважинах наземных систем теплоснабжения. Часть I: Процессы

пористого замораживания влаги в почве / Г.П. Васильев, Н.В. Песков, В.А. Личман и др. // Издательство Майк Наука/Интерпериодика (Российская Федерация). – 2015. – Вып. 62. – № 8.

19. Кузнецов Р.С., Чипулис В.П. Информационно-аналитические системы мониторинга, анализа и автоматического управления энергокомпаниями // Вестник ДВО РАН. – 2016. – Вып. 4. – С. 116–124.

References

1. Khokhlov, A., Mel'nikov, Yu., Veselov, F., Kholkin, D., Datsko, K. *Raspredelyaemaya energiya v Rossii: Potentsial razvitiya* [Distributed Energy in Russia: Development Potential]. Skolkovo, 2018. 87 p. Available at: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_DER-3.0_2018.02.01.pdf (date accessed: 01.10.2019).
2. Alahakoon, D., Yu, X. Smart electricity meter data intelligence for future energy systems: a survey. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2016, vol. 12, no. 1, pp. 425–436. DOI:10.1109/TII.2015.2414355
3. Wan, J., Tang, S., Shu, Z., Li, D., Wang, S., Imran, M., Vasilakos, A.V. Software-defined industrial Internet of Things in the context of Industry 4.0. *IEEE Sensors Journal*, 2016, vol. 16, pp. 7373–7380. DOI: 10.1109/JSEN.2016.2565621
4. Jayaram, A. An IIoT quality global enterprise inventory management model for automation and demand fore-casting based on cloud. *Proc. Int. Conf. on Computing, Communication and Automation (ICCCA)*. Greater Noida, India, 2017, pp. 1258–1263. DOI: 10.1109/CCAA.2017.8230011
5. Mudialba, P.J. The impact of cloud technology on the automation of businesses. *Proc. Int. Conf. on Platform Technology and Service (PlatCon)*. 2016. DOI: 10.1109/PlatCon.2016.7456831
6. Optimal solutions for substation automation: integrated system ASDTM/AIMSCME. *Energoekspert*, 2009, no. 6, pp. 25–28.
7. Luan, W., Peng, J., Maras, M., Lo, J., Harapnuk, B. Smart meter data analytics for distribution network connectivity verification. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, vol. 6, no. 4, pp. 1964–1971. DOI: 10.1109/TSG.2015.2421304
8. Bukin, A.V., Tikhonov, E.I. *Avtomatizirovannaya sistema upravleniya i dispetcherizatsii ob'ektov teploenergetiki v Sankt-Peterburge* [Automated Control and Dispatching System for Thermal Power Engineering Facilities in St. Petersburg]. *Otraslevoy nauchno-tekhnologicheskii zhurnal «ISUP»*, 2012, issue 6(42). Available at URL: <https://isup.ru/articles/3/3322/> (date accessed: 12.05.2019).
9. Staroverov, B.A., Gnatyuk, B.A. Povyshenie effektivnosti avtomatizirovannogo kommercheskogo ucheta energopotrebleniya za schet vnedreniya funktsiy prognozirovaniya [Improving the efficiency of the automated commercial accounting of power consumption due to the introduction of the prediction functions]. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 6, pp. 10–15.
10. Du, Y., Tu, H., Lukic, S., Lubkeman, D., Dubey, A., Karsai, G. Development of a controller hardware-in-the-loop platform for microgrid distributed control applications. *IEEE Electronic Power Grid (eGrid)*. 2018. DOI: 10.1109/eGRID.2018.8598696
11. Staroverov, B.A., Mozokhin, A.E. *Struktura i etapy postroeniya avtomatizirovannoy sistemy upravleniya elektricheskimi setyami v mashtabakh regional'noy setevoy kompanii* [The structure and stages of construction of the automated control system of power grids at the scale of regional network company]. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2018, issue 3(84), pp. 55–62.
12. Pongpun Urarungroj – Low order boiler-turbine dynamic models and stress calculations in thermal power plant, January 1997. A thesis submitted to the University of New South Wales to fulfil the requirements for the degree of Master of Engineering. Available at National library of Australia URL: <https://trove.nla.gov.au/>
13. Chang Chen – Dynamic modeling and control of hybrid ground source heat pump systems, May 2008. A thesis submitted to the Concordia University to fulfil the requirements for the degree of Master of Applied Science. Available at Library and Archives Canada URL: <http://www.bac-lac.gc.ca>
14. John Adam Dembecki. *Automatic Control of Hydro and Thermal Generation on a large Interconnected Power System (including continuous economic optimization)*, December 1964. A thesis submitted to the University of New South Wales to fulfil the requirements for the degree of Master of Engineering. Available at National library of Australia URL: <https://trove.nla.gov.au/>
15. Reference architecture of smart grids. Version 2.0. Microsoft Worldwide Group Power & Utilities, 2013. 320 p. URL: http://d2_rus.cigre.ru/doc/SERA_v2_ru_v2.1.pdf (date accessed: 01.10.2019).
16. Automation of substations for the construction of intelligent power. CISCO SYSTEMS, 2010. 5 p. URL: cisco.com/web/RU/downloads/broch...po...podstancij.pdf (date accessed: 7.03.2020).
17. Cloud computing. Tadviser. State. Business. Information technology. 2018. 10 p. URL: http://www.tadviser.ru/index.php/Cloud_Computing (date accessed: 09.10.2019).
18. Vasil'ev, G.P., Peskov, N.V., Lichman, V.A., Gornov, V.F., Kolesova, M.V. Modelirovanie teplovykh usloviy ekspluatatsii v teplovykh skvazhinakh nazemnykh sistem teplosnabzheniya. Chast' I: Protessy poristogo

zamorazhivaniya vlagi v pochve [Simulating the thermal operating conditions in the thermal wells of ground-source heat-pump heat supply systems. Part I: Porous moisture freezing processes in soil]. *Izdatel'stvo Mayk Nauka/Interperiodika (Rossiyskaya Federatsiya)*, 2015, issue 62, no. 8.

19. Kuznetsov, R.S., Chipulis, V.P. Informatsionno-analiticheskie sistemy monitoringa, analiza i avtomaticheskogo upravleniya energokompaniyami [Information and analytical systems for monitoring, analysis and automatic control of energy utilities]. *Vestnik DVO RAN*, 2016, issue 4, pp. 116–124.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ В ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК ИВАНОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА»

В журнал принимаются рукописи в электронном виде. Средний объем статьи – 6 страниц. Статьи сопровождаются двумя рецензиями – кафедральной (с места работы автора с указанием даты обсуждения и номера протокола) и внешней.

Правила оформления статьи.

Обязательно указывается УДК.

Фамилия, имя, отчество авторов полностью, место работы, должность, звание, ученая степень, страна и город, контактная информация (на русском и английском языках) располагаются по ширине страницы.

Название статьи (на русском и английском языках), *авторское резюме* (на русском и английском языках), ключевые слова (на русском и английском языках) располагаются по ширине страницы.

Основной текст располагается **в две колонки**, используется шрифт **Arial**, размер шрифта – **11**.

Графики и рисунки должны быть выполнены на компьютере, желательно в программах векторной графики либо в Word. Надписей на рисунках (кроме основополагающих понятий) быть не должно, они обозначаются цифрами и далее расшифровываются, а все расшифровки выносятся под рисунок, размер шрифта – 10 (шрифт **Arial**). Рисунки, так же, как и графики, должны быть **только черными**, любые другие цвета недопустимы.

Формулы набираются в редакторе формул Math Type (шрифт **Arial**), размер шрифта – **11**, располагаются в тексте в одну колонку.

В конце статьи размещаются пристатейные библиографические списки (на русском языке и References).

Примеры оформления авторского резюме и библиографических списков см. на сайте:

<http://vestnik.ispu.ru/ru/node/14>

Редакционно-издательский отдел оставляет за собой право на редактирование статей.

ВЕСТНИК ИВАНОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Выпуск 2

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации ПИ N 77-13527 от 20.09.02 г.

Подписано в печать 09.04.2021. Выход в свет 30.04.2021. Формат 60х84 1/8.

Усл. печ. л. 9,3. Уч.-изд. л. 10,1. Тираж 100 экз. Цена свободная. Заказ

Ивановский государственный энергетический университет, 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.
Типография ООО «ПресСто», 153025, г. Иваново, ул. Дзержинского, 39, оф. 307.