



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. 3 /2020

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

В.А. Горбунов, Н.А. Лоншаков, М.Н. Мечтаева. Разработка модели процесса сепарации влажного пара в паровом пространстве парогенератора ПГВ-1000М.....**5**

О.Б. Колибаба, Д.А. Долинин, Р.Н. Габитов, М.О. Шавитова. Определение теплофизических свойств керамики с добавкой пиролизного остатка твердых отходов.....**16**

А.Л. Кухарев. Выбор рационального расположения электродов в многоэлектродной дуговой печи постоянного тока.....**23**

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

А.И. Тихонов, А.В. Стулов, И.С. Снитько, А.В. Подобный. Разработка 2D-моделей магнитного поля для реализации технологии цифровых двойников и порождающего проектирования силовых трансформаторов...**32**

А.Н. Голубев, В.Г. Белоногов. Разработка многоканальной системы управления многофазным синхронным электроприводом с улучшенными виброшумовыми характеристиками.....**43**

МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В.Е. Мизонов, А.В. Митрофанов, Е.В. Басова, Е.А. Шуина. Ячеечная модель теплопроводности в многослойной среде с переменным числом слоев.....**51**

А.Б. Капранова, А.Е. Лебедев, А.М. Мельцер, С.В. Неклюдов. Исследование поведения системы газ–пар внутри кавитационного пузыря при работе осевого клапана.....	58	характеристик частиц сыпучих материалов на основе цифрового анализа изображений.....	64
А.В. Огурцов, Ю.В. Хохлова, В.Е. Мизонов, В.А. Огурцов. Определение морфологических		А.Б. Капранова, Д.Д. Бахаева, Д.В. Стенько, И.И. Верлока. Исследование энергетических характеристик процесса смешивания сыпучих компонентов в ротационном аппарате.....	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 3 /2020

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. Antir, 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

V.A. Gorbunov, N.A. Lonshakov, M.N. Mehtaeva. Development of a model for the wet steam separation in the steam space of PGV-1000M steam generator.....**5**

O.B. Kolibaba, D.A. Dolinin, R.N. Gabitov, M.O. Shavitova. The study of thermophysical properties of ceramics with the addition of the pyrolysis residue of solid waste..... **16**

A.L. Kukharev. Selecting the rational electrodes location in a dc multi-electrode arc furnace.....**23**

ELECTROMECHANICS

A.I. Tikhonov, A.V. Stulov, I.S. Snitko, A.V. Podobnyj. Development of 2D models of the magnetic field for digital twin technology and generative design of power transformers.....**32**

A.N. Golubev, V.G. Belonogov. The development of multi-channel control system for a multi-phase synchronous electric drive with improved vibration noise characteristics.....**43**

METHODS OF MATHEMATICAL SIMULATION

V.E. Mizonov, A.V. Mitrofanov, E.V. Basova, E.A. Shuina. A cell model of heat conduction in multi-layer medium with variable number of the layers.....**51**

A.B. Kapranova, A.E. Lebedev, A.M. Melzer, S.V. Neklyudov. The behavior of a gas-vapor system inside a cavitation bubble during axial valve operation.....**58**

A.V. Ogurtzov, Yu.V. Khokhlova, V.E. Mizonov, V.A. Ogurtzov. Identifying morphological characteristics of solid particles based on digital image analysis.....	64
A.B. Kapranova, D.D. Bahaeva, D.V. Stenko, I.I. Verloka. The study of the energy characteristics of bulk materials mixing in a rotary mixer.....	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 621.181

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПРОЦЕССА СЕПАРАЦИИ ВЛАЖНОГО ПАРА В ПАРОВОМ ПРОСТРАНСТВЕ ПАРОГЕНЕРАТОРА ПГВ-1000М

В.А. ГОРБУНОВ, Н.А. ЛОНШАКОВ, М.Н. МЕЧТАЕВА

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»
г. Иваново, Российская Федерация

E-mail: gorbynov.w@mail.ru, nik-lon@mail.ru, maria.mechtaeva@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. В настоящее время актуальным является вопрос снижения влажности пара на выходе из парогенераторов. Величина влажности напрямую влияет на безопасность и эффективность работы электростанций. Оптимизация конструкции парогенератора улучшит его сепарационные свойства и снизит влажность пара. Создание численной модели процесса сепарации влажного пара в натурном парогенераторе и ее верификация позволят перейти к оптимизации конструкции парогенератора и оценке эффективности полученной модели. Целью данного исследования является предварительное исследование процесса сепарации влажного пара в паровом пространстве парогенератора ПГВ-1000М.

Материалы и методы. Для исследования сепарации влажного пара в паровом пространстве парогенератора ПГВ-1000М в системе конечно-элементного анализа ANSYS Fluent разработана численная модель и приняты следующие допущения: поверхность зеркала испарения ровная; капли имеют сферическую форму, не оказывают влияния на движение пара, не взаимодействуют друг с другом; распада капель не происходит.

Результаты. Получена трехмерная модель парового пространства парогенератора ПГВ-1000М, позволяющая рассматривать процессы сепарации влажного пара. Анализ результатов проведенного исследования показывает, что характер протекающих в модели процессов соответствует теоретическим выкладкам и эксплуатационным данным. Проведена верификация полученной модели, после которой она может быть применена для целей оптимизации конструкции парогенератора.

Выводы. Дальнейшие численные исследования разработанной модели помогут определить наиболее оптимальную конструкцию парогенератора, обеспечивающую наивысшую эффективность сепарации пара. Кроме того, возможно и перспективно изучение влияния поверхности зеркала испарения на влажность пара в паровом объеме парогенератора. Снижение влажности пара на выходе из парогенератора существующих и проектируемых электростанций обеспечит значительную экономию средств, затрачиваемых на ремонт лопаточного аппарата паровой турбины, и приведет к повышению тепловой эффективности станции.

Ключевые слова: парогенератор, сепарация пара, гравитационная сепарация, трехмерная численная модель, зеркало испарения, пароприемный дырчатый лист

DEVELOPMENT OF A MODEL FOR THE WET STEAM SEPARATION IN THE STEAM SPACE OF PGV-1000M STEAM GENERATOR

V.A. GORBUNOV, N.A. LONSHAKOV, M.N. MECHTAIEVA

Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

E-mail:gorbynov.w@mail.ru, nik-lon@mail.ru, maria.mechtaeva@mail.ru

Abstract

Background. The issue of reducing steam humidity at the output of steam generator is relevant. The value of humidity directly affects the safety and efficiency of power plants. The optimization of steam generator design will enable to enhance its separation properties and reduce steam humidity. Creating a numerical model of wet steam separation process in a full-scale steam generator and its verification will allow proceeding to optimize the steam generator design and evaluate the model effectiveness. This article presents a preliminary study of the wet steam separation process in the steam space of PGV-1000M steam generator.

Materials and methods. To study the wet steam separation process in the steam space of PGV-1000M steam generator, a numerical model was developed in the ANSYS Fluent finite element analysis system. The following assumptions were made: the surface of the evaporation mirror is flat, drops have a spherical shape, they do not affect the movement of steam, they do not interact with each other, and there is no decay of the droplets.

Results. A three-dimensional model of the steam space of PGV-1000M steam generator which allows considering the processes of wet steam separation has been obtained. The analysis of the results has shown that the nature of the processes occurring in the model corresponds to theoretical calculations and operational data. The developed model has been verified and can be used to optimize the steam generator design.

Conclusions. Further numerical studies of the developed model will enable to determine the most optimal design of the steam generator which provides the highest efficiency of steam separation. Moreover, it is possible and promising to study the effect of the evaporation mirror surface on the steam humidity in the steam generator. Decreasing the steam humidity at the steam generator output at existing and projected power plants will provide significant savings in funds spent on repairing the steam turbine blade apparatus, and will lead to an increase in the thermal efficiency of the plant.

Key words: steam generator, steam separation, gravitational separation, three-dimensional numerical model, evaporation mirror, steam distribution perforated plate

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.3.005-015

Введение. Важнейшим элементом АЭС с реакторами с водой под давлением являются парогенераторы (ПГ), выдающие пар на турбогенератор для выработки электроэнергии. В ходе эксплуатации конструкция парогенераторов, по сравнению с проектной, претерпевала изменения и модификации. Процесс совершенствования парогенераторов, находящихся в эксплуатации, продолжается [1]¹.

Парогенератор представляет собой специальное теплообменное устройство, предназначенное для генерации рабочего пара необходимых параметров [2]. Рабочий пар производится из питательной воды парогенераторов, которая получает теплоту от теплоносителя реактора. Качество производимого пара является одним из основных показателей работы парогенератора. Ис-

следования, посвященные процессам генерации пара на АЭС и методам улучшения его качества [3–9], показывают, что увлажнение пара и унос примесей котловой воды при парообразовании представляют собой сложный комплекс процессов. Качество получаемого пара зависит от конструктивных особенностей парогенератора и его сепарирующих устройств, параметров состояния пара, водного режима, условий эксплуатации блока, уровня котловой воды (высоты парового пространства) и др. Среди контролируемых показателей качества пара одни свидетельствуют о чистоте самого пара, а другие (косвенно) – о чистоте конденсата.

Целесообразно нормировать влажность пара. Продукты коррозии находятся во влаге в крупно- или мелкодисперсном состоянии, их отложения более вероятны с увеличением концентрации продуктов коррозии в уносимой влаге и зависят от величины влажности насыщенного пара. Даже при незначительном уносе влаги ко-

¹ Отчет об опыте эксплуатации и усовершенствованиях парогенератора типа ПГВ-1000М: ОКБ Гидропресс. – 1998.

личество примесей, уносимых с потоками влажного пара, будет измеряться десятками килограммов в сутки. Отложение этих примесей на теплообменных поверхностях, в пароперегревателе и особенно в турбине приводит к повреждениям парогенератора, эрозии лопаток турбины и снижению ее внутреннего относительного КПД. Поэтому обеспечение низкой влажности пара на выходе из парогенератора является важной задачей в теплоэнергетике. Величина влажности нормируется и не должна превышать проектного значения 0,2 % по массе на выходе из парогенератора.

Анализ существующей конструкции ПГ показал, что большая неравномерность нагрузки зеркала испарения (рис. 1) представляет определенные технические трудности в получении пара заданной влажности. Для решения вопроса о выравнивании нагрузки был проведен большой комплекс опытно-конструкторских работ [7].

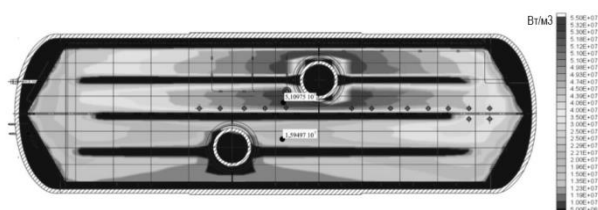


Рис. 1. Расчетная тепловая нагрузка ПГВ-1000М

Результаты исследований натурных парогенераторов в период пусконаладочных работ [10]² показали, что общая картина циркуляции воды в ПГВ-1000М может быть представлена схемой, показанной на рис. 2.

Наиболее характерной особенностью работы ПГВ-1000М, даже при номинальной нагрузке, является выброс пароводяной смеси из горячего канала между корпусом и закраиной погруженного дырчатого листа, что отрицательно влияет на качество генерируемого пара [11].

В объеме ПГВ-1000М наблюдается комплекс гидродинамических процессов: меняющиеся режимы циркуляции рабочего тела; неравномерная раздача питательной воды; неравномерная паровая нагрузка по длине и ширине парогенератора; выброс

пароводяной смеси в середине парогенератора и слив значительной части воды в торцы, создающие обратное движение воды под погруженным дырчатым листом в нижней части пакетов по направлению к середине парогенератора. В результате качество генерируемого пара может непредсказуемо измениться в широких пределах, а это налагает особую ответственность на конструкцию сепарационных устройств³.

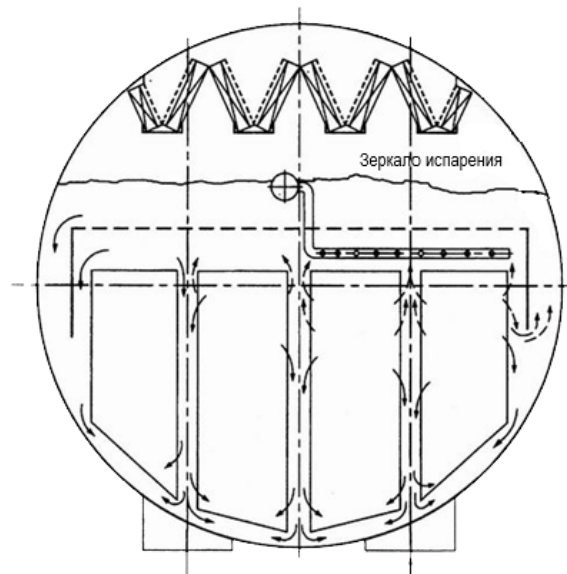


Рис. 2. Схема циркуляции котловой воды в объеме ПГВ-1000 М

Большинство исследований по модернизации и оптимизации конструкции парогенераторов носят опытно-экспериментальный характер, что связано со значительными финансовыми и временными затратами. Понятно, что такой метод невозможно применить для исследований и обоснования работоспособности парогенераторов современных атомных электрических станций, находящихся на стадии проектирования.

Исходя из всего вышеперечисленного, целесообразно сначала провести численное исследование работы существующего парогенератора. В случае подтверждения работоспособности модели, т.е. схожести результатов ее работы с эксплуатационными данными работы натурного парогенератора, возможно проведение расчетов и изменение данной модели в целях оптимиза-

² Трунов Н.Б. Повышение надежности и усовершенствование конструкции парогенераторов горизонтального типа для АЭС с ВВЭР: дис. ... канд. техн. наук. – М., 1990. – 125 с.

³ Петров А.Ю. Модернизация сепарационных устройств парогенераторов АЭС с ВВЭР: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2005. – 108 с.

ции работы всего агрегата. Результаты таких расчетов помогут спрогнозировать эффективность сепарации пара в оптимизированном парогенераторе и оценить вынос капельной влаги за его пределы [6].

Ниже предлагается предварительное исследование с созданием в программной системе конечно-элементного анализа ANSYS Fluent численной модели процесса сепарации влажного пара в паровом пространстве парогенератора ПГВ-1000М [12]. В качестве объекта моделирования и дальнейшего исследования был взят парогенератор ПГВ-1000М, эксплуатируемый на 5 ЭБ Нововоронежской АЭС.

Созданная модель должна иметь следующие возможности:

- определение влияния гравитационной сепарации и скорости движения пара на содержание влаги в паровом потоке;
- построение зависимости влажности пара от высоты парового пространства парогенератора;
- оценка влияния пароприемного дырчатого листа на выравнивание поля скоростей в паровом объеме;
- визуализация траекторий потоков пара и капель влаги.

Методы исследования. В ходе проведения исследования по инженерным чертежам парогенератора была воспроизведена расчетная область⁴. Она включает в себя паровой объем парогенератора, ограниченный поверхностью зеркала испарения, расположенной на уровне 2550 мм, поверхностями «горячего» и «холодного» коллекторов, корпусом самого парогенератора, стенками пароотводящих патрубков и сечением парового коллектора (рис. 3). На входном граничном условии задан профиль паровой нагрузки для нормальных условий эксплуатации парогенератора. На выходе дан перепад давления парового пространства.

ANSYS для решения поставленной задачи применяет метод конечных элементов. Расчетная область разбивается на некоторое количество малых, но конечных по размерам элементов (рис. 4), и для каждого элемента численным методом решаются дифференциальные уравнения с частными производными.

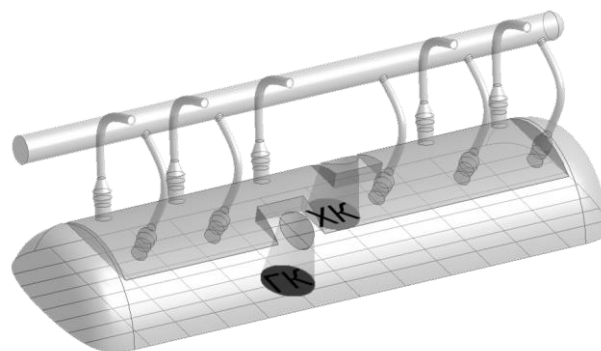


Рис. 3. Расчетная область модели парогенератора ПГВ-1000М

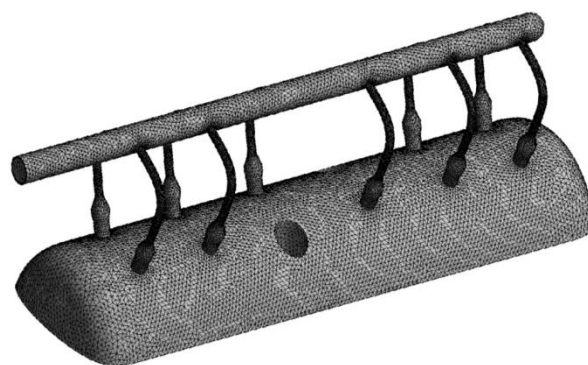


Рис. 4. Расчетная сетка модели парового пространства парогенератора

Поток пара смоделирован как сплошная среда при помощи решения уравнений Навье–Стокса:

$$\left\{ \begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) &= \rho f_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(2 \frac{\partial u_x}{\partial x} - \frac{2}{3} \operatorname{div}(u) \right) \right] + \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \right]; \\ \rho \left(\frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) &= \rho f_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(2 \frac{\partial u_y}{\partial y} - \frac{2}{3} \operatorname{div}(u) \right) \right] + \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \right]; \\ \rho \left(\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) &= \rho f_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \right] + \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(2 \frac{\partial u_z}{\partial z} - \frac{2}{3} \operatorname{div}(u) \right) \right]. \end{aligned} \right. \quad (1)$$

⁴ Парогенератор ПГВ-1000М. Чертеж общего вида. 320.05.01.00.000 ВО, ГКАЭ ОКБ «Гидропресс», 1979 г.

Вместе с уравнением неразрывности уравнения Навье–Стокса образуют замкнутую систему:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0.$$

Слагаемые левой части системы уравнений (1) определяют изменение свойств потока жидкости (газа) во времени и количество движения жидкой частицы. Слагаемые правой части уравнений определяют действие массовых сил, сил давления и сил вязкости. Таким образом, уравнения рассматриваются как баланс сил инерции (левая часть), массовых сил, сил давления и вязкости (правая часть), действующих на жидкую частицу.

Капли влаги с применением DPM (Discrete Phase Model) смоделированы как дискретная фаза в виде сферических частиц, рассеянных в непрерывной фазе парового потока. При помощи ANSYS Fluent вычислены траектории этих дискретных фазовых объектов, а также тепломассоперенос в/из них. Расчет дискретной фазовой траектории проведен в Лагранжевой формулировке, включающей дискретную фазовую инерцию, гидродинамическое сопротивление и силу тяжести, как для стационарных, так и для нестационарных течений.

Лагранжева дискретная фазовая модель в ANSYS Fluent следует подходу Эйлера–Лагранжа. Пар рассматривается как сплошная среда путем решения уравнений Навье–Стокса, в то время как дисперсная фаза решается путем отслеживания большого количества капель через расчетное поле потока. Дисперсная фаза может обмениваться импульсом, массой и энергией с жидкой фазой. Этот подход значительно упрощается, когда взаимодействиями каплей дискретной фазы между собой можно пренебречь.

Расчет траекторий полета капель проведен путем интегрирования баланса сил, действующих на каплю [13]. Этот баланс приравнивает инерцию капли к силам, действующим на нее, и может быть записан как

$$m_p \frac{d\vec{u}_p}{dt} = m_p \frac{\vec{u} - \vec{u}_p}{\tau_p} + m_p \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F}, \quad (2)$$

где m_p – масса частицы (капли); \vec{u} – скорость газовой фазы; \vec{u}_p – скорость капли;

ρ_p, ρ – плотность капель и пара соответственно; \vec{F} – дополнительные силы; $m_p \frac{\vec{u} - \vec{u}_p}{\tau_p}$ – сила сопротивления; τ_p – время релаксации капли.

Время релаксации определяется как

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \cdot \frac{24}{C_d Re},$$

где μ – молекулярная вязкость жидкости; d_p – диаметр капли; Re – число Рейнольдса; C_d – коэффициент сопротивления.

Число Рейнольдса определяется по формуле

$$Re = \frac{\rho d_p |\vec{u}_p - \vec{u}|}{\mu}.$$

Для решения поставленной задачи принимались следующие допущения:

- поверхность зеркала испарения ровная;
- капли не оказывают влияния на движение пара;
- взаимодействием между каплями пренебрегается;
- капли имеют сферическую форму;
- распада капель не происходит.

Результаты исследования. В ходе проведенного предварительного исследования была разработана численная модель процесса сепарации влажного пара в паровом пространстве парогенератора ПГВ-1000М. Были получены и проанализированы следующие результаты:

- определено распределение абсолютного давления в паровом пространстве парогенератора;
- проведена оценка влияния пароприемного дырчатого листа на выравнивание скорости посредством представления распределения скоростей под листом и над ним;
- представлено распределение концентрации влаги по паровому объему парогенератора;
- визуализированы траектории потока генерируемого пара и капель влаги диаметром 10–500 мкм;

Ниже представлены результаты расчета поля абсолютного давления в паровом пространстве парогенератора (рис. 5) и скорости пара (рис. 6) в парогенераторе.

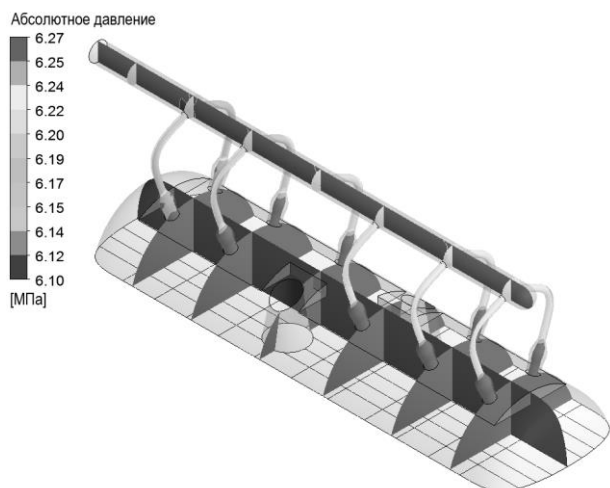


Рис. 5. Распределение абсолютного давления в паровом объеме парогенератора

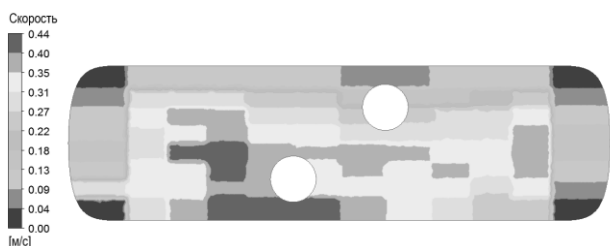


Рис. 6. Распределение скорости пара, выходящего с поверхности зеркала испарения

Скорости выхода пара с поверхности зеркала испарения преобладают в области горячего коллектора, что вполне логично. Наблюдается значительная неравномерность нагрузки зеркала испарения. В то же время скорости не превышают требуемого значения.

Оценку влияния пароприемного дырчатого листа на выравнивание скорости визуализируем посредством представления распределения скоростей под листом и над ним (рис. 7). Визуальная оценка представленных результатов говорит о необходимости переменной перфорации пароприемного дырчатого листа для более равномерной подачи пара в паропровод.

Результат визуализации траектории потока пара представлен на рис. 8. Анализ результатов расчета определяет некоторые особенности течения пара в паровом объеме парогенератора:

1) вихревое движение пара в пристеночной области пароприемного дырчатого листа и эллиптических обечаек;

2) вихревое движение пара в зоне коллекторов теплоносителя первого контура и стенок пароприемного дырчатого листа;

3) закручивание потока пара в шарообразной области паропровода;

4) закручивание потока на входе в коллекторы отбора пара.

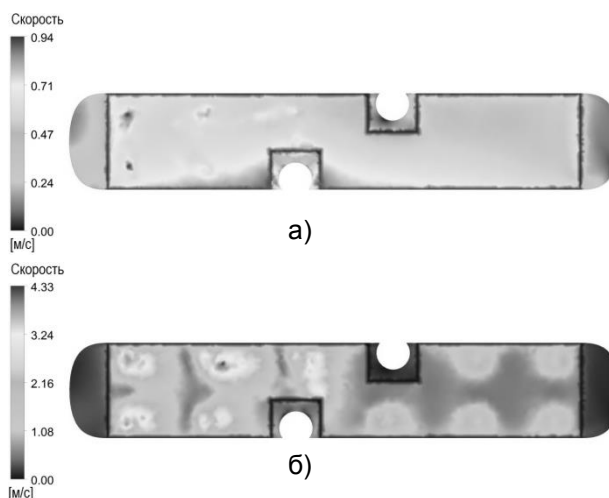


Рис. 7. Распределение скорости: а – под пароприемным дырчатым листом; б – над пароприемным дырчатым листом

Теоретические и экспериментальные работы, посвященные проблемам капельного уноса, показывают, что жидкость транспортируется потоком пара лишь в том случае, если она подвергалась дроблению на достаточно мелкие фракции [3, 5–9].

При нормальных условиях работы парогенератора уносятся относительно мелкие капли. Однако с повышением нагрузки котла, т.е. с увеличением скорости подъема пара, уносятся и более крупные капли. Сам процесс образования капель в барабане условно определяется двумя факторами: в результате дробления пароводяных струй и вследствие разрыва оболочек паровых пузырей.

Отмечается сложность гидродинамики горизонтальных парогенераторов энергоблоков атомных электрических станций с ВВЭР. Мелкие капли образуются путем дробления пароводяных струй при ударе о перегородки, стенки барабана, у «горячего» коллектора и т.д. Однако при снижении нагрузки котла вероятность образования таких капель резко уменьшается. При малых нагрузках зеркала испарения являются основным источником мелких капель [14].



Рис. 8. Траектория потока пара в паровом объеме парогенератора

По мере повышения нагрузки (т.е. увеличения подъемной скорости пара) увеличивается и унос капель, оторвавшихся от зеркала испарения. Чем больше давление пара в барабане, чем больше скорость его подъема и чем меньше диаметр капли, тем больше высота подъема. Чем

меньше диаметр капли, тем больше высота подъема капель за счет воздействия потока пара на нее [3, 14].

Полученные в результате расчетов траектории капель влаги представлены на рис. 9–11 на примере капель диаметром 50, 200, 400 мкм.

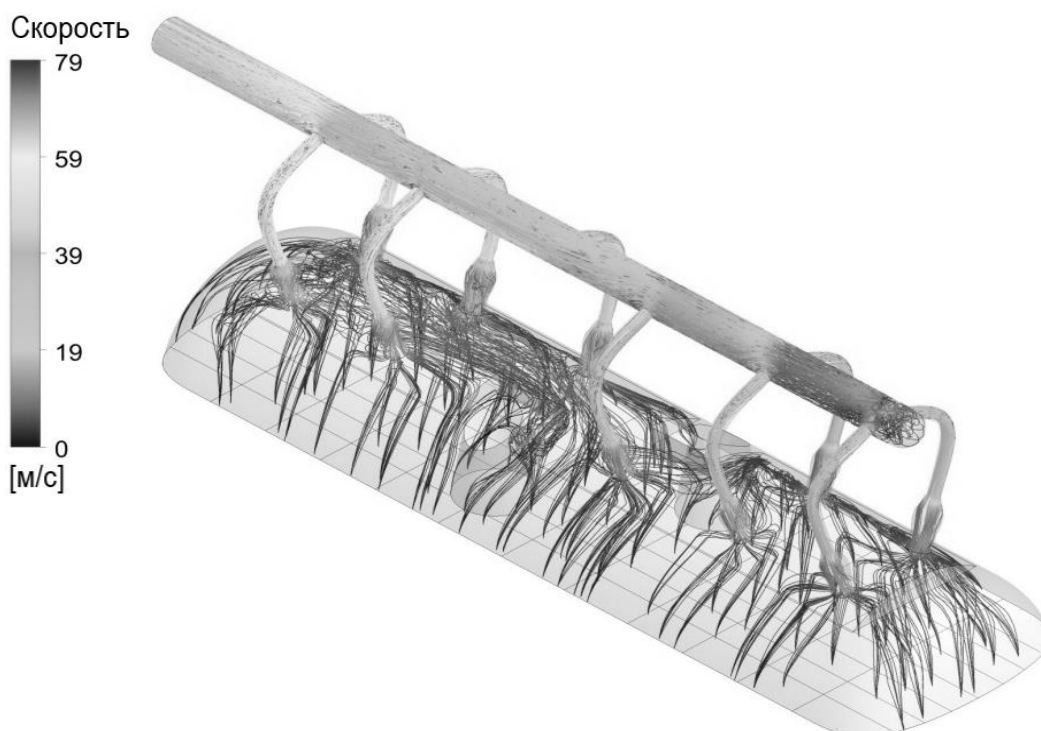


Рис. 9. Траектории частиц диаметром 50 мкм

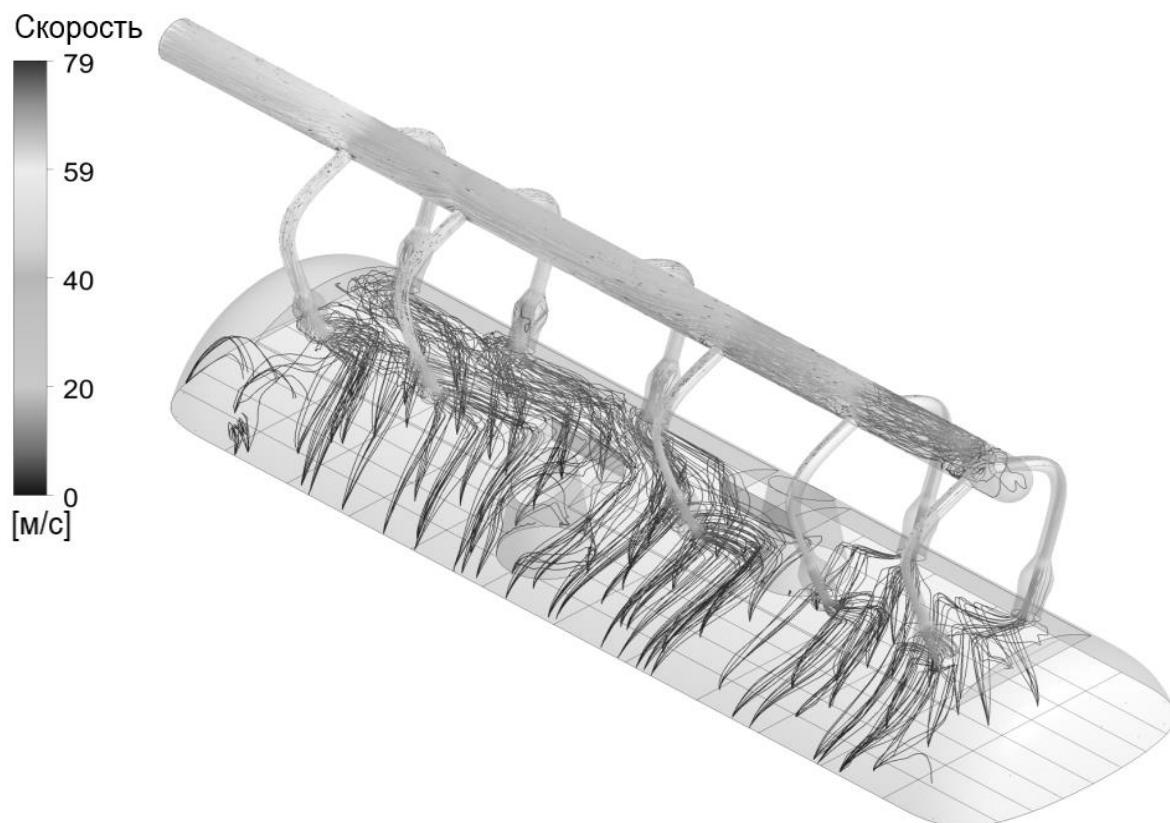


Рис. 10. Траектории частиц диаметром 200 мкм

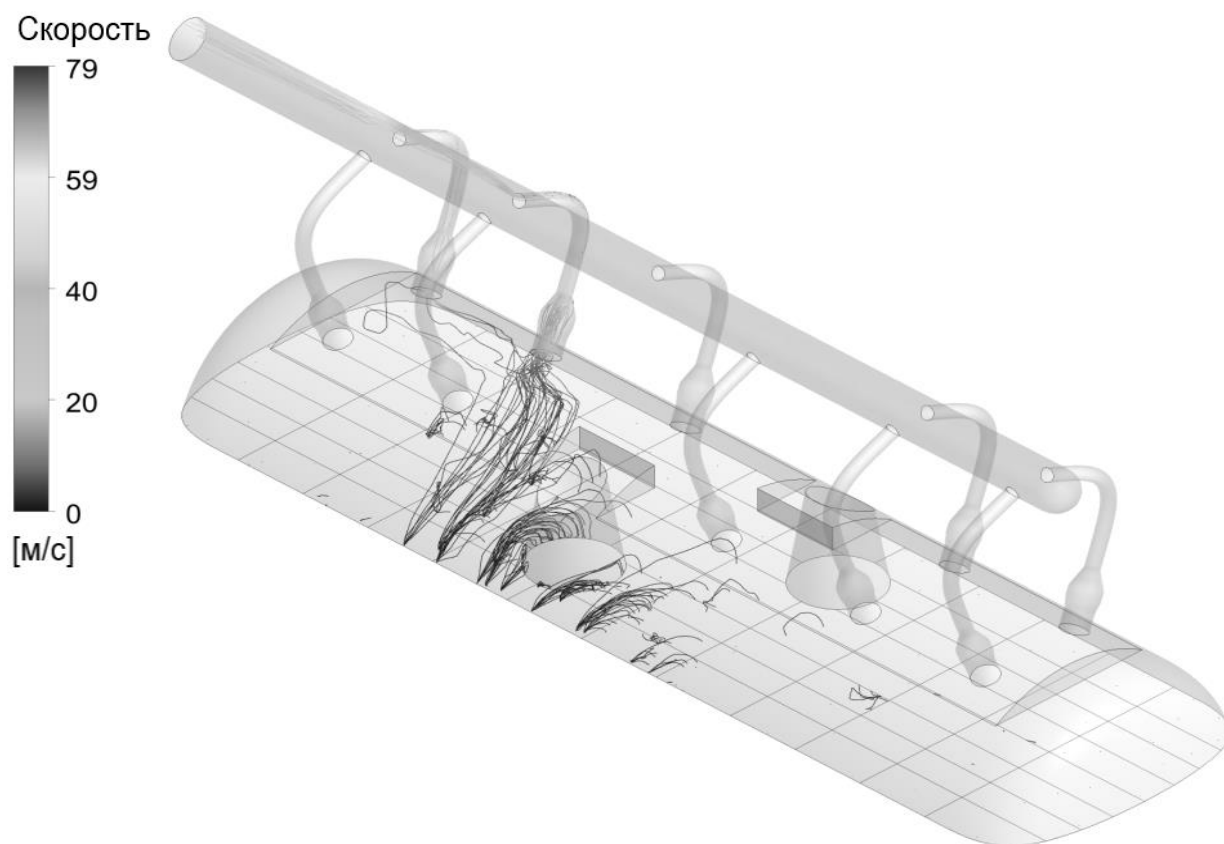


Рис. 11. Траектории частиц диаметром 400 мкм

Капли влаги диаметром 10, 50, 100, 200 мкм имеют схожие траектории движения, но отличаются количеством частиц, попавших в паропровод.

В областях, где скорость выхода пара с поверхности зеркала испарения не велика (в зонах эллиптических обечаек), капли диаметром 200 и 300 мкм оседают на поверхность зеркала испарения.

Отличительная черта капель диаметром 400 мкм связана с их выбросом в один коллектор. Это связано с тем, что входная скорость пара в области горячего коллектора высокая (выше скорости витания), ка-

пельная влага подхватывается установившимся потоком пара и вылетает в коллектор. В областях с относительно низкой скоростью пара скорость витания капель больше, поэтому они оседают обратно на поверхность зеркала испарения.

Капли диаметром 500 мкм выносятся паром с поверхности зеркала испарения лишь в зонах с высокой скоростью пара и практически сразу возвращаются обратно.

Результаты проведенного расчета распределения концентрации влаги в паре со стороны холодного и горячего коллекторов представлены на рис. 12.

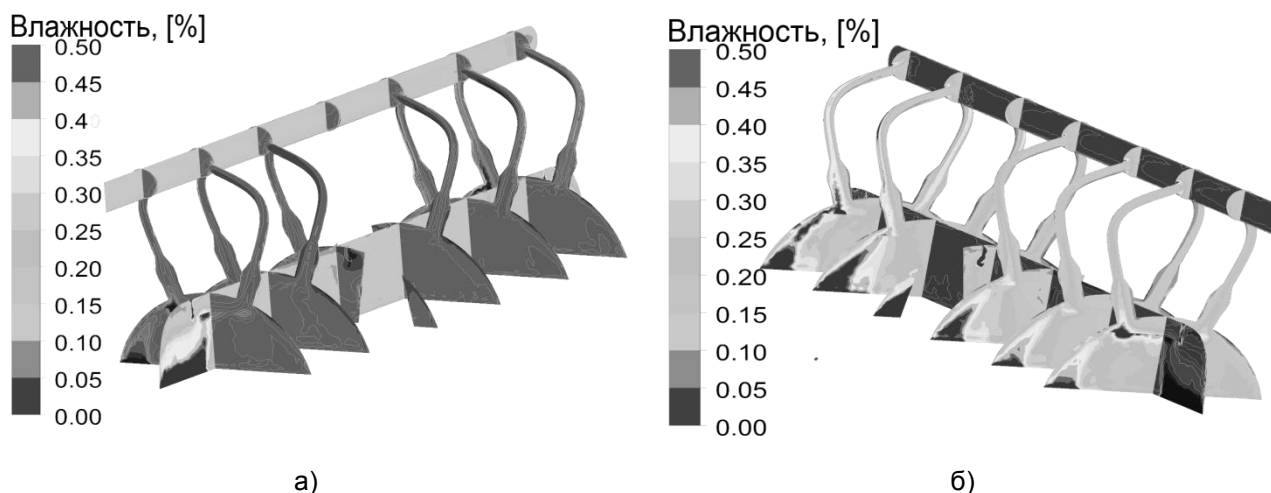


Рис. 12. Концентрация влаги в паровом объеме парогенератора: а – со стороны холодного коллектора; б – со стороны горячего коллектора

Выводы. Разработанная в ходе проведения предварительного исследования полноценная численная модель позволяет рассматривать процессы сепарации влажного пара, происходящие в паровом объеме парогенератора ПГВ-1000М. Анализ результатов проведенного исследования показывает, что характер процессов, которые протекают в модели парового объема парогенератора, соответствует теоретическим выкладкам [7] и эксплуатационным данным. Созданная математическая модель верифицирована и может быть внедрена в производство на этапе проектирования парогенераторов АЭС.

На основании экспериментальных данных и предварительных результатов моделирования процесса сепарации пара через отверстия пароприемного дырчатого листа можно сделать вывод, что конструктивные параметры дырчатого листа не оптимизированы в должной степени. Поэтому необходимо разработать модель работы пароприемного дырчатого листа с заданны-

ми режимными параметрами и оптимизировать его конструкцию (степень перфорации, применение переменной перфорации вдоль пара, форма и угол расположения отверстий) [15]⁵. Численные исследования помогут определить наиболее оптимальную конструкцию пароприемного дырчатого листа, которая обеспечит наивысшую эффективность сепарации пара.

Кроме того, возможно и перспективно изучение влияния поверхности зеркала испарения на влажность пара в паровом объеме парогенератора [12]. В предварительном исследовании зеркало испарения рассматривалось как гладкая поверхность. Для того чтобы модель была еще более близкой к действительности, необходимо это допущение убрать, так как из-за разницы в тепловых нагрузках с «горячей» и

⁵ Емельянов Д.А. Определение выравнивающей способности погруженного дырчатого листа переменной перфорации для повышения мощности АЭС с ВВЭР: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2015. – 214 с.

«холодной» стороны в ПГ возникают перекосы уровня паросодержания и скорости движения пара [7], что отражено на рис. 16 на примере паросодержания.

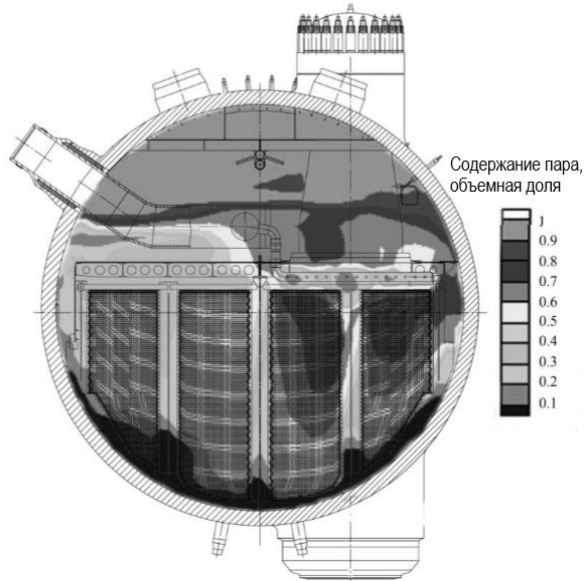


Рис. 13. Паросодержание в поперечном сечении парогенератора

Повышение эффективности сепарации пара в парогенераторах существующих и проектируемых атомных электростанций обеспечит значительную экономию средств, затраченных на ремонт лопаточного аппарата паровой турбины, и приведет к повышению тепловой эффективности станции.

Список литературы

1. Трунов Н.Б., Драгунов Ю.Г. Совершенствование конструкции ПГ АЭС с ВВЭР // The International Nuclear Forum «Nuclear Energy – Challenges and Prospects». – Warna, Bulgaria, June 2003.
2. Федоров Л.Ф., Рассохин Н.Г. Процессы генерации пара на атомных электростанциях. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 288 с.
3. Стырикович М.А., Мартынова О.И., Миропольский З.Л. Процессы генерации пара на электростанциях. – М.: Энергия, 1969. – 312 с.
4. Маргулова Т.Х. Атомные электрические станции. – М.: Высш. шк., 1974. – 360 с.
5. Стырикович М.А., Полонский В.С., Циклаури Г.В. Тепломассообмен и гидродинамика в двухфазных потоках атомных электрических станций. – М.: Наука, 1982. – 368 с.
6. Сепарационные устройства АЭС / А.Г. Агеев, В.Б. Карасев, И.Т. Седов, В.Ф. Титов. – М.: Энергоиздат, 1982. – 170 с.

7. Трунов Н.Б., Логвинов С.А., Драгунов Ю.Г. Гидродинамические и технологические процессы в парогенераторах АЭС с ВВЭР. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 316 с.

8. Маргулова Т.Х., Мартынова О.И. Водные режимы тепловых и атомных электростанций. – М.: Высш. шк., 1981. – 320 с.

9. Татаринев Б.П. О факторах, определяющих качество пара паровых котлов // Известия РИИЖТа. – 1948. – Вып. XVI. – С. 48.

10. Циркуляция воды в парогенераторе ПГВ-1000 / В.Ф. Титов, Ю.В. Козлов, А.В. Некрасов и др. // Теплоэнергетика. – 1990. – № 7. – С. 54–58.

11. Особенности гидродинамики водяного объема парогенератора ПГВ-1000М / В.Ф. Титов, Ю.В. Козлов, Б.М. Корольков и др. // Электрические станции. – 1993. – № 9. – С. 25–30.

12. Мечтаева М.Н., Горбунов В.А. К вопросу о моделировании работы парогенератора // Материалы XIX Междунар. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (Бенардосовские чтения), 31 мая – 2 июня 2017. Т. 2. – Иваново, 2017. – С. 87–90.

13. Кружилин Г.Н. Теория уноса и сепарации влаги в паровых котлах // Советское котлостроение. – 1945. – № 1. – С. 11–15.

14. Стырикович М.А. Внутрикотловые процессы. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1954. – 340 с.

15. Мечтаева М.Н., Горбунов В.А. К вопросу о моделировании процессов сепарации влаги в парогенераторе // Материалы XX Междунар. (Всерос.) науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (Бенардосовские чтения), 29–31 мая 2019 г. Т. 2. – Иваново, 2019. – С. 106–108.

References

1. Trunov, N.B., Dragunov, Yu.G. Sovershenstvovanie konstruktsii PG AES s VVER [Improving the design of steam generators for nuclear power plants with VVER]. *The International Nuclear Forum «Nuclear Energy – Challenges and Prospects»*. Warna, Bulgaria, June 2003.
2. Fedorov, L.F., Rassokhin, N.G. *Protsessy generatsii para na atomnykh elektrostantsiyakh* [Steam Generation Processes at Nuclear Power Plants]. Moscow: Energoatomizdat, 1985. 288 p.
3. Styrikovich, M.A., Martynova, O.I., Miro-pol'skiy, Z.L. *Protsessy generatsii para na elektrostantsiyakh* [Steam generation processes in power plants]. Moscow: Energiya, 1969. 312 p.
4. Margulova, T.Kh. *Atomnye elektricheskie stantsii* [Nuclear power plants]. Moscow: Vysshaya shkola, 1974. 360 p.
5. Styrikovich, M.A., Polonskiy, V.S., Tsiklauri, G.V. *Teplomassoobmen i gidrodinamika v dvukhfaznykh potokakh atomnykh elektricheskikh stantsiy* [Heat and mass transfer and hydrodynam-

ics in two-phase flows of nuclear power plants]. Moscow: Nauka, 1982. 368 p.

6. Ageev, A.G., Karasev, V.B., Sedov, I.T., Titov, V.F. *Separatsionnye ustroystva AES* [Separation devices of nuclear power plants]. Moscow: Energoizdat, 1982. 170 p.

7. Trunov, N.B., Logvinov, S.A., Dragunov, Yu.G. *Gidrodinamicheskie i tekhnologicheskie protsessy v parogeneratorakh AES s VVER* [Hydrodynamic and technological processes in steam generators of nuclear power plants with VVER]. Moscow: Energoatomizdat, 2001. 316 p.

8. Margulova, T.Kh., Martynova, O.I. *Vodnye rezhimy teplovykh i atomnykh elektrostantsiy* [Water regimes of thermal and nuclear power plants]. Moscow: Vysshaya shkola, 1981. 320 p.

9. Tatarinov, B.P. O faktorakh, opredelyayushchikh kachestvo para parovykh kotlov [On factors determining the steam quality in steam boilers]. *Izvestiya RIIZhTa*, 1948, issue XVI, p. 48.

10. Titov, V.F., Kozlov, Yu.V., Nekrasov, A.V. Tsirkulyatsiya vody v parogeneratorе PGV-1000 [Water circulation in PGV-1000 steam generator]. *Teploenergetika*, 1990, no. 7, pp. 54–58.

11. Titov, V.F., Kozlov, Yu.V., Korol'kov, B.M. Osobennosti gidrodinamiki vodyanogo ob"ema parogeneratora PGV-1000M [Hydrodynamic features of water volume of PGV-1000M steam generator]. *Elektricheskie stantsii*, 1993, no. 9, pp. 25–30.

12. Mechtaeva, M.N., Gorbunov, V.A. K voprosu o modelirovanii raboty parogeneratorsa [On modeling the steam generator operation]. *Materialy XIX mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii» (Benardosovskie chteniya)* [Proceedings of XIX International scientific conference «The State and prospects of electric and thermal technology»]. Ivanovo, 2017, vol. 2, pp. 87–90.

13. Kruzhilin, G.N. Teoriya unosa i separatsii vlagi v parovykh kotlakh [The theory of ablation and separation of moisture in steam boilers]. *Sovetskoe kotloturbostroenie*, 1945, no. 1, pp. 11–15.

14. Styrikovich, M.A. *Vnutrikotlovye protsessy* [Boiler processes]. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat, 1954. 340 p.

15. Mechtaeva, M.N., Gorbunov, V.A. K voprosu o modelirovanii protsessov separatsii vlagi v parogeneratorе [On modeling the moisture separation processes in the steam generator]. *Materialy XX mezhdunarodnoy (Vserossiyskoy) nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii» (Benardosovskie chteniya)* [Proceedings of XX International scientific conference «The State and prospects of electric and thermal technology»]. Ivanovo, 2019, vol. 2, pp. 106–108.

Горбунов Владимир Александрович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, заведующий кафедрой атомных электрических станций, e-mail: gorbunov.w@mail.ru

Gorbunov Vladimir Alexandrovich,

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

Лоншаков Никита Андреевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», старший преподаватель кафедры атомных электрических станций, e-mail: nik-lon@mail.ru

Lonshakov Nikita Andreevich,

Ivanovo State Power Engineering University, Senior Lecturer, Department of Nuclear Power Plants, e-mail: nik-lon@mail.ru

Мечтаева Мария Николаевна,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант, ассистент кафедры атомных электрических станций, e-mail: maria.mechtaeva@mail.ru

Mechtaeva Maria Nikolaevna,

Ivanovo State Power Engineering University, PhD student, assistant, Department of Nuclear Power Plants, e-mail: maria.mechtaeva@mail.ru

УДК 62.932.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КЕРАМИКИ С ДОБАВКОЙ ПИРОЛИЗНОГО ОСТАТКА ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ

О.Б. КОЛИБАБА, Д.А. ДОЛИНИН, Р.Н. ГАБИТОВ, М.О. ШАВИТОВА
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. Перспективным экологически безопасным методом переработки твердых коммунальных отходов является пиролиз. Пиролиз позволяет получить комбинацию твердых, жидких и газообразных продуктов в различных пропорциях за счет изменения рабочих параметров процесса. Перспективным направлением использования твердых продуктов пиролиза является производство различных материалов для промышленного, гражданского и дорожного строительства. Известны способы получения на его основе цемента, бетона и пеностекла с улучшенными свойствами. В современных строительных технологиях широко используются керамические материалы, для производства которых требуются различные дорогостоящие добавки, такие как кварцевый песок, доломит, каменный уголь, горные породы угледобычи и др. В связи с этим актуальным представляется использование остатка пиролиза твердых коммунальных отходов в качестве «бесплатной» структурообразующей добавки в технологии производства керамического материала. Для определения области применения этого материала и выполнения последующих теплотехнических расчетов требуется знание его теплофизических характеристик.

Материалы и методы. Для определения теплофизических характеристик керамического материала использован экспериментальный метод цилиндрического слоя и расчетно-экспериментальный метод обратной задачи теплопроводности.

Результаты. В результате экспериментальных исследований теплофизических свойств нового керамического материала получены зависимости средней удельной теплоемкости и коэффициента температуропроводности керамического материала от температуры в диапазоне 30–90 °С, а коэффициента теплопроводности – в диапазоне 30–500 °С, позволяющие выполнять расчеты тепловых процессов, протекающих в материале при его промышленном использовании. Установлено, что коэффициент теплопроводности материала изменяется в пределах 0,3–0,65 Вт/м·К, коэффициент температуропроводности – $(1,8–2,3) \cdot 10^{-7}$ м²/с, а средняя удельная теплоемкость – 780–1300 Дж/кг·К, что сопоставимо с теплофизическими характеристиками известных керамических материалов.

Выводы. Целесообразно использовать пиролизный остаток твердых коммунальных отходов в качестве бесплатного сырья вместо дорогостоящих добавок для получения керамического материала. Рекомендуется использовать новый керамический материал в технологиях производства строительных изделий различного назначения.

Ключевые слова: пиролиз, твердые коммунальные отходы, твердый углеродистый остаток, теплофизические свойства, керамический материал

THE STUDY OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF CERAMICS WITH THE ADDITION OF THE PYROLYSIS RESIDUE OF SOLID WASTE

O.B. KOLIBABA, D.A. DOLININ, R.N. GABITOV, M.O. SHAVITOVA
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Abstract

Background. A promising environmentally friendly method for processing municipal solid waste is pyrolysis. Pyrolysis allows obtaining a combination of solid, liquid and gaseous products in various proportions due to changes in process parameters. A promising area for the use of solid pyrolysis products is the production of various materials for industrial, civil and road construction. There are some known methods for producing cement, concrete and foam glass with improved properties on pyrolysis basis. In modern building technologies, ceramic materials are widely used. Their production requires various expensive additives such as quartz sand, dolomite, coal, coal mining rocks, etc. Thus, it seems relevant to use the residue of the pyrolysis

of municipal solid waste as a free of charge structure-forming additive for the production of ceramic material. To determine the scope of the material application and to perform subsequent thermotechnical calculations, the data on its thermophysical characteristics is required.

Materials and methods. To determine the thermophysical characteristics of the ceramic material, the experimental method of the cylindrical layer and the calculation-experimental method of inverse heat conduction problem are used.

Results. The experimental studies of thermophysical properties of the new ceramic material have allowed obtaining the dependence of the average specific heat capacity and thermal diffusivity of the ceramic material on temperatures in the range of 30–90 °C, and the coefficient of thermal conductivity on the temperatures in the range of 30–500 °C. These characteristics enable to perform calculations of thermal processes that occur in the material during its industrial use. The coefficient of thermal conductivity of the material varies from 0,3 to 0,65 W/m·K, thermal diffusivity varies within $(1,8–2,3) \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, and the average specific heat capacity changes from 780 to 1300 J/kg·K, which is comparable with the thermophysical characteristics of known ceramic materials.

Conclusions. It is advisable to use the pyrolysis residue of municipal solid waste as a free raw material instead of expensive additives to obtain ceramic material. It is recommended to use the new ceramic material in the production technology of building products for various purposes.

Key words: pyrolysis, municipal solid waste, solid carbon residue, thermophysical properties, ceramic material

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.3.016-023

Введение. Сложность проблемы утилизации твердых коммунальных отходов (ТКО) обусловлена необходимостью решения многофакторной задачи эколого-экономического обоснования выбора конкретной технологии утилизации отходов и применения капиталоемкого оборудования. До настоящего времени не существует единого мнения относительно того, какая из технологий утилизации отходов является наиболее рациональной.

В мировой практике реализовано более десятка технологий переработки твердых коммунальных отходов с использованием различных методов. Наиболее распространенными являются термические методы (сжигание, пиролиз, газификация).

Пиролиз (термическая деструкция) ТКО представляет собой одно из перспективных направлений переработки твердых коммунальных отходов с точки зрения как экологической безопасности, так и получения вторичных полезных продуктов. Пиролиз привлекает внимание своей гибкостью, позволяющей получить комбинацию твердых, жидких и газообразных продуктов в различных пропорциях только за счет изменения рабочих параметров, таких как температура и скорость процесса. Термическое разложение отходов может проводиться в режиме, обеспечивающем либо получение газа и твердого углеродистого остатка при минимальном выходе или даже полном отсутствии жидкой фракции (жижки), либо получение жижки в качестве одного из целевых продуктов.

Из всех образующихся в процессе пиролиза продуктов газообразные нашли наиболее широкое применение. С экономической точки зрения выгодным считается использование пиролизных газов в качестве топлива. Однако возможность такого использования определяется составом газов, который зависит от технологии переработки ТКО. Так, пиролизный газ технологии *Purox* можно рассматривать в качестве энергетического или энерготехнологического топлива вместо природного газа или мазута, поскольку он имеет высокую теплоту сгорания и высокую температуру горения, в то время как пирогаз технологий *Torrax* и *Landgart* содержит значительное количество молекулярного азота и имеет низкую теплотворную способность [1, 2]. Соответственно, он не пригоден для транспортировки и может использоваться только по месту производства. Однако, как показали исследования [2], можно повысить теплоту сгорания пиролизного газа посредством его метилирования.

Жижка, как правило, используется непосредственно в самом процессе пиролиза для выработки тепловой энергии. Технология получения из отходов жидкого топлива (пиротоплива) методом мгновенного пиролиза разработана компанией *Occidental Petroleum Corp* [2].

Твердые продукты пиролиза (твердый углеродистый остаток) коммунальных отходов содержат органические и неорганические компоненты. Одним из перспективных направлений является его применение

в металлургии в составе защитных материалов, используемых при разливке стали [3]. Рядом исследователей разработаны технологии, позволяющие из твердого углеродсодержащего остатка пиролиза автошин получить формованное топливо [4, 5]. Еще одним направлением использования пиролизного остатка является производство различных материалов для промышленного, гражданского и дорожного строительства, например цемента или пеностекла [2, 6]. Однако широкому промышленному применению твердого углеродистого остатка в последнее время уделяется недостаточно внимания, в то время как создание энергоэффективных безотходных технологий на основе его использования имеет большие перспективы.

Нами предложено использовать твердый углеродистый остаток пиролиза смеси ТКО среднего морфологического состава [7] в технологии производства керамического материала в качестве структурофазообразующей добавки. Химический состав материала представлен следующими соединениями:

SiO_2 – 53,7%, $\text{Al}_3\text{Ca}_{0,5}\text{Si}_3\text{O}_{11}$ – 21,1%,

Fe_2O_3 – 10,7%, $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ – 14,5%.

Создание новых материалов, свойства которых определяются такими факторами, как физико-химические превращения, скорость нагрева, широкий температурный диапазон и другими, требует проведения экспериментальных исследований по определению их теплофизических характеристик.

Методы исследования. Целью настоящего исследования является определение теплофизических свойств (ТФС) (теплоемкости, плотности, коэффициентов теплопроводности и температуропроводности) керамического материала, полученного с использованием пиролизного остатка ТКО. Изучение ТФС веществ осуществляют экспериментальными и расчетно-экспериментальными методами.

Для определения коэффициента теплопроводности керамического материала использовали известный экспериментальный метод – стационарный метод цилиндрического слоя [8]. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

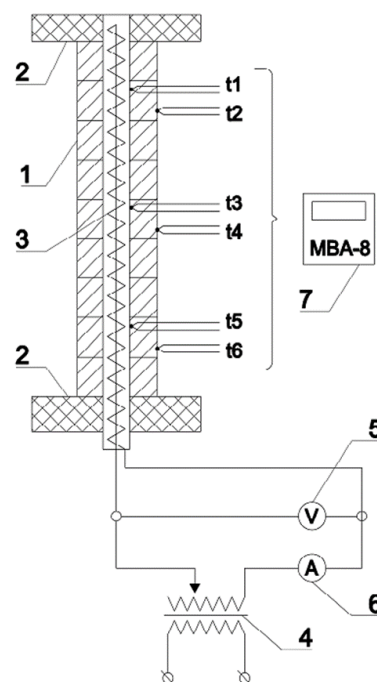


Рис. 1. Схема установки для определения коэффициента теплопроводности

Согласно данному методу, исследуемому материалу придали форму цилиндрической полый трубы, набранной из девяти коротких колец 1, плотно прилегающих друг к другу. Длина рабочего участка образца составила 200 мм. Внутренний диаметр исследуемого образца $d_1 = 15$ мм, а наружный диаметр $d_2 = 45$ мм. Для уменьшения тепловых потерь на торцах нагревателя установили теплоизолирующие втулки 2. Внутри материала поместили патронный электронагреватель (ТЭНП) 3, создающий равномерно распределенный по длине образца тепловой поток. При установившемся состоянии системы все количество теплоты, которое выделяется в электронагревателе, проходит через цилиндрический слой материала.

Электронагреватель питается через автотрансформатор 4 стабилизированным напряжением. Изменение мощности нагревателя производили изменением напряжения в цепи нагревателя. Количество теплоты, выделяемое электронагревателем, определяли по закону Джоуля-Ленца, для чего производили измерения напряжения и силы тока при помощи вольтметра 5 и амперметра 6.

Температуры исследуемого материала измеряли с помощью шести хромель-алюмелевых (ХА) термопар ДТПК 011-0,7 ($t_1...t_6$), горячие спаи которых заложены на

наружной (t_2 , t_4 , t_6) и на внутренней (t_1 , t_3 , t_5) поверхностях исследуемого материала.

Фиксацию значений температур производили с помощью аналогового модуля ввода MBA-8 (7). Передача данных на персональный компьютер осуществлялась посредством преобразователя AC-4 (RS-485 – USB). Значения температур фиксировали в специализированной программе с интервалом времени 1 с. Стабилизация температурного режима наступала через 90 мин после включения установки. Температуры внутренней и наружной поверхностей цилиндра усредняли по показаниям соответствующих термопар. В ходе экспериментов варьировали напряжение в интервале 20–200 В. При этом мощность нагревателя изменялась в диапазоне 2,4–310,6 Вт, а средняя температура образца – 30–515 °С. Результаты измерения температуры при мощности нагревателя 36,4 Вт представлены на рис. 2.

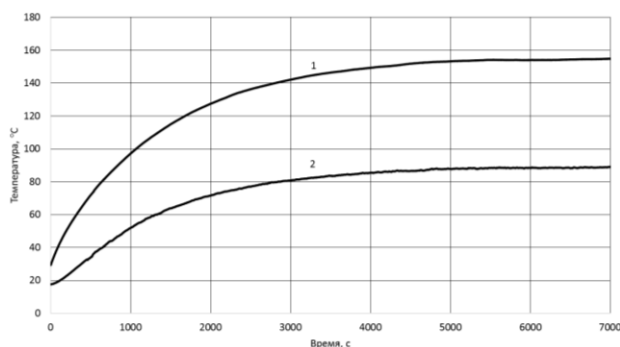


Рис. 2. Температуры образца при мощности нагревателя 36,4 Вт: 1 – внутренняя поверхность; 2 – наружная поверхность

Используя результаты измерения температуры, был рассчитан коэффициент теплопроводности:

$$\lambda = \frac{Q \cdot \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)}{2\pi l(T_1 - T_2)}, \quad (1)$$

где d_1 , d_2 – внутренний и наружный диаметр испытуемого цилиндра соответственно; T_1 , T_2 – температура на внутренней и наружной поверхностях цилиндра; Q – тепловой поток, равный мощности нагревателя; l – длина цилиндра.

Одним из перспективных подходов к определению ТФС материалов является проведение расчетно-экспериментальных теплофизических исследований, основанных на обработке экспериментальных дан-

ных методами обратных задач теплопроводности (ОЗТ), когда по результатам измерения граничных условий и температуры во внутренних точках исследуемого образца определяют его неизвестные теплофизические характеристики.

Нами была использована разработанная ранее методика нахождения коэффициента температуропроводности [9], в основу которой положен численно-аналитический метод дискретного удовлетворения краевых условий (ДУКУ) [10], в соответствии с которым дифференциальное уравнение теплопроводности удовлетворяется непрерывно, а граничные условия – дискретно в g моментах времени, равномерно выбранных на рассматриваемом отрезке времени. Расчет методом ДУКУ базируется на точном аналитическом решении задачи теплопроводности для тел канонической формы, в частности для неограниченной пластины, при граничных условиях I рода.

Была проведена серия лабораторных экспериментов по нагреву керамических образцов на установке, схема которой представлена на рис. 3.

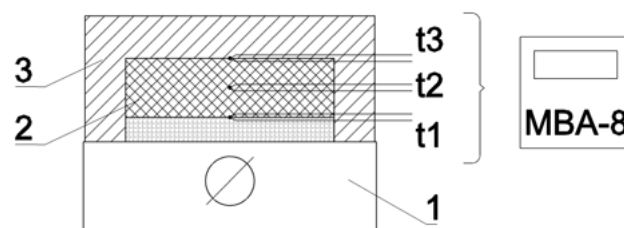


Рис. 3. Схема установки для определения коэффициента температуропроводности

Методика эксперимента заключалась в следующем. Керамический образец 1 толщиной 23 мм помещали на нагревательное устройство 3 и накрывали тепловой изоляцией 3. По высоте образца размещали 3 термопары типа ТХА(К) (t_1 , t_2 , t_3). Для получения правильного представления о поле температур образца особое внимание обращали на точность размещения термопар в образце. Для исключения переноса теплоты через электроды термопары устанавливали с торца и размещали в изотермических поверхностях. Точки замера температуры выбирали на оси тела или около нее, так как температурные градиенты здесь либо равны нулю, либо невелики. Все это позволяло величину ошибки при замерах свести к минимуму. Сигнал с тер-

мопар поступал на аналоговый модуль МВА-8 и далее обрабатывался на компьютере. Показания термопар фиксировали с интервалом времени в одну секунду.

В процессе нагрева образца ТКО измеряли температуру в расчетных сечениях по высоте слоя, как это показано на рис. 3. Для получения более достоверных результатов и во избежание влияния случайных погрешностей один и тот же эксперимент повторяли не менее 5 раз. В качестве исходных данных для последующих расчетов принимали усредненные по числу опытов значения температур для данного режима нагрева (рис. 4).

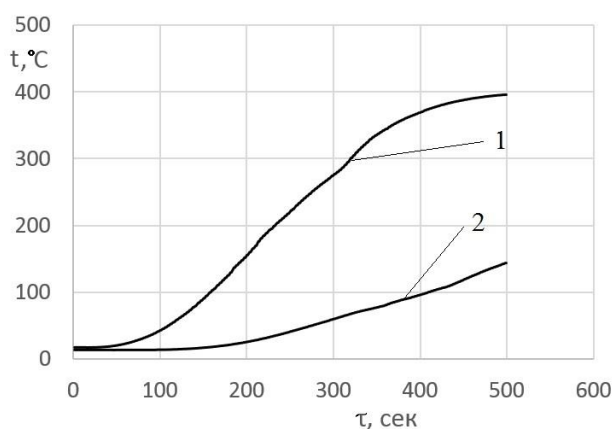


Рис. 4. Температуры образца: 1 – наружная поверхность $T(R, \tau)$; 2 – внутренняя поверхность $T(0, \tau)$

Используя полученные экспериментальные значения $T(0, \tau)$ и $T(R, \tau)$ и с последующим обращением к программной реализации алгоритма решения ОЗТ, находили соответствующие величины коэффициента температуропроводности, исходя из условия обеспечения среднеквадратичного расхождения расчетных и экспериментальных данных не более 8 %.

Для определения теплоемкости исследуемого материала воспользовались известной формулой:

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}, \quad (2)$$

где λ , a – полученные из экспериментов коэффициенты теплопроводности и температуропроводности; ρ – плотность, найденная по формуле

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (3)$$

где m – масса образца, полученная методом взвешивания; V – объем образца, найденный прямым измерением.

Результаты. Используя приведенные выше методы, были определены теплофизические коэффициенты нового керамического материала, полученного с использованием в качестве структурообразующей добавки твердого углеродистого остатка пиролиза смеси ТКО среднего морфологического состава.

Средняя плотность материала составила $1752,6 \text{ кг/м}^3$.

Полученная зависимость коэффициента теплопроводности от температуры в диапазоне $30\text{--}515^\circ\text{C}$ показана на рис. 5.

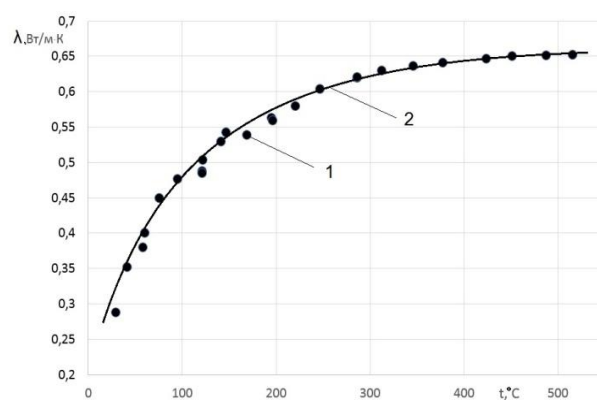


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплопроводности керамического материала от температуры: • – результаты эксперимента; 2 – аппроксимирующая кривая

Анализ полученных данных (рис. 5) показывает, что коэффициент теплопроводности неравномерно возрастает с увеличением температуры. Полученные экспериментальные данные аппроксимированы зависимостью вида

$$\lambda = 0,243 + 2,83 \cdot 10^{-3} \cdot t - 7,012 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 5,968 \cdot 10^{-9} \cdot t^3$$

с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,984$.

Зависимость коэффициента температуропроводности от температуры $a = f(t)$, представленная на рис. 6, носит убывающий характер.

Полученные экспериментальные данные аппроксимированы линейным уравнением вида

$$a = 2,2843 \cdot 10^{-7} - 4,2226 \cdot 10^{-10} \cdot t$$

с достоверностью $R^2 = 0,98$.

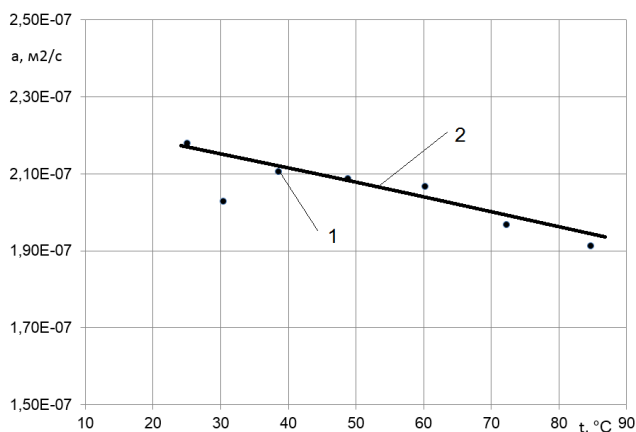


Рис. 6. Зависимость коэффициента температуропроводности от температуры: • – результаты эксперимента; 2 – аппроксимирующая кривая

Зависимость средней удельной теплоемкости от температуры получили расчетом по формуле (2) с использованием экспериментальных данных (рис. 5, 6). Результаты представлены на рис. 7.

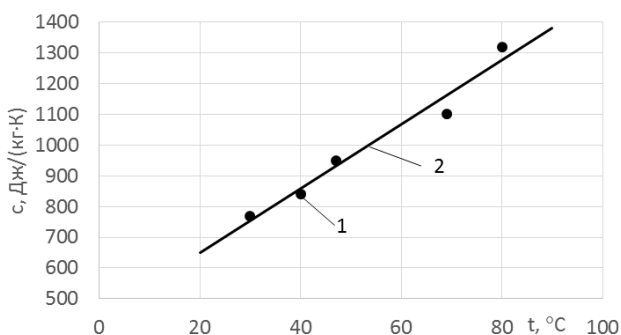


Рис. 7. Зависимость коэффициента теплоемкости от температуры: • – результаты эксперимента; 2 – аппроксимирующая кривая

Полученные экспериментальные данные аппроксимированы зависимостью вида $c = 441,452 + 10,430 \cdot t$.

Коэффициент детерминации $R^2 = 0,985$.

Полученные данные о ТФС исследуемого материала сопоставимы со значениями теплофизических характеристик известных керамических материалов [11].

Выводы. В результате проведенных расчетно-экспериментальных исследований теплофизических свойств нового керамического материала, полученного с использованием в качестве структурофазообразующей добавки твердого углеродистого остатка пиролиза смеси ТКО среднего морфологического состава, получены температурные зависимости средней удельной теплоемкости и коэффициента температуропроводности керамического

материала в диапазоне 30–90 °С, а коэффициента теплопроводности – в диапазоне 30–500 °С, что сопоставимо с теплофизическими характеристиками известных керамических материалов. Таким образом, целесообразно использовать пиролизный остаток твердых коммунальных отходов в технологии получения новых керамических изделий вместо дорогостоящих добавок.

Список литературы

1. **Алексеев Г.М., Петров В.Н., Шпильфогель П.В.** Индустриальные методы санитарной очистки городов (Термическая переработка бытовых отходов и использование продуктов пиролиза). – Л.: Стройиздат, 1983. – 96 с.
2. **Переработка** твердых бытовых отходов методом пиролиза. Обз. информ. – М.: ЦНИИТЭИМС, 1983. – 40 с.
3. **Термические** процессы в технологиях переработки твердых бытовых отходов: аналитическая оценка и практические рекомендации / Л.Я. Шубов, Л.Г. Федоров, Р.В. Залепухин, В.Ф. Кроткова // ВИНТИ, Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. – 1998. – № 5. – С. 33–97.
4. **Технология** переработки твердого остатка пиролиза автошин в формованное топливо / А.В. Папин, А.Ю. Игнатова, А.В. Неведов, К.А. Шиканова // Ползуновский вестник. – 2015. – № 5. – С. 106–110.
5. **Шиканова К.А.** Технология переработки твердого углеродсодержащего остатка, являющегося отходом пиролиза автошин // Вестник Российского университета дружбы народов. Сер.: Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2015. – № 4. – С. 80–83.
6. **Перспективы** использования продуктов термической утилизации твердых коммунальных отходов в технологии силикатных теплоизоляционных материалов / Е.А. Яценко, Б.М. Гольцман, А.А. Чумаков и др. // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. – 2019. – № 3. – С. 77–81.
7. **Соломин И.А., Афанасьева В.И.** Состав и свойства твердых коммунальных отходов, учитываемые при выборе технических методов обращения с отходами // Природообустройство. – 2017. – Вып. 3 – С. 82–90. doi.org/10.26897/1997-6011-2017-3-82-90.
8. **Осипова В.А.** Экспериментальное исследование процессов теплообмена: учеб. пособие для теплоэнерг. спец. вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1979. – 319 с.
9. **Метод** определения эффективного коэффициента температуропроводности слоя органосодержащего сырья / О.Б. Колибаба, О.И. Горинов, Р.Н. Габитов, О.В. Самышина // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 6. – С. 16–19.

10. Бровкин Л.А., Крылова Л.С. Решение задач теплопроводности дискретным удовлетворением граничных условий // Вопросы теплообмена в промышленных установках: сб. науч. тр. – Иваново, 1971. – С. 56.

11. Четверикова А.Г., Каныгина О.Н., Кулеева А.Х. Теплоемкость кремнеземистой керамики при умеренных температурах // Вестник Кыргызско-Российского славянского университета. – 2011. – № 11. – С. 72–76.

References

1. Alekseev, G.M., Petrov, V.N., Shpil'fogel', P.V. *Industrial'nye metody sanitarnoy ochistki gorodov (Termicheskaya pererabotka bytovykh otkhodov i ispol'zovanie produktov piroliza)* [Industrial methods of sanitary cleaning of cities (Thermal processing of household waste and the use of pyrolysis products)]. Leningrad: Stroyizdat, 1983. 96 p.

2. *Pererabotka tverdykh bytovykh otkhodov metodom piroliza. Obzornaya informatsiya* [The processing of municipal solid waste by pyrolysis. Review inform]. Moscow: TsNIITEIMS, 1983. 40 p.

3. Shubov, L.Ya., Fedorov, L.G., Zalepukhin, R.V., Krotkova, V.F. Termicheskie protsessy v tekhnologiyakh pererabotki tverdykh bytovykh otkhodov: analiticheskaya otsenka i prakticheskie rekomendatsii [Thermal processes in solid waste processing technologies: analytical assessment and practical recommendations]. *VINITI, Nauchnye i tekhnicheskie aspekty okhrany okruzhayushchey sredy*, 1998, no. 5, pp. 33–97.

4. Papin, A.V., Ignatova, A.Yu., Nevedrov, A.V., Shikanova, K.A. Tekhnologiya pererabotki tverdogo ostatka piroliza avtoshin v formovannoe toplivo [Technology for processing solid residue of tire pyrolysis into molded fuel]. *Polzunovskiy vestnik*, 2015, no. 5, pp. 106–110.

5. Shikanova, K.A. Tekhnologiya pererabotki tverdogo uglersoderzhashchego ostatka, yavlyayushchegosya otkhodom piroliza avtoshin [Technology for processing solid carbon-containing residue, a waste of tire pyrolysis]. *Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya:*

Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti, 2015, no. 4, pp. 80–83.

6. Yatsenko, E.A., Gol'tsman, B.M., Chumakov, A.A., Smoliy, V.A., Khol'shemakher, K., Bulgakov, A.G. Perspektivy ispol'zovaniya produktov termicheskoy utilizatsii tverdykh kommunal'nykh otkhodov v tekhnologii silikatnykh teploizolyatsionnykh materialov [Prospects for the use of thermal utilization products of solid municipal waste in the technology of silicate thermal insulation materials]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Severo-Kavkazskiy region*, 2019, no. 3, pp. 77–81.

7. Solomin, I.A., Afanas'eva, V.I. Sostav i svoystva tverdykh kommunal'nykh otkhodov, uchityvaemye pri vybore tekhnicheskikh metodov obrashcheniya s otkhodami [The composition and properties of municipal solid waste considered when choosing technical methods of waste management]. *Prirodobustroystvo*, 2017, issue 3, pp. 82–90. doi.org/10.26897/1997-6011-2017-3-82-90.

8. Osipova, V.A. *Eksperimental'noe issledovanie protsessov teploobmena* [An experimental study of heat transfer processes]. Moscow: Energiya, 1979. 319 p.

9. Kolibaba, O.B., Gorinov, O.I., Gabitov, R.N., Samyshina, O.V. Metod opredeleniya effektivnogo koefitsienta temperaturoprovodnosti sloya organosoderzhashchego syr'ya [Method for determining the effective coefficient of thermal diffusivity of a layer of organo-containing raw materials]. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 6, pp. 16–19.

10. Brovkin, L.A., Krylova, L.S. Reshenie zadach teploprovodnosti diskretnym udovletvoreniem granichnykh usloviy [Solving heat conduction problems by discrete satisfaction of boundary conditions]. *Sbornik nauchnykh trudov «Voprosy teplomassoobmena v promyshlennnykh ustanovkakh»* [Sat. scientific tr. «Issues of heat and mass transfer in industrial plants»]. Ivanovo, 1971, p. 56.

11. Chetverikova, A.G., Kanygina, O.N., Kuleeva, A.Kh. Teploemkost' kremnezemistoy keramiki pri umerennykh temperaturakh [Heat capacity of siliceous ceramics at moderate temperatures]. *Vestnik Kyrgyzsko-Rossiyskogo slavyanskogo universiteta*, 2011, no. 11, pp. 72–76.

Колибаба Ольга Борисовна,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, заведующий кафедрой энергетика теплотехнологий и газоснабжения, e-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Kolibaba Olga Borisovna,

Ivanovo State Power Engineering University, PhD in Engineering, Head of Department of Thermal Engineering and Gas Supply, e-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Долинин Денис Александрович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», старший преподаватель кафедры энергетика теплотехнологий и газоснабжения, e-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Dolinin Denis Aleksandrovich,

Ivanovo State Power Engineering University, Senior Lecturer, Department of Thermal Engineering and Gas Supply, e-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Габитов Рамиль Наилевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры энергетика теплотехнологий и газоснабжения, e-mail: Ramilgab@mail.ru;

Gabitov Ramil Nailevich,

Ivanovo State Power Engineering University, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Thermal Engineering and Gas Supply, e-mail: Ramilgab@mail.ru;

Шавитова Мария Олеговна,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», магистрант 2 курса, e-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Shavitova Maria Olegovna,

Ivanovo State Power Engineering University, Master student, e-mail: tevp@tvp.ispu.ru

УДК 669.187.2; 537.84

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ В МНОГОЭЛЕКТРОДНОЙ ДУГОВОЙ ПЕЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

А.Л. КУХАРЕВ

ГОУВПО «Луганский национальный университет имени Владимира Даля», г. Луганск, Украина

E-mail: alex.kuharev@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. Одним из основных конструктивных параметров многоэлектродных печей, во многом определяющих их теплоэнергетические и технико-экономические показатели, является отношение диаметра распада электродов к диаметру ванны D_p/D_b . Существующие методики выбора рациональных конструктивных параметров в большей степени относятся к дуговым печам, работающим на переменном токе промышленной частоты. Для многоэлектродных печей постоянного тока, в которых используются магнитогидродинамические эффекты для улучшения условий перемешивания и температурной гомогенизации расплава, отсутствуют зависимости параметров теплопереноса от диаметра распада электродов. Данное исследование является продолжением ряда патентов и статей, в которых обоснована конструкция, разработана математическая модель магнитогидродинамических и тепловых процессов в расплаве печи, содержащей три сводовых и три подовых электрода, произведена верификация модели по результатам физических экспериментов, исследованы параметры теплопереноса в печи при $D_p/D_b \approx 0,2$. Для предложенной печи целесообразно исследовать влияние D_p/D_b на параметры теплопереноса в расплаве, что позволит произвести рациональный выбор данного конструктивного параметра.

Материалы и методы. Результаты получены с помощью трехмерной математической модели магнитогидродинамических и тепловых процессов в расплаве стали, построенной при использовании безындукционного приближения с учетом $k-\varepsilon$ модели турбулентности. Обработка результатов произведена с помощью методов анализа вихревых структур и оценки среднеинтегральных показателей гидродинамических и тепловых процессов в ванне расплава.

Результаты. Проведены численные эксперименты, в которых конструктивный параметр D_p/D_b изменялся от 0,2 до 0,5. Установлены новые научные данные о закономерностях изменения структуры течений и параметров теплопереноса в ванне расплава шестиелектродной печи: с увеличением D_p/D_b в указанном диапазоне увеличивается интенсивность вертикальных вихревых течений, циркулирующих между осью соответствующей электрической дуги и осью ванны, а также азимутальных течений, циркулирующих в горизонтальных сечениях ванны; подавляются вихревые течения, формируемые за счет естественной конвекции вблизи боковых стенок печи; зоны максимальных значений эффективной теплопроводности, достигающей $1,8 \cdot 10^5$ Вт/(м·К), перераспределяются в центральную область ванны, что способствует повышению равномерности распределения температуры в ванне. Полученные результаты позволяют рекомендовать рациональный диапазон значений $D_p/D_b - 0,4-0,5$, при котором в предлагаемой шестиелектродной печи объем застойных зон уменьшается более чем на 40 % и более чем на 10 % увеличиваются интегральные значения числа Нуссельта в среднем по глубине горизонтальном сечении ванны.

Выводы. Полученные закономерности, выявляющие возможности улучшения условий перемешивания и повышения эффективности теплопереноса в расплаве шестиэлектродной печи, могут быть рекомендованы для выбора отношения D_p/D_b при проектировании мощных печных установок.

Ключевые слова: дуговая печь, конвективный теплоперенос, диаметр распада электродов, вертикальные вихревые течения

SELECTING THE RATIONAL ELECTRODES LOCATION IN A DC MULTI-ELECTRODE ARC FURNACE

A.L. KUKHAREV

Lugansk Vladimir Dahl National University, Lugansk, Ukraine

E-mail: alex.kuharev@mail.ru

Abstract

Background. One of the main design parameters of multi-electrode furnaces, which largely determines their heat and economic indicators, is the ratio of the pitch circle diameter of electrodes to the bath diameter D_p/D_b . The existing methods for choosing rational design parameters are more relevant to arc furnaces operating on alternating current of industrial frequency. For multi-electrode direct current furnaces, which use magnetohydrodynamic effects to improve mixing conditions and temperature homogenization of the melt, there is no relationship between the heat transfer parameters and the pitch circle diameter of electrodes. This work is a continuation of a number of patents and articles. Elsewhere, the design was justified, a mathematical model of magnetohydrodynamic and thermal processes in the melt of the furnace containing three roof arc and three bottom electrodes was developed, the model was verified through the results of physical experiments, and the parameters of heat transfer in the furnace at $D_p/D_b \approx 0,2$ were studied. The proposed type of furnace requires the study of the D_p/D_b effect on the heat transfer parameters in the melt, which will allow a rational choice of the design parameter.

Materials and methods. The results were obtained using a three-dimensional mathematical model of magnetohydrodynamic and thermal processes in the steel melt constructed with the non-induction approximation and taking into account the $k-\varepsilon$ turbulence model. The results were processed using methods of analysis of vortex structures and estimation of the integral parameters of hydrodynamic and thermal processes in the molten bath.

Results. Numerical experiments have been carried out with the design parameter D_p/D_b varying from 0,2 to 0,5. New scientific data on the patterns of changes in the structure of flows and heat transfer parameters in the molten pool of a six-electrode furnace have been obtained. D_p/D_b increase within the indicated range causes the increase of intensity of vertical vortex flows circulating between the axis of the corresponding electric arc and the axis of the bath and of the azimuthal flows circulating in horizontal sections of the bath. Vortex flows formed due to natural convection near the side walls of the furnace are suppressed. The maximum value zones of the effective thermal conductivity that reaches $1,8 \cdot 10^5 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ are redistributed to the central part of the bath, which contributes to increasing temperature distribution efficiency in the bath. The obtained results allow recommending a rational range of values of D_p/D_b within 0,4–0,5, which decreases the volume of stagnant zones in the proposed six-electrode furnace by more than 40 % and increases the integral values of the Nusselt number over the depth of the horizontal section of the bath on average by more than 10 %.

Conclusions. The obtained data revealing the possibility of improving the mixing conditions and increasing the heat transfer efficiency in the melt of the six-electrode furnace can be recommended for choosing the D_p/D_b ratio when designing high power furnace.

Key words: arc furnace, convective heat transfer, pitch circle diameter of electrodes, vertical vortex flow

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.3.023-031

Введение. В настоящее время одной из важнейших задач энергоемких печных комплексов является улучшение их тепло-энергетических и технико-экономических показателей, которое может быть достигнуто за счет оптимизации их конструктивных и режимных параметров [1, 2]. Одним из

основных конструктивных параметров многоэлектродных печей, во многом определяющих интенсивность тепломассообменных процессов в расплаве, является диаметр распада электродов D_p , определяемый как диаметр окружности, проходящей через центры торцов электродов. Наибо-

лее часто данный параметр представляется в относительных единицах как отношение его к диаметру ванны D_B : $D_p^* = D_p / D_B$.

Следует отметить, что некоторые высокоомощные дуговые печи переменного тока работают с предельно низким диаметром распада электродов ($D_p^* \approx 0,2$), на основании чего теоретически обосновывается уменьшение реактивного сопротивления печного контура и, соответственно, некоторое увеличение активной мощности печи [1, 3]. Однако в [3] отмечается и ряд недостатков таких печей, связанных с возможными поломками электродов и перегревом подины за счет большой концентрации электромагнитных сил и тепловых нагрузок вблизи оси ванны.

В свою очередь, многоэлектродные печи, работающие на постоянном токе, характеризуются гораздо меньшим реактивным сопротивлением печного контура, и, как правило, в таких печах диаметр распада электродов в 1,5–2 раза больше, чем в печах переменного тока [4, 5]. Для этого класса печей вопросы рационального выбора диаметра распада электродов являются недостаточно проработанными.

Данная статья является продолжением работ [2, 6]. В этих работах нами обоснована конструкция шестизлектродной печи постоянного тока, содержащая три сводовых и три подовых электрода, причем угол между смежными осями сводовых и подовых электродов составляет 60° (рис. 1). В [2] для данной печи разработана математическая модель магнитогидродинамических и тепловых процессов в расплаве стали, также произведена верификация модели по результатам физических экспериментов и исследованы параметры теплопереноса в расплаве при $D_p^* \approx 0,2$.

Для предложенной печи актуальным является исследование влияния диаметра распада электродов на параметры теплопереноса в расплаве, что позволит произвести рациональный выбор данного конструктивного параметра.

Методы исследования. Исследуемая печь имела ванну цилиндросферокопической формы емкостью 180 т (рис. 1). В геометрической модели электрические дуги представлялись однородными цилиндрическими проводниками, располагаемыми в центрах поперечного сечения соответствующих

сводовых электродов 1, 2, 3. Также предполагалось наличие вогнутых менисков в области расплава под электрическими дугами. В принятой компоновке диаметр распада подовых электродов 4, 5, 6 был равен диаметру распада сводовых электродов 1, 2, 3.

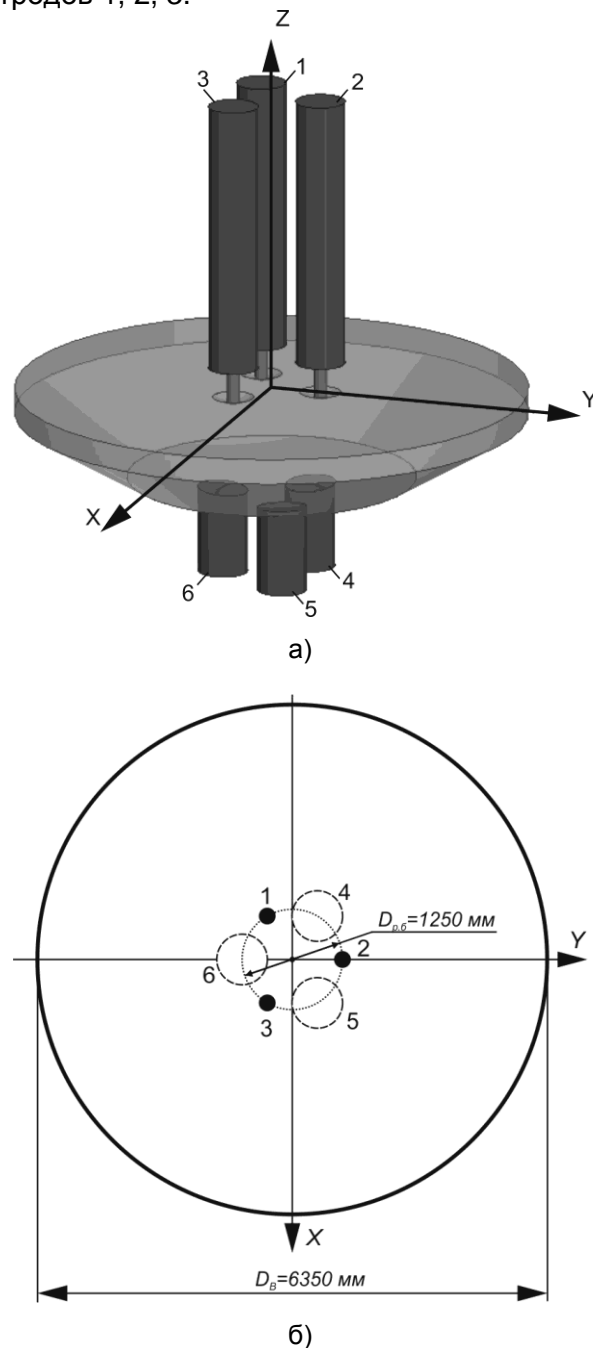


Рис. 1. Геометрическая модель печи: а – общий вид; б – профиль ванны в плоскости XY

В данном исследовании в геометрической модели значения D_p^* для сводовых и подовых электродов поэтапно изменяли от 0,2 до 0,5 с шагом приблизительно 0,05, причем вариант расположения электродов

при $D_p^* \approx 0,2$ считался базовым, и для его показателей в обозначениях использовался индекс «б».

Основные допущения и условия моделирования для расплава стали подробно описаны в [2]. Уточним граничные условия, используемые при моделировании. Значения токов в электродах составляли 80 кА. В целях обеспечения одинаковых тепловых условий нагрева расплава в областях менисков задавались постоянные значения температур – 3300 К [7]. На боковых и нижних стенках ванны печи задавались постоянные значения температуры 1900 К, что приблизительно соответствует результатам измерения температуры в действующей дуговой печи ДСП-180 [8]. Так как в ходе плавки верхняя поверхность расплава покрыта шлаковым слоем, то на этой поверхности применялось условие теплоизоляции. Также на всех твердых стенках и на верхней границе расплава задавалось условие прилипания.

Результаты исследования. Оценивались графики распределения гидродинамических и тепловых параметров в сечениях ванны, их среднеинтегральные значения в горизонтальных и вертикальных сечениях ванны, а также среднеинтегральные значения по объему ванны. Для приведения полученных данных к сопоставимому виду также выполнено их приведение к соответствующим базовым значениям (например, $v^* = v / v_6$).

В геометрической модели печи в качестве основных были выбраны вертикальные сечения, проходящие через ось X и ось Y, а также горизонтальное сечение вблизи поверхности расплава ($Z = -70$ мм) и горизонтальное сечение, располагаемое в средней по глубине части ванны (при $Z = -715$ мм). Выбор данных сечений производился по результатам исследований [2] с учетом обеспечения наибольшей наглядности протекающих гидродинамических и тепловых процессов.

На рис. 2 показаны зависимости средних значений скоростей в горизонтальном сечении ванны, а также в вертикальном сечении, проходящем через ось X, от диаметра распада электродов.

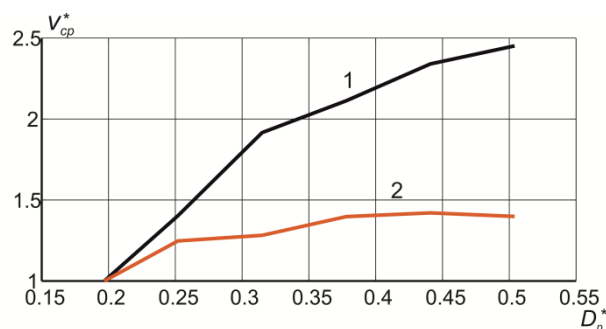


Рис. 2. Зависимости средних значений скоростей от относительного диаметра распада электродов: 1 – в горизонтальном сечении при $Z = -715$ мм; 2 – в вертикальном сечении, проходящем через ось X

Согласно полученным зависимостям, с увеличением D_p^* значения средних скоростей в указанных сечениях в основном увеличиваются. В горизонтальном сечении при $Z = -715$ мм средняя скорость увеличивается более чем в 2 раза, по сравнению со средней базовой скоростью в данном сечении. В вертикальном сечении, проходящем через ось X, при $0,2 < D_p^* \leq 0,44$ средняя скорость увеличивается более чем на 40 %, а при $0,44 < D_p^* \leq 0,5$ наблюдается некоторое уменьшение скорости от 1,42 до 1,39 о.е.

Изменение структуры течений в основных сечениях ванны показаны на рис. 3–6.

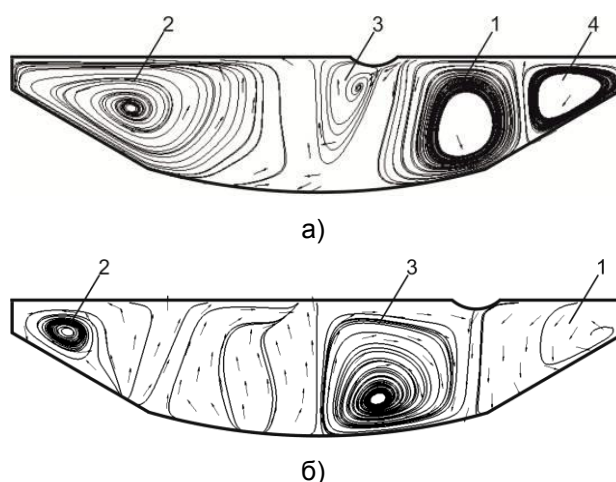


Рис. 3. Траектории течений в вертикальном сечении ванны вдоль оси Y: а – при $D_p^* \approx 0,2$; б – при $D_p^* \approx 0,5$

В сечении, проходящем через ось Y (рис. 3), при увеличении диаметра распада электродов структура течений изменяется следующим образом. Центры вихрей 1 и 2

смещаются к соответствующим боковым стенкам, значительно увеличивается интенсивность третьего вихря, а интенсивность первого и второго вихрей несколько уменьшается. Часть восходящих потоков вблизи оси ванны не участвуют в вихревом течении 2, а замыкаются вблизи поверхности расплава. Четвертый вихрь, который, как было показано в [2], формировался за счет влияния естественной конвекции, при $D_p^* > 0,25$ отсутствует, так как подавляется первым контуром циркуляции (электровихревым течением).

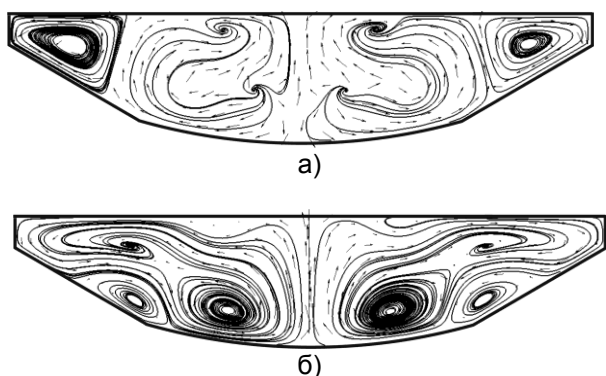


Рис. 4. Траектории течений в вертикальном сечении ванны вдоль оси X: а – при $D_p^* \approx 0,2$; б – при $D_p^* \approx 0,5$

В сечении, проходящем через ось X (рис. 4), также зафиксировано несколько вихревых контуров, обладающих симметрией относительно оси ванны. Причем при $D_p^* \approx 0,5$ (рис. 4,б) наблюдается «вытягивание» вихревых структур в направлении от оси ванны к периферии. Так же, как и на рис. 3,б, наблюдается подавление течений, циркулирующих аналогично вихрю 4 вблизи боковых стенок печи.

В горизонтальных сечениях ванны с увеличением D_p^* зоны с максимальными значениями скоростей и соответствующие им на рис. 5 области замыкания азимутальных потоков смещаются к боковым стенкам ванны и при $D_p^* \approx 0,5$ располагаются приблизительно в средней цилиндрической части ванны.

Интенсивность азимутальных течений также оценивали по среднему значению завихренности в горизонтальных сечениях:

$$\frac{1}{S} \int_S \text{rot} \vec{v} dS. \text{ Отмечено, что с увеличением}$$

D_p^* среднее значение завихренности увеличивается во всех сечениях, кроме сечения, непосредственно примыкающего к подовым электродам. Так, при $D_p^* \approx 0,5$ средняя завихренность в этих сечениях увеличивается на 20–80 % по сравнению с завихренностью при базовом диаметре распада электродов.

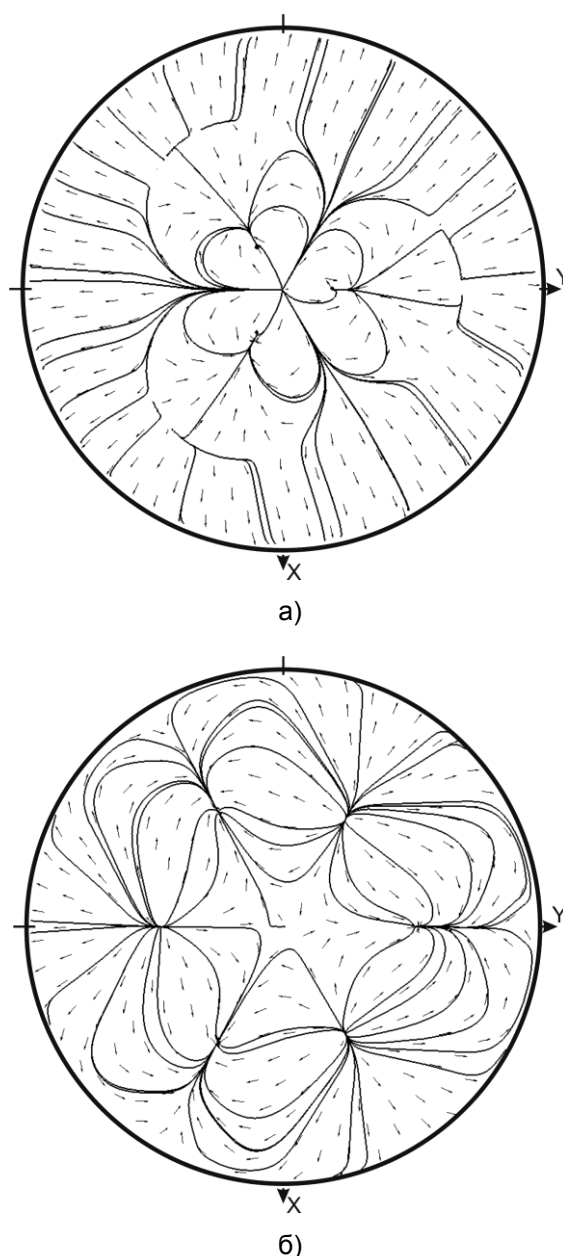


Рис. 5. Траектории течений в горизонтальном сечении при $Z = -70$ мм: а – при $D_p^* \approx 0,2$; б – при $D_p^* \approx 0,5$

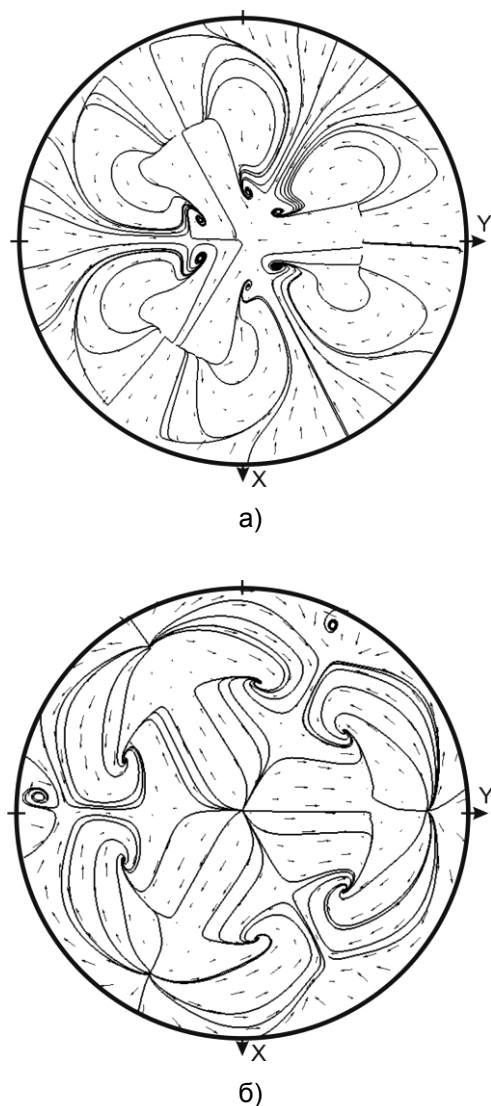


Рис. 6. Траектории течений в горизонтальном сечении при $Z = -715$ мм: а – при $D_p^* \approx 0,2$; б – при $D_p^* \approx 0,5$

Анализ профилей скорости вдоль диаметра ванны (рис. 7) показывает, что с увеличением D_p^* значения скоростей течений в области дуги и в области оси соответствующего подового электрода увеличиваются, а значения скоростей вдоль оси ванны – уменьшаются (рис. 7,б).

В нижней части ванны (рис. 7,г,д) при $D_p^* \approx 0,3$ также наблюдается увеличение скоростей течений в вышеуказанных областях, но при $D_p^* \approx 0,5$ значения скоростей несколько уменьшаются.

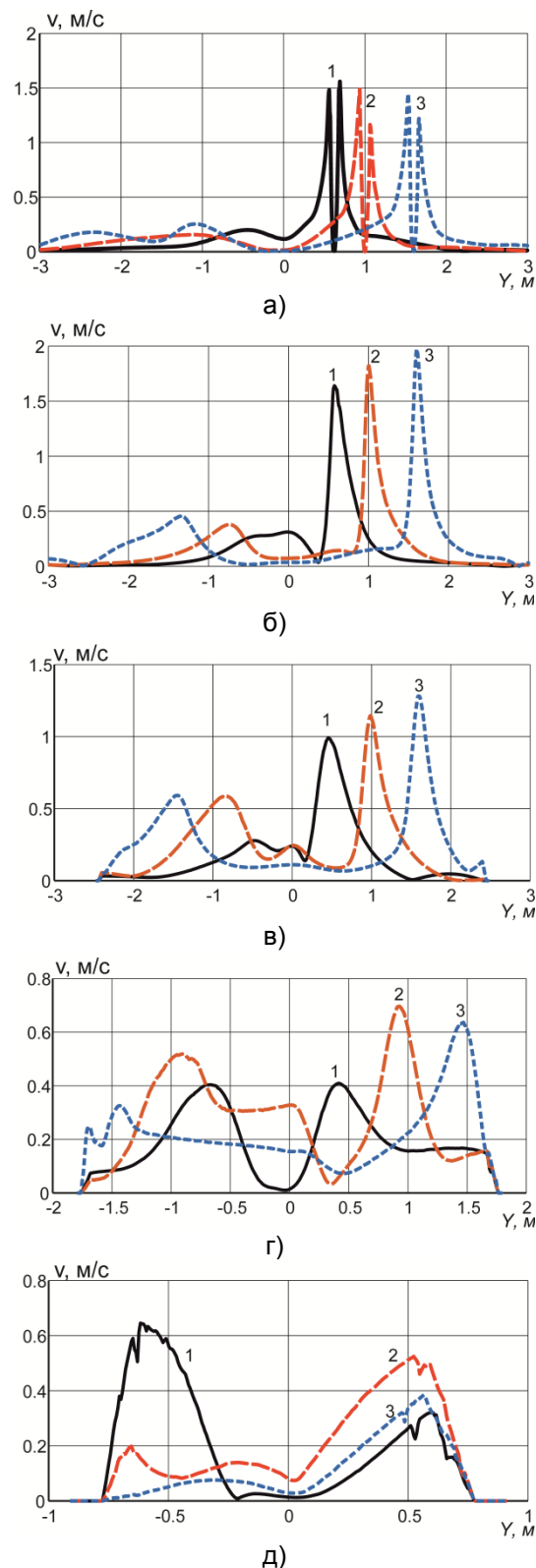


Рис. 7. Распределение скорости вдоль диаметра ванны в направлении оси Y : а – $Z = -70$ мм; б – $Z = -310$ мм; в – $Z = -715$ мм; г – $Z = -1120$ мм; д – $Z = -1320$ мм; 1 – при $D_p^* \approx 0,2$; 2 – при $D_p^* \approx 0,3$; 3 – при $D_p^* \approx 0,5$

Таким образом, при увеличении D_p^* условия перемешивания расплава улучшаются, что также подтверждается уменьшением объема застойных зон в ванне (рис. 8). Объем застойных зон определялся как объем областей ванны, в которых скорость потоков расплава была ниже, чем 0,05 м/с. Относительный объем застойных зон, выраженный через объем расплава в ванне и объем застойных зон при базовом варианте расположения электродов, определялся по выражению

$$V_3^* = \frac{V_3}{V_B V_{3,6}}, \quad (1)$$

где V_3 – объем расплава, в котором скорость менее 0,05 м/с, м³; V_B – объем расплава в ванне, м³; $V_{3,6}$ – объем расплава, в котором скорость менее 0,05 м/с, при базовом диаметре распада электродов.

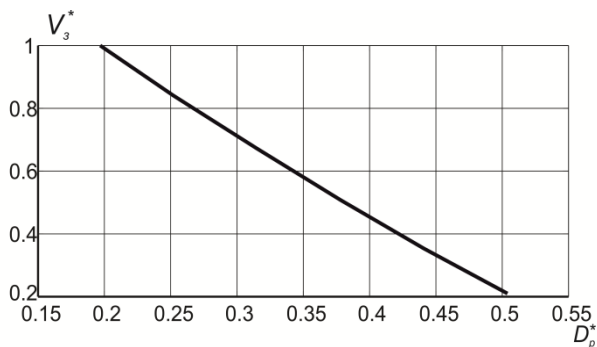
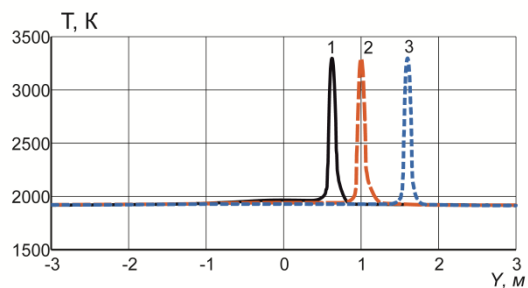
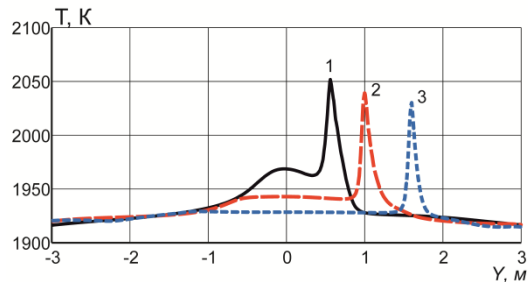


Рис. 8. Зависимость относительного объема застойных зон в ванне (при $v \leq 0,05$ м/с) от относительного диаметра распада электродов

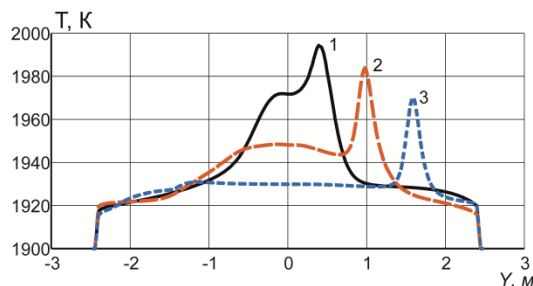
Анализ влияния значений D_p^* на распределение температуры в сечениях ванны (рис. 9) показывает, что за счет более эффективного конвективного теплопереноса при увеличении D_p^* температура в горизонтальных сечениях ванны распределяется более равномерно (рис. 9,б–д): снижаются максимумы температур в областях электрических дуг, понижается приблизительно на 20–30 К температура в центральной части ванны. Улучшение условий теплопереноса в центральной части ванны, как будет показано ниже, также обусловлено формированием в этой области ванны зоны максимальных значений эффективной теплопроводности.



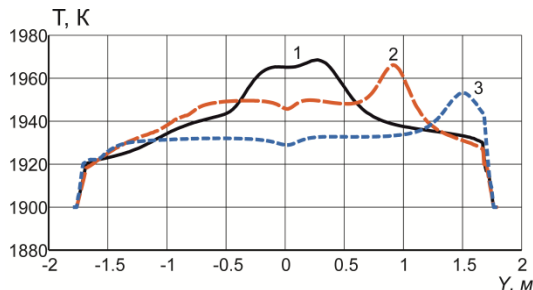
а)



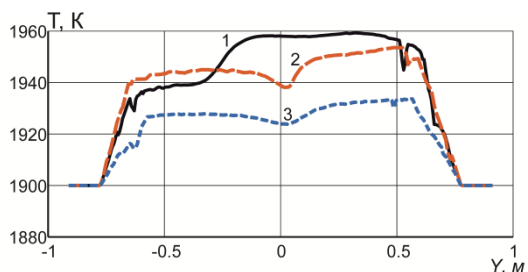
б)



в)



г)



д)

Рис. 9. Распределение температуры вдоль диаметра ванны в направлении оси Y: а – $Z = -70$ мм; б – $Z = -310$ мм; в – $Z = -715$ мм; г – $Z = -1120$ мм; д – $Z = -1320$ мм; 1 – при $D_p^* \approx 0,2$; 2 – при $D_p^* \approx 0,3$; 3 – при $D_p^* \approx 0,5$

Повышение эффективности теплопереноса при увеличении D_p^* также подтверждается зависимостями числа Нуссельта (рис. 10), рассчитанного по среднеинтегральным значениям коэффициента теплоотдачи ($\alpha_{cp} = q_{cp} / \Delta T_{cp}$) в сечениях ванны. Приведенное к базовым параметрам среднее значение числа Нуссельта в соответствующем сечении ванны определялось по выражению

$$Nu_{cp}^* = \frac{1}{Nu_{cp,б}} \frac{1}{S} \frac{L_0}{\Delta T_{cp}} \int q dS, \quad (2)$$

где $Nu_{cp,б}$ – число Нуссельта при базовом варианте расположения электродов; S – площадь соответствующего сечения ванны, m^2 ; L_0 – характерный размер, m (принят равным глубине ванны); q – плотность теплового потока, $Вт/м^2$.

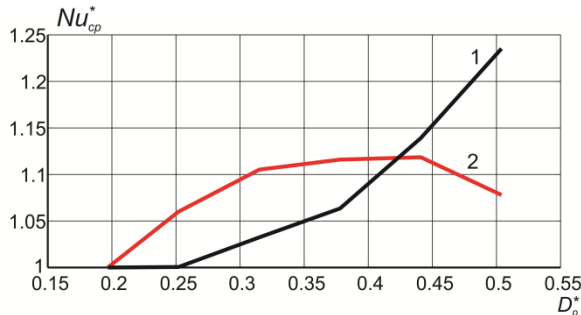


Рис. 10. Зависимости числа Нуссельта от относительного диаметра распада электродов: 1 – в горизонтальном сечении при $Z = -715$ мм; 2 – в вертикальном сечении, проходящем через ось X

Анализ полученных зависимостей (рис. 10) показывает, что с увеличением D_p^* интенсивность конвективного теплопереноса в среднем по глубине горизонтальном сечении ванны при $0,25 < D_p^* \leq 0,5$ увеличивается более чем на 20 %. В вертикальном сечении при $0,25 < D_p^* \leq 0,44$ значения чисел Нуссельта также увеличиваются приблизительно на 10 %, а при $0,44 < D_p^* \leq 0,5$ наблюдается уменьшение числа Нуссельта на 4 %, что вызвано уменьшением скорости в этом сечении (см. рис. 2).

На рис. 11 показан график зависимости средней по объему ванны эффективной теплопроводности от диаметра распада электродов. При $0,2 < D_p^* \leq 0,38$ средняя по объему эффективная теплопровод-

ность уменьшается, а при $0,38 < D_p^* \leq 0,5$ – увеличивается.

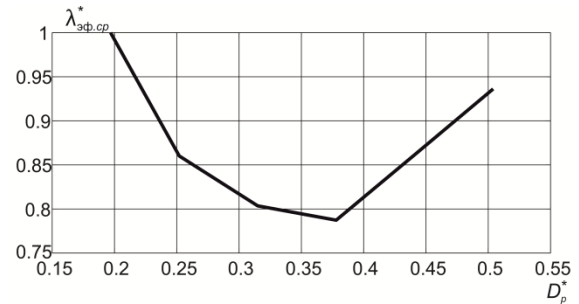


Рис. 11. Зависимость относительного значения средней по объему эффективной теплопроводности от относительного диаметра распада электродов

Изменение эффективной теплопроводности с ростом D_p^* поясняется рис. 12.

Если при $0,2 < D_p^* \leq 0,25$ зоны максимальной эффективной теплопроводности были сосредоточены вблизи центров вихрей 1 и 2, то при $D_p^* > 0,3$ зона максимальных значений эффективной теплопроводности смещается в центральную область ванны, при этом ее значения в этой области достигают $1,8 \cdot 10^5$ Вт/(м·К).

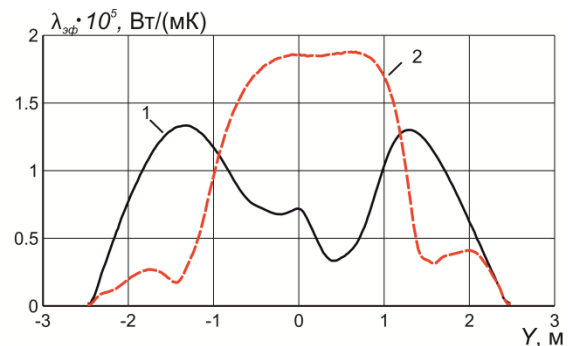


Рис. 12. Распределение эффективной теплопроводности вдоль диаметра ванны в направлении оси Y при $Z = -715$ мм: 1 – при $D_p^* \approx 0,2$; 2 – при $D_p^* \approx 0,5$

Отметим, что увеличение относительного диаметра распада электродов более 0,5 нецелесообразно по причине усиления воздействия излучения электрических дуг на боковые стенки печи.

Выводы. На основании численного исследования конвективного теплопереноса в предложенной шестиэлектродной печи показано, что с увеличением отношения диаметра распада электродов к диаметру ванны от 0,2 до 0,5 увеличивается интен-

сивность вертикальных вихревых течений, циркулирующих между осью соответствующей электрической дуги и осью ванны, а также азимутальных течений, циркулирующих в горизонтальных сечениях ванны, подаются вихревые течения, формируемые за счет естественной конвекции вблизи боковых стенок печи, зоны максимальных значений эффективной теплопроводности, достигающих $1,8 \cdot 10^5$ Вт/(м·К), перераспределяются в центральную область ванны, что способствует повышению равномерности распределения температуры в ванне. Полученные результаты позволяют рекомендовать рациональный диапазон значений отношения $D_p/D_b = 0,4-0,5$, при котором в предлагаемой печи уменьшается более чем на 40 % объем застойных зон и более чем на 10 % увеличиваются интегральные значения числа Нуссельта в среднем по глубине горизонтальном сечении ванны.

Список литературы

1. **Белковский А.Г., Кац Я.Л., Сивак Б.А.** Будущее дуговых сталеплавильных печей – в специализации их конструкции // Черные металлы. – 2013. – № 3. – С. 14–18.
2. **Кухарев А.Л.** Особенности конвективного теплопереноса в расплаве многоэлектродной дуговой печи // Вестник ИГЭУ. – 2020. – № 2. – С. 13–22.
3. **Кузьменко А.Г., Фролов Ю.Ф., Поздняков М.А.** Дуговые сталеплавильные печи: состояние, проблемы // Электromеталлургия. – 2011. – № 3. – С. 2–7.
4. **Адати Т., Селлан Р.** Сверхмощная 420-тонная электродуговая печь компании Tokyo Steel, Япония // Metallургическое производство и технология. – 2012. – № 2. – С. 8–17.
5. **Kazak O., Semko O.** Modelling magnetohydrodynamic processes in DC arc steelmaking furnace with bottom electrodes // Ironmaking and Steelmaking. – 2011. – № 38. – P. 353–358.
6. **Патент 119279** Украина МПК H05B 7/144, F27D 11/10. Система электропитания многоэлектродной дуговой печи / А.Л. Кухарев, А.А. Ковальчук; опубл. 25.09.2017, Бюл. № 18.
7. **Недопекин Ф.В., Казак О.В., Семко А.Н.** Моделирование гидродинамических и теплофизических процессов в сталеплавильных печах постоянного тока. – Донецк: ДонНУ, 2014. – 315 с.

зических процессов в сталеплавильных печах постоянного тока. – Донецк: ДонНУ, 2014. – 315 с.

8. **Шешкунов А.Ю., Некрасов И.В., Невидимов В.Н.** Температурный режим шлака сверхмощной ДСП и технологические параметры плавки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета МГТУ им. Г.И. Носова. – 2010. – № 1. – С. 29–31.

References

1. Belkovskiy, A.G., Kats, Ya.L., Sivak, B.A. Budushchee dugovykh staleplavil'nykh pechey – v spetsializatsii ikh konstruksii [The future of electric arc furnaces lies in their design specialization]. *Chernye metally*, 2013, no. 3, pp. 14–18.
2. Kukharev, A.L. Osobennosti konvektivnogo teploperenosa v rasplave mnogiektroodnoy dugovoy pechi [Characteristics of convective heat transfer in the melt of multi-electrode arc furnace]. *Vestnik IGEU*, 2020, issue 2, pp. 13–22.
3. Kuz'menko, A.G., Frolov, Yu.F., Pozdnyakov, M.A. Dugovye staleplavil'nye pechi: sostoyanie, problemy [Electric arc furnaces: state and problems]. *Elektrometallurgiya*, 2011, no. 3, pp. 2–7.
4. Adati, T., Sellan, R. Sverkhmoshchnaya 420-tonnaya elektrodugovaya pech' kompanii Tokyo Steel, Yaponiya [Ultra high power 420-ton electric arc furnace at Tokyo Steel, Japan]. *Metallurgicheskoe proizvodstvo i tekhnologiya*, 2012, no. 2, pp. 8–17.
5. Kazak, O., Semko, O. Modelling magnetohydrodynamic processes in DC arc steelmaking furnace with bottom electrodes. *Ironmaking and Steelmaking*, 2011, no. 38, pp. 353–358.
6. Kukharev, A.L., Koval'chuk, A.A. Sistema elektropitaniya mnogiektroodnoy dugovoy pechi [Power supply system of multi-electrode arc furnace]. Patent Ukraine, no. 119279, 2017.
7. Nedopekin, F.V., Kazak, O.V., Semko, A.N. Modelirovanie gidrodinamicheskikh i teplofizicheskikh protsessov v staleplavil'nykh pechakh postoyannogo toka [Modeling of hydrodynamic and thermophysical processes in direct current steelmaking furnaces]. Donetsk: DonNU, 2014. 315 p.
8. Sheshkunov, A.Yu., Nekrasov, I.V., Nevdimov, V.N. Temperaturnyy rezhim shlaka sverkhmoshchnoy DSP i tekhnologicheskie parametry plavki [Temperature conditions of slag of ultra-high power arc steelmaking furnace and technological parameters of melting]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta MGTU im. G.I. Nosova*, 2010, no. 1, pp. 29–31.

Кухарев Алексей Леонидович,

ГОУВПО «Луганский национальный университет имени Владимира Даля», кандидат технических наук, доцент кафедры горной электромеханики и транспортных систем, e-mail: alex.kuharev@mail.ru

Kukharev Aleksei Leonidovich,

Lugansk Vladimir Dahl National University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Mining Electromechanics and Transport Systems Department, e-mail: alex.kuharev@mail.ru

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.321

РАЗРАБОТКА 2D-МОДЕЛЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ И ПОРОЖДАЮЩЕГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ¹

А.И. ТИХОНОВ¹, А.В. СТУЛОВ², И.С. СНИТЬКО¹, А.В. ПОДОБНЫЙ¹¹ ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», г. Иваново, Российская Федерация² ООО «Трансформер», Московская обл., г. Подольск, Российская Федерация
E-mail: aitispu@mail.ru, alxstl@mail.ru, irant-kin@yandex.ru, aleksandr.rash@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. Актуальной является задача разработки технологий порождающего проектирования, решающего задачи структурной оптимизации и цифровых двойников, представляющих собой имитационные модели устройств с точностью не ниже 95 %. Данные технологии реализуются, как правило, на основе 3D-моделей физических полей, например, с использованием пакетов ANSYS Maxwell, COMSOL Multiphysics, требовательных к компьютерным ресурсам и к квалификации проектировщиков. Однако достаточная для цифровых двойников трансформаторов точность может быть достигнута при использовании цепных и 2D-полевых моделей. В связи с этим актуальной является разработка моделей, используемых для расчета трансформатора с точностью и способностью к учету особенностей конструкции конкретного устройства, характерной для цифровых двойников, что может найти применение в порождающем проектировании трансформаторов и при исследовании режимов их работы при эксплуатации.

Материалы и методы. Использован метод конечных элементов, реализованный средствами библиотеки EMLib (авторская разработка), позволяющей рассчитывать магнитные поля в 2D-постановке, а также методы имитационного моделирования с использованием пакета MatLab Simulink SymPowerSystem.

Результаты. Оценены допущения, принимаемые при имитационном моделировании силового трансформатора, – возможность использования цепных и 2D-полевых моделей без учета анизотропии стали с граничными условиями Дирихле при расчете потоков рассеяния. Разработаны 2D-полевые модели для расчета основного потока и потоков рассеяния, которые могут быть положены в основу технологии цифровых двойников и порождающего проектирования трансформаторов. Приведена имитационная модель трансформатора, реализованная в MatLab Simulink. Показана возможность использования приведенных моделей для диагностирования неисправностей трансформатора. Приведены результаты моделирования трансформатора с дефектом.

Выводы. Результаты работы могут быть использованы при проектировании трансформаторов для поиска оптимальных исполнений и исследования результатов проектных решений без создания

¹ Работа была выполнена при финансовой поддержке РФФИ, региональный конкурс Ивановской области, проект № 18-43-370012 от 09.06.2018, и Фонда содействия инновациям, номер договора 17ГРЦТС10-D5/56171 от 12.12.2019.

опытных образцов, а также при эксплуатации трансформаторов для оценки их повреждений по результатам испытаний без демонтажа.

Ключевые слова: цифровые двойники, порождающее проектирование, метод конечных элементов, имитационное моделирование трансформаторов

DEVELOPMENT OF 2D MODELS OF THE MAGNETIC FIELD FOR DIGITAL TWIN TECHNOLOGY AND GENERATIVE DESIGN OF POWER TRANSFORMERS

A.I. TIKHONOV¹, A.V. STULOV², I.S. SNITKO¹, A.V. PODOBNYJ¹

¹ Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

² Transformer, Moscow Region, Podolsk, Russian Federation

E-mail: aitispu@mail.ru, alxstl@mail.ru, irant-kin@yandex.ru, aleksandr.rash@mail.ru

Abstract

Background. The development of generative design technologies that solve the problems of structural optimization and digital twins, that is simulation models of devices with at least 95 % accuracy, is an urgent task. These technologies are usually implemented on the basis of 3D models of physical fields, for example, using ANSYS Maxwell or COMSOL Multiphysics packages, which are demanding in terms of computer resources and designer skills. However, the sufficient accuracy for transformer digital twins can be achieved using chain and 2D field models. The article aims to develop the models to calculate the transformer with the accuracy and ability to take into account the design features of a particular device, which is characteristic of digital twins. This can be used in generative design of transformers and in the study of their operation modes.

Materials and methods. The finite element method implemented via the authoring EMLib library which allows calculating magnetic fields in a 2D formulation was used. The simulation methods using the MatLab Simulink SymPowerSystem package were also employed.

Results. The assumptions made during the power transformer simulation have been estimated. They include the possibility of using chain and 2D field models without taking into account the steel anisotropy with Dirichlet boundary conditions when calculating the scattering fluxes. 2D field models have been developed for calculating the main flux and scattering fluxes, which are able to form the basis for digital twin technology and generative design of transformers. A simulation model of a transformer implemented in MatLab Simulink has been provided. The possibility of using the models for diagnosing transformer faults has been demonstrated. The simulation results of a transformer with a defect have been presented.

Conclusions. The results obtained can be used in the development of transformers to search for optimal designs and to study the results of design decisions without creating prototypes. The findings can also be applied while operating the transformers to assess the damage and failures without dismantling and according to the test results.

Key words: digital twins, generative design, finite element method, simulation of transformers

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.3.032-043

Введение. Одним из приоритетов государственной политики России, обозначенных в рамках «Национальной технологической инициативы» (НТИ) РФ, является цифровизация экономики [1]. В сфере производства это касается, в первую очередь, использования высокотехнологичных интеллектуальных систем при проектировании и эксплуатации технических объектов. Отставание в данном направлении неизбежно приведет к проигрышу в конкуренции. Поэтому даже в рамках предприятий малого и среднего бизнеса четко просматривается необходимость цифровых технологий, связанных с такими понятиями, как

«порождающее проектирование» и «цифровые двойники».

Под порождающим проектированием понимается технология, основанная, в первую очередь, на полевых 3D-моделях физических процессов, самостоятельно формирующих облик проектируемых изделий под заданные конструктором условия их будущего функционирования [2]. Порождающее проектирование является следующей ступенью развития CAD/CAE-систем, на которой основное внимание уделяется поиску оптимальной формы или конструкции проектируемого изделия исходя из условий ее работы [3]. В определен-

ном смысле порождающее проектирование является продолжением идеи топологической оптимизации, позволяющей находить новые конструктивные решения на стадии проектирования технических устройств. Например, в [4] приведен пример оптимизации детали (кронштейна) с использованием пакета Autodesk Inventor Professional. Следует отметить, что идеи порождающего проектирования в настоящее время реализуются, главным образом, в области машиностроения. Научные работы в области порождающего проектирования электрических машин и трансформаторов пока отсутствуют.

Так как при порождающем проектировании возникают условия для порождения новых исполнений проектируемого устройства, для которых не существует апробированных методик инженерного расчета, то данная технология тесно связана с другим характерным направлением развития экономики, связанным с понятием цифровых двойников.

Под цифровыми двойниками понимаются виртуальные прототипы технических устройств, представляющие собой наукоемкие модели, позволяющие с высокой точностью (95 % и выше) имитировать эти устройства в различных режимах работы. При проектировании это дает возможность оценивать результаты проектных решений без необходимости создания опытных образцов, что существенно снижает материальные затраты на проектирование особенно в условиях штучного или мелкосерийного производства. Как и в случае порождающего проектирования, для создания цифровых двойников используются, как правило, CAE-технологии, работающие с 3D-моделями, такие как ANSYS [5], CADFEM [6], COMSOL [7]. К сожалению, практически все публикации по теме цифровых двойников в настоящее время являются, как правило, либо рекламными статьями, либо краткими сообщениями о проводимых в этой области работах, не несущими научной конкретики, например [8]. Однако есть статьи, в которых отражены возможности моделирования процессов в трансформаторах с использованием 3D- и 2D-моделей (например, [9, 10, 11]). Правда, таких публикаций также мало.

Главная проблема, возникающая при таком подходе в приложении к предприятиям малого и среднего бизнеса, состоит в

невозможности приобретения коммерческой лицензии на использование данных дорогостоящих технологических платформ. Подготовка кадров для работы с этими платформами также является значительной проблемой.

В то же время, если рассматривать конкретно сферу электромашиностроительного и трансформаторостроительного производства, необходимо отметить, что создание точных полевых моделей, позволяющих имитировать произвольные режимы работы электрических машин и трансформаторов произвольной конструкции, может быть осуществлено с использованием 2D-моделей, которые не только проще и доступней, но и зачастую гораздо точнее 3D-моделей. В частности, в [12] приведена методика оптимизации коллекторных машин с использованием технологии [13], основанной на 2D-модели магнитного поля. При оптимизации на каждом шаге поиска решения с использованием генетических алгоритмов полностью перестраивается конечно-элементная модель, обеспечивая при этом выход на изначально непредсказуемые варианты конструктивных исполнений, что полностью соответствует идее порождающего проектирования. Для спроектированной таким образом машины осуществляется серия расчетов магнитного поля, результаты которой используются в цепной модели динамических режимов работы машины, с помощью которой можно симитировать произвольные режимы работы машины с учетом особенностей ее конструкции, что полностью соответствует понятию цифрового двойника.

Приведенная в [12] технология исследований может быть адаптирована и к силовым трансформаторам. Математическая модель, на основе которой может быть построен цифровой двойник трансформатора, подробно рассмотрена в [14]. Здесь отмечено, в частности, что магнитопровод трансформатора может быть достаточно точно смоделирован с использованием теории магнитных цепей. Однако ряд параметров, таких как магнитное сопротивление поля нулевой последовательности и индуктивность рассеяния обмоток, требуют расчета магнитного поля.

Ниже проведена оценка допущений, используемых при моделировании силового трансформатора с точностью, позволяющей говорить о том, что данные модели

могут быть отнесены к классу цифровых двойников, на которых можно не только исследовать работу спроектированного трансформатора, но и реализовать технологию порождающего проектирования.

Методы исследования. Силовой трансформатор относится к статическим устройствам, основанным на индукционном принципе преобразования энергии. Это значит, что с точки зрения функционального моделирования определяющее значение в данном случае имеет знание точной картины магнитного поля в различные моменты времени. Так как при промышленной частоте 50 Гц электромагнитным излучением энергии можно пренебречь, то для анализа режимов работы достаточно использовать модель квазистационарного магнитного поля. Это существенно упрощает задачу.

В то же время с точки зрения картины магнитного поля трансформатор традиционно относится к типичным объектам, для которых необходимо использовать именно 3D-модели, что требует значительных вычислительных ресурсов и опыта моделирования. В реальном проектировании количество таких задач желательно минимизировать.

Одним из главных требований, предъявляемых к инженерным моделям наряду с требованиями адекватности и точности, является требование максимальной простоты. В случае полевых задач наиболее распространенным является метод редукции размерности задачи, например сведение 3D-задачи к одной или нескольким 2D-задачам без потери точности.

Понятно, что 2D-модель магнитного поля в плоскопараллельной постановке (рис. 1) принципиально не подходит для расчета потоков рассеяния. Однако сравнение результатов расчета величины основного магнитного потока, замыкающегося по магнитопроводу, полученных на этой модели, с результатами расчета магнитного поля в 3D-постановке дает расхождение, не превышающее 2–3 % (например, в тестовой задаче расчета магнитного поля трансформатора ТМГ–1000–10/0,4 величина основного магнитного потока составила 0,0474 Вб при расчете на 3D-модели в Comsol Multyphysics и 0,0484 Вб – при расчете на 2D-модели в EMLib; расхождение составило 2,1 %). При этом ввиду возможности генерации более детальной конечно-элементной (КЭ) сетки в 2D-постановке

может быть обеспечена более высокая точность расчета, чем в 3D-постановке.

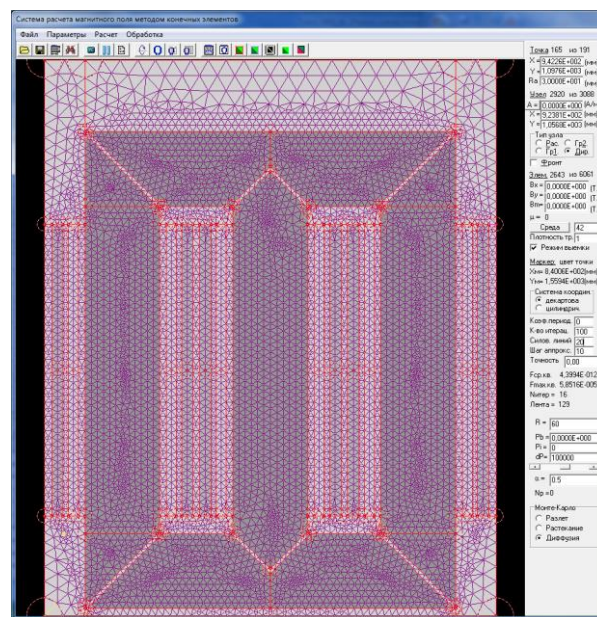


Рис. 1. Конечно-элементная модель силового трансформатора, созданная библиотекой EMLib

Следует отметить, что сечение стержня и ярма в 2D-модели (рис. 1) имеет форму прямоугольника, а не ступенчатой фигуры, вписанной в окружность или эллипс, как в реальном трансформаторе. При этом ширина сердечника b_c принималась равной ширине наибольшего пакета электротехнической стали, а толщина (размер в третьем измерении) рассчитывалась как

$$a_c = \frac{S_a}{b_c}, \quad (1)$$

где S_a – активное сечение стали стержня.

Именно при этом допущении 2D-модель обеспечивает точность расчета основного потока не менее 95 %, что требуется для создания цифрового двойника.

Бак трансформатора обычно изготавливается из стали (ферромагнитный материал), толщина которой мала по сравнению с размерами трансформатора. При триангуляции бака элементы сетки зачастую оказываются вытянутыми, что вносит дополнительную погрешность в расчет. Для упрощения модели желательно стенку бака не учитывать, а границу области провести по внутренней стороне бака. Для этого было проведено исследование эффекта вытеснения тока в стенке бака от полей рассеяния на тестовых моделях нестациона-

нарного магнитного поля в ELCUT (рис. 2). В результате было получено, что уже на частоте $f = 50$ Гц магнитный поток практически полностью вытесняется из массива железа (величина потока в железе на два порядка меньше полного потока рассеяния), что позволяет с высокой степенью точности принять допущение о возможности заменить бак границей Дирихле.

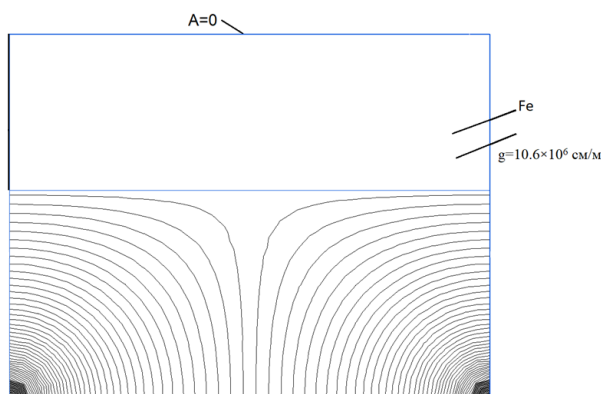


Рис. 2. Картина нестационарного магнитного поля вблизи массивной железной стенки

Для учета наличия технологических зазоров, возникающих при шихтовке магнитопровода, в модели на рис. 1 предусмотрены расчетные немагнитные вставки, толщина которых δ выбирается из условия достижения максимальной точности расчета в методе конечных элементов (элементы должны иметь форму, близкую к равностороннему треугольнику). Магнитная проницаемость данной вставки определяется из условия равенства магнитного сопротивления расчетных вставок магнитному сопротивлению реального технологического зазора:

$$\mu_{\delta} = \mu_0 \frac{\delta_{\text{тз}}}{\delta}, \quad (2)$$

где μ_0 – магнитная постоянная; $\delta_{\text{тз}}$ – расчетная ширина технологического зазора.

Так как $\delta_{\text{тз}}$ – это расчетная величина, зависящая от технологических особенностей конкретного производства, то на практике для расчета величины μ_{δ} рекомендуется алгоритм, основанный на итерационной серии расчетов магнитного поля трансформатора в режиме холостого хода (XX) при амплитудном значении тока XX в средней фазе (рис. 3). Искомое значение μ_{δ} соответствует расчету, в котором первичное напряжение равно

$$U_1 \approx E_1 = 4,44 \cdot f w_1 \Phi_m, \quad (3)$$

где U_1 – напряжение сети; E_1 – ЭДС первичной обмотки; f – частота сети; w_1 – число витков в первичной обмотке; Φ_m – амплитудное значение основного магнитного потока.

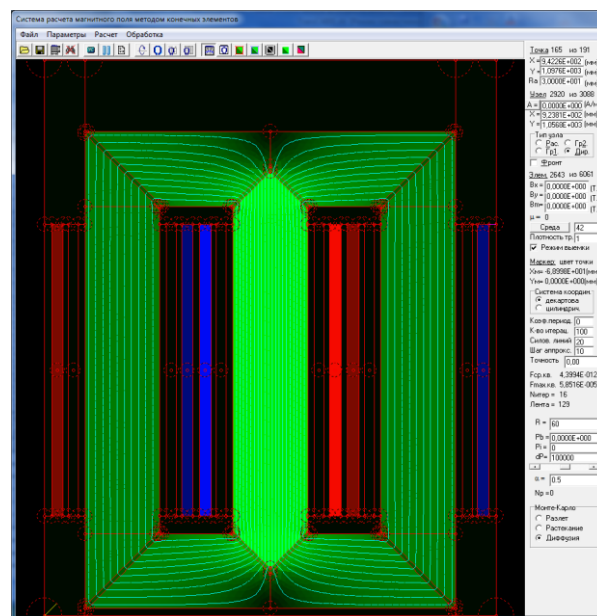


Рис. 3. Результаты расчета магнитного поля в режиме XX для момента времени, соответствующего максимальному току в средней фазе

Реальное значение тока XX может быть найдено только по результатам экспериментальных испытаний. На этапе проектирования данное значение может быть определено по приближительной формуле, приведенной в РД 16 317-86 «Трансформаторы силовые. Расчет потерь и тока холостого хода».

В условиях реального производства рекомендуется на основе серии экспериментальных измерений и численных расчетов на приведенной модели построить зависимость $\mu_{\delta} = f(\delta')$, где $\delta' = \delta/d_c$ – относительная ширина немагнитной вставки; δ – ширина вставки, найденная по приведенной методике для конкретного трансформатора; d_c – диаметр стержня. Такая зависимость позволяет однозначно определять значение μ_{δ} на этапе проектирования, причем с учетом специфики технологического процесса конкретного производства.

КЭ-модель трансформатора, калиброванная таким образом, оставаясь двумерной, позволит определять величину основного магнитного потока не только с учетом технологического зазора, что не всегда находит отражение в подобного рода мо-

делях, но и с учетом возможной несимметрии магнитопровода, вызванной, например, ударными электродинамическими воздействиями при коротком замыкании (КЗ) или некачественной шихтовкой.

Необходимость учета анизотропии электротехнической стали при создании цифровых двойников силовых трансформаторов также требует оценки. Здесь следует учесть, что использование в модели расчетных немагнитных вставок приводит к тому, что в области углов магнитопровода силовые линии искривляются практически под прямым углом (см. рис. 3). Даже при использовании изотропной стали составляющая магнитной индукции в направлении, перпендикулярном направлению проката стали, в стержнях на шесть порядков меньше составляющих магнитной индукции вдоль проката. Исключение составляют участки ярма в области среднего стержня, где силовые линии идут под некоторым углом к направлению проката. Однако даже если мы в исследованиях для всех областей ярма используем кривую намагничивания, соответствующую направлению силовых линий магнитного поля поперек проката, то расхождение в величине основного магнитного потока составляет около 1 %. Это значит, что усложнять задачу дополнительным учетом анизотропии в средних областях ярма не следует.

Для учета влияния технологических отверстий в сердечнике на величину основного потока было проведено исследование в Comsol Multiphysics в 2D- и 3D-постановке с учетом анизотропии стали и без учета (рис. 4).

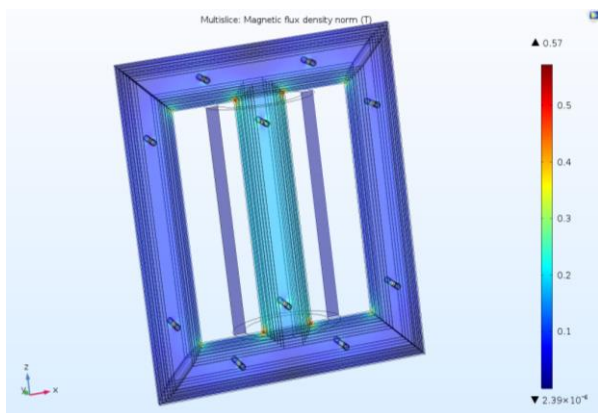


Рис. 4. Исследование влияния технологических отверстий в магнитопроводе на величину основного магнитного потока

Расхождение с вариантом 2D-модели без анизотропии и без отверстий составило:

- 0,027 % в 2D-модели без анизотропии;
- 0,022 % в 2D-модели с анизотропией;
- 0,99 % в 3D-модели без анизотропии;
- 1,6 % в 3D-модели с анизотропией.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что расхождения находятся в пределах допустимой точности инженерных расчетов. Поэтому для упрощения модели влиянием технологических отверстий можно пренебречь без существенной потери точности.

Особый подход к моделированию необходимо применить для учета потоков полей рассеяния. Расчет магнитного поля на 3D-модели показывает, что поток рассеяния силового трансформатора существенно меньше основного потока (в 50–100 раз и более). Например, как уже отмечалось, расчет основного потока трансформатора ТМГ–1000–10/0,4 дал величину 0,0474 Вб, в то время как поток рассеяния составил всего 0,00044 Вб. То есть величина потока поля рассеяния, по сути, находится в области погрешности метода конечных элементов.

Таким образом, поток рассеяния необходимо рассчитывать отдельно. При этом эффективность использования для этого 3D-моделей на компьютерах с обычной производительностью является спорной. В то же время достаточно оправданным в данном случае является использование 2D-модели, в которой учитывается осевая симметрия (рис. 5). В данной модели магнитопровод полностью исключен, а на всей границе расчетной области задается условие Дирихле, что соответствует полному вытеснению магнитного поля рассеяния из железа бака и железа магнитопровода, что соответствует принятым допущениям. Намагничивающие силы обмоток принимаются равными и противоположными по знаку, что соответствует условиям проведения опыта короткого замыкания. Поток рассеяния каждой k -й обмотки рассчитывается по формуле $\Phi_{\sigma k} = 2\pi\Psi_k$,

(4)

где $\Psi_k = r_k A_k$ – функция векторного магнитного потенциала A_k в точке радиусом r_k относительно оси симметрии (положение точки выбирается приблизительно в середине k -й обмотки из условия нахождения максимального по модулю значения функции Ψ_k ; при этом точка с нулевым значени-

ем функции Ψ_k лежит приблизительно в центре главного канала).

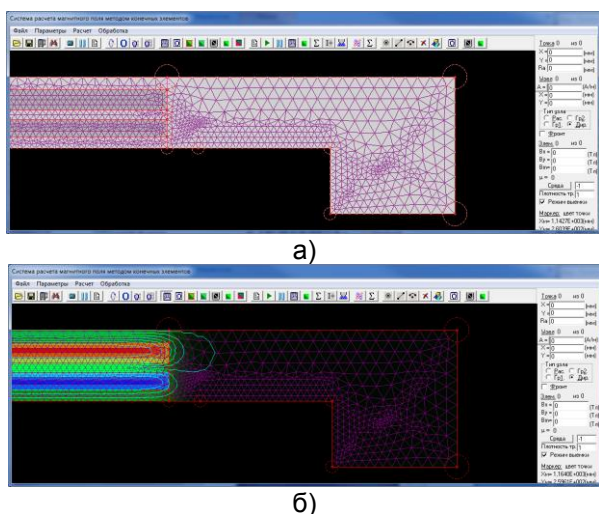


Рис. 5. Фрагмент осесимметричной модели трансформатора для расчета индуктивности рассеяния обмоток (а) и картина поля рассеяния (б)

Соответственно, индуктивность рассеяния каждой k -й обмотки определяется как

$$L_{\sigma k} = \frac{\Psi_{\sigma k}}{i_k},$$

где $\Psi_{\sigma k}$ – потокосцепление k -й обмотки в опыте короткого замыкания; i_k – ток в k -й обмотке.

Рассмотренные особенности картины основного магнитного поля трансформатора (высокая степень однородности, слабое поле рассеяния, слабое влияние дополнительных факторов) говорят о том, что с достаточной для цифровых двойников точностью для расчета основного магнитного поля достаточно использовать теорию магнитных цепей. Магнитная цепь в большинстве случаев имеет вид, представленный на рис. 6.

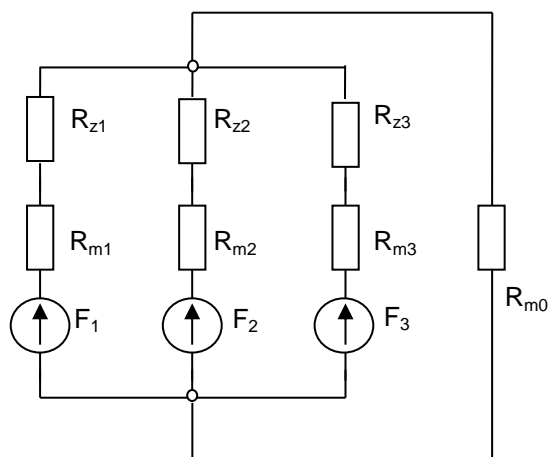


Рис. 6. Магнитная цепь силового трансформатора

На рис. 6 приведены следующие обозначения: R_{m1} , R_{m2} , R_{m3} – магнитные сопротивления ветвей схемы замещения, которые рассчитываются по формуле

$$R_{mk} = v(B_k) \begin{cases} \frac{\ell_s}{S_s} + \frac{2\ell_a}{S_a} & \text{при } k = 1, 3, \\ \frac{\ell_s}{S_s}, & \text{при } k = 2; \end{cases} \quad (5)$$

$$R_{zk} = \frac{\delta_{T3}}{2\sqrt{2} \cdot \mu_0 S_s}; \quad (6)$$

F_1 , F_2 , F_3 – намагничивающие силы стержней, которые рассчитываются по формулам

$$F_k = i_{0rk} w_1; \quad (7)$$

R_{m0} – магнитное сопротивление потока нулевой последовательности.

Здесь $v(B)$ – кривая намагничивания электротехнической стали в направлении проката стали в форме зависимости удельного магнитного сопротивления стали от индукции (рис. 7); ℓ_s – длина средней линии стержня до линий стыка; ℓ_a – длина средней линии половины ярма до линий стыка; S_s , S_a – активное сечение стержня и ярма соответственно; δ_{T3} – расчетное значение технологического зазора между стержнем и ярмом; i_{0rk} – намагничивающий ток k -й фазы; w_1 – число витков в первичной обмотке.

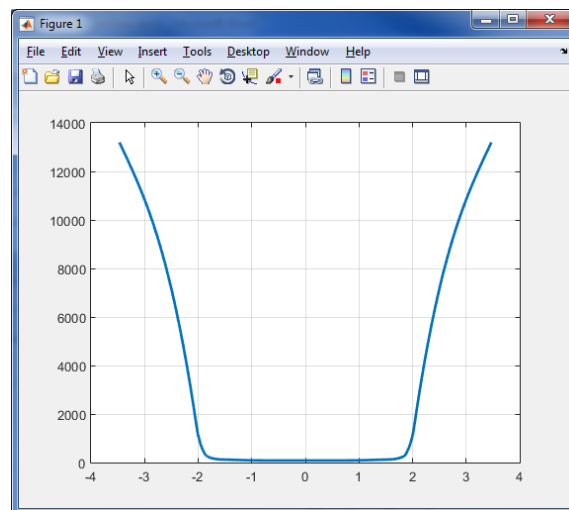


Рис. 7. Кривая намагничивания электротехнической стали в форме $v(B)$

Для расчета магнитного сопротивления нулевой последовательности предлагается использовать модель, представленную на рис. 8, аналогичную модели на рис. 5, но с заданием тока только в первичной обмот-

ке, равным амплитуде намагничивающего тока i_{0m} . При этом

$$R_{m0} = \frac{\Phi_0}{i_{0m} w_1}, \quad (8)$$

где Φ_0 – найденный из модели на рис. 7 магнитный поток.

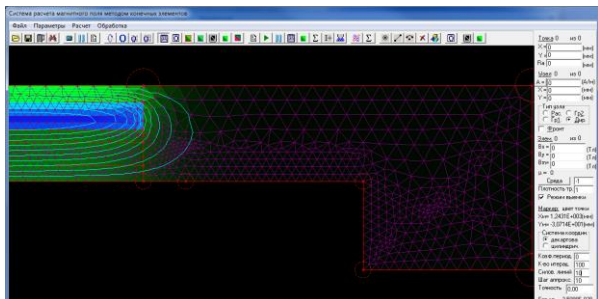


Рис. 8. Осесимметричная модель для расчета магнитного сопротивления поля нулевой последовательности

Таким образом определяются практически все параметры электрической схемы замещения, которая может быть использована для создания цифрового двойника трансформатора (рис. 9) и отличается от схемы, приведенной в [14], только элементом R_z , посредством которого учитывается вклад технологических зазоров в стыках стержней с ярами.

Для определения уточненных номиналов сопротивлений R_{muA} , R_{muB} , R_{muC} , учитывающих потери мощности в магнитопроводе, предлагается следующий алгоритм. Сначала осуществляется предварительная

оценка величины данных сопротивлений. Для этого реализуется серия расчетов магнитного поля на модели, представленной на рис. 3, в режиме XX при разных значениях токов XX в разных фазах на периоде при допущении о симметрии и синусоидальном характере изменения данных токов. В каждом i -м элементе КЭ сетки k -го стержня и прилегающих к нему участков ярма определяется максимальная за период величина магнитной индукции B_{mik} . Предварительные значения потерь XX k -го стержня рассчитываются по формуле

$$P_{0k} = \gamma a_c k_p^e k_p^u \sum_{i=1}^{N_{\Delta k}} p(B_{mik}) S_{\Delta ik} + 2\sqrt{2} S_a p_3 \left(\frac{B_{mik}}{\sqrt{2}} \right), \quad (9)$$

где γ – плотность стали; a_c – приведенная толщина пакета электротехнической стали, найденная по (1); k_p^e, k_p^u – коэффициент увеличения потерь за счет действия остаточных механических напряжений в стали и коэффициент увеличения потерь за счет искажения формы кривой магнитной индукции соответственно, принятые по рекомендациям [15]; $p(B_{mik})$ – удельные потери в стали, найденные по кривой потерь при индукции B_{mik} ; $S_{\Delta ik}$ – площадь i -го треугольного элемента k -го стержня и прилегающих к нему участков ярма; S_a – активная площадь стержня; p_3 – удельные потери в стали в зоне стыка, найденные по рекомендациям [15] в зависимости от B_{mik} .

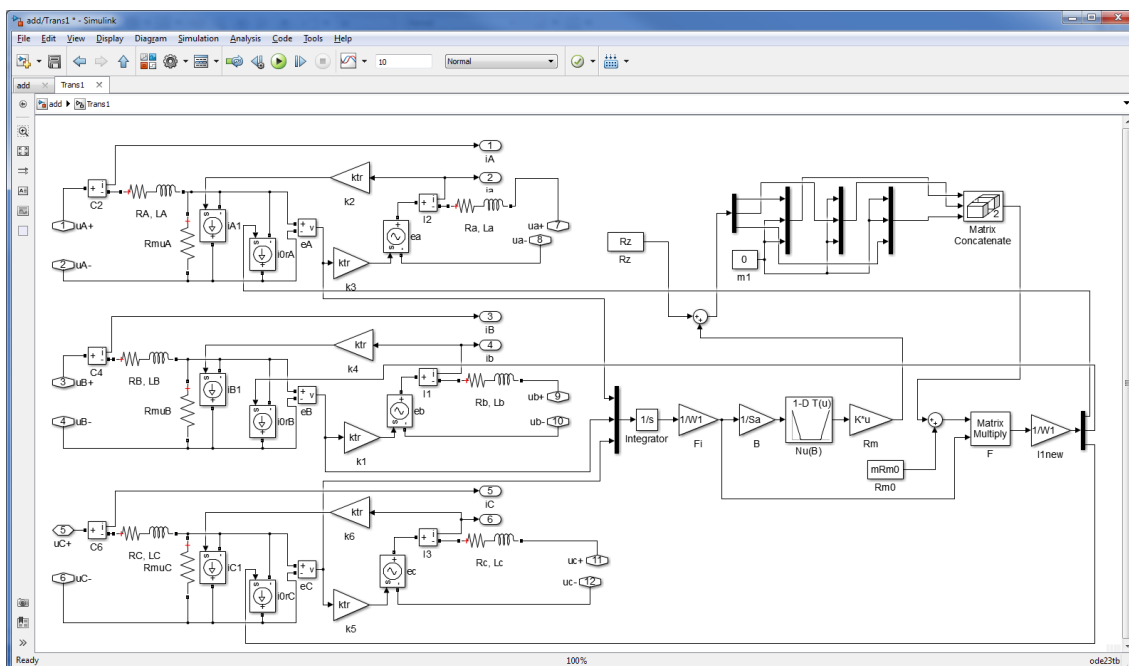


Рис. 9. Схема динамической модели трехфазного трансформатора в MatLab Simulink SimPowerSystem

Затем рассчитывается первое приближение сопротивлений ветвей намагничивания фаз:

$$R_{muk} = \frac{U_1^2}{P_{0k}}. \quad (10)$$

Подставляем данные сопротивления в соответствующие ветви на схеме рис. 9 и рассчитываем модель в режиме включения трансформатора на XX. По результатам расчета активных составляющих токов XX в фазах трансформатора в установившемся режиме, которые в данном случае будут иметь несинусоидальный характер, рассчитываем усредненные за период потери (расчет осуществляется в серии полевых расчетов при найденных мгновенных значениях токов фаз):

$$P_{0k} = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^n \left(\gamma a_c k_p^e k_p^u \sum_{i=1}^{N_{sk}} p(B_{mikj}) S_{\Delta ik} + \right. \\ \left. + 2\sqrt{2} S_a p_3 \left(\frac{B_{mikj}}{\sqrt{2}} \right) \right) \Delta t_j, \quad (11)$$

где n – количество шагов интегрирования на периоде; Δt_j – j -й шаг интегрирования.

После этого по (10) вычисляем уточненные значения сопротивлений ветвей намагничивания фаз, которые подставляем в модель цифрового двойника трансформатора, схема которого изображена на рис. 9.

В проектировании цифровой двойник в рассмотренной здесь версии может использоваться на стадии поверочного расчета. Однако КЭ-модель с приведенными здесь допущениями может использоваться также и при построении функции цели оптимизации трансформатора. При этом на каждом шаге поиска при обращении к функции цели осуществляется полная перестройка КЭ-модели трансформатора по тем размерам, которые определяются текущими значениями варьируемых параметров, с последующим расчетом магнитного поля и использованием результатов данного расчета при вычислении конкретных критериев целевой функции.

Для этого был создан параметрический генератор КЭ-модели силового трансформатора, который позволяет автоматически генерировать серии полевых моделей по заданному списку величин, определяющих как геометрию расчетной области, так и конструкцию трансформатора (стержневая, бронестержневая, витая или пространственная конструкция магни-

топровода, разные типы обмоток и т.п.) аналогично тому, как это было реализовано в [13] для решения задачи оптимизации конструкции коллекторной машины. Поиск оптимального решения при этом осуществляется с использованием генетического алгоритма, позволяющего успешно справиться с проблемой дискретности и разрывности целевой функции.

В такой постановке задача оптимизация полностью соответствует понятию порождающего проектирования.

Результаты исследований. В качестве результатов проведенного исследования рассмотрим решение задачи включения трансформатора на XX при условии, что перед этим в трансформаторе произошло трехфазное короткое замыкание и под действием электродинамических усилий магнитопровод несколько деформировался.

Например, примем, что верхнее ярмо сместилось таким образом, что зазоры в стыках стержней с верхним ярмом стали составлять соответственно 0,1 мм, 1 мм и 2 мм (исходный зазор составлял 0,1 мм во всех стыках). Расчет осуществлялся с использованием модели, приведенной на рис. 9.

Результат расчета установившегося тока XX трансформатора до повреждения представлен на рис. 10. Анализ полученных результатов показывает, в частности, что токи XX в двух крайних фазах симметричны друг другу, ток в средней фазе ожидаемо отличается.

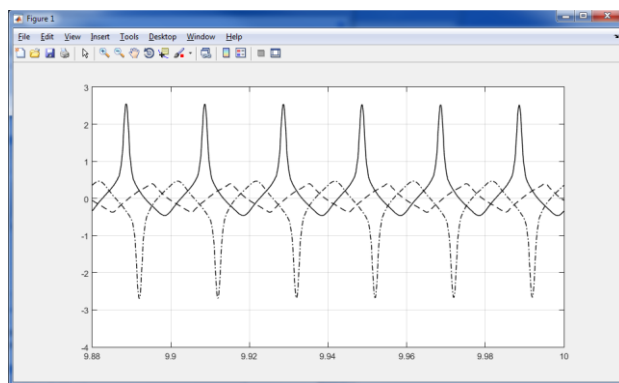


Рис. 10. Установившиеся фазные токи XX в трансформаторе с одинаковыми по стержням технологическими зазорами ($\delta_{тз} = 0,1$ мм)

Для выполнения условий задачи моделирования трансформатора с повреждением по (6) был осуществлен пересчет магнитных сопротивлений технологических

зазоров. Магнитопровод стал несимметричным, что отразилось на кривых включения трансформатора на XX (рис. 11). Для сравнения на рис. 12 кривые токов XX до повреждения (тонкие линии) и после повреждения (толстые линии) наложены друг на друга.

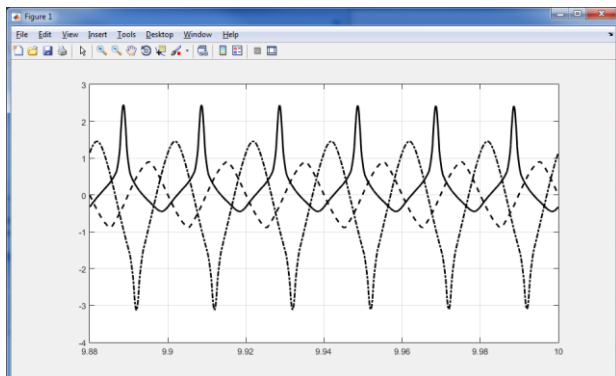


Рис. 11. Установившиеся фазные токи XX в трансформаторе с разными по стержням технологическими зазорами ($\delta_{T31} = 0,1$ мм, $\delta_{T32} = 1$ мм, $\delta_{T33} = 2$ мм)

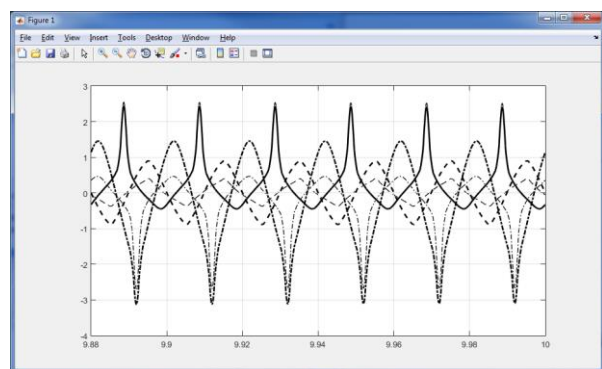


Рис. 12. Сравнение токов XX до повреждение (тонкие линии) и после (толстые линии)

Анализ полученных результатов показывает, что токи в крайних фазах потеряли симметрию друг с другом, при этом амплитуда токов во второй и третьей фазах увеличилась.

Использование цифровых двойников возможно и на стадии контроля качества произведенной продукции. Так, получив реальные осциллограммы токов XX, можно реализовать дефект в модели, подобрав его параметры таким образом, чтобы модельные кривые совпали с осциллограммой. По этим данным можно судить о характере неисправностей трансформатора.

Выводы. Проведенный анализ позволяет сформулировать требования к моделям, которые могут быть положены в ос-

нову цифрового двойника силового трансформатора, а также могут быть использованы в порождающем проектировании трансформатора, обеспечивающем поиск оптимальных вариантов конструкции.

Основное внимание было направлено на отказ от традиционных для таких задач 3D-моделей магнитного поля. Показано, что несколько 2D-моделей способны обеспечить требуемую точность расчетов (не менее 95 %). При этом собственно полевые модели используются только для расчета параметров цепной модели трансформатора, что дает возможность использовать данные модели для имитации различных режимов работы трансформатора с учетом особенностей его конструкции при высоком быстродействии моделей.

Результаты работы могут быть использованы при проектировании силовых трансформаторов в условиях производства и проектных организаций. Кроме того, результаты могут быть использованы при эксплуатации трансформаторов для оценки их повреждений по результатам испытаний без демонтажа.

Список литературы

1. **Национальная** технологическая инициатива [Электронный ресурс] // Агентство стратегических инициатив. – Режим доступа: <https://asi.ru/nti>.
2. **Технологии** порождающего проектирования AutoDesk [Электронный ресурс] // Агентство стратегических инициатив. – Режим доступа: <https://www.pointcad.ru/tehnologii/generative-design>.
3. **Дейнеко Л., Тertyшная Н., Плещевский П.** Порождающее проектирование – инновационный подход к созданию цифрового макета изделия // CAD/cam/cae Observer. – 2018. – № 3(119). – С. 65–68.
4. **Порождающее** проектирование и топологическая оптимизация: перспективы новой технологии [Электронный ресурс] // Агентство стратегических инициатив. – Режим доступа: <http://integral-russia.ru/2018/12/21/porozhdayushhee-proektirovanie-i-topologicheskaya-optimizatsiya-perspektivy-novoj-tehnologii/>
5. **Digital Twin** // ANSYS. URL: <https://www.ansys.com/products/systems/digital-twin/>
6. **Цифровой** двойник (Digital Twin) [Электронный ресурс] // CADFEM. – Режим доступа: <https://www.cadfem-cis.ru/service/digital-twin/>
7. **Digital Twin Modeling with COMSOL® in 18 Minutes** // COMSOL. URL: <https://www.comsol.com/events/webinar/Digital-Twin-Modeling-with-COMSOL-in-18-Minutes-74531>

8. **Романовская О.** Ученые ЮУрГУ разрабатывают цифровой двойник электропривода [Электронный ресурс] // Эксперт online. – Режим доступа: <https://expert.ru/2019/08/6/uchenye-yuurgu-razrabatyvayut-tsifrovoy-dvoynik-elektroprivoda/>

9. **Калявин А.** Новые возможности ANSYS 15.0 для решения задач электромеханики // САПР и графика. – 2014. – № 1. – С. 70–73.

10. **Калявин А.** Моделируем электромагнитное поле в обновленном ANSYS 16.0 // САПР и графика. – 2015. – № 3. – С. 62–67.

11. **Моделирование** электромагнитных процессов при работе силовых трансформаторов под нагрузкой и в режиме холостого хода [Электронный ресурс] / Д.С. Ярымбаш, М.И. Котур, Т.С. Ярымбаш, И.М. Килимник // Problemele energetich regionale. – 2020. – № 1(45). – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-elektromagnitnyh-protsessov-pri-rabote-silovykh-transformatorov-pod-nagruzkoj-i-v-rezhime-holostogo-hoda/viewer>

12. **Тамьярова М.В., Тихонов А.И.** Методика структурно-параметрической оптимизации коллекторных машин с использованием модели магнитного поля и генетического алгоритма // Вестник ИГЭУ. – 2018. – Вып. 5. – С. 46–55.

13. **Шмелев А.С., Пайков И.А., Булатов Л.Н.** Методика организации численного исследования электротехнических устройств с использованием библиотеки конечно-элементного моделирования магнитного поля // Вестник ИГЭУ. – 2014. – Вып. 1. – С. 55–61.

14. **Разработка** нелинейной модели трехфазного трансформатора для исследования влияния несимметрии магнитной системы на работу устройства в произвольных режимах / А.И. Тихонов, А.В. Стулов, А.А. Каржевин, А.В. Подобный // Вестник ИГЭУ. – 2020. – Вып. 1. – С. 22–31.

15. **Тихомиров П.М.** Расчет трансформаторов: учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.

References

1. Natsional'naya tekhnologicheskaya iniciativa [National Technological Initiative]. *Agentstvo strategicheskikh initsiativ* [Agency for Strategic Initiatives]. Available at: <https://asi.ru/nti>.

2. Tekhnologii porozhdayushchego proektirovaniya AutoDesk [AutoDesk generating design technologies]. *Agentstvo strategicheskikh initsiativ* [Agency for Strategic Initiatives]. Available at: <https://www.pointcad.ru/tehnologii/generative-design>.

3. Deyneko, L., Tertyshnaya, N., Plashchanskiy, P. Porozhdayushchee proektirovanie – innovatsionnyy podkhod k sozdaniyu tsifrovogo maketa izdeliya [Generating design – an innovative

approach to creating a digital model of a product]. *CAD/cam/cae Observer*, 2018, no. 3(119), pp. 65–68.

4. Porozhdayushchee proektirovanie i topologicheskaya optimizatsiya: perspektivy novoy tekhnologii [Generative design and topological optimization: prospects for new technology]. *Agentstvo strategicheskikh initsiativ* [Agency for Strategic Initiatives]. Available at: <http://integral-russia.ru/2018/12/21/porozhdayushchee-proektirovanie-i-topologicheskaya-optimizatsiya-perspektivy-novoy-tehnologii/>

5. Digital Twin. ANSYS. Available at: <https://www.ansys.com/products/systems/digital-twin/>

6. Tsifrovoy dvoynik [Digital twin]. *CAD-FEM*. Available at: <https://www.cadfem-cis.ru/service/digital-twin/>

7. Digital Twin Modeling with COMSOL® in 18 Minutes. COMSOL. Available at: <https://www.comsol.com/events/webinar/Digital-Twin-Modeling-with-COMSOL-in-18-Minutes-74531>

8. Romanovskaya, O. Uchenye YuUrGU razrabatyvayut tsifrovoy dvoynik elektroprivoda [Scientists at SUSU are developing a digital twin for electric drive]. *Expert online*. Available at: <https://expert.ru/2019/08/6/uchenye-yuurgu-razrabatyvayut-tsifrovoy-dvoynik-elektroprivoda/>

9. Kalyavin, A. Novye vozmozhnosti ANSYS 15.0 dlya resheniya zadach elektromekhaniki [New features of ANSYS 15.0 for solving problems of electromechanics]. *SAPR i grafika*, 2014, no. 1, pp. 70–73.

10. Kalyavin, A. Modeliruem elektromagnitnoe pole v obnovlennom ANSYS 16.0 [Modeling the electromagnetic field in the updated ANSYS 16.0]. *SAPR i grafika*, 2015, no. 3, pp. 62–67.

11. Yarymbash, D.S., Kotsur, M.I., Yarymbash, T.S., Kilimnik, I.M. Modelirovanie elektromagnitnykh protsessov pri rabote silovykh transformatorov pod nagruzkoj i v rezhime kholostogo khoda [Modeling of electromagnetic processes in power transformers under load and in idle mode]. *Problemele energetich regionale*, 2020, no. 1(45). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-elektromagnitnyh-protsessov-pri-rabote-silovykh-transformatorov-pod-nagruzkoj-i-v-rezhime-holostogo-hoda/viewer>

12. Tam'yarova, M.V., Tikhonov, A.I. Metodika strukturno-parametricheskoy optimizatsii kollektornykh mashin s ispol'zovaniem modeli magnitnogo polya i geneticheskogo algoritma [Method of structural-parametric optimization of collector machines using a magnetic field model and a genetic algorithm]. *Vestnik IGEU*, 2018, issue 5, pp. 46–55.

13. Shmelev, A.S., Paykov, I.A., Bulatov, L.N. Metodika organizatsii chislennogo issledovaniya elektrotekhnicheskikh ustroystv s ispol'zovaniem biblioteki konechno-elementnogo modelirovaniya magnitnogo polya [Numerical study of electrical

engineering devices using a magnetic field finite element modeling library]. *Vestnik IGEU*, 2014, issue 1, pp. 55–61.

14. Tikhonov, A.I., Stulov, A.V., Karzhev, A.A., Podobnyy, A.V. Razrabotka nelineynoy modeli trekhfaznogo transformatora dlya issledovaniya vliyaniya nesimmetrii magnitnoy sistemy na rabotu ustroystva v proizvol'nykh rezhimakh [De-

velopment of a non-linear model of a three-phase transformer to study the effect of asymmetry of the magnetic system on the operation of the device in arbitrary modes]. *Vestnik IGEU*, 2020, issue 1, pp. 22–31.

15. Tikhomirov, P.M. *Raschet transformatorov* [Calculation of transformers: a textbook for universities]. Moscow: Energoatomizdat, 1986. 528 p.

Тихонов Андрей Ильич,

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

Tikhonov Andrey Ilyich,

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

Стулов Алексей Вадимович,

ООО «Трансформер», кандидат технических наук, заместитель генерального директора по техническому развитию, e-mail: alxstl@mail.ru

Stulov Alexey Vadimovich,

Transformer LLC, PhD in Engineering, Deputy Director General for Technical Development, e-mail: alxstl@mail.ru

Снитко Ирина Сергеевна,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», старший преподаватель, e-mail: irant-kin@yandex.ru

Snit'ko Irina Sergeevna,

Ivanovo State Power Engineering University, Senior Lecturer, e-mail: irant-kin@yandex.ru

Подобный Александр Викторович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант, e-mail: aleksandr.rash@mail.ru

Podobny Alexander Viktorovich,

Ivanovo State Power Engineering University, PhD student, e-mail: aleksandr.rash@mail.ru

УДК 621.313.333

РАЗРАБОТКА МНОГОКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОФАЗНЫМ СИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С УЛУЧШЕННЫМИ ВИБРОШУМОВЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

А.Н. ГОЛУБЕВ, В.Г. БЕЛОНОВ

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: Belonogovvladimir@vk.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. Ужесточающиеся требования к характеристикам электромеханических систем включают в себя задачу улучшения виброшумовых показателей электропривода. В настоящее время эта задача решается в основном в рамках традиционных трехфазных систем управления. Новые возможности ее решения открывает переход на многофазный вариант построения электропривода. Целью исследования является улучшение виброшумовых характеристик электропривода за счет разработки системы многофазного управления, обеспечивающей целенаправленное формирование конфигурации поля в зазоре многофазной электрической машины.

Материалы и методы. Для проведения исследований использована модель многофазного синхронного двигателя, учитывающая пространственную несинусоидальность распределения поля в зазоре. Модель позволяет представить структуру двигателя как объекта управления в виде совокупности параллельных подструктур, число которых зависит от числа фаз.

Результаты. Предложена методика конструкторского проектирования синхронного двигателя при произвольном числе фаз обмотки на базе полевой модели машины. Корректность получаемых с помощью методики результатов обеспечивается учетом реальной геометрии магнитопровода и насы-

щения стали. Предложена многоканальная система управления электроприводом, отличающаяся целенаправленным формированием конфигурации поля в зазоре многофазной электрической машины. Разработана расчетная модель электропривода, сочетающая в себе полевую модель двигателя и систему управления. Модель двигателя реализована в программном комплексе EICut, модель системы управления – в комплексе MatLab (Simulink).

Выводы. По сравнению с традиционным трехфазным исполнением электропривода при синусоидальном питающем напряжении, предложенные варианты формирования поля в зазоре синхронного двигателя обеспечивают уменьшение пондеромоторной силы на 8–14 %. Инженерную методику проектирования m -фазного синхронного двигателя с постоянными магнитами и структуру многоканальной САУ предлагается использовать при разработке электроприводов с улучшенными виброшумовыми характеристиками.

Ключевые слова: синхронный электропривод, многофазный двигатель, виброшумовые характеристики, программный комплекс EICut, многоканальная система управления электроприводом

THE DEVELOPMENT OF MULTI-CHANNEL CONTROL SYSTEM FOR A MULTI-PHASE SYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE WITH IMPROVED VIBRATION NOISE CHARACTERISTICS

A.N. GOLUBEV, V.G. BELONOGOV

Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

E-mail: Belonogovvladimir@vk.ispu.ru

Abstract

Background. Constantly increasing requirements for the performance of electromechanical systems include the task of improving the vibration and noise characteristics of the electric drive. Currently, this problem is solved mainly by using traditional three-phase systems. The transition to a multiphase version of the electric drive construction opens up new opportunities for its solution. The aim of the study is to improve the vibration and noise characteristics of the electric drive through the development of a multiphase control system that provides targeted formation of the field configuration in the gap of a multiphase electric machine.

Materials and methods. To conduct the research, the model of a multiphase synchronous motor proposed by the authors was used. The model considers the spatial non-sinusoidality of the field distribution in the gap and enables to represent the engine as a set of parallel substructures, the number of which depends on the number of phases.

Results. The technique to design a synchronous motor with an arbitrary number of winding phases based on the field model of the machine has been proposed. The correctness of the results obtained is ensured by the real geometry of the magnetic circuit and steel saturation. The multi-channel control system of the electric drive, characterized by the targeted formation of field configuration in the gap of a multiphase electric machine has been proposed. The calculation model of the electric drive has been developed. The model combines the field model of the engine and the control system. The engine model is implemented in the EICut software package, the control system model is implemented in the MatLab (Simulink) complex.

Conclusions. Compared to the traditional three-phase design of the electric drive with a sinusoidal supply voltage, the options for forming a field in the gap of a synchronous motor considered in the article provide a reduction in ponderomotive force by 8–14 %. The engineering methodology for designing an m -phase synchronous permanent magnet motor with permanent magnets and the structure of the multi-channel control system can be applied when developing electric drives with improved vibration and noise characteristics.

Key words: synchronous electrical drive, multiphase drive, vibronoise characteristics, EICut software package, multi-channel control system for electric drive

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.3.043-050

Введение. Перспективным вариантом построения современной электромеханической системы является ее реализация на основе исполнительного синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ). Эти машины имеют относительно простую кон-

струкцию, отличаются высокой надежностью, в течение длительного времени (от 5 до 10 лет, а в космической промышленности 15 лет и более) сохраняют первоначальные магнитные характеристики

[1, 2, 3]¹. Уже очевидно, что улучшение характеристик и увеличение удельной мощности таких машин дает значительный экономический эффект и при этом область их применения постоянно расширяется. Благодаря своим высоким эксплуатационным характеристикам они являются наиболее перспективными электрическими машинами в диапазоне малых и средних мощностей, особенно для моментных систем электропривода (ЭП), как уже отмечалось, конструктивно просты, надежны, имеют абсолютно жесткие механические характеристики и не требуют затрат энергии на возбуждение.

Один из вопросов, который необходимо решать при создании ЭП с улучшенными технико-экономическими показателями, является улучшение его виброшумовых характеристик. Как показывает практика и анализ литературы [4], этому вопросу уделяется самое пристальное внимание. Задача устранения шума связана как с физиологией человека, то есть стремлением создать наиболее комфортные условия труда работнику или бесшумную среду пользователю, так и с чисто технико-экономическими факторами, такими как надежность и срок службы, ведь известно, что любой шум вызван вибрацией частей машины. Вибрирующие части испытывают большее механическое напряжение и в большом числе случаев являются причиной отказов и уменьшения гарантированного срока эксплуатации машин. Кроме того, электрические машины, как правило, работают в комплексе с другими устройствами и механизмами, вибрации электрических машин могут быть причиной вибрации всего агрегата.

Материалы и методы. *Магнитные шумы.* Источником магнитного шума являются магнитные силы, изменяющиеся во времени и пространстве и действующие между активными частями машины. В случае синхронных машин – это тангенциальные и радиальные магнитные силы, действующие между статором и ротором, изменяющиеся во времени и пространстве [5].

Переход на увеличенное число фаз ($m > 3$) статорной обмотки двигателей переменного тока, в частности СДПМ, помимо улучшения основных энергетических и

регулируемых характеристик ЭП [5] позволяет эффективно решать обозначенную выше задачу путем целенаправленного формирования геометрии поля в зазоре машины. Следует указать, что многофазный вариант построения ЭП автоматически снижает вибрации и шумы, вызванные тангенциальными силами, обусловленными пульсациями электромагнитного момента. Это связано с устранением из спектра поля асинхронных пространственных гармоник [6]. Вместе с тем увеличение числа фаз без принятия специальных дополнительных мер по формированию конфигурации поля не решает задачи уменьшения радиальных сил, действующих между статором и ротором и вызывающих изменяющуюся во времени деформацию статорного кольца, что и является причиной соответствующих ей шумов. Радиальная сила пропорциональна квадрату индукции в воздушном зазоре. Из этого следует, что оптимальной в указанном отношении формой распределения поля в зазоре является меандр или трапецеидальная. Выражения для ортогональных составляющих магнитной индукции в зазоре и соответствующих им сил достаточно просто могут быть получены из упрощенной модели машины, базирующейся на использовании допущений о гладком (равномерном) воздушном зазоре, т.е. отсутствии зубчатости сердечника статора, а также отсутствии насыщения [6, 7].

Программа моделирования. Для корректного анализа данного вопроса необходимо оперировать с адекватной математической моделью СДПМ, учитывающей реальную геометрию магнитопровода и пространственное распределение обмотки, а также насыщения стали. Такой подход может быть реализован на использовании современных программных средств, к которым относится отечественный интерактивный программный комплекс ElCut. Важным достоинством этого комплекса является то, что в данной среде достаточно просто создать собственные настройки с использованием любого языка программирования. Эти возможности были реализованы с использованием программного языка Visual C++ для написания прикладного программного продукта EngineBuilder.exe. Структура программы включает в себя следующие функциональные блоки: расчетный блок; блок построения полевой модели ЭП; блок те-

¹ Статьи от компании Danfoss в сфере промышленности. Синхронные двигатели с постоянными магнитами. <https://drives.ru/tipy-dvigately/sinhronnye-dvigately-s-magnitami/> (дата обращения: 18.03.2020).

стирования модели; блок создания системы управления MatLab (Simulink).

Расчетный блок реализует расчет в интерактивном режиме геометрии m -фазного СДПМ на основе заданных технических требований на проектирование. При расчете используются методика и расчетные соотношения, изложенные в [8, 9].

Важной составляющей является задание исходных данных для проектирования (рис. 1). Актуальность такого проектирования связана с тем, что в настоящее время у нас отсутствует промышленное производство m -фазных ($m > 3$) СДПМ.

Шаг 1-1. Общие параметры

НОМИНАЛЬНЫЙ МОМЕНТ	24
НОМИНАЛЬНЫЙ ФАЗОВЫЙ ТОК	29.2
ЧАСОТА ПИТАНИЯ	50
ЧИСЛО_ПАР_ПОЛЮСОВ	2
УГОЛ НАГРУЗКИ	0.2
КПД	0.96
ЧИСЛО_ФАЗ_ДВИГАТЕЛЯ	3
МАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ МАГНИТА	1.17
КОЭРЦИТИВНАЯ СИЛА ПО ИНДУКЦИИ МАГНИТА	800000

Шаг 1-2. Параметры ротора

КОЭФФИЦИЕНТ ИНДУКЦИИ ПРИ ХОЛОСТОМ ХОДЕ	0.6
КОЭФФИЦИЕНТ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ	0.735
КОЭФФИЦИЕНТ РАССЕИВАНИЯ ХОЛОСТОГО ХОДА	1.15
КОЭФФИЦИЕНТ ПАДЕНИЯ МАГНИТНОГО НАПРЯЖЕНИЯ	1.15
КОЭФФИЦИЕНТ ПРИВЕДЕНИЯ МДС РЕАКЦИИ ЯКОРЯ	0.85
КОЭФФИЦИЕНТ УДАРНОСТИ	1.2
КОЭФФИЦИЕНТ ФОРМЫ ПОЛЯ	1.11
КРАТНОСТЬ ТОКА КЗ	6
КОЭФФИЦИЕНТ ЗАПОЛНЕНИЯ МАГНИТА	0.558

Шаг 1-3. Параметры ротора

СООТНОШЕНИЕ ДЛИНЫ К ДИАМЕТРУ МАГНИТА	1.11
КОЭФФИЦИЕНТ ЗАПАСА НА ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАГНИТА	1.25
КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЮСНОГО ПЕРЕКРЫТИЯ	0.986
ВЫСОТА БАШМАКА	0
ОБМОТОЧНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ	0.945
КОЭФФИЦИЕНТ ДИАМЕТРА ВТУЛКИ	0.44
СООТНОШЕНИЕ ШИРИНЫ БАШМАКА К ПОЛЮСУ	0.993

Шаг 1-4. Параметры статора

ЧИСЛО_ПАЗОВ_НА_ПОЛЮС_И_ФАЗУ	1.5
ЧИСЛО ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЕТВЕЙ ОБМОТКИ	1
ЧИСЛО ПРОВОДНИКОВ В ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЕТВЯХ	8
ДОПУСТИМАЯ ПЛОТНОСТЬ ТОКА В ВЕТВИ	575
КОЭФФИЦИЕНТ ДИАМЕТРА ИЗОЛИРОВАННОГО ПРОВОДА	1.08
КОЭФФИЦИЕНТ ЗАПОЛНЕНИЯ ПАЗА	0.53
ИНДУКЦИЯ ЗУБЦА	1.14

Шаг 1-5. Параметры статора

КОЭФФИЦИЕНТ ЗАПОЛНЕНИЯ ПАКЕТА СТАТОРА	0.95
ДОПУСТИМАЯ ИНДУКЦИЯ СПИНКИ СТАТОРА	1.5
ВЫСОТА ШЛИЦА	0.07
ВЫСОТА КЛИНА	0.07
СООТНОШЕНИЕ ШИРИНЫ ШЛИЦА К ПАЗУ	0.5

Рис. 1. Задание основных энергетических характеристик и геометрии СДПМ

Определение свойств активных материалов (рис. 2) реализовано на этапе задания на двигатель (шаги 1–6), причем

проектировщик может воспользоваться как библиотекой свойств материалов, так и задать свои исходные данные, а может и вообще не учитывать нелинейность свойств материалов, решая линейную задачу и, соответственно, ускоряя процессы вычислений.

На основе исходных данных производится расчет основных параметров СДПМ и задание на создание модели в среде EICut.

Шаг 1-6. Материалы

МАТЕРИАЛ_МАГНИТА	Магнит	Добавить
МАТЕРИАЛ_СТАТОРА	Сталь	
МАТЕРИАЛ_РОТОРА	Сталь	
МАТЕРИАЛ_БАШМАКОВ	Сталь	

Добавление нового матери...

Название материала: Магнитная проницаемость

тип: 1

тип: 1

☐ Нелинейный материал

Коэрцитивная сила

Значение: 0

Угол (градусы): 0

Добавить

Свойства материала - MAGNET.1

Общие

Магнитная проницаемость

☒ Постоянная проницаемость

Коэрцитивная сила материала

Величина: 100000 (А/м)

Направление: 0 (градус)

Зависит от температуры: ☐ Да ☒ Нет

Источники поля

$i = 0$ (А/м)

☐ Постоянный ток ☒ Переменный ток

☐ Постоянное напряжение ☒ Переменное напряжение

OK Отмена Справка

Свойства материала - STATOR

Общие

Магнитная проницаемость

☒ Постоянная проницаемость

Коэрцитивная сила материала

Величина: 0 (А/м)

Направление: 0 (градус)

Зависит от температуры: ☐ Да ☒ Нет

Источники поля

$i = 0$ (А/м)

☐ Постоянный ток ☒ Переменный ток

☐ Постоянное напряжение ☒ Переменное напряжение

OK Отмена Справка

Шаг 2-1. Основные расчеты

НОМИНАЛЬНАЯ ЧАСТОТА ВРАЩЕНИЯ	1500
УГЛОВАЯ СКОРОСТЬ ВРАЩЕНИЯ	157.0796
НОМИНАЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ	3084.3247
НОМИНАЛЬНОЕ ФАЗНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ	37.4222
ИНДУКЦИЯ ПРИ ХОЛОСТОМ ХОДЕ	0.702
НАПРЯЖЕННОСТЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ	588000

Шаг 2-2. Расчет ротора

ОБЪЕМ МАГНИТА	294.2141
ДИАМЕТР МАГНИТА	9.1098
ДЛИНА МАГНИТА	10.1119
ДЛИНА РОТОРА	10.1119
ДИАМЕТР РОТОРА	9.1098
ВЫСОТА ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА	0.2095
ДЛИНА СРЕДНЕЙ МАГНИТНОЙ ЛИНИИ	9.825
ПОЛЮСНОЕ ДЕЛЕНИЕ РОТОРА ПО МАГНИТУ	7.1548

Шаг 2-3. Расчет ротора

ДЛИНА ДУГИ ПОЛЮСНОГО БАШМАКА	7.1047
ШИРИНА ПОЛЮСНОЙ ДУГИ	7.0547
ШИРИНА МАГНИТА	6.3704
ПЛОЩАДЬ СЕЧЕНИЯ МАГНИТА	7.274
ЛИНЕЙНАЯ НАГРУЗКА НА МАГНИТ	40467.7636
ВЫСОТА МАГНИТА	1.1853
ВНУТРЕННИЙ ДИАМЕТР МАГНИТА	6.7392
ДИАМЕТР ВТУЛКИ	2.9652

Шаг 2-4. Расчет статора

ПЛОЩАДЬ_ПОВЕРХНОСТИ_МАГНИТА	71,3358
МАГНИТНЫЙ_ПОТОК_В_ЗАЗОРЕ	0,0044
НОМИНАЛЬНАЯ_ЭДС_ХОЛОСТОГО_ХОДА	57,9421
ЧИСЛО_ВИТКОВ_В_ФАЗЕ	63,4253
ЧИСЛО_ПАЗОВ_СТАТОРА	18
ЧИСЛО_ПРОВОДНИКОВ_В_ПАЗУ	169,1341
ПЛОЩАДЬ_СЕЧЕНИЯ_ПРОВОДА	0,0063

Шаг 2-5. Расчет статора

ДИАМЕТР_ПРОВОДА	0,0899
ДИАМЕТР_ПРОВОДА_С_ИЗОЛЯЦИЕЙ	0,0971
ПЛОЩАДЬ_СЕЧЕНИЯ_ПРОВОДА_С_ИЗОЛЯЦИЕЙ	0,0074
ПЛОЩАДЬ_ПАЗА	2,3628
ВНУТРЕННИЙ_ДИАМЕТР_СТАТОРА	9,5289
ЗУБЦОВОЕ_ДЕЛЕНИЕ_СТАТОРА	1,6631
ИНДУКЦИЯ_В_ЗАЗОРЕ	0,6104
ШИРИНА_ЗУБЦА	0,9374

Шаг 2-6. Расчет статора

ШИРИНА_ПАЗА_МИН	0,7501
ВЫСОТА_СПИНКИ_СТАТОРА	1,5551
ШИРИНА_ПАЗА_СРЕД	1,1004
ШИРИНА_ПАЗА_МАКС	1,4508
ВЫСОТА_ПАЗА	2,1471
ДИАМЕТР_СТАТОРА_С_ПАЗАМИ	14,1032
ВНЕШНИЙ_ДИАМЕТР_СТАТОРА	17,2134
ШИРИНА_ШЛИЦА	0,3751

Рис. 2. Окно задания свойств материалов

Блок построения модели осуществляет: открытие программного комплекса EICut; отрисовку геометрии; присвоение меток блокам; прописание заданных и расчетных свойств (рис. 3).

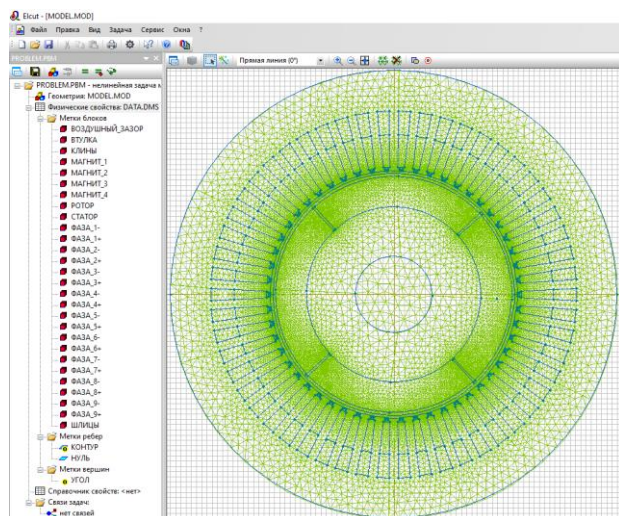


Рис. 3. Окно с расчетной моделью в EICut

Блок тестирования позволяет тестировать как текущую модель, так и модели из библиотеки файлов с различными решениями (рис. 4).

Система управления. Необходимо отметить, что полученные данные применимы к статическому состоянию ЭП. Блок создания системы управления MatLab (Simulink) позволяет получить данные динамических процессов ЭП.

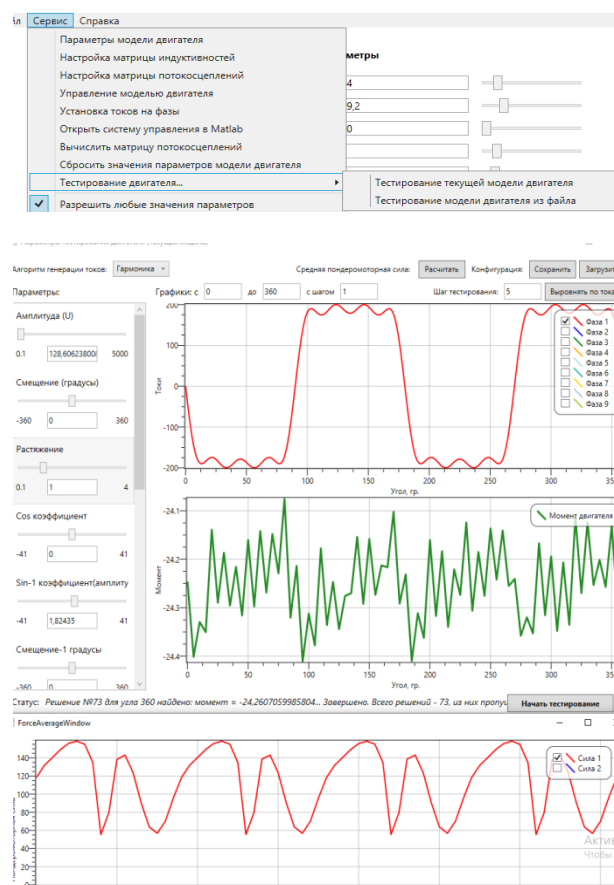


Рис. 4. Окно с результатами тестирования разработанных СДПМ

Специфика многофазного синхронного двигателя с электромагнитным возбуждением заключается в том, что для обеспечения полезной работы высших временных гармоник тока с порядковым номером, меньшим m , за счет создания ими дополнительных постоянных составляющих электромагнитного момента, в отличие от систем с асинхронным двигателем, необходимо существенно усложнять систему управления синхронным ЭП при ограничении его регулировочных возможностей [5]. В этой связи, как показано в [5], целесообразно в качестве исполнительного двигателя использовать СДПМ, когда при обеспечении ортогональной ориентации приведенных спектральных векторов тока статора к продольной оси ротора автоматически обеспечиваются высокие энергетические характеристики. Функциональная схема такой САУ имеет вид (рис. 5). Здесь РС и РТ – регуляторы скорости и ортогональных спектральных составляющих векторов тока статора, приведенных к v -м пространственным гармоникам [5] соответственно. При этом задания на составляющие этих

векторов по продольной оси принимаются равными нулю; БН – блоки нелинейности, реализующие задания на формирование фазных токов СДПМ, обеспечивающих конфигурацию поля в зазоре, снижающую уровень радиальных сил; ПК1 и ПК2 – координатные преобразователи; ВУ – вычислительное устройство, определяющее ортогональные составляющие приведенных спектральных векторов тока статора.

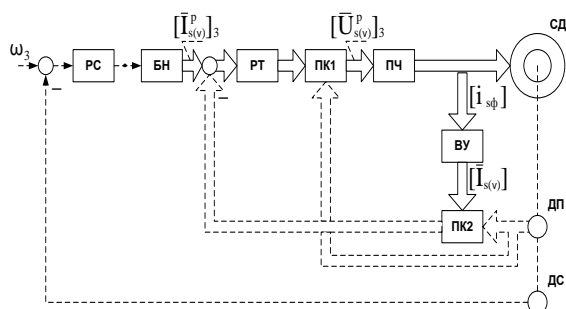


Рис. 5. Функциональная схема синхронного ЭП

Данная функциональная схема реализована на основе представления модели СДПМ как объекта управления в виде математической модели, состоящей из параллельных подструктур, соответствующих соотношениям [6]:

$$\bar{U}_{s(v)}^p = \bar{I}_{s(v)}^p R_s + p \bar{\Psi}_{s(v)}^p + jv\omega \bar{\Psi}_{s(v)}^p;$$

$$\bar{\Psi}_{s(v)}^p = (L_{sI} + L_{m(v)}) \bar{I}_{s(v)}^p + M_{(2v)}^p \bar{I}_{s(v)}^p + M_{f(v)}^p \bar{I}_{m0}^p;$$

$$M_{эм(v)} = \frac{m}{2} z_p v \operatorname{Im} \left\{ M_{(2v)} \bar{I}_{s(v)}^{p2} + \bar{I}_{m0}^p M_{f(v)} \bar{I}_{s(v)}^p \right\};$$

$$M_{эм} = \sum_{v=1} M_{эм(v)},$$

где $\bar{I}_{m0}^p = \text{const}$.

Этим уравнениям в среде MatLab (Simulink) соответствует расчетная схема, приведенная на рис. 6.

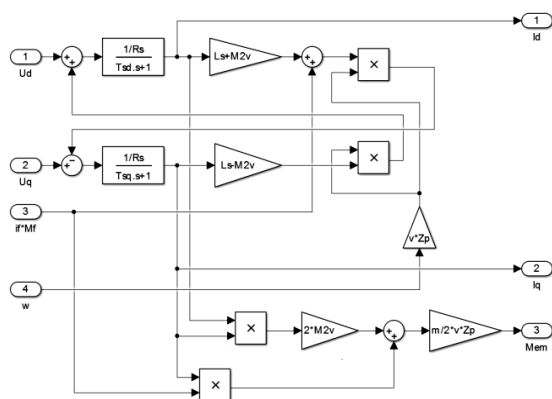


Рис. 6. Расчетная схема СДПМ в среде MatLab (Simulink)

Модель системы управления реализована на базе Simulink, она работает вместе с математической моделью СДПМ (рис. 7).

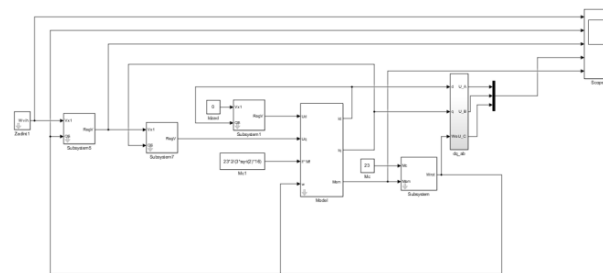


Рис. 7. Модель САУ в среде Simulink

Результаты. Разработанная модель позволяет достаточно удобно исследовать статические и различные динамические режимы синхронного ЭП.

В качестве примера на рис. 8 приведены кривые переходных процессов по скорости и составляющим электромагнитного момента от различных пространственных гармоник при пуске на номинальную скорость 9-фазного СДПМ при номинальной нагрузке.

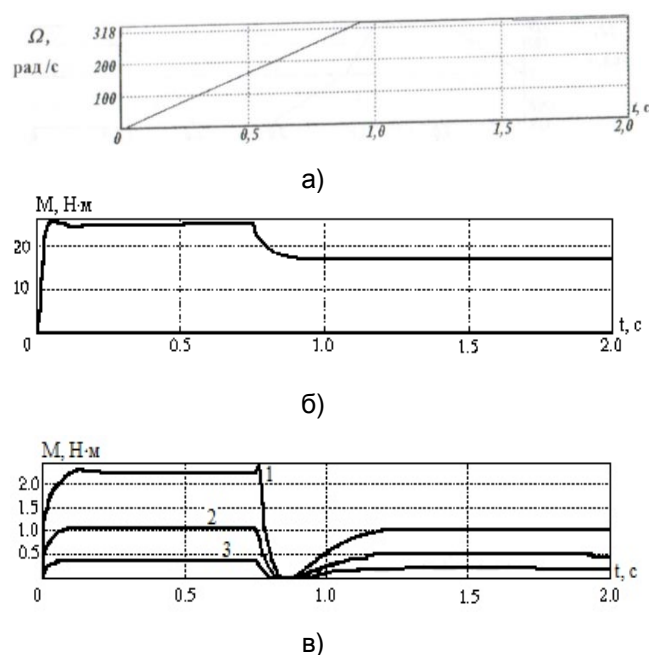


Рис. 8. Кривые переходного процесса при пуске на номинальную скорость 9-фазного ЭП: а – $\omega(t)$; б – $M_{эм(1)}(t)$; в: 1 – $M_{эм(3)}(t)$; 2 – $M_{эм(5)}(t)$; 3 – $M_{эм(7)}(t)$

На рис. 9 приведены некоторые формы фазных токов 9-фазного СДПМ, а на рис. 10 – соответствующие им кривые распределения пндеромоторной силы.

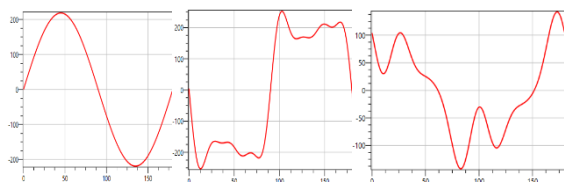


Рис. 9. Формы фазных токов

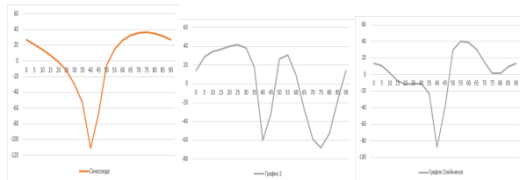


Рис 10. Эпюры пондеромоторной силы

Результаты численного сравнения этих кривых приведены в таблице.

Результаты сравнительного анализа пондеромоторной силы

	Ср. сила	%	Разница, %
Синусоида	133,4	100	0
Трапеция	114,56	85,87	–14,13
Призв. усил. гармоник	123,13	92,3	–7,7

Анализ полученных данных подтверждает положение о необходимости целенаправленного формирования поля для снижения радиальных сил. Так, формирование распределения поля в зазоре, близкого к трапецеидальному, привело к снижению силы, действующей на кольцо статора, а следовательно, и к снижению вибраций на 14 %.

Выводы. Показано, что увеличение числа фаз исполнительного СДПМ является эффективным вариантом реализации ЭП с пониженным уровнем шумов.

Представленный вариант построения синхронного ЭП обеспечивает уменьшение радиальных магнитных сил, его отличительной особенностью является многоканальный, соответствующий числу фаз исполнительного СДПМ принцип построения САУ.

Предложенная инженерная методика проектирования синхронного двигателя с использованием программного комплекса Elcut обеспечивает пользователю возможность осуществлять проектирование и исследование виброшумовых и других электромагнитных характеристик машины с произвольным, а не только с традицион-

ным трехфазным числом фаз статорной обмотки; при этом использование в структуре расчетного модуля полевой модели машины, учитывающей реальную геометрию магнитопровода, пространственное распределение обмотки и насыщение стали, повышает корректность получаемых результатов по исследованию виброшумовых характеристик.

Представленные результаты имитационного моделирования подтверждают эффективность предложенного многоканального принципа построения синхронного ЭП с улучшенными виброшумовыми характеристиками. В сравнении с традиционным трехфазным исполнением ЭП, при синусоидальном питающем напряжении рассмотренные варианты формирования поля в зазоре СДПМ обеспечивают уменьшение пондеромоторной силы на 8–14 %.

Список литературы

1. Левкин Д. Синхронный двигатель с постоянными магнитами. Инженерные решения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://engineeringsolutions.ru/motorcontrol/pmsm/> (дата обращения: 19.03.2020).
2. Павлов О.П. Синхронный двигатель с постоянными магнитами, управляемый при помощи прогнозирующей модели [Электронный ресурс] // Молодой ученый. – 2019. – № 25. – С. 135–138. Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/263/61104/> (дата обращения: 18.03.2020).
3. Meiling Tang, Shengxian Zhuang. On Speed Control of a Permanent Magnet Synchronous Motor with Current Predictive Compensation // Energies, MDPI, Open Access Journal. – 2018. – Vol. 12(1). – P. 1–15.
4. Колосов Ю.В., Барановский В.В. Защита от вибраций и шума на производстве: учеб. пособие. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2011. – 38 с.
5. Синхронный электропривод с улучшенными виброшумовыми характеристиками и его моделирование / С.С. Ананьев, А.Н. Голубев, В.А. Мартынов и др. // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 2. – С. 33–39.
6. Белоногов В.Г., Голубев А.Н., Мартынов В.А. Синхронный электропривод с улучшенными виброшумовыми характеристиками на основе исполнительного синхронного двигателя постоянными магнитами // Вестник ИГЭУ. – 2015. – Вып. 4. – С. 23–27.
7. Геллер Б., Гамата В. Высшие гармоники в асинхронных машинах. – М.: Энергия, 1981. – 352 с.
8. Гольдберг О.Д. Проектирование электрических машин. – М.: Высш. шк., 2006. – 430 с.

9. Проектирование электрических машин / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев. – М.: Юрайт, 2011. – 767 с.

References

1. Levkin, D. *Sinkhronnyy dvigatel' s postoyannymi magnitami. Inzhenernye resheniya* [Permanent magnet synchronous motor. Engineering solutions]. Available at: <https://engineering-solutions.ru/motorcontrol/pmsm/>

2. Pavlov, O.P. Sinkhronnyy dvigatel' s postoyannymi magnitami, upravlyаемый pri pomoshchi prognoziruyushchey modeli [Permanent magnet synchronous motor controlled by predictive model]. *Molodoy uchenyy*, 2019, no. 25, pp. 135–138. Available at: <https://moluch.ru/archive/263/61104/>

3. Meiling, Tang, Shengxian, Zhuang. On Speed Control of a Permanent Magnet Synchronous Motor with Current Predictive Compensation. *Energies*, MDPI, Open Access Journal, 2018, vol. 12(1), pp. 1–15.

4. Kolosov, Yu.V., Baranovskiy, V.V. *Zashchita ot vibratsiy i shuma na proizvodstve* [Vibration and Noise Protection: A Tutorial]. Saint-Petersburg: SPbGU ITMO, 2011. 38 p.

5. Anan'ev, S.S., Golubev, A.N., Martynov, V.A., Belonogov, V.G., Karachev, V.D. Sinkhronnyy elektroprivod s uluchshennymi vibroshumovymi kharakteristikami i ego modelirovanie [Synchronous electric drive with improved vibration and noise characteristics and its modeling]. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 2, pp. 33–39.

6. Belonogov, V.G., Golubev, A.N., Martynov, V.A. Sinkhronnyy elektroprivode s uluchshennymi vibroshumovymi kharakteristikami na osnove ispolnitel'nogo sinkhronnogo dvigatelya postoyannymi magnitami [Synchronous electric drive with improved vibration and noise characteristics based on a synchronous permanent magnet motor]. *Vestnik IGEU*, 2015, issue 4, pp. 23–27.

7. Geller, B., Gamata, V. *Vysshie garmoniki v asinkhronnykh mashinakh* [Higher harmonics in asynchronous machines]. Moscow: Energiya, 1981. 352 p.

8. Gol'dberg, O.D. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [Electrical Machine Design]. Moscow: Vysshaya shkola, 2006. 430 p.

9. Kopylov, I.P., Klovov, B.K., Morozkin, V.P., Tokarev, B.F. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [Electrical Machine Design]. Moscow: Yurayt, 2011. 767 p.

Голубев Александр Николаевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры теоретических основ электротехники и электротехнологий, телефон (4932) 26-99-03, e-mail: alenikgo@yandex.ru

Golubev Alexander Nikolaevich,

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering, Professor, Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering and Electrotechnology, telephone (4932) 26-99-03, e-mail: alenikgo@yandex.ru

Белоногов Владимир Григорьевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», начальник военного учебного центра, телефон (4932) 26-99-19, e-mail: belonogovvladimir@vk.ispu.ru

Belonogov Vladimir Grigorievich,

Ivanovo State Power Engineering University, Head of Military Training Centre, telephone (4932) 26-99-19, e-mail: belonogovvladimir@vk.ispu.ru

МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

УДК 536.2.02

ЯЧЕЕЧНАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ В МНОГОСЛОЙНОЙ СРЕДЕ С ПЕРЕМЕННЫМ ЧИСЛОМ СЛОЕВ¹

В.Е. МИЗОНОВ, А.В. МИТРОФАНОВ, Е.В. БАСОВА, Е.А. ШУИНА
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: mizonov46@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. Теплопроводность является важной составной частью тепловых процессов в энергетике, строительстве, химических технологиях и других отраслях. Теоретическому и экспериментальному исследованию теплопередачи путем теплопроводности посвящено множество исследований. В настоящее время значительное внимание уделяется теплопроводности в среде с подвижными границами, так называемой задаче Стефана. Причиной перемещения границы может быть выгорание материала, его износ, плавление с уносом расплава и другие физико-химические процессы. Аналитические решения задачи Стефана существуют только для далеко идущих упрощений, при которых практическая ценность решений теряется. В связи с этим актуальной научной и практической задачей является разработка эффективных численных методов, которые сочетали бы в себе универсальность и физическую ясность с удобством и простотой использования в инженерной практике.

Материалы и методы. Для решения поставленной задачи используется метод математического моделирования. Модель использует математический аппарат теории цепей Маркова. Она адаптирована к ячеечной модели среды, в которой число ячеек может изменяться согласно тому или иному механизму взаимодействия крайних ячеек с окружающей средой. Перенос теплоты теплопроводностью и тепловые процессы при взаимодействии с тепловыми источниками описаны классическими уравнениями теплового баланса. Изучение влияния параметров на протекание процесса выполнено численными методами.

Результаты. Разработана математическая модель, позволяющая описывать переходные тепловые процессы в многослойной среде с изменяющимся числом слоев. Приведены результаты расчета кинетики теплового процесса в плоской стенке с подвижной границей со стороны действия теплового источника, где причиной перемещения границы считается термическое разложение материала при некоторой критической температуре. Полученные результаты физически не противоречивы и подтверждают работоспособность модели.

Выводы. Выявлен ряд принципиальных отличий теплового процесса в стенках с неподвижной и подвижной границами. Показано, что в стенке с подвижной границей температура в стенке не превосходит критической температуры термического разложения материала за все время существования стенки, а скорость убывания ее размера увеличивается с уменьшением ее толщины.

Ключевые слова: теплопроводность, многослойная среда, цепь Маркова, задача Стефана, переменное число слоев, поле температур, кинетика убывания размера

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №18-08-00028).

A CELL MODEL OF HEAT CONDUCTION IN MULTI-LAYER MEDIUM WITH VARIABLE NUMBER OF THE LAYERS

V.E. MIZONOV, A.V. MITROFANOV, E.V. BASOVA, E.A. SHUINA
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: mizonov46@mail.ru

Abstract

Background. The heat conduction is an important part of heat transfer processes in power engineering, civil engineering, chemical technologies, etc. Variety of researches is devoted to theoretical and experimental study of the heat transfer by the heat conduction. At present, the considerable attention is concentrated on the heat conduction in media with variable boundaries (the so-called Stephan's problem). A reason of a boundary motion can be burning-out of material, its wear, its melting with carry-over of a melt, other physico-chemical processes. Analytical solutions to the Stephan's problem exist only after far-going assumptions, which lead to the loss of their practical value. The development of effective numerical methods of its solution becomes an actual scientific and practical problem. Such methods are to combine universality and physical clearness and convenience for engineering practice.

Materials and methods. In order to solve the problem, the method of mathematical modeling is used. The model uses the mathematical tools of the theory of Markov chains. It is adapted to the cell model of a medium, in which the number of cells can vary due to this or that mechanism of the edge cells interaction with outside medium. The heat transfer by the heat conduction and the heat interaction with the heat sources are described by the classical heat balance equations. The study of the influence of parameters on the process is performed by numerical methods.

Results. A mathematical model that allows describing transient heat processes in a multi-layer medium with variable number of layers is developed. The results of heat process calculation inside a plane wall with the moving boundary from the heat source side due to the boundary thermal destruction at a certain critical temperature are presented. The obtained results are physically consistent and approve the model workability.

Conclusions. The principle differences between the heat processes in the walls with immovable and movable boundaries are found. It is shown that the temperature in a wall with moving boundary does not overbalance the critical temperature of the thermal distraction when the wall still exists, and the rate of the wall dimension decrease is growing with its dimension decrease.

Key words: heat conduction, multi-layer medium, Markov chain, Stephan's problem, variable number of layers, temperature field, kinetics of dimension decrease

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.3.051-057

Состояние вопроса. Задача о моделировании теплопроводности в среде с подвижной границей (так называемая задача Стефана) возникает в ряде теплофизических процессов в теплоэнергетике, химической промышленности и других отраслях. Например, при сжигании угля в топках кипящего слоя прогрев и горение частиц сопровождается уменьшением их размера, вызванным их износом и протекающими реакциями. Другим примером является плавление частиц, когда расплав периферийного материала удаляется в виде капельной жидкости.

Теоретическому исследованию нестационарной теплопроводности посвящено большое количество работ. В [1] описано аналитическое решение задачи теплопроводности в плоской прямоугольной пластине, на которую действует ло-

кальный тепловой источник, перемещающийся по эллиптической траектории. Такая траектория единственно возможная для получения аналитического решения. Для его получения использован метод функции Грина. Однако ни изменение геометрии, ни изменение свойств пластины в [1] не рассматривается. Применение метода Петрова-Галеркина к решению аналогичной задачи представлено в [2]. Здесь задача решается применительно к процессу сварки. Но основным объектом исследования являются не физические особенности процесса, а изучение влияния количества узловых точек на точность решения. В [3] представлено аналитическое и численное решение задачи теплопроводности при нагреве пластины лазерным источником, но снова переменность свойств и геометрии объекта остаются за

пределами задачи. В свете рассмотрения многослойных сред интересны результаты, полученные в [4], где рассмотрена нестационарная теплопроводность в двухслойном материале с неидеальным контактом между слоями. Для поиска аналитического решения использован метод Фурье, для чего функция источника в уравнении теплопроводности также раскладывается в ряд Фурье. Несмотря на то, что сам метод хорошо известен, полученное решение было эффективно использовано для экспериментального исследования термического сопротивления контакта между слоями. Аналитический метод расчета температурного поля в полубесконечном теле, вызванного тепловым источником, движущимся с переменным направлением по его поверхности, описан в [5]. Но и здесь, кроме движения собственно источника, никакие другие нестационарные процессы не рассматриваются. Позднее, в [6], в модель был введен процесс плавления, но только как локальный фактор, изменяющий теплоотдачу от источника к телу, но не изменяющий его конфигурацию. Теоретическое и экспериментальное исследование плавления тонкой проволоки описано в [7, 8], где нижний конец проволоки получал теплоту от электрического разряда. Эта задача формально напоминает задачу Стефана, но описанный подход вряд ли применим для рассматриваемой нами задачи. В [9] описано моделирование взрывной реакции, вызываемой движущимся источником теплоты. Однако все внимание уделено мероприятиям по обходу трудностей, связанных с представлением источника дельта-функцией, для чего введен метод движущейся сетки. Исследованию теплопередачи при плавлении около движущегося горизонтального или цилиндрического теплового источника посвящена работа [10]. Здесь общая зона расплава представлена двумя зонами: зоной непосредственного контакта и зоной устойчивого расплава, причем основное внимание уделено контактной зоне, а весь расплав, формирующий геометрию объекта, оставлен без внимания. Таким образом, анализ перечисленных и других работ, несмотря на их несомненную ценность для теории теплопроводности, показывает, что они не могут рекомендовать универсальный и до-

стоверный подход к решению поставленной задачи.

Цикл выполненных нами ранее исследований, обобщенных в [11, 12], показал, что эффективным инструментом для задач рассматриваемого класса является математический аппарат теории цепей Маркова. В [13] описано применение этого подхода к решению задачи Стефана применительно к влаготеплопроводности при намотке ткани на вращающийся цилиндр, где он продемонстрировал полную работоспособность и позволил решить ряд нетривиальных задач оптимизации.

Ниже предлагается обобщение этого подхода на расчетную схему рассматриваемой конфигурации.

Материалы и методы. Не нарушая общности, рассмотрим линейную теплопроводность в плоской стенке (или в теплоизолированном по боковой поверхности стержне), левый край которой теплоизолирован, а на правый край действует тепловой источник известной постоянной мощности. Расчетная схема модели показана на рис. 1.

Полная толщина стенки L разбита на m ячеек малой, но конечной длины $\Delta x = L/m$, внутри которых все теплофизические свойства и параметры считаются распределенными равномерно. Поперечное сечение ячеек принято равным условной единице. Левый край стенки ($j = 1$) теплоизолирован, а через правый край ($j = m1$) возможен подвод или отвод теплоты. Все теплофизические свойства ячеек считаются постоянными: ρ – плотность; c – удельная теплоемкость; λ – коэффициент теплопроводности. Параметры теплового состояния ячеек представлены вектор-столбцами размера $m \times 1$: \mathbf{Q} – вектор теплоты; \mathbf{T} – вектор температуры. Тепловое состояние процесса фиксируется в дискретные моменты времени $t_k = (k-1)\Delta t$, где Δt – продолжительность, а k – номер временного перехода, рассматриваемый ниже как дискретный аналог времени.

При достижении правой крайней ячейкой некоторого критического теплового состояния она покидает цепь и ее длина становится на единицу короче. Для определенности будем считать, что критическое состояние – это достижение ячейкой некоторой критической температуры T_{cr} , при которой начинается термическое разложение материала и ячейка опустошается, а

внешний тепловой поток переходит на следующую ячейку (рис. 1).

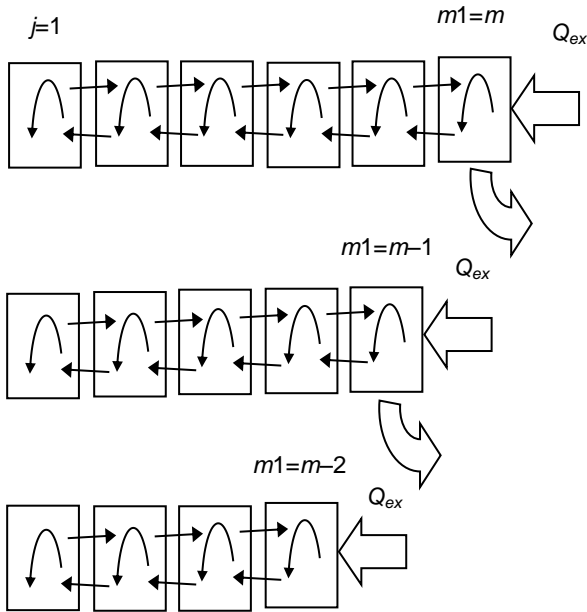


Рис. 1. Схематическое представление процесса теплопроводности через плоскую стенку меняющейся толщины

Эволюция теплового состояния процесса описывается рекуррентным матричным равенством

$$\mathbf{Q}^{k+1} = \mathbf{P}^k \mathbf{Q}^k + \Delta \mathbf{Q}_{\text{ex}}^k, \quad (1)$$

где \mathbf{Q} – вектор теплоты, определяемый для начальной цепи ячеек следующим образом:

$$\mathbf{Q}^k = \begin{Bmatrix} Q_1^k \\ Q_2^k \\ \dots \\ Q_{m-2}^k \\ Q_{m-1}^k \\ Q_m^k \end{Bmatrix}; \quad (2)$$

$\Delta \mathbf{Q}_{\text{ex}}^k$ – вектор внешних источников, который содержит единственный ненулевой элемент в строке с номером ячейки, на которую он действует:

$$\Delta \mathbf{Q}_{\text{ex}}^k(m1) = \alpha(T_{\text{out}} - T_{m1}^k) \Delta t, \quad (3)$$

где T_{out} – температура теплового источника; α – коэффициент теплоотдачи; \mathbf{P} – матрица теплопроводности (матрица переходных вероятностей в терминах теории цепей Маркова), которая описывает перенос теплоты между ячейками путем теплопроводности в течение одного временного перехода. Правила ее построения подробно

описаны в [11]. Для полной первоначальной цепи она имеет вид

$$\mathbf{P}^k = \begin{bmatrix} 1-d & d & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ d & 1-2d & d & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d & 1-2d & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1-2d & d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & d & 1-2d & d \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & d & 1-d \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где

$$d = \frac{\lambda}{c_p} \frac{\Delta t}{\Delta x^2}. \quad (5)$$

Переход от распределения по ячейкам теплоты \mathbf{Q}^k к распределению температуры осуществляется по формуле

$$\mathbf{T}^k = \mathbf{Q}^k / (c_p \Delta x). \quad (6)$$

Если в ячейке $m1 = m$ температура сравнивается с критической ($T_{m1}^k \geq T_{cr}$), то она покидает цепь (первый переход на рис. 1). После этого вектор теплового состояния \mathbf{Q}^k (2) и матрица теплопроводности \mathbf{P}^k (4) претерпевают изменения:

$$\mathbf{Q}^k = \begin{Bmatrix} Q_1^k \\ Q_2^k \\ \dots \\ Q_{m-2}^k \\ Q_{m-1}^k \\ 0 \end{Bmatrix}; \quad (7)$$

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

Аналогично после отделения второй ячейки будем иметь:

$$\mathbf{Q}^k = \begin{Bmatrix} Q_1^k \\ Q_2^k \\ \dots \\ Q_{m-2}^k \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}; \quad (9)$$

$$P^k = \begin{bmatrix} 1-d & d & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ d & 1-2d & d & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d & 1-2d & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1-d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

и так далее. Эта процедура легко алгоритмируется и дает полное решение поставленной задачи.

Результаты. Целью численных экспериментов с моделью было показать ее работоспособность и физическую непротиворечивость. Расчеты выполнены для трехслойной стенки толщиной $L = 0,1$ м, разделенной на $m = 20$ ячеек длиной $0,005$ м. Теплофизические свойства материала приняты следующими: коэффициент теплопроводности материала $\lambda = 0,5$ Вт/м·град, его плотность $\rho = 1000$ кг/м³, его удельная теплоемкость $c = 400$ Дж/кг·град. Начальная температура всех ячеек одинакова и равна $T_j^1 = 20$ °С, температура теплового источника $T_{out} = 100$ °С, критическая температура термического разложения материала $T_{cr} = 40$ °С, коэффициент теплоотдачи от источника к ячейке $\alpha = 20$ Вт/м².

Расчетный анализ процесса целесообразно начать с графика эволюции распределения температуры в стенке постоянной толщины, т. е. в цепи с постоянным числом ячеек $m1 = m = \text{const}$. Для этого в программе расчета достаточно положить критическую температуру выше температуры теплового источника, когда термическое разложение материала не наступает вообще. Эта задача имеет и аналитическое решение, но целесообразно использовать предложенный алгоритм, чтобы получить базу для дальнейшего сравнения. Результаты ее численного решения показаны на рис. 2.

Внешняя ячейка прогревается тепловым источником, затем теплота распространяется внутрь стенки путем теплопроводности. Асимптотически ($k \rightarrow \infty$) вся стенка будет прогрета до температуры теплового источника.

Теперь обратимся к случаю, в котором число ячеек цепи $m1$ меняется с течением времени по мере достижения критической температуры в крайней ячейке и ее удаления (рис. 3). Здесь картина эволюции распределения температуры принципиально меняется.

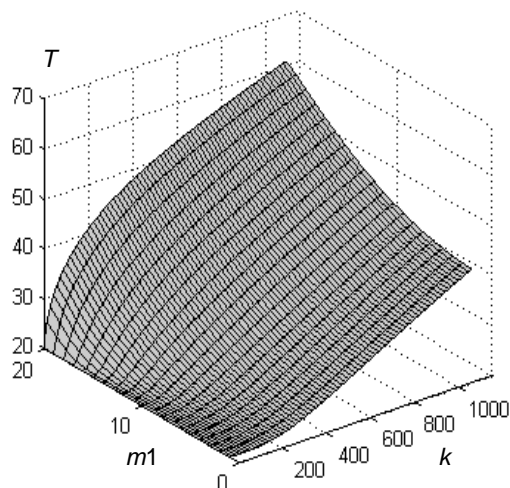


Рис. 2. Эволюция распределения температуры в стенке постоянной толщины

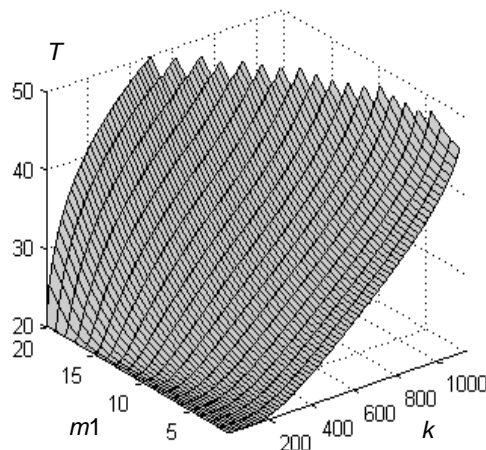


Рис. 3. Эволюция распределения температуры в стенке изменяющейся толщины

Сначала идет относительно долгий прогрев внешней ячейки до критической температуры, после чего она исчезает, а тепловой источник прикладывается к следующей ячейке, которая уже была прогрета на предыдущей стадии процесса. Поэтому времени для ее нагрева до критической температуры требуется меньше. Очевидно, что по мере удаления ячеек на прогрев оставшейся ячейки будет требоваться все меньше и меньше времени, то есть процесс термического разложения стенки будет ускоряться.

Другой особенностью распределения температуры является то, что она по всей глубине стенки никогда не превысит критической температуры, т. е., пока стенка существует, материал, изолирующий стенку с левой стороны, оказывается термически защищенным от действия теплового источ-

ника, правда относительно кратковременно. Этот принцип используется, например, для тепловой защиты спускаемых космических аппаратов путем накладки пластин с выгорающей поверхностью.

На рис. 4 показана кинетика изменения числа ячеек цепи, т. е. толщины пластины. Анализ полученных данных подтверждает, что скорость изменения толщины стенки быстро возрастает по мере убывания ее толщины.

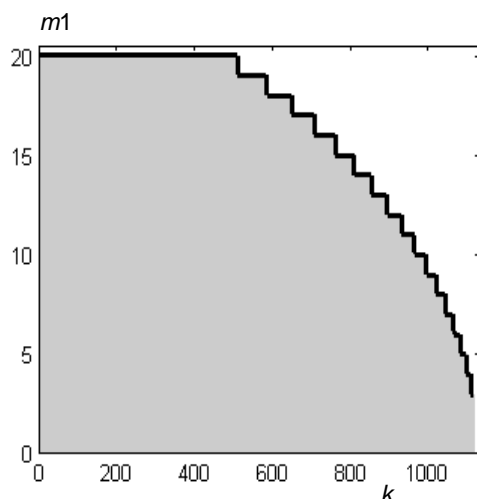


Рис. 4. Изменения толщины стенки с течением времени

Выводы. Таким образом, предложенная математическая модель численного решения задачи Стефана для теплопроводности в среде с подвижной границей основана на теории цепей Маркова с изменяющимся во времени числом ячеек цепи. Модель легко алгоритмизируется и программируется, численные эксперименты с ней требуют незначительных затрат машинного времени. Она носит универсальный характер и допускает подключение разнообразных моделей механизмов сокращения толщины стенки (термическое разложение (выгорание), плавление, износ поверхности и других). Модель апробирована для случая линейной теплопроводности в стенке, одна граница которой теплоизолирована, а на другую – подвижную – действует тепловой источник постоянной мощности. Причиной изменения толщины стенки считается термическое разложение контактирующего с источником слоя при достижении им некоторой критической температуры. Показано, что эволюция распределения температуры в стенке с неподвижной и подвижной границей принципиально отличаются. Если в стенке с неподвижной границей ее температура асимпто-

тически стремится к температуре теплового источника, то в стенке с подвижной границей ее температура никогда не превышает критической температуры разложения материала вплоть до полного его исчезновения. В связи с этим выгорающая стенка может использоваться как эффективное средство кратковременной тепловой защиты поверхностей, причем скорость убывания толщины стенки резко возрастает с уменьшением самой ее толщины.

Список литературы

1. **Kidawa-Kukla J.** Temperature distribution in a rectangular plate heated by a moving heat source // *Int. J. Heat Mass Transf.* – 2008. – Vol. 51. – P. 865–872.
2. **Shibahara M., Atluri S.N.** The meshless local Petrov-Galerkin method for the analysis of heat conduction due to a moving heat source, in welding // *Int. J. Therm. Sci.* – 2011. – Vol. 50. – P. 984–992.
3. **Solutions** for modeling moving heat source in a semi-infinite medium and applications to laser material processing / M. Van Elsen, M. Baelmans, P. Mercelis, J.-P. Kruth // *Int. J. Heat Mass Transf.* – 2007. – Vol. 50. – P. 4872–4882.
4. **Belghazi H., El Ganaoui M., Labbe J.C.** Analytical solution of unsteady heat conduction in a two-layered material in imperfect contact subjected to a moving heat source // *Int. J. Therm. Sci.* – 2010. – Vol. 49. – P. 311–318.
5. **Winczek J.** Analytical solution to transient temperature field in a half-infinite body caused by moving volumetric heat source // *Int. J. Heat Mass Transf.* – 2010. – Vol. 53. – P. 5774–5781.
6. **Winczek J.** New approach to modeling of temperature field in surfaced steel elements // *Int. J. Heat Mass Transf.* – 2011. – Vol. 54. – P. 4702–4709.
7. **Huang L.J., Ayyaswamy P.S., Cohen I.M.** Melting and solidification of thin wires: class of phase-change problems with a mobile interface – I. Analysis // *Int. J. Heat Mass Transf.* – 1995. – Vol. 38. – P. 1637–1645.
8. **Cohen I.M., Huang L.J., Ayyaswamy P.S.** Melting and solidification of thin wires: class of phase-change problems with a mobile interface – II. Experimental confirmation // *Int. J. Heat Mass Transf.* – 1995. – Vol. 38. – P. 1647–1659.
9. **Jingtang Ma, Yingjun Jiang.** Moving mesh methods for blowup in reaction–diffusion equations with traveling heat source // *J. Comput. Phys.* – 2009. – Vol. 228. – P. 6977–6990.
10. **Moallemi M.K., Viskn R.** Analysis of melting around a moving heat source // *Int. J. Heat Mass Trans.* – 1996. – Vol. 29. – P. 1271–1282.
11. **Mizonov V., Yelin N.** Numerical study of melting a rod by a periodically moving local heat

source // Int. J. Therm. Sci. – 2015. – Vol. 97. – P. 1–8. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2015.06.005.

12. **Mizonov V., Yelin N., Sakharov A.** Theoretical study of the thermal state of building envelop in the neighborhood of embedded item // Applied Thermal Engineering. – 2015. – Vol. 79. – P. 149–152.

13. **Modeling** the Moisture Content Distribution over a Rotating Porous Cylinder using Markov Chains / V. Mizonov, V. Zaitsev, V. Volynskii, V. Leznov // Chemical Engineering & Technology. – 2011. – Vol. 34. – P. 1185–1190. doi: 10.1002/ceat.201100015

References

1. Kidawa-Kukla, J. Temperature distribution in a rectangular plate heated by a moving heat source. Int. J. Heat Mass Transf., 2008, vol. 51, pp. 865–872.

2. Shibahara, M., Atluri, S.N. The meshless local Petrov-Galerkin method for the analysis of heat conduction due to a moving heat source, in welding. Int. J. Therm. Sci., 2011, vol. 50, pp. 984–992.

3. Van Elsen, M., Baelmans, M., Mercelis, P., Kruth, J.-P. Solutions for modeling moving heat source in a semi-infinite medium and applications to laser material processing. Int. J. Heat Mass Transf., 2007, vol. 50, pp. 4872–4882.

4. Belghazi, H., El Ganaoui, M., Labbe, J.C. Analytical solution of unsteady heat conduction in a two-layered material in imperfect contact subjected to a moving heat source. Int. J. Therm. Sci., 2010, vol. 49, pp. 311–318.

5. Winczek, J. Analytical solution to transient temperature field in a half-infinite body caused by

moving volumetric heat source. Int. J. Heat Mass Transf., 2010, vol. 53, pp. 5774–5781.

6. Winczek, J. New approach to modeling of temperature field in surfaced steel elements. Int. J. Heat Mass Transf., 2011, vol. 54, pp. 4702–4709.

7. Huang, L.J., Ayyaswamy, P.S., Cohen, I.M. Melting and solidification of thin wires: class of phase-change problems with a mobile interface - I. Analysis. Int. J. Heat Mass Transf., 1995, vol. 38, pp. 1637–1645.

8. Cohen, I.M., Huang, L.J., Ayyaswamy, P.S. Melting and solidification of thin wires: class of phase-change problems with a mobile interface - II. Experimental confirmation. Int. J. Heat Mass Transf., 1995, vol. 38, pp. 1647–1659.

9. Jingtang, Ma, Yingjun, Jiang. Moving mesh methods for blowup in reaction–diffusion equations with traveling heat source. J. Comput. Phys., 2009, vol. 228, pp. 6977–6990.

10. Moallemi, M.K., Viskn, R. Analysis of melting around a moving heat source. Int. J. Heat Mass Transf., 1996, vol. 29, pp. 1271–1282.

11. Mizonov, V., Yelin, N. Numerical study of melting a rod by a periodically moving local heat source. Int. J. Therm. Sci., 2015, vol. 97, pp. 1–8. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2015.06.005.

12. Mizonov, V., Yelin, N., Sakharov, A. Theoretical study of the thermal state of building envelop in the neighborhood of embedded item. Applied Thermal Engineering, 2015, vol. 79, pp. 149–152.

13. Mizonov, V., Zaitsev, V., Volynskii, V., Leznov, V. Modeling the Moisture Content Distribution over a Rotating Porous Cylinder using Markov Chains. Chemical Engineering & Technology, 2011, vol. 34, pp. 1185–1190. doi: 10.1002/ceat.201100015.

Мизонов Вадим Евгеньевич,

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

Mizonov Vadim Evgen'evich,

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

Митрофанов Андрей Васильевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики, e-mail: and2mit@mail.ru

Mitrofanov Andrey Vasil'yevich,

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Applied Mathematics Department, e-mail: and2mit@mail.ru

Басова Елена Владимировна,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», ассистент кафедры высшей математики, e-mail: nowikowa.elena@mail.ru

Basova Elena Vladimirovna,

Ivanovo State Power Engineering University, Assistant of Higher Mathematics Department, e-mail: nowikowa.elena@mail.ru

Шуина Елена Александровна,

ФГБОУВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», доктор технических наук, заведующая кафедрой высшей математики, e-mail: barantseva77@mail.ru

Shuina Elena Aleksandrovna,

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Head of Higher Mathematics Department, e-mail: barantseva77@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ СИСТЕМЫ ГАЗ–ПАР ВНУТРИ КАВИТАЦИОННОГО ПУЗЫРЯ ПРИ РАБОТЕ ОСЕВОГО КЛАПАНА

А.Б. КАПРАНОВА¹, А.Е. ЛЕБЕДЕВ¹, А.М. МЕЛЬЦЕР², С.В. НЕКЛЮДОВ²

¹ ФГБОУВО «Ярославский государственный технический университет»,
г. Ярославль, Российская Федерация

² ЗАО НПО «Регулятор», г. Ярославль, Российская Федерация
E-mail: kapranova_anna@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. Энергетическая промышленная отрасль нуждается в надежной, экологически безопасной регулирующей арматуре, к которой относится категория регулирующих клапанов. Создание условий снижения интенсивности кавитационных эффектов еще на начальных этапах ее развития определяет основную цель исследования для предотвращения возможных негативных последствий развитой кавитации, к числу которых можно отнести эрозию проточных поверхностей элементов указанного оборудования и вибрации, выходящие за рамки эксплуатационных норм. Одним из возможных направлений решения проблемы является применение процесса дросселирования потоков жидкости в рабочем объеме регулирующего устройства. При этом особый интерес вызывает математическое описание механизма образования кавитационных пузырей с позиции системы газ–пар.

Материалы и методы. Для получения аналитических результатов описания поведения системы газ–пар макросистемы кавитационных пузырей использована авторская стохастическая модель процесса образования кавитационных пузырей в проточной части осевого клапана, построенная на основе энергетического метода в рамках равновесного представления состояний энергетически закрытой макросистемы.

Результаты. Указанным способом выполнен анализ зависимости случайной составляющей момента импульса кавитационного пузыря от коэффициента проходной способности клапана и условного диаметра его проходного сечения при различных соотношениях содержания газа и пара внутри образующихся пузырей.

Выводы. Реализация процесса дросселирования потоков жидкости в регулирующем клапане в случае предложенной схемы конструкторского решения узла «сепаратор–внешняя запирающая обечайка» позволяет обеспечить снижение значений случайной составляющей момента импульса кавитационного пузыря с ростом коэффициента проходной способности клапана на различных стадиях открытия сепаратора.

Ключевые слова: осевой клапан, гидравлическая кавитация, кавитационный пузырь, момент импульса, стохастическая энергия, пропускная способность

THE BEHAVIOR OF A GAS–VAPOR SYSTEM INSIDE A CAVITATION BUBBLE DURING AXIAL VALVE OPERATION

A.B. KAPRANOVA¹, A.E. LEBEDEV¹, A.M. MELZER², S.V. NEKLYUDOV²

¹ Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation

² JSC «Regulator», Yaroslavl, Russian Federation

E-mail: kapranova_anna@mail.ru; lae4444@mail.ru; meltzer.a@mail.ru; neklydov.s@nporeg.ru

Abstract

Background. The energy industry needs reliable, environmentally friendly control valves, which include the category of control valves. The creation of conditions for reducing the intensity of cavitation effects at the initial stages of its development determines the main purpose of the study which aims to prevent possible negative consequences of developed cavitation, which in their turn include erosion of the flowing surfaces of the elements of the specified equipment and vibrations that go beyond operating standards. One of the possible ways to solve the problem is to use the process of throttling fluid flows in the working volume of the control device. The particular interest is paid to the mathematical description of the mechanism of formation of cavitation bubbles in terms of gas–vapor system.

Materials and methods. To obtain analytical results for describing the behavior of the gas–vapor system of the macro-system of cavitation bubbles, we used the authoring stochastic model of the cavitation bubbles

formation process in the flow part of the axial valve. The model was constructed on the basis of the energy method in the framework of the equilibrium representation of states of an energetically closed macro-system.

Results. The dependence of the random component of the angular momentum of the cavitation bubble on the flow coefficient of the valve and the conditional diameter of its flow cross section for various ratios of gas and vapor concentration inside the bubbles has been analysed.

Conclusions. The implementation of the process of throttling fluid flows in the control valve using the proposed design solution to the separator–external locking shell allows reducing the random component of the angular momentum of the cavitation bubble and increasing the valve throughput coefficient at various stages of the separator opening.

Key words: axial valve, hydraulic cavitation, cavitation bubble, angular momentum, stochastic energy, throughput

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.3.058-064

Состояние вопроса. Безопасность и эффективность работы регулирующей арматуры являются основными требованиями, которые предъявляются к инженерным методикам при проектировании оборудования специального назначения [1–3]. Учет множества факторов, влияющих на движение транспортируемой жидкости в проточной части регулирующего клапана, как правило, зависит от режима течения среды [4]. Появление кавитационных эффектов относится в данном трубопроводном оборудовании к негативным факторам, связанным с эрозией внутренних поверхностей арматуры и агрессивным шумовым фоном вне санитарных норм ее эксплуатации.

Описание процесса образования кавитационных пузырей в проточной части клапана может составить теоретическую базу при его проектировании [5]. При этом отметим, что в последнее время превалируют модели с численными результатами, требующие трудоемкой операции валидации [6–8], однако развитие методов получения аналитических зависимостей для основных показателей изучаемого процесса кавитации остается одним из приоритетных направлений моделирования, удобных как при анализе результатов, так и при прогнозировании поведения системы кавитационных пузырей. Основными этапами первых стадий эволюции гидродинамической кавитации являются следующие [4, 9]: образование полостей при критической скорости течения жидкости в условиях резкого падения давления; формирование сферической формы этих полостей при внешнем давлении жидкости; заполнение образованных сфер ее паром; просачивание газа внутрь пузыря. При этом наблюдается не только перемещение пузыря в общем потоке жидкости, но и смещения системы газ-пар

внутри кавитационной полости, которые носят случайный характер. Особый интерес исследователей в данной области обращен к развитию стохастических методов моделирования кавитационных эффектов [9–13], несмотря на существующий детерминированный подход [14–16]. Для решения поставленных задач предлагается использовать энергетический метод в рамках равновесного представления состояний энергетически закрытой макросистемы [17]. Выполненное стохастическое моделирование процесса образования кавитационных пузырей [18, 19] на платформе киберфизической системы [20] предлагается применить для случая течения жидкостной среды в осевом клапане с неподвижной частью затвора в форме цилиндрического сепаратора и с подвижной глухой обечайкой [21].

Материалы и методы. За основную характеристику, отражающую динамику системы газ-пар внутри кавитационного пузыря, выбрана случайная составляющая момента импульса образовавшейся сферической полости M_{ran} по аналогии с описанием капли жидкости в ударных процессах [22]. Пусть α_g и α_s – объемные доли газа и пара для внутренней области пузыря; ρ_g и ρ_s – плотности их веществ; I – осевой момент инерции сферической полости с минимальным значением радиуса r_{min} .

Используя адиабатическое приближение с показателем адиабаты k для отношения давления насыщенного пара P_s (в момент времени, когда формируется кавитационная полость) и максимального значения давления в центральной области пузыря P_{max} (при стремлении радиуса пузыря к минимальному значению r_{min}) [23]

$$\left(\frac{P_{\text{max}}}{P_s}\right)^3 = \left(\frac{r_s}{r_{\text{min}}}\right)^{1/k}, \quad (1)$$

получим уравнение относительно искомой величины случайной составляющей момента импульса кавитационного пузыря M_{ran}

$$N \left(\frac{P_{max}}{P_s} \right)^{1/k} = \frac{A_n v_L}{r_b} \int_0^1 \xi d\xi \int_0^1 \exp[-E(\xi, \eta) / E_0] d\eta, \quad (2)$$

где A_n – нормировочная константа; N – число образовавшихся кавитационных пузырей, которое определяется выражением [18, 19]

$$N = A_n r_b v_L \int_0^1 d\xi \int_0^1 \exp[-E(\xi, \eta) / E_0] d\eta. \quad (3)$$

Здесь $E(\xi, \eta)$ – энергия стохастического движения одиночного пузыря в зависимости от условного радиуса ξ и условной скорости η его центра масс:

$$\xi = r / r_b, \quad \eta = v / v_L \quad (4)$$

при течении со скоростью v_L жидкости плотностью ρ_L . Согласно формализму Орнштейна–Уленбека [17, 22], имеем:

$$E(\xi, \eta) = v_L^2 \eta^2 \frac{k_1 r_b^4 \xi^4 + k_2}{r_b \xi} + \frac{5}{8} k_1 \frac{M_{ran}^2}{r_b^5 \xi^5} + k_3 r_b^2 \xi^2 + k_4 r_b^3 \xi^3. \quad (5)$$

Здесь

$$k_1 = \frac{2}{3} \pi (\alpha_g \rho_g + \alpha_s \rho_s); \quad (6)$$

$$k_2 = \frac{k_\xi}{4} (\zeta_1 + \zeta_2) \rho_L; \quad (7)$$

$$k_3 = 4\pi\sigma; \quad (8)$$

$$k_4 = \frac{8}{3} \pi P_s, \quad (9)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения; k_ξ – коэффициент пропорциональности; ζ_1 и ζ_2 – составляющие коэффициента гидравлического сопротивления при кавитационном режиме течения жидкости [24–26].

Выражение (5) содержит энергетическую характеристику E_0 , которая определяется физико-механическими, конструктивными и режимными параметрами процесса образования кавитационных пузырей в рабочем объеме клапана. При формировании вида функции $E(\xi, \eta)$ учитывались перечисленные выше основные этапы первых стадий эволюции гидродинамической кавитации [18, 19].

Результаты. В качестве примера выполнен расчет искомой величины M_{ran} с

учетом (6)–(9) для случая течения жидкостной среды в осевом клапане с неподвижной частью затвора в форме цилиндрического сепаратора и с подвижной глухой обечайкой (рис. 1, 2).

Согласно полученным результатам, при соотношении долей содержания газа и пара $\alpha_g : \alpha_s = 4:1$ значения случайной составляющей момента импульса кавитационного пузыря изменяются в пределах $M_{ran} = (8,2–18,6) \cdot 10^{-12}$ кг·м²/с (рис. 1, поверхность 1); при $\alpha_g : \alpha_s = 1:1$ – $M_{ran} = (5,8–16,3) \cdot 10^{-12}$ кг·м²/с (рис. 1, поверхность 2); при $\alpha_g : \alpha_s = 1:4$ – $M_{ran} = (3,8–10,6) \cdot 10^{-12}$ кг·м²/с (рис. 1, поверхность 3), т.е. с понижением содержания газа уменьшается значение M_{ran} .

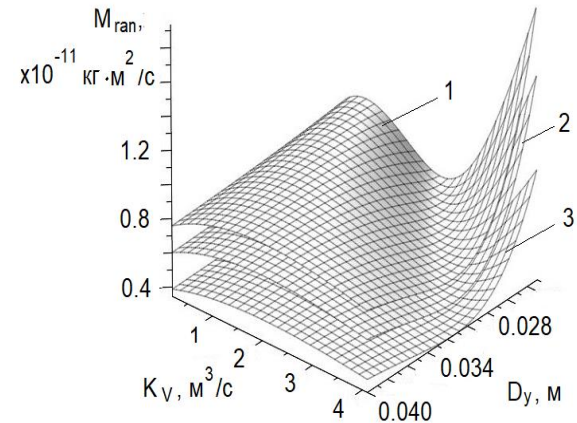


Рис. 1. Зависимость случайной составляющей момента импульса кавитационного пузыря $M_{ran}(K_v, D_y)$ от коэффициента проходной способности клапана K_v и условного диаметра его проходного сечения D_y : $k = 1,3$; $P_s = 10^{-3}$ Па; $P_{max} = 1,3 \cdot 10^8$ Па; $\sigma = 7,284 \cdot 10^{-4}$ Н/м; $r_b = r_{min} = 10^{-3}$ м; $\rho_g = 1,205$ кг/м³; $\rho_s = 1,44 \cdot 10^{-2}$ кг/м³; $\rho_L = 10^3$ кг/м³; 1 – $\alpha_g = 0,8$; $\alpha_s = 0,2$; 2 – $\alpha_g = \alpha_s = 0,5$; 3 – $\alpha_g = 0,2$; $\alpha_s = 0,8$

Проиллюстрировать зависимость случайной составляющей момента импульса кавитационного пузыря M_{ran} от степени открытия клапана можно с помощью семейств графиков, показанных на рис. 2. Здесь отмечено однозначное соответствие значений коэффициента пропускной способности $K_v(D_{yi})$, $i = 1, 4$, условному диаметру проходного сечения D_{yi} при различных степенях открытия клапана: 20 % ($i = 1$); 50 % ($i = 2$); 80 % ($i = 3$); 100 % ($i = 4$). Получено, что с увеличением пропускной способности клапана снижаются значения M_{ran} . Например, в случае $\alpha_g : \alpha_s = 4:1$ при открытии клапана с 20 до 50 % значение M_{ran} падает в 1,05 раза (рис. 2, графики 1 и 2); при открытии

клапана до 80 % – в 1,27 раза (рис. 2, графики 1 и 3), а при открытии клапана до 100 % – в 1,29 раза (рис. 2, графики 1 и 4). Аналогичная картина наблюдается для соотношений $\alpha_g:\alpha_s = 1:1$ (рис. 2, графики 1'–4') и $\alpha_g:\alpha_s = 1:4$ (рис. 2, графики 1''–4'').

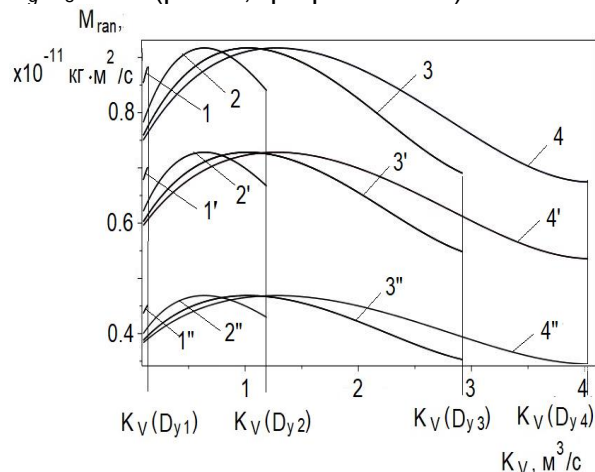


Рис. 2. Зависимость случайной составляющей момента импульса кавитационного пузыря $M_{rand}(K_v)$ от коэффициента проходной способности клапана K_v при различных значениях условного диаметра его проходного сечения D_j ; $k = 1,3$; $P_s = 10^{-3}$ Па; $P_{max} = 1,3 \cdot 10^8$ Па; $\sigma = 7,284 \cdot 10^{-4}$ Н/м; $r_b = r_{min} = 10^{-3}$ м; $\rho_g = 1,205$ кг/м³; $\rho_s = 1,44 \cdot 10^{-2}$ кг/м³; $\rho_L = 10^3$ кг/м³; 1, 2, 3, 4 – $\alpha_g = 0,8$; $\alpha_s = 0,2$; $D_{j1} = 1,40 \cdot 10^{-2}$ м; $D_{j2} = 2,21 \cdot 10^{-2}$ м; $D_{j3} = 2,8 \cdot 10^{-2}$ м; $D_{j4} = 3,13 \cdot 10^{-2}$ м; 1', 2', 3', 4' – $\alpha_g = \alpha_s = 0,5$; 1'', 2'', 3'', 4'' – $\alpha_g = 0,2$; $\alpha_s = 0,8$; 1, 1', 1'' – $K_v(D_{j1}) = 1,375 \cdot 10^{-1}$ м³/с; 2, 2', 2'' – $K_v(D_{j2}) = 1,189 \cdot 10^{-1}$ м³/с; 3, 3', 3'' – $K_v(D_{j3}) = 2,921 \cdot 10^{-1}$ м³/с; 4, 4', 4'' – $K_v(D_{j4}) = 4,032 \cdot 10^{-1}$ м³/с

Выводы. На базе стохастической модели процесса образования кавитационных пузырей в проточной части осевого клапана [18, 19], построенной на основе энергетического метода [17] в рамках равновесного представления состояний энергетически закрытой макросистемы в формализме Орнштейна–Уленбека [17, 22], получены аналитические результаты описания поведения системы газ–пар макросистемы кавитационных пузырей. В частности, выполнен анализ зависимости случайной составляющей момента импульса кавитационного пузыря от коэффициента проходной способности клапана и условного диаметра его проходного сечения при различных соотношениях содержания газа и пара внутри образующихся пузырей. При этом выявлено, что реализация процесса дросселирования потоков жидкости в регулирующем клапане [21] в случае предло-

женной схемы конструкторского решения узла «сепаратор–внешняя запирающая обечайка» [5] позволяет обеспечить снижение значений случайной составляющей момента импульса кавитационного пузыря [27] с ростом коэффициента проходной способности клапана на различных стадиях открытия сепаратора.

Список литературы

1. Ионайтис Р.Р., Чеков М.Е. Интенсификация дросселирования проточной части регуляторов расхода среды // Атомная энергия. – 2012. – Т. 112, вып. 5. – С. 263–269.
2. Арзуманов Е.С. Гидравлические регулирующие органы систем автоматического управления. – М.: Машиностроение, 1985. – 256 с.
3. Благоев Е.Е. Дроссельные и регулирующие клапаны тепловых электростанций и атомных электростанций // Дроссельно-регулирующая арматура ТЭС и АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.
4. Кнепп Р., Дейли, Дж., Хеммит, Ф. Кавитация. – М.: Мир, 1974. – 668 с.
5. Engineering Method for Calculating of an Axial Valve Separator With an External Location of the Locking Part / A.B. Kapranova, A.E. Lebedev, S.V. Neklyudov, A.M. Melzer // Process and Energy Systems. – March 2020. – Vol. 8. – P. 1–17. doi.org/10.3389/fenrg.2020.00032.
6. Pressure Drop and Cavitation Analysis on Sleeve Regulating Valve / C. Qiu, Ch.-H. Jiang, H. Zhang, et. al. // Processes. – 2019. – Vol. 7(11). – P. 829. doi.org/10.3390/pr7110829.
7. Parametric analysis on throttling components of multi-stage high pressure reducing valve / C.-W. Hou, J. Qian, F. Chen, et. al. // Applied Thermal Engineering. – 2017. – Vol. 128. – P. 1238–1248. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.09.081.
8. Cavitation optimization of a throttle orifice plate based on three-dimensional genetic algorithm and topology optimization / T.F. Tang, L. Gao, B. Li, et. al. // Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2019. – Vol. 60(2). doi.org/10.1007/s00158-019-02249-z.
9. Fundamentals of Cavitation / S. Xu, Y. Qiao, X. Liu, et. al. // Cavitation in Biomedicine. – Springer, Dordrecht, 2015. doi.org/10.1007/978-94-017-7255-6_1.
10. Frenkel J. Kinetic Theory of Liquids. International Series of Monographs on Physics / Oxford University Press. – London, 1946. – 332 с.
11. Kedrinskii V.K. Hydrodynamics of Explosion: Experiments and Models (Shock Wave and High Pressure Phenomena), Chapter 7. – Springer, Berlin, 2005. – P. 307–344.
12. Seung S., Kwak H.Y. Shock wave propagation in bubbly liquids at small gas volume fractions // Journal of Mechanical Science and Technol-

ogy (J Mech Sci Technol). – 2017. – Vol. 31. – P. 1223–1231. doi.org/10.1007/s12206-017-0221-2.

13. **Time-resolved** measurements of shock induced cavitation bubbles in liquids / S. Koch, W. Garen, F. Hegedűs, et. al // Appl. Phys. – 2012. – Vol. 108. – P. 345–351.

14. **Besant W.H.** Hydrostatics and hydrodynamics. – London: Cambridge University Press, 1859. – Art. 158.

15. **Baron Rayleigh J.W.S.** Scientific papers (Vol. 6: 1911–1919). Cambridge University Press, 1899–1920.

16. **Plesset M.S., Chapman R.B.** Collapse of an initially spherical vapour cavity in the neighbourhood of a solid boundary // J. Fluid Mech. – 1971. – Vol. 47(2). – P. 283–290. doi.org/10.1017/S0022112071001058.

17. **Климонтович Ю.Л.** Турбулентное движение и структура хаоса: Новый подход к статистической теории открытых систем. – М.: ЛЕНАНД, 2014. – 328 с.

18. **Стохастическая** модель процесса образования кавитационных пузырей в проточной части регулирующего клапана / А.Б. Капранова, А.Е. Лебедев, А.М. Мельцер, С.В. Неклюдов // Вестник ИГЭУ. – 2016. – Вып. 4. – С. 24–29. doi.org/10.17588/2072-2672.2016.4.024-029.

19. **The ensemble-averaged** characteristics of the bubble system during cavitation in the separator // E3s Web of Conference (E3S Web Conf. International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering: EECE-2019). – 2019. – Vol. 140. – 06005. doi.org/10.1051/e3sconf/201914006005.

20. **About** Formation of Elements of a Cyber-Physical System for Efficient Throttling of Fluid in an Axial Valve / A.B. Kapranova, A.E. Lebedev, A.M. Meltser, S.V. Neklyudov // Cyber-Physical Systems: Advances in Design & Modeling. Studies in Systems, Decision and Control. – 2020. – Vol. 259 (Springer, Cham). – P. 109–119. doi.org/10.1007/978-3-030-32579-4_9.

21. **Пат. 175776** Российская Федерация, МПК F16K 1/12, F16K 47/14, F16K 3/24. Клапан прямого действия / А.Е. Лебедев, А.А. Капранова, А.М. Мельцер, С.А. Солопов, Д.В. Воронин, С.В. Неклюдов; опубл. май, 2018 г.

22. **Зайцев А.И., Бытев Д.О.** Ударные процессы в дисперсионно-пленочных системах. – М.: Химия, 1994. – 176 с.

23. **Исследование** вихревых и кавитационных потоков в гидравлических системах / Е.П. Запорожец, Л.П. Холпанов, Г.К. Зиберт, А.В. Артемов // Теор. осн. хим. технол. – 2004. – Т. 38, № 3. – С. 243–252.

24. **Альтшуль А.Д.** Гидравлическое сопротивление. – М.: Недра, 1970. – 216 с.

25. **Арзуманов Е.С.** Расчет и выбор органов управления автоматических систем. – М.: Энергия, 1971. – 112 с.

26. **Арзуманов Е.С.** Кавитация в местных гидравлических сопротивлениях. – М.: Энергия, 1978. – 304 с.

27. **Описание** поведения парогазовой системы внутри кавитационного пузыря при работе осевого клапана / А.Б. Капранова, А.Е. Лебедев, А.М. Мельцер, С.В. Неклюдов // Математические методы в технике и технологии (ММТТ-32): сб. тр. XXXII Междунар. науч. конф. в 12 т. / под ред. А.А. Большакова. – СПб.: Изд-во Политехника. Университет, 2019. – Вып. 2. – С. 3–6.

References

1. Ionaytis, R.R., Chekov, M.E. Intensifikatsiya drosselirovaniya protochnoy chasti regulyatorov raskhoda sredy [Throttling Intensification of the flow part in the flow rate controllers]. *Atomnaya energiya*, 2012, vol. 112, issue 5, pp. 263–269.

2. Arzumanov, E.S. *Gidravlicheskie reguliruyushchie organy sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Hydraulic regulatory bodies of automated control systems]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1985. 256 p.

3. Blagov, E.E. Drossel'nye i reguliruyushchie klapany teplovykh elektrostantsiy i atomnykh elektrostantsiy [Throttle and control valves of thermal power plants and nuclear power plants]. *Drossel'no-reguliruyushchaya armatura TES i AES* [Throttle control valves of TPPs and NPPs]. Moscow: Energoatomizdat, 1990. 288 p.

4. Knepp, R., Deyli, Dzh., Khemmit, F. *Kavitatsiya* [Cavitation]. Moscow: Mir, 1974. 668 p.

5. Kapranova, A.B., Lebedev, A.E., Neklyudov, S.V., Melzer, A.M. Engineering Method for Calculating of an Axial Valve Separator With an External Location of the Locking Part. *Process and Energy Systems*, March 2020, vol. 8, article 32, pp. 1–17. doi.org/10.3389/fenrg.2020.00032.

6. Qiu, C., Jiang, Ch.-H., Zhang, H., Wu, J.-Y., Jin, Z. Pressure Drop and Cavitation Analysis on Sleeve Regulating Valve. *Processes*, 2019, vol. 7(11), pp. 829. doi.org/10.3390/pr7110829.

7. Hou, C.-W., Qian, J., Chen, F., Jiang, W., Jin, Z. Parametric analysis on throttling components of multi-stage high pressure reducing valve. *Applied Thermal Engineering*, 2017, vol. 128, pp. 1238–1248. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.09.081.

8. Tang, T.F., Gao, L., Li, B., Liao, L., Xi, Y., Yang, G. Cavitation optimization of a throttle orifice plate based on three-dimensional genetic algorithm and topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2019, vol. 60(2). doi.org/10.1007/s00158-019-02249-z.

9. Xu, S., Qiao, Y., Liu, X., Church, C.C., Wan, M. Fundamentals of Cavitation. Cavitation in Biomedicine. Springer, Dordrecht. 2015. doi.org/10.1007/978-94-017-7255-6_1.

10. Frenkel, J. Kinetic Theory of Liquids. International Series of Monographs on Physics. London: Oxford University Press, 1946. 332 p.
11. Kedrinskii, V.K. Hydrodynamics of Explosion: Experiments and Models (Shock Wave and High Pressure Phenomena), Chapter 7. Springer, Berlin, 2005, pp. 307–344.
12. Seung, S., Kwak, H.Y. Shock wave propagation in bubbly liquids at small gas volume fractions. *Journal of Mechanical Science and Technology (J Mech Sci Technol)*. 2017, vol. 31, pp. 1223–1231. doi.org/10.1007/s12206-017-0221-2.
13. Koch, S., Garen, W., Hegedüs, F., Neu, W., Reuter, R., Teubner, U. Time-resolved measurements of shock induced cavitation bubbles in liquids. *Appl. Phys.*, 2012, vol. 108, pp. 345–351.
14. Besant, W.H. Hydrostatics and hydrodynamics. London: Cambridge University Press, 1859. Art. 158.
15. Baron Rayleigh, J.W.S. (1911–1919) Scientific papers (Vol. 6: 1911–1919). Cambridge University Press, 1899–1920, reissued by the publisher 2011.
16. Plesset, M.S., Chapman, R.B. Collapse of an initially spherical vapour cavity in the neighbourhood of a solid boundary. *J. Fluid Mech.*, 1971, vol. 47(2), pp. 283–290. doi.org/10.1017/S0022112071001058
17. Klimontovich, Y.L. *Turbulentnoe dvizhenie i struktura khaosa: Novyy podkhod k statisticheskoy teorii otkrytykh sistem* [Turbulent Motion and Chaos Structure: A New Approach to the Statistical Theory of Open Systems]. Moscow: LENAND, 2014. 328 p.
18. Kapranova, A.B., Lebedev, A.E., Meltser, A.M., Neklyudov, S.V. Stokhasticheskaya model' protsessa obrazovaniya kavitatsionnykh puzyrey v protochnoy chasti reguliruyushchego klapana [A stochastic model of the process of formation of cavitation bubbles in the flow part of a control valve]. *Vestnik IGEU*, 2016, issue 4, pp. 24–29. doi.org/10.17588/2072-2672.2016.4.024-029.
19. Kapranova, A., Lebedev, A., Meltser, A., Neklyudov, S. The ensemble-averaged characteristics of the bubble system during cavitation in the separator. E3S Web of Conference (E3S Web Conf. International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering: EECE-2019), 2019, vol. 140, 06005. Published online 18 December 2019. doi.org/10.1051/e3sconf/201914006005.
20. Kapranova, A.B., Lebedev, A.E., Meltser, A.M., Neklyudov, S.V. About Formation of Elements of a Cyber-Physical System for Efficient Throttling of Fluid in an Axial Valve. *Cyber-Physical Systems: Advances in Design & Modelling. Studies in Systems, Decision and Control*, 2020, vol. 259 (Springer, Cham), pp. 109–119. doi.org/10.1007/978-3-030-32579-4_9.
21. Lebedev, A.E., Kapranova, A.B., Meltser, A.M., Solopov, S.A., Voronin, D.V., Neklyudov, S.V. *Klapan pryamogo deystviya* [Direct-acting control valve]. Patent RF, no. 175776, 2018.
22. Zaytsev, A.I., Bytev, D.O. *Udamnye protsessy v dispersionno-plenochnykh sistemakh* [Impact processes in dispersion-film systems]. Moscow: Khimiya, 1994. 176 p.
23. Zaporozhets, E.P., Kholpanov, L.P., Zibert, G.K., Artemov, A.V. Issledovanie vikhrevykh i kavitatsionnykh potokov v gidravlicheskikh sistemakh [The study of vortex and cavitation flows in hydraulic systems]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskikh tekhnologiy*, 2004, vol. 38, no. 3, pp. 243–252.
24. Al'tshul', A.D. *Gidravlichesкое soprotivlenie* [Hydraulic resistance]. Moscow: Nedra, 1970. 216 p.
25. Arzumanov, E.S. *Raschet i vybor organov upravleniya avtomaticheskikh sistem* [Calculation and selection of the regulatory bodies of automatic systems]. Moscow: Energiya, 1971. 112 p.
26. Arzumanov, E.S. *Kavitatsiya v mestnykh gidravlicheskikh soprotivleniyakh* [Cavitation in local hydraulic resistances]. Moscow: Energiya, 1978. 304 p.
27. Kapranova, A.B., Lebedev, A.E., Meltser, A.M., Neklyudov, S.V. Opisanie povedeniya parogazovoy sistemy vnuti kavitatsionnogo puzyr'ka pri rabote oseвого klapana [Description of the behavior of the gas–vapor system inside a cavitation bubble during axial valve operation]. *Sbornik trudov XXXII mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologii» (MMTT-32) v 12 t.* [Proceedings of the 32nd International scientific conf. «Mathematical Methods in Engineering and Technology» (MMTT-32) in 12 vol.]. Saint-Petersburg: Izdatel'stvo Politekhnik. Universitet, 2019, issue 2, pp. 3–6.

Капранова Анна Борисовна,

ФГБОУВО «Ярославский государственный технический университет», доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической механики и сопротивления материалов, e-mail: kapranova_anna@mail.ru

Kapranova Anna Borisovna,

Yaroslavl State Technical University, D.Sc. of Physical and Mathematical Sciences, professor, Head of the Department of Theoretical Mechanics and Resistance of Materials, e-mail: kapranova_anna@mail.ru

Лебедев Антон Евгеньевич,

ФГБОУВО «Ярославский государственный технический университет», доктор технических наук, доцент, профессор кафедры теоретических машин и оборудования, e-mail: lae4444@mail.ru

Lebedev Anton Evgenievich,

Yaroslavl State Technical University, D.Sc. of Eng., Associate Professor, Professor of the Department of Theoretical Machines and Equipment, e-mail: lae4444@mail.ru

Мельцер Александр Михайлович,

ЗАО «НПО Регулятор», генеральный директор, e-mail: meltzer.a@mail.ru

Meltzer Aleksandr Mikhaylovich,

JSC «Regulyator», General director, e-mail: meltzer.a@mail.ru

Неклюдов Сергей Владимирович,

ЗАО «НПО Регулятор», главный конструктор, кандидат технических наук, e-mail: neklydov.s@nporeg.ru

Neklyudov Sergey Vladimirovich,

JSC «Regulyator», Chief Designer, Ph.D. of Engineering, e-mail: neklydov.s@nporeg.ru

УДК 621.6.04

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧАСТИЦ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОГО АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ

А.В. ОГУРЦОВ¹, Ю.В. ХОХЛОВА², В.Е. МИЗОНОВ¹, В.А. ОГУРЦОВ²

¹ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация

²ФГБОУВО «Ивановский государственный политехнический университет»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: ogurtzovvawork@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. Обогащенный уголь как источник энергии имеет ряд неоспоримых экологических и экономических преимуществ, обладает более высокой теплотворной способностью. Важными характеристиками, оказывающими влияние на технологический процесс флотации угля, являются гранулометрический состав, форма угольных частиц и текстура их поверхности. Ситовой анализ является наиболее распространенным методом для определения гранулометрического состава сыпучих сред. Однако он не является чувствительным к учету формы частиц и характеру их поверхности. При ситовом методе анализа не происходит непосредственного измерения ни одной из осей частицы за исключением случая, когда частица имеет форму шара. В этом случае ее размер совпадает с длиной ребра квадратной ячейки сита. Две частицы совершенно разной формы могут проходить через одно и то же отверстие сита. В связи с этим актуальной является задача разработки простой методики, позволяющей идентифицировать параметры формы и текстуры частиц сыпучего материала.

Материалы и методы. Для решения поставленной задачи используется алгоритм, реализованный в среде MATLAB (пакет Image Processing Toolbox) и концепция фракталов.

Результаты. Предложен метод оценки формы и текстуры частиц сыпучих материалов на основе цифровой обработки изображений. Построены кривые распределения частиц по размерам, полученные методом ситового просеивания и методом обработки изображений. Установлено, что эти кривые хорошо согласуются друг с другом.

Выводы. Таким образом, цифровая обработка изображений является альтернативным вариантом определения важных качественных характеристик сыпучих сред.

Ключевые слова: гранулометрический состав, фрактальная размерность, форма и текстура частиц сыпучего материала, обработка цифровых изображений, ситовой анализ

IDENTIFYING MORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS OF SOLID PARTICLES BASED ON DIGITAL IMAGE ANALYSIS

A.V. OGURTZOV¹, Yu.V. KHOKHLOVA², V.E. MIZONOV¹, V.A. OGURTZOV²

¹Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

²Ivanovo State Polytechnic University, Ivanovo, Russian Federation

E-mail: ogurtzovavork@mail.ru

Abstract

Background. Enriched coal as an energy source has a number of undeniable environmental and economic advantages, and has a higher calorific value. Important characteristics that affect the technological process of coal flotation are the particle size distribution, the shape of the coal particles and their surface texture. Screen analysis is the most common method for determining the granulometric composition of granular media. However, it is not sensitive to the shape of the particles and the nature of their surface. With the sieve method of analysis, there is no direct measurement of any axes of the particle, except the case when the particle is ball-shaped. In this case, its size coincides with the edge length of the square mesh of the sieve. Thus, two particles of completely different shapes can pass through the same sieve opening. Our task was to develop a simple technique that allows identifying the shape and texture parameters of particles of the bulk material.

Materials and methods. To solve the problem in question, the algorithm implemented in MATLAB (Image Processing Toolbox) and the concept of fractals are used.

Results. A method for estimating the shape and texture of bulk material particles based on digital image processing has been proposed. The particle size distribution curves are constructed, obtained by sieving method and image processing method. It was found that these curves are in good agreement with each other.

Conclusions. Digital image processing is an alternative to identifying the important quality characteristics of bulk materials.

Key words: granulometric composition, fractal dimension, shape and texture of particles of bulk material, digital image processing, sieve analysis

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.3.064-070

Введение. Сыпучие материалы широко применяются в различных отраслях промышленности, в том числе в энергетической. Так, горючие сланцы, каменный уголь являются источниками энергии ТЭЦ. Как известно, качество добываемого и используемого угольного сырья может быть повышено за счет процесса флотации. Обогащенный уголь имеет ряд неоспоримых экологических и экономических преимуществ, обладает более высокой теплотворной способностью. При этом важными параметрами, оказывающими влияние на технологический процесс флотации, являются гранулометрический состав, форма угольных частиц и текстура их поверхности [1–3]. Размер и форма частиц угля также влияют на их характеристики тепло- и массопереноса [4]. Ситовой анализ является наиболее распространенным методом для определения гранулометрического состава сыпучих сред. Однако он не является чувствительным к учету формы частиц и характеру их поверхности. При ситовом методе анализа не происходит непосред-

ственного измерения ни одной из осей частицы за исключением случая, когда частица имеет форму шара. Ее размер в этом случае совпадает с длиной ребра квадратной ячейки сита. Две частицы совершенно разной формы могут проходить через одно и то же отверстие сита. В связи с этим актуальным является разработка простой методики, позволяющей идентифицировать параметры формы и текстуры частиц сыпучего материала.

Методы исследования. В качестве модельного материала использована песчано-гравийная смесь месторождения «Новинкинское», (Фурмановский район, Ивановская область). Исходное сырье ситовым методом было разделено на несколько классов крупности. Изображения образцов получали при помощи камеры (Nikon D5600, увеличение 0,82x), соединенной с компьютером (рис. 1).

В ходе эксперимента в целях накопления статистических данных для каждой фракции использовалось приблизительно по 300 частиц каждого образца.

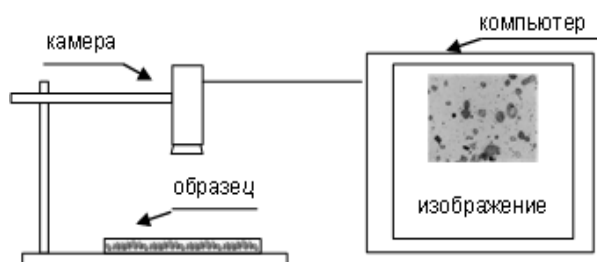


Рис. 1. Схема процесса получения цифровых изображений

Для оценки формы частиц сыпучего материала был использован алгоритм, реализованный в среде MATLAB, пакет Image Processing Toolbox. Это обусловлено тем, что среда MATLAB, разработанная фирмой MathWorks, является языком высокого уровня для выполнения технических и научных вычислений. В ней интегрированы вычисления, визуализация и программирование в удобной для пользователя среде, в которой задачи и их решения представлены с помощью привычных математических выражений – массивов элементов, представленных в матричной форме [5]. Пакет прикладных программ Image Processing Toolbox (IPT) является эффективным инструментом разработки, исследования и моделирования процессов обработки изображений. При разработке методов и алгоритмов обработки изображений пакет IPT позволяет идти двумя путями. Первый из них состоит в самостоятельной программной реализации методов и алгоритмов. Другой путь позволяет моделировать решение задачи с помощью готовых функций, которые реализуют наиболее известные методы и алгоритмы обработки изображений. Однако для исследователей и разработчиков методов и алгоритмов обработки изображений предпочтительным является второй путь. Это объясняется гибкостью таких программ, возможностью изменения всех параметров, что очень актуально при исследовании, разработке, определении параметров регуляризации и т.д. Для решения задач обработки изображений могут быть использованы стандартные функции пакета IPT [5]².

Разработанный алгоритм оценки формы частиц сыпучего материала включает следующие шаги:

- считывание исходного изображения (функция `imread` – используется для загрузки изображений в рабочее пространство MATLAB);

- перевод исследуемого изображения в бинарный вид (функция `im2b` – для отделения границ частиц от фона). Растровые изображения, используемые в цифровой обработке, представляют собой двумерные массивы, элементы которых (пиксели) содержат информацию о цвете. Изображения в MATLAB делятся на следующие типы: бинарные (черно-белые), полутоновые (в виде оттенков серого, *grayscale*), палитровые (индексированные) и полноцветные. Бинарные изображения представляют собой массив, элементы которого могут принимать лишь два значения – 0 и 1, что очень удобно с точки зрения их обработки. Точкам исследуемого объекта соответствует значение 1, точкам фона – значение 0 (рис. 2);

- пороговая обработка изображения (функция `threshold`), устранение шума – с использованием морфологических функций (`imopen`, `imclose` – морфологическое открытие и закрытие, `strel('disk',R)` – дисковая фильтрация, т.е. создание структурного элемента «диск» с радиусом R) удаляется ненужная информация, например цветовое искажение фона и неравномерная засветка;

- поиск границ частиц с помощью функции `bwboundaries`, которая отслеживает границы объектов на бинарном изображении. Точность выделяемых границ в этом случае зависит от указания оптимального порога бинаризации, определяемого эмпирически;

- определение параметров, необходимых для вычисления степени округлости объектов (площадь, периметр), с помощью функции `regionprops`.

Для характеристики округлости объектов использовался параметр, определяемый по формуле

$$m = \frac{4\pi S}{P^2}, \quad (1)$$

где S – площадь; P – периметр объекта.

² Дьяконов В., Абраменкова И. MATLAB. Обработка сигналов и изображений: Специальный справочник. – СПб.: ПИТЕР, 2002. – 602 с.; <http://matlab.exponenta.ru>

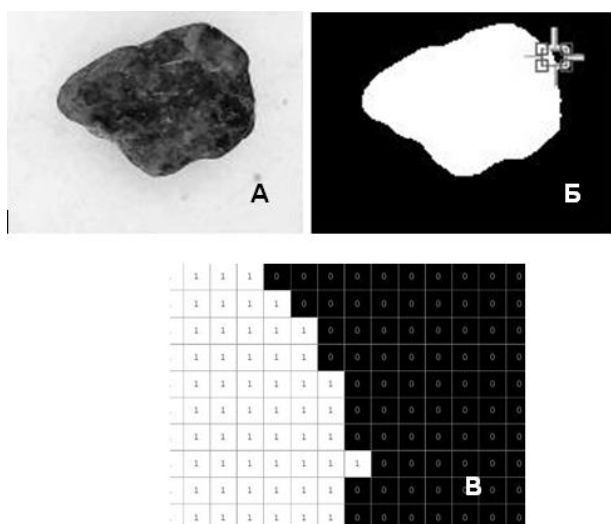


Рис. 2. Представление изображений в бинарном виде: А – исходное изображение частицы; Б – бинарное изображение частицы с выделенной областью; В – изображение со значениями пикселей (0 и 1) выделенной области

Вычисляемый параметр m , степень округлости, равен 1 только в случае идеальной окружности и является меньшим при других формах исследуемого объекта.

Результаты расчетов сохранялись в файл Excel и выполнялась их статистическая обработка. Для лучшего визуального восприятия полученных результатов на бинарном изображении найденные границы частиц выделяли цветом с указанием степени их округлости. Пример исходного и конечного изображения при реализации алгоритма приведен на рис. 3.

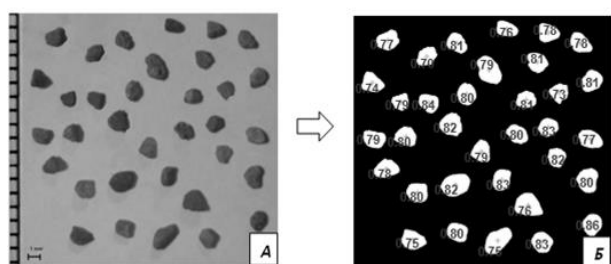


Рис. 3. Результат работы функции для определения степени округлости: А – исходное изображение образца; Б – изображение после обработки в MATLAB с указанием найденных параметров

В качестве количественной оценки текстуры частиц песчано-гравийной смеси была использована концепция фракталов. Фрактальная геометрия была разработана Б. Мандельбортом [6] для описания объектов, обладающих самоподобием и мас-

штабной инвариантностью. Ключевым понятием теории фракталов является понятие дробной величины фрактальной размерности – меры структурности описываемого объекта. Известно, что размерность линии равна 1, поверхность двумерна (размерность равна 2), а объемная фигура – это трехмерный объект (соответственно, размерность равна 3). Фракталы представляют собой фигуры, которые занимают нишу между линией и поверхностью (размерность меняется от 1 до 2) или поверхностью и трехмерной фигурой (размерность варьируется от 2 до 3). Для определения фрактальной размерности частиц песчано-гравийной смеси использован метод подсчета клеток (box-counting method, размерность Минковского) [7]. На предварительно обработанные изображения накладывается сетка ячеек (клеток) со стороной δ . Считается число клеток N , через которые проходит контур изображения. Затем масштаб уменьшается и измерения проводятся заново (рис. 4).



Рис. 4. Процедура определения фрактальной размерности методом box-count: А – исходное изображение; Б, В – покрытие контура изображения ячейками различного размера

Очевидно, что с уменьшением размера δ происходит увеличение числа клеток N , содержащих контур объекта. Далее строится график зависимости N от δ в двойных логарифмических координатах (рис. 5).

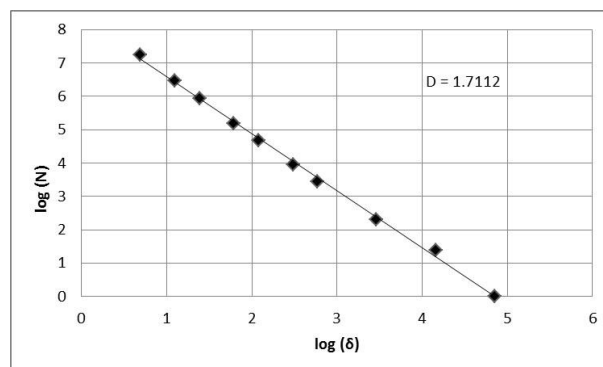


Рис. 5. Пример нахождения фрактальной размерности

Пользуясь методом наименьших квадратов, находим коэффициенты зависимости:

$$\ln(N) = -D \cdot \ln(\delta) + a, \quad (2)$$

где D – искомая фрактальная размерность.

Результаты исследования. Кумулятивные кривые распределения частиц по размерам для ситового анализа и анализа изображений приведены на рис. 6. В табл. 1 для сравнения представлены соответствующие результаты.

Таблица 1. Сравнение результатов измерения размеров частиц

Размер фракции, мм	Содержание фракции, %	
	ситовой анализ	анализ изображений
A (0 - 5)	63,39	60
B (5 - 10)	7,74	8,51
C (10 - 20)	9,61	10,2
D (20 - 40)	9,7	10,8
E (40 - 70)	5,47	6
F (>70)	11,71	4,49

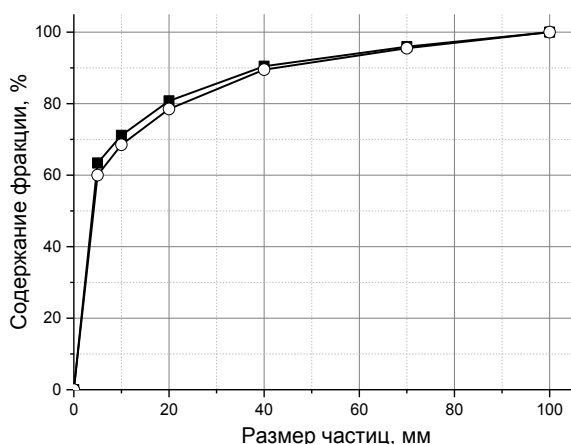


Рис. 6. Кумулятивные кривые распределения частиц по размерам: ■ – ситовой анализ; ○ – анализ изображений

Анализ полученных данных показывает, что результаты обоих методов измерения частиц хорошо согласуются друг с другом.

Для каждой фракции песчано-гравийной смеси найдены и сведены в табл. 2 средние величины степени округлости. Можно убедиться в том, что присутствует небольшой разброс в показателях округлости гранул со средним значением 0,76 по всем рассматриваемым фракциям.

В соответствии с визуальной шкалой, приведенной на рис. 7 [8], можно отнести исследуемые частицы к IV классу с показателем округлости от 0,6 до 0,8.

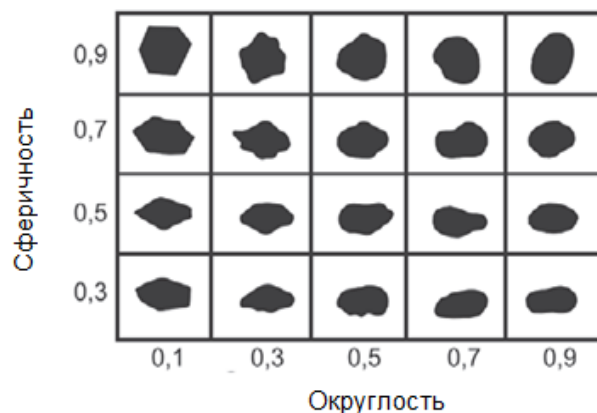


Рис. 7. Визуальная шкала для определения степени округлости и сферичности

Таблица 2. Результаты вычисления степени округлости частиц

Размер фракции, мм	Степень приближения формы частицы к окружности (среднее значение)
A (0 - 5)	0,81
B (5 - 10)	0,8
C (10 - 20)	0,77
D (20 - 40)	0,71
E (40 - 70)	0,74
F (>70)	0,72

Результаты вычисления фрактальной размерности частиц приведены в табл. 3. Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что частицы исследуемого материала меньшего размера имеют более гладкую текстуру поверхности, что характерно для частиц песка.

Таблица 3. Результаты вычисления фрактальной размерности частиц

Размер фракции, мм	Фрактальная размерность (среднее значение)
A (0 - 5)	1,6771
B (5 - 10)	1,6934
C (10 - 20)	1,7112
D (20 - 40)	1,7289
E (40 - 70)	1,7193
F (>70)	1,7019

Выводы. Кривые распределения частиц по размерам, полученные методом ситового просеивания и методом обработки изображений, хорошо согласуются друг с другом. Основные показатели качества модельного сыпучего материала – гранулометрический состав, округлость зерен – легко определяются с помощью алгоритма, реализованного в MATLAB на основе обработки цифровых изображений. Принимая во внимание данные факты, можно сделать вывод, что цифровая обработка изображений является альтернативным вариантом определения важных качественных характеристик сыпучих сред.

Список литературы

1. **Техника** и технология обогащения углей / В.В. Беловолов, Ю.Н. Бочков, М.В. Давыдов и др. / под ред. В.А. Чантурия, А.Р. Моляко. – М.: Наука, 1995. – 622 с.
2. **Ahmed M.M.** Effects of comminution on particle shape and surface roughness and their relation to flotation process // *International Journal of Mineral Processing*. – 2010. – Vol. 94, No. 3–4. – P. 180–191.
3. **Particle** shape effects in flotation. Part 1: Microscale experimental observations / D.I. Verrelli, W.J. Bruckard, P.T.L. Koh, et. al. // *Minerals Engineering*. – 2014. – Vol. 58. – P. 80–89.
4. **Ulusoy U., Hiçyılmaz C., Yekeler M.** Role of shape properties of calcite and barite particles on apparent hydrophobicity // *Chemical Engineering and Processing*. – 2004. – Vol. 43, No. 8. – P. 1047–1053.
5. **Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С.** Цифровая обработка изображений в среде MATLAB. – М.: Техносфера, 2006. – 616 с.
6. **Мандельброт Б.** Фрактальная геометрия природы. – М.: Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с.

7. **Кроновер Р.М.** Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории. – М.: Постмаркет, 2000. – 352 с.

8. **Крумбейн В.К., Слосс Л.Л.** Стратиграфия и осадкообразование. – М.: Гостоптехиздат, 1960. – 411 с.

References

1. Belovolov, V.V., Bochkov, Yu.N., Davydov, M.V. *Tekhnika i tekhnologiya obogashcheniya ugley* [Technique and technology of coal preparation]. Moscow: Nauka, 1995. 622 p.
2. Ahmed, M.M. Effects of comminution on particle shape and surface roughness and their relation to flotation process. *International Journal of Mineral Processing*, 2010, vol. 94, no. 3–4, pp. 180–191.
3. Verrelli, D.I., Bruckard, W.J., Koh, P.T.L., Schwarz, M.P., Follink, B. Particle shape effects in flotation. Part 1: Microscale experimental observations. *Minerals Engineering*, 2014, vol. 58, pp. 80–89.
4. Ulusoy, U., Hiçyılmaz, C., Yekeler, M. Role of shape properties of calcite and barite particles on apparent hydrophobicity. *Chemical Engineering and Processing*, 2004, vol. 43, no. 8, pp. 1047–1053.
5. Gonsales, R., Vuds, R., Eddins, S. *Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy v srede MATLAB* [Digital image processing in MATLAB]. Moscow: Tekhnosfera, 2006. 616 p.
6. Mandel'brot, B. *Fraktal'naya geometriya prirody* [Fractal geometry of nature]. Moscow: Institut komp'yuternykh issledovaniy, 2002. 656 p.
7. Kronover, P.M. *Fraktaly i khaos v dinamicheskikh sistemakh. Osnovy teorii* [Fractals and chaos in dynamic systems. Theory Fundamentals]. Moscow: Postmarket, 2000. 352 p.
8. Krumbeyn, V.K., Sloss, L.L. *Stratigrafiya i osadkoobrazovanie* [Stratigraphy and sedimentation]. Moscow: Gostoptekhizdat, 1960. 411 p.

Огурцов Антон Валерьевич,

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

Ogurtsov Anton Valerevich,

Ivanovo State Power Engineering University, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Applied Mathematics, e-mail: mizonov46@mail.ru

Хохлова Юлия Владимировна,

ФГБОУВО «Ивановский государственный политехнический университет», кандидат технических наук, доцент кафедры архитектуры и строительства, e-mail: hohjul@mail.ru

Khokhlova Julia Vladimirovna,

Ivanovo State Polytechnic University, PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Architecture and Construction, e-mail: hohjul@mail.ru

Мизонов Вадим Евгеньевич,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики, e-mail: mizonov46@mail.ru
Mizonov Vadim Evgenievich,
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering, Professor, Department of Applied Mathematics, e-mail: mizonov46@mail.ru

Огурцов Валерий Альбертович,
ФГБОУВО «Ивановский государственный политехнический университет», доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой архитектуры и строительства, e-mail: ogurtzovvawork@mail.ru
Ogurtsov Valery Albertovich,
Ivanovo State Polytechnic University, Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Architecture and Construction, e-mail: ogurtzovvawork@mail.ru

УДК 66.022.54

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА СМЕШИВАНИЯ СЫПУЧИХ КОМПОНЕНТОВ В РОТАЦИОННОМ АППАРАТЕ

А.Б. КАПРАНОВА, Д.Д. БАХАЕВА, Д.В. СТЕНЬКО, И.И. ВЕРЛОКА
ФГБОУВО «Ярославский государственный технический университет»,
г. Ярославль, Российская Федерация
E-mail: kapranova_anna@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. Применение сыпучих композитов, физико-механические свойства которых задаются требованиями регламента конкретной производственной сферы, в том числе атомной и тепловой энергетики, постоянно расширяется. Получение качественных композитных смесей из твердых дисперсных сред связано с рядом трудностей по предотвращению влияния сегрегационных и адгезионных эффектов, что вызывает сложности при выборе способа реализации технологической операции смешивания сыпучих компонентов, типа смесительных элементов, рационального диапазона изменения основных параметров указанного процесса и т.п. Обеспечение эффективного режима смешивания сыпучих компонентов возможно в аппаратах с организацией их разреженных потоков, в частности, с помощью ротационных устройств. Проектирование указанных аппаратов специального назначения связано с математическим моделированием данного процесса как соответствующей теоретической основы.

Материалы и методы. Аналитическое описание смешивания сыпучих материалов при организации разреженных потоков в рабочем объеме ротационного аппарата выполняется в рамках стохастического подхода в приближении равновесного представления состояний энергетически закрытой макросистемы каждого компонента.

Результаты. Энергетическим способом проведен анализ зависимости энергетической характеристики процесса смешивания сыпучих компонентов, выполняемого с помощью ротационных устройств, от режимных и конструктивных параметров данной операции.

Выводы. Выявленная аналитическая взаимосвязь между энергетическими характеристиками каждого разреженного потока сыпучих материалов и параметрами изучаемого процесса позволяет спрогнозировать степень влияния ряда факторов на качество готовой сыпучей смеси.

Ключевые слова: ротационное устройство, процесс смешивания сыпучих материалов, эластичные лопасти, разреженный поток, стохастическая модель

THE STUDY OF THE ENERGY CHARACTERISTICS OF BULK MATERIALS MIXING IN A ROTARY MIXER

A.B. KAPRANOVA, D.D. BAHAEVA, D.V. STENKO, I.I. VERLOKA
Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation
E-mail: kapranova_anna@mail.ru

Abstract

Background. The use of bulk composites, the physical and mechanical properties of which are specified by the regulation requirements of a particular production area, including nuclear and thermal energy, is constantly expanding. Obtaining high-quality composite mixtures from solid dispersed media is associated with a number of difficulties in preventing the influence of segregation and adhesion effects. This presents a number of challenges in choosing a method for mixing bulk components, a type of mixing elements, rational range of changes in the main parameters of the specified process, etc. Ensuring an effective mode of mixing bulk materials is possible in the devices with rarefied flows, in particular, using rotary devices. The design of these special-purpose apparatuses is associated with the mathematical modeling of this process as an appropriate theoretical basis.

Materials and methods. An analytical description of bulk materials mixing and the organization of rarefied flows in the volume of a rotary mixer is carried out using the stochastic approach in approximating the equilibrium representation of the states of energetically closed macrosystem of each component.

Results. An energy method was used to analyze the dependence of the energy characteristics of the process of mixing bulk components, which was performed using rotary devices, on the operational and structural parameters of this operation.

Conclusions. The revealed analytical relationship between the energy characteristics of each rarefied flow of bulk materials and the parameters of the process under study allows predicting the degree of influence of a number of factors on the quality of the finished bulk mixture.

Key words: rotary device, bulk mixing, elastic blades, rarefied flow, bulk materials, stochastic model

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.3.070-078

Состояние вопроса. Широкий класс композитных сыпучих сред находит свое активное применение в атомной и тепловой энергетике. При этом особые требования к качеству данных продуктов продиктованы необходимостью соблюдения жестких производственных регламентов. Проектировщик смесительного аппарата сталкивается с целым рядом сложностей, к которым можно отнести проблемы выбора сразу в нескольких направлениях. Во-первых, в зависимости от особенностей технологической цепочки и физико-механических свойств смешиваемых компонентов требуется обозначить способ реализации технологической операции их смешивания и тип смесительных элементов. Во-вторых, необходимо определить рациональный диапазон изменения основных параметров указанного процесса с учетом нежелательных эффектов, например сегрегационных и адгезионных [1]. Выявление факторов, оказывающих наиболее существенное влияние на эффективность процесса смешивания сыпучих компонентов, является одной из ос-

новных задач математического моделирования данной технологической операции на этапе формирования теоретической базы проектирования соответствующего смесительного оборудования [2, 3].

Применение стохастического подхода при описании процесса получения сыпучей смеси в последнее время стало уже традиционным вследствие вероятностного характера его протекания. При этом активное развитие получили стохастические методы, основанные на теории цепей А.А. Маркова [4–7], к которым можно отнести широкий спектр моделей смешивания [8–15], в том числе описания с позиций: диффузии [7], кинетики [5], рождения-гибели [4] и т.д. [11]. Энергетический метод, база которого заложена в [16, 17], успешно апробирован при описании состояний различных макросистем: каплей жидкости при ее диспергировании [18] и частиц смешиваемых материалов в разреженных потоках [11, 19–21]. Данный метод [16, 17] позволяет получить аналитические зависимости для выделенных показателей исследуемого процесса в зави-

симости от его значимых параметров. Заметим, что особую значимость при математическом моделировании указанных процессов имеет их системно-структурный анализ [7, 22, 23].

Таким образом, предлагается на основе энергетического метода [16, 17] изучить влияние основных значимых факторов процесса смешивания сыпучих компонентов с помощью ротационного аппарата на энергетические характеристики рабочих компонентов.

Особенности конструкции смесительных устройств. Как показала практика, обеспечение эффективного режима смешивания сыпучих компонентов возможно не только в плотных слоях [24], заполняющих рабочий объем, но в аппаратах с организацией разреженных потоков сыпучих компонентов [19–21].

Одним из способов получения таких условий смешивания твердых дисперсных материалов является применение приводных ротационных устройств, закрепленных над горизонтальной транспортной лентой [25]. Подача слоев смешиваемых компонентов ($i = 1, 2$) после дозирования в зазор между барабаном с упругими лопатками и лентой обеспечивает непрерывный характер данной технологической операции. Одной из конструктивных особенностей указанного смесительного устройства является способ закрепления упругих лопаток на поверхности барабана. В частности, в недеформированном состоянии прямоугольные лопатки находятся в касательных плоскостях по отношению к цилиндрической поверхности барабана (рис. 1).

Данные упругие элементы с противоположными направлениями расположения (рис. 1, а и 1, б) закреплены чередующимися ярусами (рис. 1, А и В) по длине смесительного барабана. Ниже остановимся на моделировании процесса смешивания сыпучих компонентов в ротационном аппарате для рабочего объема, соответствующего ярусу В (рис. 1, б), при вращении барабана радиусом r_b против часовой стрелки с угловой скоростью ω . Пусть деформированные упругие лопатки при повороте барабана на угол менее π рад соответствуют номеру индекса $j = 1, 2, 3$.

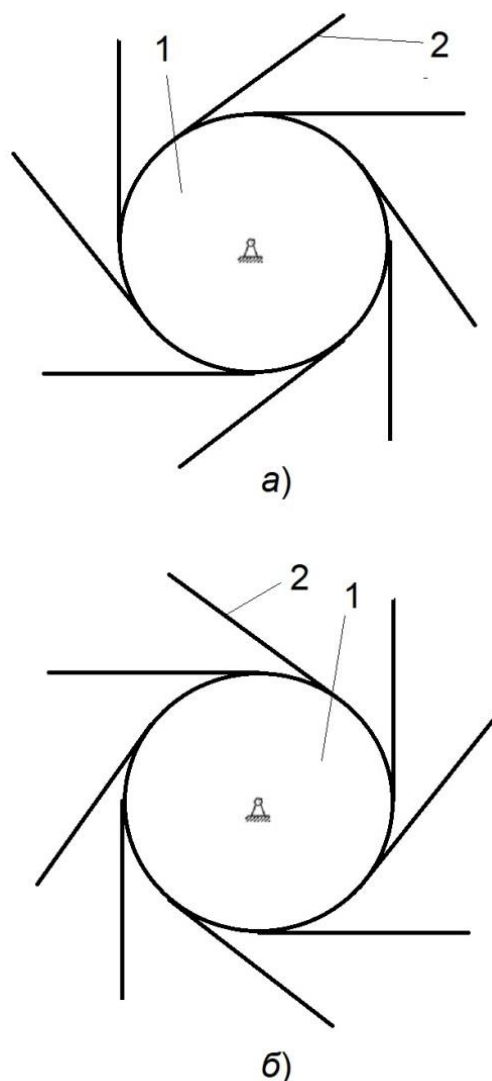


Рис. 1. Условная схема сечения смесительного барабана с упругими лопатками в различных ярусах: а – ярус А; б – ярус В; 1 – цилиндрический барабан; 2 – лопатка

Материалы и методы. Пусть усредненные диаметры частиц сыпучих компонентов по их фракциям равны d_{Ti} при плотностях веществ ρ_{Ti} , $i = 1, 2$, и имеют массу m_i . Пользуясь формализмом энергетического метода [16, 17], считаем, что частицы каждого компонента ($i = 1, 2$) образуют энергетически закрытую макросистему вследствие сглаживания мелкомасштабных флуктуаций макросистемы в виде столкновений односортовых частиц при образовании однонаправленных разреженных потоков после одновременного сбрасывания с деформированных лопаток. Тогда случайный процесс смешивания данных сыпучих материалов является Марковским (однородным, непрерывным, стационарным, гауссовским), и состояния указан-

ной макросистемы описываются стационарным решением кинетического уравнения Фоккера-Планка [16, 17] в выбранном фазовом пространстве, например с элементом фазового объема:

$$d\Omega_{ij} = dV_{xij} dV_{yij} = -\omega^2 r_{ij} dr_{ij} d\theta_{ij}, \quad (1)$$

где V_{xij} , V_{yij} – составляющие скорости центра масс частицы i -го компонента в декартовой системе координат с центром O на оси вращения барабана в плоскости его поперечного сечения; (r_{ij}, θ_{ij}) – координаты этого центра масс в полярной системе с началом в точке $O'(r_b \sin \varphi_0; r_b \cos \varphi_0)$; $\varphi_0 = 2\pi/k_0$; k_0 – число упругих лопаток. Заметим, что направление оси Ox выбрано вниз перпендикулярно горизонтальному транспортеру.

С учетом геометрии деформированной упругой лопатки, нагруженной частицами смешиваемых компонентов, принимается приближение о скорости движения конца данного упругого элемента W_{ij} , $j = 1, 2, 3$, в указанной полярной системе координат:

$$V_{r\theta ij}(r_{Wij}(\theta_{ij}), \theta_{ij}) = \frac{\omega r_{Wij}(\theta_{ij})}{\cos\{\arctg[b/r_{Aij}(\theta_{ij})]\}}, \quad (2)$$

где $r_{Aij}(\theta_{ij}) = a + b\theta_{ij}$ – уравнение спирали Архимеда; $r_{Wij}(\theta_{ij})$ – уравнение точки W_{ij} в форме

$$r_{Wij}(\theta_{ij}) = r_{Aij}(\theta_{ij}) \cos(3\{\arctg[b/r_{Aij}(\theta_{ij})]/2\}) + \\ + ([2r_{Aij}(\theta_{ij}) \cos(3\{\arctg[b/r_{Aij}(\theta_{ij})]/2\})]^2 - \\ - 4[r_{Aij}(\theta_{ij})^2 - r_b^2]^{1/2})/2. \quad (3)$$

Выражения (2) и (3) содержат следующие значения:

$$a = r_b(1 - \cos \varphi_0) + h_0; \quad (4)$$

$$b = \frac{\{[r_b(1 + \cos \varphi_0)]^2 + (r_b + l_b)^2\}^{1/2} - a}{\pi + \arctg\{(r_b + l_b)/[r_b(1 + \cos \varphi_0)]\}}, \quad (5)$$

где H_0 – высота зазора между барабаном и горизонтальным транспортером.

Учитывая вид стационарного решения кинетического уравнения Фоккера-Планка [16, 17], число частиц i -го компонента в элементарном фазовом объеме $d\Omega_{ij}$, согласно (1), описывается выражением

$$dN_{ij} = A_{ij} \exp\left(-\frac{E_{ij}}{E_{0ij}}\right) d\Omega_{ij}, \quad (6)$$

где A_{ij} – нормировочная константа; E_{0ij} – энергетическая характеристика процесса смешивания сыпучих компонентов ($i = 1, 2$) при разбрасывании их частиц деформированными упругими лопатками ($j = 1, 2, 3$), которая соответствует энергии стохастического движения указанной частицы в момент стохастизации макросистемы частиц.

Данная энергетическая характеристика играет определяющую роль при моделировании дифференциальной функции распределения числа частиц i -го компонента при сбрасывании j -й упругой лопаткой по некоторому параметру процесса K_{ij} :

$$g_{ij}(K_{ij}) = \frac{1}{N_{ij}} \frac{dN_{ij}}{dK_{ij}}. \quad (7)$$

Заметим, что выбор параметра K_{ij} зависит от конкретной решаемой проблемы, например может соответствовать углу разбрасывания j -й упругой лопаткой частиц i -го компонента.

Для нас интерес представляет расчет энергетической характеристики процесса смешивания сыпучих компонентов E_{0ij} , который может быть произведен с помощью уравнения энергетического баланса

$$E_{1j} = E_{2j}, \quad (8)$$

в левой части которого содержится значение E_{1j} – полной энергии взаимодействия частиц, захватываемых деформируемыми лопатками из зазора высотой H_0 между барабаном и горизонтальным транспортером, а в правой части значение E_{2j} – полной энергии частиц в момент их разбрасывания.

Значения E_{1j} и E_{2j} , согласно (1), (3), (6), определяются следующими выражениями:

$$E_{1j} = \sum_{i=1}^2 N_{ij} m_i \left(\frac{H_0^2}{2} + \frac{1}{\varphi_0} \int_0^{\varphi_0} \frac{[r_{Wij}(\theta_{ij})]^4}{\alpha_0^2 + \alpha_{1ij}^2} d\theta_{ij} \right); \quad (9)$$

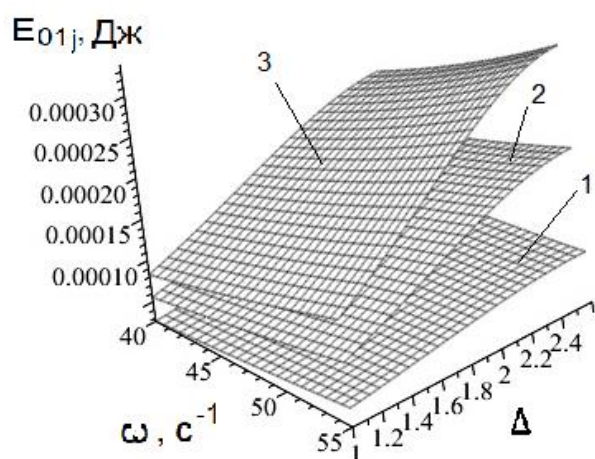
$$E_{2j} = \sum_{i=1}^2 A_{ij} \int_{\theta_{1ij}}^{\theta_{2ij}} d\theta_{ij} \int_{r_{Uij}}^{r_{Wij}} E_{ij} \exp\left(-\frac{E_{ij}}{E_{0ij}}\right) r_{ij} dr_{ij}. \quad (10)$$

В выражение (9) входят параметры α_0 и α_{1ij} , зависящие от конструктивных параметров изучаемого процесса. В выражении (10) для характерных значений θ_{1ij} и θ_{2ij} при суммарной высоте двух слоев H_L для смешиваемых компонентов, подаваемых в зазор барабан–транспортер соответственно обозначено:

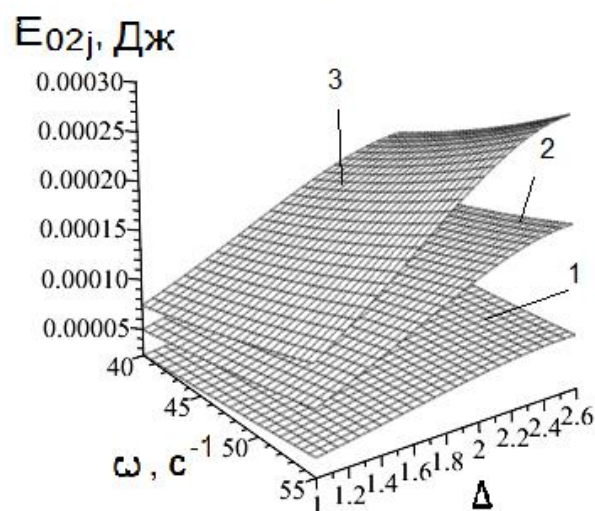
$$r_{U1} = r_b(1 - \cos \varphi_0) + H_0; \quad (11)$$

$$r_{U2} = r_{U1} - H_L / 2. \quad (12)$$

Результаты. Рассмотрим пример расчета (рис. 2, 3) искомых энергетических характеристик процесса смешивания сыпучих компонентов E_{0ij} ($i = 1, 2$) при разбрасывании их частиц деформированными упругими лопатками ($j = 1, 2, 3$) при получении смеси из кальцинированной соды ГОСТ 5100-85 ($i = 1$) и природного песка ГОСТ 8736-93 ($i = 2$).



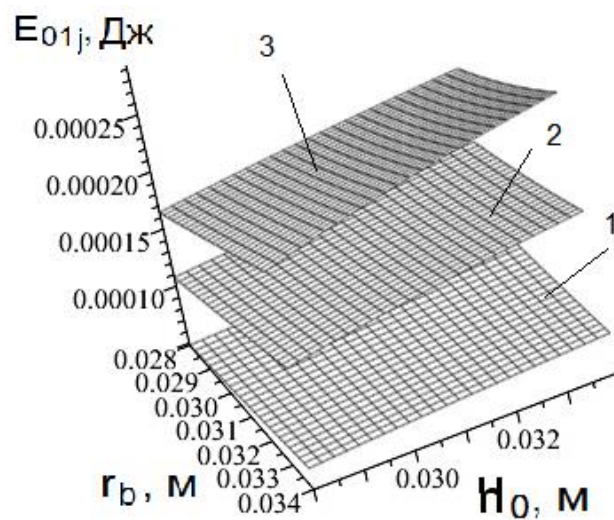
а)



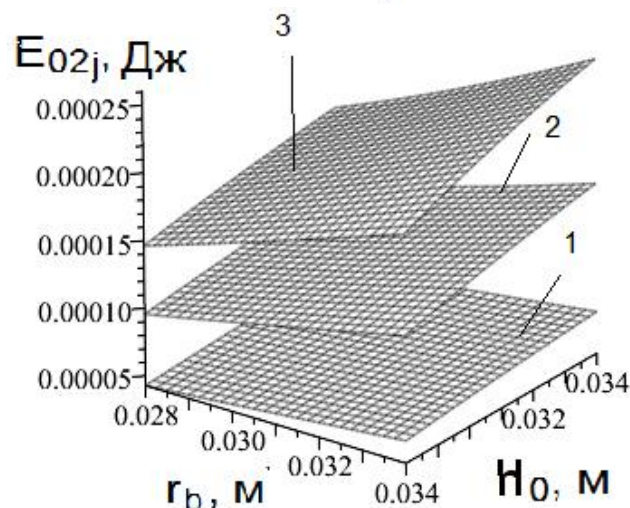
б)

Рис. 2. Зависимости $E_{0ij}(\omega, \Delta)$ для энергетических характеристик процесса смешивания сыпучих компонентов ($i = 1, 2$) при разбрасывании их частиц деформированными упругими лопатками ($j = 1, 2, 3$): $H_L = 1,6 \cdot 10^{-2}$ м; $r_b = 3,0 \cdot 10^{-2}$ м; а – $E_{01j}(\omega, \Delta)$, 1–3 – кальцинированная сода ГОСТ 5100-85 ($i = 1$); б – $E_{02j}(\omega, \Delta)$, 1–3 – природный песок ГОСТ 8736-93 ($i = 2$); 1 – $j = 1$; 2 – $j = 2$; 3 – $j = 3$

Для данных сыпучих материалов известны следующие физико-механические характеристики: усредненные диаметры частиц по фракциям $d_{T1} = 1,75 \cdot 10^{-4}$ м, $d_{T2} = 1,50 \cdot 10^{-4}$ м при плотностях веществ $\rho_{T1} = 1,08 \cdot 10^3$ кг/м³, $\rho_{T2} = 1,525 \cdot 10^3$ кг/м³. Пределы изменения конструктивных параметров: $r_b = (2,8-3,2) \cdot 10^{-2}$ м; $H_0 = (2,8-3,2) \cdot 10^{-2}$ м; $l_b = (3,0-5,0) \cdot 10^{-2}$ м; режимных параметров: $\omega = (40,0-55,0)$ с⁻¹; $H_s = (1,55-1,60) \cdot 10^{-2}$ м.



а)



б)

Рис. 3. Зависимости $E_{0ij}(r_b, H_0)$ для энергетических характеристик процесса смешивания сыпучих компонентов ($i = 1, 2$) при разбрасывании их частиц деформированными упругими лопатками ($j = 1, 2, 3$): $H_L = 1,6 \cdot 10^{-2}$ м; $\omega = 52,36$ с⁻¹; а – $E_{01j}(r_b, H_0)$, 1–3 – кальцинированная сода ГОСТ 5100-85 ($i = 1$); б – $E_{02j}(r_b, H_0)$, 1–3 – природный песок ГОСТ 8736-93 ($i = 2$); 1 – $j = 1$; 2 – $j = 2$; 3 – $j = 3$

По аналогии с работами [19–21], в которых описывается поведение частиц смешиваемых сыпучих компонентов после взаимодействия со щеточными элементами, закрепленными на барабане по различным винтовым линиям, дополнительно введен комплексный параметр, характеризующий степень деформирования упругих лопаток $\Delta = l_b/H_0$ после выхода из зазора барабан–транспортная лента.

Анализ семейств полученных поверхностей для зависимостей $E_{0ij}(\omega, \Delta)$, показанных на рис. 2, и для $E_{0ij}(r_b, H_0)$, изображенных на рис. 3, показывает наиболее существенное влияние на характер распределения числа частиц $g_{ij}(K_{ij})$ по выбранному параметру процесса K_{ij} из (7) только двух параметров: угловой скорости вращения барабана ω и комплексного параметра для степени деформирования упругих лопаток Δ . Например, увеличение параметра Δ в 2,6 раза приводит к росту энергетической характеристики E_{0ij} в 1,6–3,2 раза соответственно для различных значений $j = 1, 2, 3$ при образовании разреженного потока из кальцинированной соды ГОСТ 5100-85 (рис. 2, а, $i = 1$, поверхности 1–3) и в 1,5–3,0 раза – из природного песка ГОСТ 8736-93 (рис. 2, б, $i = 2$, поверхности 1–3). Влияние на характер поведения зависимости $E_{0ij}(r_b, H_0)$ (рис. 3) более значительно при изменении параметра H_0 , в сравнении с изменением конструктивного параметра r_b , что подтверждает вывод о значимости введения комплексного параметра $\Delta = l_b/H_0$ при анализе условий эффективного смешивания сыпучих сред в ротационном аппарате. В частности, рост параметра H_0 в 1,13 раза приводит к росту энергетической характеристики E_{0ij} в 1,30–1,8 раза при $j = 1, 2, 3$ для формирования разреженного потока из кальцинированной соды ГОСТ 5100-85 (рис. 3, а, $i = 1$, поверхности 1–3) и в 1,21–1,67 раза – из природного песка ГОСТ 8736-93 (рис. 3, б, $i = 2$, поверхности 1–3).

Выводы. В рамках стохастического подхода в приближении равновесного представления состояний энергетически закрытой макросистемы каждого компонента выполнено аналитическое моделирование основных энергетических характеристик смешиваемых компонентов E_{0ij} , необходимых для получения $g_{ij}(K_{ij})$ дифференциальной функции распределения числа

частиц i -го компонента при сбрасывании j -й упругой лопаткой по некоторому выбранному параметру процесса K_{ij} . При этом выполненный анализ зависимости энергетической характеристики процесса смешивания сыпучих компонентов в ротационном устройстве от режимных и конструктивных параметров данной операции дополнительно позволяет спрогнозировать степень влияния ряда факторов на качество готовой сыпучей смеси.

Список литературы

1. Bauman I., Curic D., Boban M. Mixing of solids in different mixing devices // *Sadhana*. – 2008. – Vol. 33(6). – P. 721–731. doi.org/10.1007/s12046-008-0030-5.
2. Shaul S., Rabinovich E., Kalman H. Generalized flow regime diagram of fluidized beds based on the height to bed diameter ratio // *Powder Technology*. – 2012. – Vol. 228. – P. 264–271. doi.org/10.1016/j.powtec.2012.05.029.
3. Kapranova A.B., Verloka I.I., Bahaeva D.D. About Preparation of the Analytical Platform for Creation of a Cyber-Physical System of Industrial Mixture of Loose Components // *Cyber-Physical Systems: Advances in Design & Modelling. Studies in Systems, Decision and Control* / eds. A. Kravets, A. Bolshakov, M. Shcherbakov. – Springer: Cham, 2020. – Vol. 259. – P. 81–91. doi.org/10.1007/978-3-030-32579-4_7.
4. Леончик Б.И., Маякин В.П. Измерения в рассеянных потоках. – М.: Энергия, 1985. – 248 с.
5. Bharucha-Reid A.T. Elements of the Theory of Markov Processes and Their Applications. – New York: McGraw-Hill, 1960.
6. Röpke G. Statistical Mechanics for Non-Equilibrium. – Berlin: German Publishing House of Sciences, 1987.
7. Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Арутюнов С.Ю. Системный анализ процессов химической технологии. Процессы измельчения и смешивания сыпучих материалов. – М.: Наука, 1985. – 440 с.
8. Berthiaux H., Mizonov V., Zhukov V. Application of the theory of Markov chains to model different processes in particle technology // *Powder Technol.* – 2005. – Vol. 157. – P. 128–137.
9. Papoulis A. Brownian Movement and Markoff Processes // Ch. 15 in *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*. – 2nd ed. – New York: McGraw-Hill, 1984. – P. 515–553.
10. Mizonov V., Balagurov I., Berthiaux H., Gatamel C. Gatamel Markov chain model of mixing kinetics for ternary mixture of dissimilar particulate solids // *Particuology*. – 2016. – Vol. 31. – P. 80–86. doi.org/10.1016/j.partic.2016.05.006.

11. **Zhuang Y., Chen X., Liu D.** Stochastic bubble developing model combined with Markov process of particles for bubbling fluidized beds // *Chemical Engineering Journal*. – 2016. – Vol. 291. – P. 206–214. doi.org/10.1016/j.cej.2016.01.095.
12. **Ахмадиев Ф.Г., Назипов И.Т.** Стохастическое моделирование кинетики обработки гетерогенных систем // *Теоретические основы химической технологии*. – 2013. – Т. 47(2). – С. 187.
13. **Капранова А.Б., Верлока И.И.** Об оценке содержания ключевого компонента после ударного рассеивания сыпучих материалов на начальном этапе порционного смешивания // *Вестник ИГЭУ*. – 2016. – Вып. 3. – С. 78–83. doi.org/10.17588/2072-2672.2016.3.078-083.
14. **Жуков В.П., Беляков А.Н.** Моделирование совмещенных гетерогенных процессов на основе дискретных моделей уравнения Больцмана // *Теоретические основы химической технологии*. – 2017. – Т. 51(1). – С. 78–84.
15. **Ахмадиев Ф.Г., Гиззатов Р.Ф.** Моделирование разделения зернистых материалов на многокаскадных классификаторах на основе теории случайных процессов // *Теоретические основы химической технологии*. – 2018. – Т. 52(3). – С. 306–317.
16. **Klimontovich Yu.L.** Turbulent Motion and the Structure of Chaos. Series: Fundamental Theories of Physics. Vol. 42. – Springer Netherlands, 1991. – 401 p. doi.org/10.1007/978-94-011-3426-2.
17. **Климонтovich Ю.Л.** Турбулентное движение и структура хаоса: Новый подход к статистической теории открытых систем. – М.: ЛЕНАНД, 2014. – 328 с.
18. **Зайцев А.И., Бытев Д.О.** Ударные процессы в дисперсно-пленочных системах. – М.: Химия, 1994. – 176 с.
19. **Капранова А.Б., Верлока И.И.** Стохастическое описание процесса формирования потоков сыпучих компонентов в аппаратах со щеточными элементами // *Теор. основы хим. технологии*. – 2018. – Т. 52(6). – С. 707–721.
20. **Исследование** качества смеси на первой стадии работы аппарата гравитационного типа / А.Б. Капранова, И.И. Верлока, П.А. Яковлев, Д.Д. Бахаева // *Российский Химический Журнал (Журнал Химического Общества им. Д. И. Менделеева)*. – 2018. – Т. 62(4). – С. 48–50.
21. **Капранова А.Б., Бакин М.Н., Верлока И.И.** Моделирование критерия качества смеси в объеме барабанно-ленточного устройства // *Хим. и нефтегаз. машиностроение*. – 2018. – Т. 54(5). – С. 287–297. doi.org/10.1007/s10556-018-0477-0. Подробнее об изменении написания имени автора. 2018. Т. 54(7–8). С. 618. doi.org/10.1007/s10556-018-0524-x.
22. **Tapped** granular column dynamics: simulations, experiments and modeling / A.D. Rosato, L. Zuo, D. Blackmore, et al. // *Computational Particle Mechanics*. – 2016. – Vol. 3(3). – P. 333–348. doi.org/10.1007/s40571-015-0075-2.
23. **Anchal J., Matthew J.M., Benjamin J.** Effect of particle size distribution on segregation in vibrated systems // *Powder Technology*. – 2013. – Vol. 237. – P. 543–553. doi.org/10.1016/j.powtec.2012.12.044.
24. **Макаров Ю.И.** Аппараты для смешения сыпучих материалов. – М.: Машиностроение, 1973. – 216 с.
25. **Пат. 2624698** Российская Федерация, В01F3/18 на полезную модель. Агрегат для смешивания и уплотнения сыпучих материалов / А.Е. Лебедев, А.А. Ватагин, М.Е. Борисовский, М.Н. Романова, Н.В. Бадаева, И.С. Шеронина; опублик. 07.05.2017.

References

1. Bauman, I., Curic, D., Boban, M. Mixing of solids in different mixing devices. *Sadhana*, 2008, vol. 33(6), pp. 721–731. doi.org/10.1007/s12046-008-0030-5.
2. Shaul, S., Rabinovich, E., Kalman, H. Generalized flow regime diagram of fluidized beds based on the height to bed diameter ratio. *Powder Technology*, 2012, vol. 228, pp. 264–271. doi.org/10.1016/j.powtec.2012. 05.029.
3. Kapranova, A.B., Verloka, I.I., Bahaeva, D.D. About Preparation of the Analytical Platform for Creation of a Cyber-Physical System of Industrial Mixture of Loose Components. *Cyber-Physical Systems: Advances in Design & Modelling. Studies in Systems, Decision and Control*. Vol. 259. Springer: Cham, 2020, pp. 81–91. doi.org/10.1007/978-3-030-32579-4_7.
4. Leonchik, B.I., Mayakin, V.P. *Izmereniya v rasseyannykh potokakh* [Measurements in dispersed flows]. Moscow: Energiya, 1985. 248 p.
5. Bharucha-Reid, A.T. Elements of the Theory of Markov Processes and Their Applications. New York: McGraw-Hill, 1960.
6. Röpke, G. Statistical Mechanics for Non-Equilibrium. Berlin: German Publishing House of Sciences, 1987.
7. Kafarov, V.V., Dorokhov, I.N., Arutyunov, S.Yu. Sistemnyy analiz protsessov khimicheskoy tekhnologii. Protsessy izmel'cheniya i smeshivaniya sypuchikh materialov [System analysis of chemical technology processes. The processes of grinding and mixing bulk materials]. Moscow: Nauka, 1985. 440 p.
8. Berthiaux, H., Mizonov, V., Zhukov, V. Application of the theory of Markov chains to model different processes in particle technology. *Powder Technol*, 2005, vol. 157, pp. 128–137.
9. Papoulis, A. Brownian Movement and Markoff Processes. Ch. 15 in Probability, Random

Variables, and Stochastic Processes. New York: McGraw-Hill, 1984, pp. 515–553.

10. Mizonov, V., Balagurov, I., Berthiaux, H., Gatamel, C. Gatamel Markov chain model of mixing kinetics for ternary mixture of dissimilar particulate solids. *Particuology*, 2016, vol. 31, pp. 80–86. doi.org/10.1016/j.partic.2016.05.006.

11. Zhuang, Y., Chen, X., Liu, D. Stochastic bubble developing model combined with Markov process of particles for bubbling fluidized beds. *Chemical Engineering Journal*, 2016, vol. 291, pp. 206–214. doi.org/10.1016/j.cej.2016.01.095.

12. Akhmadiev, F.G., Nazipov, I.T. Stokhasticheskoe modelirovanie kinetiki obrabotki geterogennykh sistem [Stochastic modeling of the kinetics of heterogeneous systems processing]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii*, 2013, vol. 47, no. 2, pp. 187. doi.org/10.1134/S0040579513020012.

13. Kapranova, A.B., Verloka, I.I. Ob otsenke sodержaniya klyuchevogo komponenta posle udarnogo rasseivaniya sypuchikh materialov na nachal'nom etape portsiionnogo smeshivaniya [On the assessment of the content of the key component after shock dispersion of bulk materials at the initial stage of batch mixing]. *Vestnik IGEU*, 2016, issue 3, pp. 78–83. doi.org/10.17588/2072-2672.2016.3.078-083.

14. Zhukov, V.P., Belyakov, A.N. Modelirovanie sovmeshchennykh geterogennykh protsessov na osnove diskretnykh modeley uravneniya Bol'tsmana [Simulation of combined heterogeneous processes based on discrete models of the Boltzmann equation]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii*, 2017, vol. 51(1), pp. 78–84. doi.org/10.1134/S0040579517010158.

15. Akhmadiev, F.G., Gizyatov, R.F. Modelirovanie razdeleniya zernistykh materialov na mnogokaskadnykh klassifikatorakh na osnove teorii sluchaynykh protsessov [Modeling of Separation of Granular Materials on Multiple-Deck Classifiers Using the Theory of Stochastic Processes]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii*, 2018, vol. 52(3), pp. 360–370.

16. Klimontovich, Yu.L. Turbulent Motion and the Structure of Chaos. Series: Fundamental Theories of Physics. Vol. 42. Springer Netherlands, 1991. 401 p. doi.org/10.1007/978-94-011-3426-2.

17. Klimontovich, Yu.L. *Turbulentnoe dvizhenie i struktura khaosa: Novyy podkhod k*

statisticheskoy teorii otkrytykh sistem [Turbulent Motion and the Structure of Chaos: A New Approach to the Statistical Theory of Open Systems]. Moscow: LENAND, 2014. 328 p.

18. Zaytsev, A.I., Bytev, D.O. *Udarnye protsessy v dispersno-plenochnykh sistemakh* [Impact processes in the dispersion-film systems]. Moscow: Khimiya, 1994. 176 p.

19. Kapranova, A.B., Verloka, I.I. Stokhasticheskoe opisanie protsessa formirovaniya potokov sypuchikh komponentov v apparatakh so shchetochnymi elementami [Stochastic Description of Flow Formation of Bulk Components in Apparatuses with Brush Elements]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii*, 2018, vol. 52(6), pp. 707–721. doi.org/10.1134/S0040579518050330.

20. Kapranova, A.B., Verloka, I.I., Yakovlev, P.A., Bakhaeva, D.D. Issledovanie kachestva smesi na pervoy stadii raboty apparata gravitatsionnogo tipa [The study of mixture quality at the first operation stage of the gravitational type apparatus]. *Rossiyskiy Khimicheskiy Zhurnal (Zhurnal Khimicheskogo Obshchestva im. D.I. Mendeleeva)*, 2018, vol. 62(4), pp. 48–50.

21. Kapranova, A.B., Bakin, M.N., Verloka, I.I. Modelirovanie kriteriya kachestva smesi v ob"eme barabanno-lentochnogo ustroystva [Simulation of the Quality Criterion of Mixture in a Drum-Belt Apparatus]. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie*, 2018, vol. 54(5), pp. 287–297. doi.org/10.1007/s10556-018-0477-0.

22. Rosato, A.D., Zuo, L., Blackmore, D. Tapped granular column dynamics: simulations, experiments and modeling. *Computational Particle Mechanics*, 2016, vol. 3(3), pp. 333–348. doi.org/10.1007/s40571-015-0075-2.

23. Anchal, J., Matthew, J.M., Benjamin, J. Effect of particle size distribution on segregation in vibrated systems. *Powder Technology*, 2013, vol. 237, pp. 543–553. doi.org/10.1016/j.powtec.2012.12.044.

24. Makarov, Yu.I. *Apparaty dlya smesheniya sypuchikh materialov* [Devices for mixing bulk materials]. Moscow: Mashinostroenie, 1973. 216 p.

25. Lebedev, A.E., Vatagin, A.A., Borisovsky, M.E., Romanova, M.N., Badaeva, N.V., Sheronina, I.S. *Agregat dlya smeshivaniya i uplotneniya sypuchikh materialov* [Unit for mixing and compaction of bulk materials]. Patent RF, no. 2624698, 2017.

Капранова Анна Борисовна,

ФГБОУВО «Ярославский государственный технический университет», доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической механики и сопротивления материалов, e-mail: kapranova_anna@mail.ru

Kapranova Anna Borisovna,

Yaroslavl State Technical University, D.Sc. of Physical and Mathematical Sciences, professor, Head of the Department of Theoretical Mechanics and Resistance of Materials, e-mail: kapranova_anna@mail.ru

Бахаева Дарья Дмитриевна,

ФГБОУВО «Ярославский государственный технический университет», ассистент кафедры информационных систем и технологий, e-mail: bakhaevadd@mail.ru

Bahaeva Daria Dmitrievna,

Yaroslavl State Technical University, Assistant of the Department of Information Systems and Technologies, e-mail: bakhaevadd@mail.ru

Стенько Дмитрий Владимирович,

ФГБОУВО «Ярославский государственный технический университет», аспирант кафедры теоретической механики и сопротивления материалов, e-mail: dvs3d@yandex.ru

Stenko Dmitry Vladimirovich

Yaroslavl State Technical University, PhD student, Department of Theoretical Mechanics and Resistance of Materials, e-mail: dvs3d@yandex.ru

Верлока Иван Игоревич,

ФГБОУВО «Ярославский государственный технический университет», кандидат технических наук, ведущий инженер МФХЛ, e-mail: ivdean@inbox.ru

Verloka Ivan Igorevich,

Ph.D. of Engineering Sciences, Lead Engineer, e-mail: ivdean@inbox.ru

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:

Основной текст располагается **в две колонки**, используется шрифт **Arial**, размер шрифта – 11.

Обязательно указывается УДК.

Название статьи (на русском и английском языках), *фамилии и инициалы авторов* (на русском языке и в транслитерации), название организации с указанием ведомства и полного юридического адреса (города и страны), *авторское резюме* (на русском и английском языках), ключевые слова (на русском и английском языках) располагаются по ширине страницы.

Графики и рисунки должны быть выполнены на компьютере, желательно в программах векторной графики (CorelDRAW) 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 – 9 (шрифт **Arial**). Рисунки, так же, как и графики, должны быть **только черно-белыми**, 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) и информация об авторах (место работы, должность, звание, ученая степень, контактная информация).

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 3

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 04.06.2020. Выход в свет 30.06.2020. Формат 60x84 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.