

Учредитель

Белорусский национальный технический университет

Журнал включен в базы данных:
Scopus, EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE, Google Scholar, РИНЦ,
ЭБС «Лань», НЭБ «КиберЛенинка», Соционет

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

- Шклярский Я. Э., Лобко К. К., Кузнецова Ю. Н., Воробьев М. С.** Исследование составной двигательной нагрузки при наличии высших гармоник в электрической сети 285
- Высоцкий М. Э.** Длительно допустимые токи нагрузки одножильных кабелей напряжением 10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена различного конструктивного исполнения 300

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

- Игнатович Р. С., Седнин В. А., Зуева Е. С.** Анализ и оптимизация режимов работы мини-ТЭЦ на местных видах топлива в условиях профицита электроэнергетических мощностей в Объединенной энергетической системе Беларуси. Часть 2 . . . 315
- Mitrofanov A. V., Vasilevich S. V., Stojko S. O.** Computational and Experimental Study of the Patterns of Formation of a Fluidized Bed of Inert Haydite Particles Material (**Митрофанов А. В., Василевич С. В., Стойко С. О.** Расчетно-экспериментальное исследование закономерностей формирования кипящего слоя инертного керамзитового материала) 332
- Рыжова Т. В., Бухаров Д. Н., Аракелян М. М., Аракелян С. М.** Самопроизвольное зарастание трещиноватости в рабочих камерах энергетических газожидкостных тепловых установок – диффузионные динамические процессы 345
- Ольшанский А. И., Голубев А. Н.** Обобщенные комплексные переменные кинетики сушки в расчетах длительности сушки плоских тонких влажных материалов 363

Главный редактор Александр Михайлович Маляревич

Редакционная коллегия

- В. ВУЙЦИК* (Технический университет «Люблинская политехника», Люблин, Республика Польша),
В. В. ГАЛАКТИОНОВ (Русский институт управления имени В. П. Чернова, Москва, Российская Федерация),
М. ДАДО (Зволенский технический университет, Зволен, Словацкая Республика),
К. В. ДОБРЕГО (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь) (заместитель главного редактора),
П. В. ЖУКОВСКИИ (Технический университет «Люблинская политехника», Люблин, Республика Польша),
В. В. ИВАШЕЧКИН (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
А. С. КАЛИНИЧЕНКО (Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь),
А. КОННОВ (Университет Лунда, Швеция),
Х. МАХКАМОВ (Университет Нортумбрии, Великобритания),
А. А. МИХАЛЕВИЧ (Национальная академия наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
НГО ТУАН КИЕТ (Научный энергетический институт Вьетнамской академии наук и технологий, Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам),
О. Г. ПЕНЯЗЬКОВ (Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
Е. Н. ПИСЬМЕННИЙ (Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, Украина),
Ф. А. РОМАНИЮК (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
В. Ю. РУМЯНЦЕВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
А.-С. С. САУХАТАС (Рижский технический университет, Рига, Латвийская Республика),
В. С. СЕВЕРЯНИН (Брестский государственный технический университет, Брест, Республика Беларусь),
В. А. СЕДНИН (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
Б. С. СОРОКА (Институт газа НАН Украины, Киев, Украина),
В. А. СТРОЕВ (Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Российская Федерация),
Е. В. ТОРОПОВ (Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Российская Федерация),
Г. Н. УЗАКОВ (Каршинский инженерно-экономический институт, Карши, Республика Узбекистан),
Б. М. ХРУСТАЛЕВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
Л. В. ШЕНЕЦ (РУП «Белинвестэнергосбережение», Минск, Республика Беларусь)

Ведущий научный редактор В. Н. Гурьянчик

Издание зарегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 19 марта 2024 г.
Регистрационный номер 1257

Подписано к печати 31.07.2024. Формат бумаги 60×84¹/₈. Бумага мелованная.
Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 12,0. Уч.-изд. л. 8,69. Тираж 35 экз.
Дата выхода в свет . 2024. Заказ .

Адрес редакции: 220013, г. Минск, Республика Беларусь, пр. Независимости, 65.
Белорусский национальный технический университет, корп. 2, комн. 327.
Тел.: +375 17 320-65-14
e-mail: energy@bntu.by; <http://energy.bntu.by>

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 3820000006896 от 03.03.2014.
220013, г. Минск, пр. Независимости, 65

© Белорусский национальный технический университет, 2024

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

PROCEEDINGS OF THE CIS
HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS
AND POWER ENGINEERING ASSOCIATIONS

ENERGETIKA

V. 67, No 4
2024

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL
PUBLISHED FROM JANUARY, 1958

Founder

Belarusian National Technical University

The Journal is included in the following databases:
Scopus, EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE, Google Scholar, RISC,
Lan, CyberLeninka, Socionet

CONTENTS

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

- Shklyarskiy Ya. E., Lobko K. K., Kuznetsova Yu. N., Vorobyov M. S.** Investigation of the Composite Motor Load in the Presence of Higher Harmonics in the Electrical Network 285
- Vysotski M. E.** Long-Term Permissible Load Currents of Single-Core Cables with a Voltage of 10 kV with Cross-Linked Polyethylene Insulation of Various Designs 300

HEAT POWER ENGINEERING

- Ignatovich R. S., Sednin V. A., Zuyeva Ye. S.** Analysis and Optimization of Operating Modes of Mini-CHP on Local Fuels in Conditions of Surplus Electric Power Capacities in the Unified Energy System of Belarus. Part 2 315
- Mitrofanov A. V., Vasilevich S. V., Stojko S. O.** Computational and Experimental Study of the Patterns of Formation of a Fluidized Bed of Inert Haydite Particles Material 332
- Ryzhova T. V., Bukharov D. N., Arakelian M. M., Arakelyan S. M.** Spontaneous Overgrowth of Jointing in the Working Chambers of Power Gas-Liquid Thermal Installations – Diffusion Dynamic Processes 345
- Ol'shanskii A. I., Golubev A. N.** Generalized Complex Variables of Drying Kinetics in Calculations of Drying Duration of Flat Thin Wet Materials 363

Editor-in-Chief Aliaksandr M. Maliarevich

Editorial Board

- W. T. WÓJCIK* (Lublin University of Technology “Politechnika Lubelska”, Lublin, Republic of Poland),
V. V. GALAKTIONOV (Russian Institute of Management named after V. P. Chernov, Moscow, Russian Federation),
M. DADO (Technical University in Zvolen, Zvolen, Slovak Republic),
K. V. DOBREGO (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus) (Deputy Editor-in-Chief),
P. W. ZHUKOWSKI (Lublin University of Technology “Politechnika Lubelska”, Lublin, Republic of Poland),
V. V. IVASHECHKIN (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
A. S. KALINICHENKO (Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus),
A. KONNOV (Lund University, Sweden),
K. MAHKAMOV (Northumbria University, United Kingdom),
A. A. MIKHALEVICH (The National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),
NGO TUAN KIET (Research Energy Institute under the Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Socialist Republic of Vietnam),
O. G. PENYAZKOV (A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),
E. N. PISMENNYI (National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, Kiev, Ukraine),
F. A. ROMANIUK (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
V. Yu. RUMLIANTSEV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
A.-S. S. SAUHATAS (Riga Technical University, Riga, Republic of Latvia),
V. S. SEVERYANIN (Brest State Technical University, Brest, Republic of Belarus),
V. A. SEDNIN (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
B. S. SOROKA (The Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine),
V. A. STROEV (National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russian Federation),
E. V. TOROPOV (South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation),
G. N. UZAKOV (Karshi Engineering Economic Institute, Karshi, Republic of Uzbekistan),
B. M. KHROUSTALEV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
L. V. SHENETS (RUE “Belinvestenergoberezhnie”, Minsk, Republic of Belarus)

Lead Science Editor V. N. Guryanchyk

**Publication is registered in the Ministry of Information of the Republic of Belarus in 2024, March, 19th
Reg. No 1257**

Passed for printing 31.07.2024. Dimension of paper 60×84¹/₈. Coated paper.
Digital printing. Type face Times. Conventional printed sheet 12,0.
An edition of 35 copies. Date of publishing 2024. Order list .

ADDRESS

Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave., Building 2, Room 327
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 320-65-14
e-mail: energy@bntu.by; <http://energy.bntu.by>

Printed in BNTU. License LP 3820000006896 from 03.03.2014.
220013, Minsk, 65, Nezavisimosty Ave.

© Belarusian National Technical University, 2024

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-4-285-299>

УДК 621.31

Исследование составной двигательной нагрузки при наличии высших гармоник в электрической сети

Я. Э. Шклярский¹⁾, К. К. Лобко¹⁾, Ю. Н. Кузнецова¹⁾, М. С. Воробьев¹⁾

¹⁾Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II
(Санкт-Петербург, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. В статье рассматриваются методики замещения составной двигательной нагрузки как потребителя высших гармоник. Используются две схемы замещения, по которым проводились расчеты комплексного сопротивления нагрузки, а затем сравнивались с результатами имитационного моделирования. Моделирование осуществлялось в среде MATLAB Simulink, использовалась библиотека Specialized Power Systems, в которой была разработана имитационная модель с двигателями и источником гармонических искажений. Для исследования выбраны пять асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором марки АИР с мощностями, варьирующимися от 0,75 до 5,50 кВт. Моделирование проводилось при разных нагрузках двигателей. Момент на валу изменялся со значениями 50; 70; 90 и 100 % от номинальных значений каждого двигателя. В качестве источника гармонических токов в сети использовался шестипульсный диодный выпрямитель, генерирующий гармоники с номерами 5, 7, ..., 25, соответствующие пульсности, равной шести. Фиксировались осциллограммы токов и напряжений в точке общего подключения асинхронных двигателей и выпрямителя, которые впоследствии использовались для расчета комплексного сопротивления. По результатам работы получены амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики импеданса составной двигательной нагрузки, анализ которых выявил несходимость расчетных методов с имитационным моделированием. Сделаны выводы о необходимости продолжать исследования в данном направлении, так как имеются качественные расхождения в функциональной зависимости комплексного сопротивления от номера гармоники с экспериментальными данными, полученными для одиночного асинхронного двигателя. Результаты работы могут быть использованы при расчетах коэффициента искажения по напряжению и моделировании режимов, связанных с высшими гармониками, как на существующих предприятиях, так и при их проектировании, что повысит надежность и эффективность работы электрических сетей.

Ключевые слова: высшие гармоники, качество электроэнергии, схема замещения, импеданс, коэффициент искажения

Для цитирования: Исследование составной двигательной нагрузки при наличии высших гармоник в электрической сети / Я. Э. Шклярский [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 4. С. 285–299. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-4-285-299>

Адрес для переписки

Лобко Кирилл Константинович
Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II
Васильевский остров, 21 линия, д. 2
199106, Санкт-Петербург, Российская Федерация
Тел.: +7 (981)836-88-96
kirill1999lobko@yandex.ru

Address for correspondence

Lobko Kirill K.
Empress Catherine II Saint Petersburg
Mining University
2, 21 Line, Vasilievsky Island
199106, Saint Petersburg, Russian Federation
Tel.: +7 (981)836-88-96
kirill1999lobko@yandex.ru

Investigation of the Composite Motor Load in the Presence of Higher Harmonics in the Electrical Network

Ya. E. Shklyarskiy¹⁾, K. K. Lobko¹⁾, Yu. N. Kuznetsova¹⁾, M. S. Vorobyov¹⁾

¹⁾Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University
(Saint Petersburg, Russian Federation)

Abstract. The article discusses the methods of substitution of a compound motor load as a consumer of higher harmonics. Two substitution schemes were used. The calculation of the complex resistance against them was compared with the results of simulation modeling. The simulation was carried out in the MATLAB Simulink environment, with the use of the Specialized Power Systems library, in which a simulation model with motors and a source of harmonic distortion was developed. Five asynchronous motors with a squirrel-cage rotor of the AIR brand with powers varying from 0.75 to 5.50 kW were selected for the study. The simulation was carried out at different motor loads. The shaft torque varied with values of 50; 70; 90 and 100 % of the nominal values of each motor. A six-pulse diode rectifier was used as a source of harmonic currents in the network, generating harmonics with numbers 5, 7, ..., 25, corresponding to a pulse rate equal to six. Oscillograms of currents and voltages were recorded at the point of common connection of asynchronous motors and the rectifier, which were subsequently used to calculate the complex resistance. Based on the results of the work, amplitude-frequency and phase-frequency characteristics of the impedance of a composite motor load were obtained, the analysis of which revealed the incongruence of calculation methods with simulation modeling. Conclusions have been drawn on the need to continue research in this direction, since there are qualitative discrepancies in the functional dependence of the complex resistance on the harmonic number with the experimental data obtained for a single asynchronous motor. The results of the work can be used in calculating the voltage distortion factor and modeling modes associated with higher harmonics both at existing enterprises and during their design, which will increase the reliability and efficiency of electrical networks.

Keywords: higher harmonics, power quality, equivalent circuit, impedance, distortion factor

For citation: Shklyarskiy Ya. E., Lobko K. K., Kuznetsova Yu. N., Vorobyov M. S. (2024) Investigation of the Composite Motor Load in the Presence of Higher Harmonics in the Electrical Network. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (4), 285–299. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-4-285-299> (in Russian)

Введение

Проблемы электромагнитной совместимости и качества электрической энергии продолжают оставаться одними из важнейших для систем электроснабжения [1–3] в контексте стратегического развития отдельных стран и регионов [4–6] и, как следствие, увеличения спроса на электроэнергию. Данный фактор обусловлен наличием нелинейных элементов в сетях, таких как диоды [7], транзисторы и тиристоры. В свою очередь, вышеперечисленные элементы находятся в составе электротехнических устройств, без которых трудно представить современные промышленные предприятия [8–10]: преобразователи частоты [11–13], управляемые и неуправляемые выпрямители [14–16], регуляторы мощности, источники возобновляемой энергетики [17–19] и накопители электроэнергии [20]. Для снижения гармоник в сети используют различные фильтры, которые могут классифицироваться как активные, пассивные и гибридные [21–23]. На сегодняшний день активные фильтры являются достаточно дорогим решением для определенных предприятий [24], а также не всегда могут подходить по

напряжению сети и мощности гармоник. Задачу по снижению воздействий высших гармоник в сетях можно решить более дешевыми пассивными фильтрами, однако для этого необходим расчет гармонических токов и коэффициентов искажения при различной конфигурации электрической сети [25–27].

Прямая задача по расчету параметров сети на высших гармониках: экспериментально можно измерить ток и напряжение и найти сопротивление на гармониках. При этом напряжение и ток раскладываются в ряды Фурье, находится сопротивление на каждой гармонике и затем – функция сопротивления от номера гармоники. Обратная задача по расчету высших гармоник – при известном напряжении и сопротивлении нагрузок посчитать гармонические токи [28, 29]. Сопротивления нагрузок на сегодняшний день обычно представляются импедансами, то есть полными сопротивлениями. Импеданс, как комплексная величина, имеет два параметра: амплитуду и аргумент, которые изменяются в зависимости от частоты или номера гармоники. Схема сети представляется своим эквивалентом на каждой гармонике отдельно для ее расчета и анализа [30]. Полные токи или напряжения ветвей затем суммируются по принципу суперпозиции. Примеры эквивалентирования нагрузок и принцип расчета сети на высших гармониках наглядно продемонстрированы на рис. 1 и 2 соответственно.

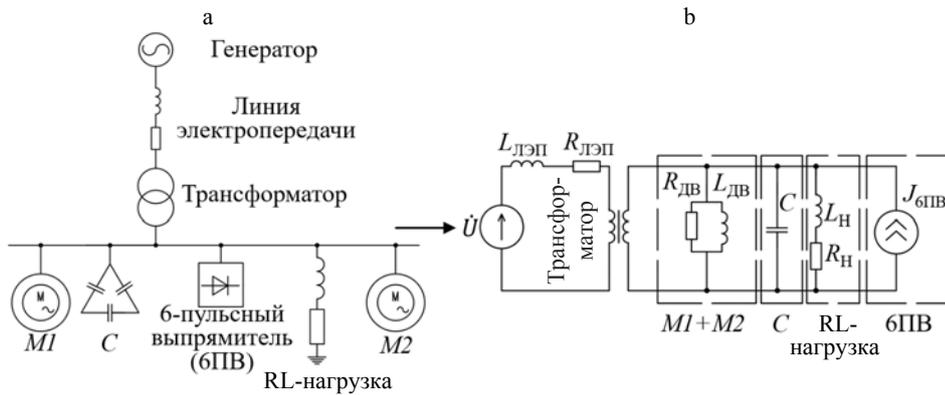


Рис. 1. Переход от общей схемы предприятия (а) к эквивалентной (б)

Fig. 1. Transition from the general enterprise scheme (a) to the equivalent one (b)

Таким образом, вышеописанный метод – метод анализа несинусоидальности напряжений с помощью схем замещения – потенциально может позволить определить показатели качества электроэнергии сети и провести их оценку на соответствие стандартным величинам, если известны схемы замещения элементов сети и нагрузок.

Схемы замещения потребителей и генераторов токов высших гармоник являются наиболее важными исходными данными при расчете показателей качества электроэнергии. Если эквивалентирование объектов электротехнического комплекса выполнено с большим количеством допущений, результаты будут иметь большие расхождения с экспериментальными данными.

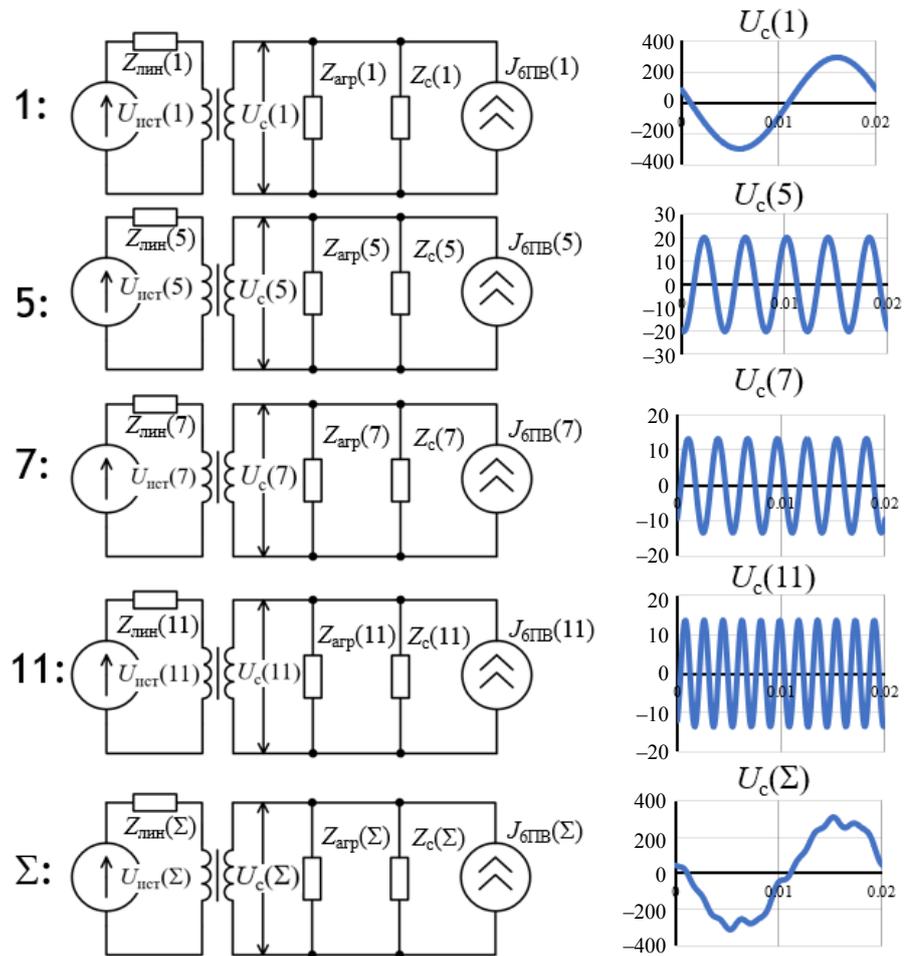


Рис. 2. Расчет искаженного напряжения по эквивалентной схеме

Fig. 2. Calculation of distorted voltage using the equivalent circuit

Современные методы предлагают составлять схемы замещения объектов электротехнических комплексов на основе: покомпонентного состава нагрузки [31], а также экспериментальных измерений [32], которые могут использовать алгоритмы нейронных сетей как методы обработки данных [33]. Одним из подходов также является агрегирование общей нагрузки в единую эквивалентную модель [30, 34–35]. Здесь под общей нагрузкой понимается множество потребителей, которые представляют неделимым целым: офисное здание, жилой дом, серверное помещение, распределительную подстанцию и т. п. [36–38].

Данная работа будет посвящена исследованию на основе имитационного моделирования характера агрегированной или составной асинхронной двигательной нагрузки, так как зачастую при расчете коэффициента искажения до конца не известно, сколько двигателей может быть подключено к шинам сети и как в таком случае она может эквивалентироваться.

Схемы замещения в данной работе

Для исследования составной двигательной нагрузки использовалось имитационное моделирование в среде MATLAB Simulink. Всего было выбрано пять асинхронных двигателей марки АИР.

В данной работе имитационное моделирование сравнивалось с существующими методами замещения обобщенной двигательной нагрузки в качестве потребителя высших гармоник. Первая методика взята из рекомендаций CIGRE, вторая методика основывается на методе, предлагаемом И. В. Жежеленко для асинхронных двигателей. Схемы замещения приведены на рис. 3.

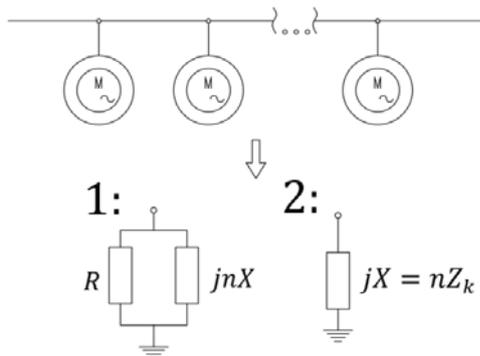


Рис. 3. Схемы замещения агрегированной двигательной нагрузки

Fig. 3. Equivalent circuits for aggregated motor load

Методика, рассмотренная в [25], рекомендует эквивалентирование множества двигателей как параллельное соединение активного (статический компонент) и индуктивного (вращающийся компонент) сопротивлений. Для расчета используется напряжения и активная мощность, измеряемые в точке общего подключения двигателей, и эмпирические коэффициенты, которые не имеют строгих критериев выбора:

$$R = \frac{U^2}{(1-K)P_1};$$

$$X = \frac{U^2}{1,2(K + K_E)K_1P_1}.$$

Здесь P_1 – общая потребляемая мощность; K – коэффициент, показывающий долю двигательной нагрузки в общей нагрузке предприятия; K_E – доля нагрузки, контролируемая электроникой, от общей нагрузки; K_1 представляет тяжесть условия запуска двигателя.

Общие рекомендации для выбора данных коэффициентов: $K = 0,8$ – для промышленных нагрузок; K_1 обычно принимается в диапазоне от 4 до 7; K_E может приниматься равным нулю. Таким образом, в данном исследовании они принимались следующими: $K = 0,8$; $K_1 = 5,5$; $K_E = 0$.

Также был рассмотрен метод с делением на пусковой коэффициент у И. В. Жежеленко [27]:

$$X = nZ_k = \frac{U_\phi}{k_\pi I_\phi}$$

Так как двигателей было несколько, пусковой коэффициент был взят как среднее арифметическое всех пусковых коэффициентов двигателей.

Имитационное моделирование. Таким образом, с целью проверки применимости вышеперечисленных схем замещения проводилось имитационное моделирование в MATLAB Simulink и на основе входных данных в виде измеренных значений: активной мощности – для методики 1; токов и напряжений – для методики 2, они сравнивались с результатами имитационного моделирования. Обычно в каталогах асинхронных двигателей приводятся следующие величины, которые называют паспортными, или номинальными, параметрами: $P_{\text{ном}}$ – мощность на валу; ω – частота вращения ротора; $I_{\text{ном}}$ – ток статора; $U_{\text{ном}}$ – напряжение сети; η – коэффициент полезного действия; $\cos\phi$ – то же мощности; $I_\pi/I_{\text{ном}}$ – то же пускового тока; $M_\pi/M_{\text{ном}}$ – то же пускового момента на валу; $M_{\text{мах}}/M_{\text{ном}}$ – то же критического момента на валу; $M_{\text{ном}}$ – момент на валу; J – то же инерции. Параметры моделируемых двигателей приведены в табл. 1. Они использовались для расчета параметров схемы замещения двигателей (R_1 – активное сопротивление статора; R_2 – то же ротора; L_1 – индуктивность статора; L_2 – то же ротора; L_m – то же магнитного зазора) при помощи встроенной функции Parameter Estimator, которые используются при моделировании. Параметры схем замещения приведены в табл. 2.

Таблица 1

Параметры моделируемых двигателей
Parameters of motors in simulation

Двигатель	АИР90L6	АИР90LA8	АИР90LB8	АИР100S2	АИР100L2
$P_{\text{ном}}$, кВт	1,50	0,75	1,10	4,00	5,50
ω , об/мин	920	680	680	2880	2900
$I_{\text{ном}}$, А	4,00	2,43	3,36	8,20	11,10
$U_{\text{ном}}$, В	220				
η , %	76,0	70,0	72,0	84,2	85,7
$\cos\phi$	0,75	0,67	0,69	0,88	0,88
$I_\pi/I_{\text{ном}}$	5,5	4,0	5,0	7,5	7,5
$M_\pi/M_{\text{ном}}$	2,0	1,8	1,8	2,2	2,2
$M_{\text{мах}}/M_{\text{ном}}$	2,1	2,0	2,0	2,3	2,3
$M_{\text{ном}}$, Н·м	15,57	10,53	15,45	13,26	18,11
J , кг·м ²	0,0067	0,0063	0,009	0,007	0,008

Таблица 2

Параметры схем замещения двигателей для моделирования
Parameters of equivalent circuits of motors for modeling

Двигатель	АИР90L6	АИР90LA8	АИР90LB8	АИР100S2	АИР100L2
R_1 , Ом	7,98	15,29	10,39	3,18	2,04
R_2 , Ом	9,44	19,46	13,35	2,234	1,315
L_1 , Гн	0,0132	0,0330	0,0226	0,0009	0,0021
L_2 , Гн	0,0134	0,0335	0,0226	0,0014	0,015
L_m , Гн	0,2126	0,3035	0,2286	0,1351	0,1181

Собранная схема имитационной модели приведена на рис. 4.

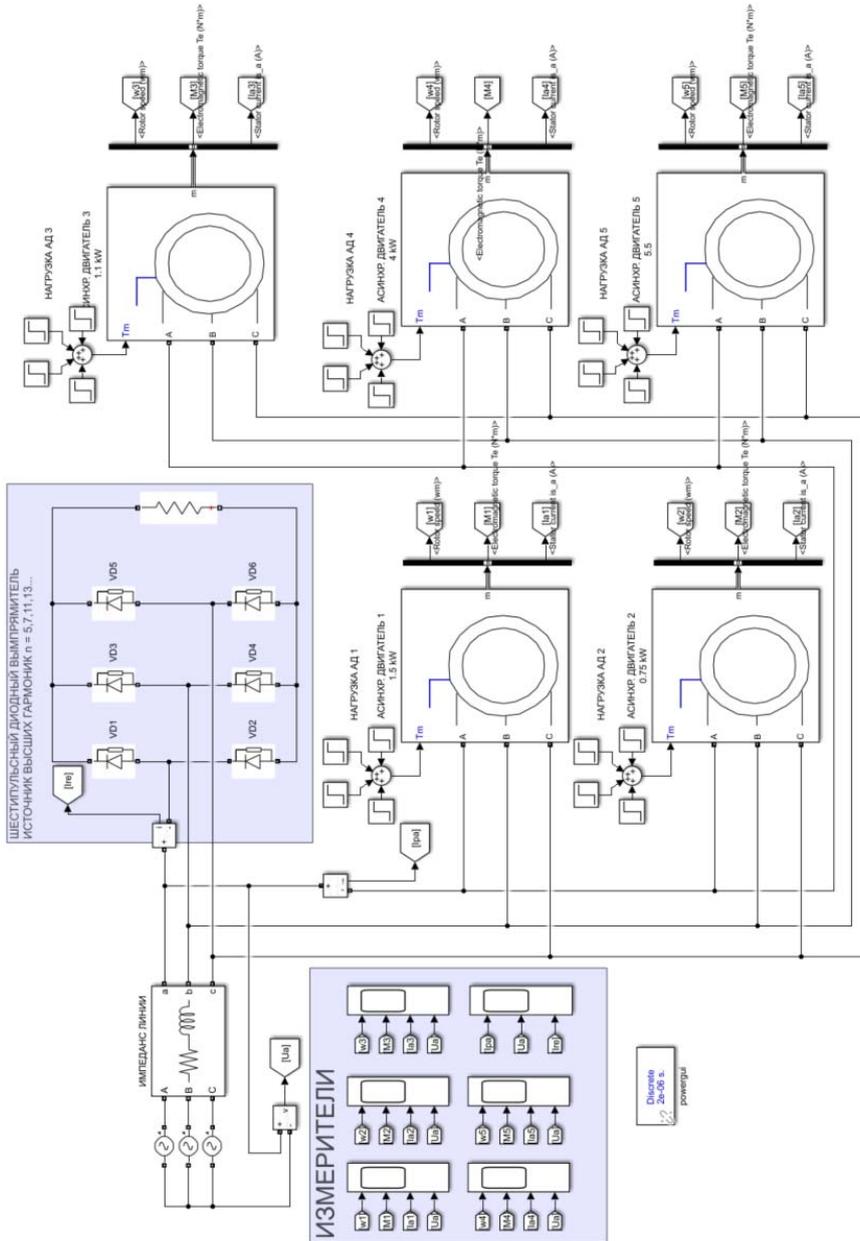


Рис. 4. Имитационная модель MATLAB Simulink для исследования составной двигательной нагрузки
Fig. 4. MATLAB Simulink simulation model for studying composite motor load

Моделировались пять асинхронных двигателей, подключенных к общей шине питания, соединенной с источником синусоидального напряжения через активно-индуктивное сопротивление. Следующие данные выводились из двигателей в виде осциллограмм: частота вращения, момент на валу и токи, для того чтобы отследить правильность отработки модели. Также фиксировались напряжение, ток и активная мощность, потребляемые двигателями на общей шине, которые далее использовались при расчете импеданса агрегированной двигательной нагрузки.

Для того чтобы внести искажения в сеть, использовался источник высших гармоник в виде шестипульсного диодного выпрямителя. При моделировании двигателя работали в четырех режимах загрузки: 50; 70; 90 и 100 % от номинального момента на валу. Момент изменялся одновременно для всех двигателей, чтобы можно было зафиксировать работу общей двигательной нагрузки при разных моментах и определить эту зависимость. Полученные данные обрабатывались при помощи Fast Fourier Transformation анализа. Таким образом, вычислялись сначала гармонические составляющие тока и напряжения, а затем – гармонические составляющие импеданса составной двигательной нагрузки.

Параметры модели были следующими: параметры линии – 0,33 Ом – для активного сопротивления, 0,0011 Гн – для индуктивности, мощность нагрузки шестипульсного выпрямителя – 5 кВт, фазное напряжение источника – 220 В, частота сети – 50 Гц, моделирование осуществлялось с шагом $2 \cdot 10^{-6}$ с, что по теореме Котельникова является достаточно точным для получения данных. Необходимо также отметить, что данные об эксперименте проводились только по одной фазе – фазе *A*, что не является ограничением, так как нагрузка была симметричной в ходе имитационного моделирования.

Результаты и обсуждение

По результатам имитационного моделирования и расчетов по схемам замещения для сравнительной оценки построены зависимости для модулей и аргументов импеданса, представленных в виде амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик на рис. 5 и 6 соответственно. На каждом графике приведены 12 зависимостей соответствующей функции от номера гармоники для разных режимов работы двигателей. Также численные значения приводятся в табл. 3 в соответствующих графах: «Им. м.» – для имитационного моделирования, «1» и «2» – для расчетов по схемам замещения 1 и 2 соответственно. Обсуждение результатов приводится для 5-й и выше гармоник, так как комплексное сопротивление двигателя на высших гармониках не зависит от сопротивления на основной [39].

Таблица 3

Результаты имитационного моделирования и расчетов
Results of simulation modeling and calculations

Нагрузка	0,5M _{ном}						0,7M _{ном}					
	Z, Ом			Ф _{агр} , град.			Z, Ом			Ф _{агр} , град.		
	Им. м.	1	2	Им. м.	1	2	Им. м.	1	2	Им. м.	1	2
1	9,73	3,05	1,65	54,6	87,9	90,0	8,38	2,41	1,42	50,9	87,9	90,0
5	2,12	15,02	8,25	50,8	79,7	90,0	2,42	11,89	7,10	50,4	79,7	90,0
7	2,67	20,72	11,54	55,8	75,7	90,0	3,06	16,39	9,94	54,8	75,7	90,0
11	3,44	31,19	18,14	64,0	68,2	90,0	4,00	24,68	15,63	65,1	68,2	90,0
13	4,04	35,89	21,44	66,2	64,7	90,0	4,65	28,40	18,47	67,3	64,7	90,0
17	4,79	44,16	28,04	72,7	58,3	90,0	5,71	34,94	24,15	72,5	58,3	90,0
19	5,33	47,74	31,33	72,9	55,4	90,0	6,32	37,77	26,99	73,4	55,4	90,0
23	6,46	53,88	37,93	79,4	50,1	90,0	7,50	42,63	32,67	77,8	50,1	90,0
25	6,99	56,49	41,23	81,2	47,7	90,0	8,01	44,70	35,52	78,6	47,7	90,0

Окончание табл. 3
 End of table 3

Нагрузка	0,9M _{ном}						M _{ном}					
	Z, Ом			Ф _{агр} , град.			Z, Ом			Ф _{агр} , град.		
	Им. м.	1	2	Им. м.	1	2	Им. м.	1	2	Им. м.	1	2
1	7,33	1,85	1,24	43,8	87,9	90,0	6,40	1,51	1,08	39,7	87,9	90,0
5	2,77	9,09	6,21	50,1	79,7	90,0	3,13	7,44	5,42	50,4	79,7	90,0
7	3,51	12,53	8,70	54,2	75,7	90,0	3,98	10,26	7,59	54,4	75,7	90,0
11	4,56	18,86	13,67	65,4	68,2	90,0	5,26	15,45	11,93	65,6	68,2	90,0
13	5,21	21,71	16,16	67,4	64,7	90,0	6,06	17,78	14,10	68,0	64,7	90,0
17	6,57	26,71	21,13	73,4	58,3	90,0	7,49	21,87	18,44	72,3	58,3	90,0
19	7,32	28,87	23,61	75,0	55,4	90,0	8,39	23,64	20,61	73,6	55,4	90,0
23	8,76	32,59	28,58	76,6	50,1	90,0	9,62	26,68	24,95	77,0	50,1	90,0
25	9,40	34,17	31,07	77,3	47,7	90,0	10,37	27,98	27,12	77,4	47,7	90,0

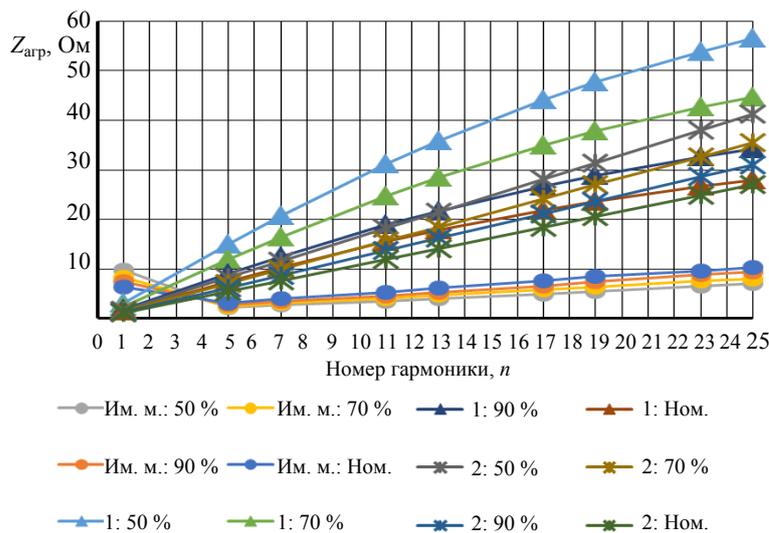


Рис. 5. Импеданс составной двигательной нагрузки в зависимости от номера гармоники

Fig. 5. Impedance of a composite motor load depending on the harmonic number

Для имитационного моделирования по амплитудно-частотной характеристике видно, что с ростом нагрузки увеличивается модуль комплексного сопротивления двигательной нагрузки на высших гармониках, притом можно заметить, что меняется пропорционально моменту на валу. Качественная характеристика графика в зоне высших гармоник при этом не меняется. Далее с ростом номера гармоник и частоты сопротивление увеличивается прямо пропорционально номеру гармоники. Если необходимо проанализировать сеть до 50-й гармоники, полученные зависимости можно экстраполировать и получить точки выше 25-й гармоники. Схемы замещения 1 и 2 имеют совсем иной характер, так как они изменяются в соответ-

ствии с сопротивлением на 1-й гармонике, которое уменьшается при увеличении момента на валу.

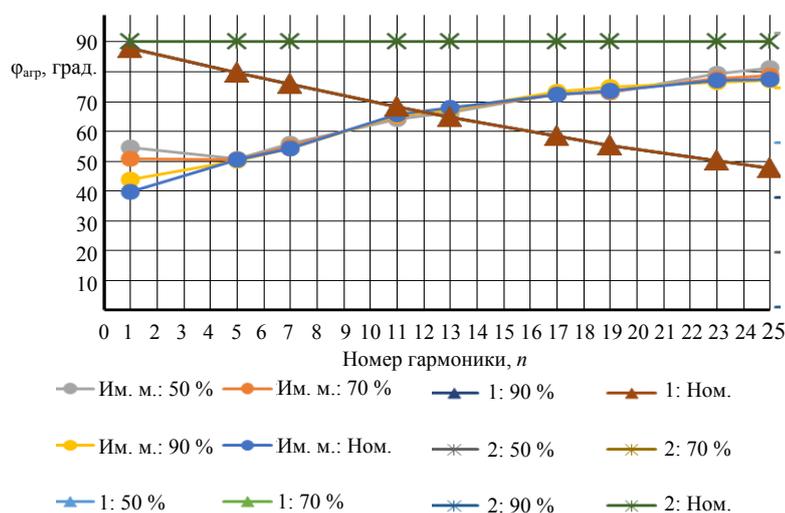


Рис. 6. Фазовая характеристика составной двигательной нагрузки в зависимости от номера гармоники

Fig. 6. Phase characteristic of a composite motor load depending on the harmonic number

По фазовой характеристике для имитационного моделирования видно, что с ростом номера гармоники растет аргумент комплексного сопротивления. Сам график имеет асимптотический характер и стремится к 90° при стремлении частоты к бесконечности. Видно, что численные значения аргумента комплексного сопротивления не меняется в зависимости от нагрузки. Это говорит о том, что соотношение активной мощности к реактивной мощности на гармониках не зависит от нагрузки на валах двигателей, что может позволить не учитывать режим работы асинхронных двигателей при анализе электрической сети на высших гармониках.

ВЫВОДЫ

1. Проанализированы существующие методы замещения агрегированной двигательной нагрузки, по которым были рассчитаны комплексные сопротивления и сравнены с результатами имитационного моделирования.

2. Выявлена несходимость результатов имитационного моделирования с результатами исследований по существующим методикам как по количественным, так и по качественным характеристикам, о чем можно судить по амплитудно-частотным характеристикам. Ошибка связана с теоретическим предположением о том, что комплексное сопротивление на фундаментальной гармонике должно изменяться пропорционально номеру, для того чтобы получить комплексное сопротивление двигателя на высших гармониках.

3. Несходимость результатов эксперимента с результатами моделирования указывает на то, что необходимо продолжать исследования в области составных нагрузок. Характер графика, полученный по результатам имитационного моделирования, соответствует графику, полученному по результатам эксперимента для одного асинхронного двигателя, проводившегося в работе [39]. Однако агрегированная двигательная нагрузки ведет себя иначе и проявляет эмерджентное свойство изменяться в зависимости от момента на валу двигателей, чего не было выявлено в эксперименте с одиночным асинхронным двигателем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Седнин, А. В. Энергоэффективность применения гибридных тепловых пунктов в условиях интеграции электрических и тепловых сетей городских микрорайонов. Ч. 1: Обоснование целесообразности применения гибридных тепловых пунктов / А. В. Седнин, М. И. Позднякова // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 6. С. 552–566. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-6-552-566>.
2. Константинова, С. В. Расчет емкости для работы мини-энергокомплекса на основе асинхронного генератора в автономном режиме / С. В. Константинова, А. Ю. Капустинский, Т. М. Ярошевич // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021 Т. 64, № 1. С. 40–50. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-40-50>.
3. Козловская, В. Б. Учет влияния высших гармоник при выборе сечений проводников линий наружного освещения / В. Б. Козловская, В. Н. Калечиц // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 6. С. 544–557. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-6-544-557>.
4. Koptev, V. Y. Information Support for the Process of Multiphase Flows Transportation Based on the Introduction of a Radioisotope Non-Separation Hydrocarbon Measuring System / V. Y. Koptev, A. V Kopteva, V. V Starshaya // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus). 2020. P. 674–679. <https://doi.org/10.1109/eiconrus49466.2020.9039314>.
5. Renewable and Sustainable Clean Energy Development and Impact on Social, Economic, and Environmental Health / K. Kumar, [et al.] // Energy Nexus. 2022. Vol. 7. P. 100118. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100118>.
6. Nguyen, M. P. Energy Transition in Vietnam: A Strategic Analysis and Forecas / M. P. Nguyen, T. Ponomarenko, N. Nguyen // Sustainability. 2024. Vol. 16, No 5. P. 1969. <https://doi.org/10.3390/su16051969>.
7. Бялобржеский, А. В. Искажающая электрическая мощность переменного тока в простейшей цепи с диодом / А. В. Бялобржеский, Д. Й. Родькин // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 5. С. 433–443. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-433-444>.
8. Nguyen, H. H. Optimization of the control System for Electrolytic Copper Refining with Digital Twin during Dendritic Precipitation / H. H. Nguyen, V. Y. Bazhin // Metallurgist. 2023. Vol. 67, № 1. P. 41–50. <https://doi.org/10.1007/s11015-023-01487-3>.
9. Бажин, В. Ю. Автоматизированный контроль и управление балансом шихты при производстве металлургического кремния / В. Ю. Бажин, О. Н. Масько, С. А. Мартынов // Цветные металлы. 2023. № 4. С. 53–60. <https://doi.org/10.17580/tsm.2023.04.07>.
10. Федорова, А. Р. Определение параметров осаждения при сгущении и промывке красных шламов / А. Р. Федорова, Е. А. Пупышева, В. В. Моргунов // Цветные металлы. 2023. № 4. С. 77–84. <https://doi.org/10.17580/tsm.2023.04.10>.
11. Nos, O. V. The Sliding-Mode Observer for PMSM Sensorless Control with Adaptive Complex-Coefficient Filter and PLL / O. V. Nos, T. V Pudkova, S. A. Kharitonov // 2023 XX Technical Scientific Conference on Aviation Dedicated to the Memory of N.E. Zhukovsky (TSCZh), 2023. P. 44–49. <https://doi.org/10.1109/tsczh58792.2023.10233364>.
12. Счастный, В. П. Электромагнитная совместимость компенсирующих устройств и преобразователей регулируемого электропривода в электрических сетях промышленных предприятий / В. П. Счастный, А. И. Жуковский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведе-

- ний и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 1. С. 37–51. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-37-51>.
13. Васильев, Б. Ю. Анализ влияния полупроводниковых преобразователей на батарею и двигатель асинхронного привода шахтных горнотранспортных машин / Б. Ю. Васильев, Т. Х. Нгуен // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 9–1. С. 299–318.
 14. Coordinate control Strategy for Stability Operation of Offshore wind Farm Integrated with Diode-Rectifier HVDC / L. Xie [et al.] // Global Energy Interconnection. 2020. Vol. 3, No 3. P. 205–216. <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2020.07.002>.
 15. A New Nonlinear Control of an Active Rectifier for Variable Speed Generating Units / C. M. Verrelli [et al.] // Control Engineering Practice. 2023. Vol. 139. P. 105653. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2023.105653>.
 16. Taha, M. 12 Pulse High power Active Rectifier for Electric Vehicle Charging / M. Taha, A. Almaktoof, M. T. E. Khan // Transportation Research Procedia. 2023. Vol. 70. P. 299–306. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.033>.
 17. Belsky, A. A. Standalone Power System with Photovoltaic and Thermoelectric Installations for Power Supply of Remote Monitoring And Control Stations for Oil Pipelines / A. A. Belsky, D. Y. Glukhanich // Renewable Energy Focus. 2023. Vol. 47. P. 100493. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2023.100493>.
 18. Fortes, R. R. A. Harmonic Distortion Assessment in Power Distribution Networks Considering DC component Injection From PV inverters / R. R. A. Fortes, R. F. Buzo, L. C. O. de Oliveira // Electric Power Systems Research. 2020. Vol. 188. P. 106521. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106521>.
 19. Artificial Neural Networks Based Harmonics Estimation for Real University Microgrids using Hourly Solar Irradiation and Temperature Data / N. Yasar [et al.] // Energy Nexus. 2023. Vol. 9. P. 100172. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100172>.
 20. Hybrid System of Hydrogen Generation by Water Electrolysis and Methane Partial Oxidation / G. Buslaev [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. 2023. Vol. 48, No 63. P. 24166–24179. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.098>.
 21. Сычев, Ю. А. Повышение качества электроэнергии в системах электроснабжения минерально – сырьевого комплекса гибридными фильтрокомпенсирующими устройствами / Ю. А. Сычев, Р. Ю. Зимин // Записки Горного института. 2021. Т. 247. С. 132–140. <https://doi.org/10.31897/pmi.2021.1.14>.
 22. Скамьин, А. Н. Определение сопротивления электрической сети при расчете режимов с искажениями в напряжении / А. Н. Скамьин, В. С. Добуш, М. Х. Жопри // Записки Горного института. 2023. Т. 261. С. 443–454. <https://doi.org/10.31897/pmi.2023.25>.
 23. Reduction and Control of Harmonic on Three-Phase Squirrel Cage Induction Motors with Voltage Source Inverter (VSI) using ANN-Grasshopper Optimization Shunt Active Filters (ANN-GOSAF) / T. O. Araoye [et al.] // Scientific African. 2023. Vol. 21. P. e01785. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01785>.
 24. Сычев, Ю. А. Анализ эффективности работы универсальных регуляторов качества электрической энергии на основе активных преобразователей в промышленных системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой / Ю. А. Сычев, М. Е. Аладьин // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 11. С. 159–181.
 25. Network Modelling for Harmonic Studies. CIGRE, 2019. 241 p.
 26. Arrillaga, J. Power System Harmonics / J. Arrillaga, N. R. Watson. 2nd. John Wiley & Sons, Ltd, 2003. 389 p. <https://doi.org/10.1002/0470871229>.
 27. Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко. Изд. 4-е. М.: Энергоатомиздат, 2006. 331 с.
 28. Extraction of Frequency-Dependent Impedances of Residential Loads in Low-Voltage Grids for Harmonic Stability Assessment / S. Simon // Electric Power Systems Research. 2022. Vol. 212. P. 108528 <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108528>.
 29. Смирнов, С. С. Высшие гармоники в сетях высокого напряжения. / С. С. Смирнов. Новосибирск: Наука, 2010. 327 с.
 30. Modelling and Aggregation of Loads in Flexible Power Networks – Scope and Status of the Work of CIGRE WG C4.605 / K. Yamashita [et al.] // IFAC Proceedings Volumes. 2012. Vol. 45, No 21. P. 405–410. <https://doi.org/10.3182/20120902-4-fr-2032.00072>.
 31. Harmonic Modeling, Data Generation, and Analysis of Power Electronics-Interfaced Residential Loads / A. Singhal [et al.] // 2022 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart

- Grid Technologies Conference (ISGT), 2022. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/isgt50606.2022.9817492>.
32. Измерение качества электроэнергии в системе электроснабжения со светодиодными / В. П. Кузьменко [и др.] // Научный вестник НГТУ. 2019. № 1. С. 197–212. <https://doi.org/10.17212/1814-1196-2019-1-197-212>.
 33. Liu, W. Aggregation Method of Distributed Load Resources Based on Non-intrusive Load Identification / W. Liu, C. Wang, Y. Li // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2138. P. 012004. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2138/1/012004>.
 34. Using Aggregated Electrical Loads for the Multinodal Load Forecasting / J. R. Moreira-Júnior [et al.] // Journal of Control, Automation and Electrical Systems. 2022. Vol. 33. P. 1592–1600. <https://doi.org/10.1007/s40313-022-00906-1>.
 35. Chapter 5 – Modeling and simulation of active electrical distribution systems using the OpenDSS / L. C. Ribeiro [et al.] // Decision Making Applications in Modern Power Systems / eds.: S. H. E. Abdel Aleem [et al.]. Academic Press, 2020. P. 121–152. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816445-7.00005-0>.
 36. Research on the Harmonics Penetration Characteristics of the Traction Network to Three-Phase 380 V Power System of the Traction Substation and Suppression Scheme / Y. Zhao [et al.] // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 195359–195369. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3033889>.
 37. Викторов, В. А. Исследование уровней и спектров высших гармоник тока в электрических сетях питания компьютерной техники и основные мероприятия по обеспечению электромагнитной совместимости / В. А. Викторов, В. А. Мешалкин, В. М. Салтыков // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 4. С. 381–402.
 38. Косарев, Б. А. Модель электротехнической системы с распределенной генерацией / Б. А. Косарев, В. К. Федоров // Омский научный вестник. 2019. № 5. С. 64–71. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2019-167-64-71>.
 39. Impedance Analysis of Squirrel-Cage Induction Motor at High Harmonics Condition / A. Skamyin [et al.] // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. 2024. Vol. 33, No 1. P. 31–41. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v33.i1.pp31-41>.
- Поступила 16.08.2023 Подписана в печать 20.10.2023 Опубликована онлайн 31.07.2024

REFERENCES

1. Sednin A. V., Pozdnyakova M. I. (2023) Energy Efficiency of Using Hybrid Heating Points in Conditions of Integration of Electrical and Thermal Networks of Urban Neighborhoods. Part 1. Justification of the Feasibility of Using Hybrid Thermal Points. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (6), 552–566. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-6-552-566> (in Russian).
2. Konstantinova S. V., Kapustinskii A. Yu., Yaroshevich T. M. (2021) Calculation of the Capacity for the Operation of a Mini-Energy Complex Based on an Independently Operating Asynchronous Generator. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (1), 40–50. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-40-50> (in Russian).
3. Kozlovskaya V. B., Kalechyts V. N. (2017) Consideration of the Impact of High Harmonics When Selecting the Conductor Cross-Sections of Lines of Outdoor Lighting. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (6), 544–557. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-6-544-557> (in Russian).
4. Koptev V. Y., Kopteva A. V., Starshaya V. V. (2020) Information Support for the Process of Multiphase Flows Transportation Based on the Introduction of a Radioisotope Non-Separation Hydrocarbon Measuring System, *2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, 674–679, <https://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9039314>.

5. Jaiswal K. K., Chowdhury C. R., Yadav D., Verma R., Dutta S., Jaiswal K. S., Sangmesh B., Karuppasamy K. S. K. (2022) Renewable and Sustainable Clean Energy Development and Impact on Social, Economic, and Environmental Health. *Energy Nexus*, 7, 100118. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100118>.
6. Nguyen M. P., Ponomarenko T., Nguyen T. Energy Transition in Vietnam: A Strategic Analysis and Forecast. *Sustainability* 2024, 16(5), 1969; <https://doi.org/10.3390/su16051969>.
7. Bialobrzeski O. V., Rod'kin D. Y. (2019) Distorting Electrical Power of the Alternating Current in the Simplest Circuit with a Diode. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (5), 433–444. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-433-444> (in Russian).
8. Nguyen H. H., Bazhin V. Y. (2023) Optimization of the Control System for Electrolytic Copper Refining with Digital Twin During Dendritic Precipitation. *Metallurgist*, 67 (1), 41–50. <https://doi.org/10.1007/s11015-023-01487-3>.
9. Bazhin V. Yu., Masko O. N., Martynov S. A. (2023) Automatic Burden Balance Monitoring and Control in the Production of Metallurgical Silicon. *Tsvetnye Metally*, (4), 53–60. <https://doi.org/10.17580/tsm.2023.04.07> (in Russian).
10. Fedorova E. R., Pupysheva E. A., Morgunov V. V. (2023) Settling Parameters Determined during Thickening and Washing of Red Mud. *Tsvetnye Metally*, (4), 77–84. <https://doi.org/10.17580/tsm.2023.04.10> (in Russian).
11. Nos O. V., Pudkova T. V., Kharitonov S. A. (2023) The Sliding-Mode Observer for PMSM Sensorless Control with Adaptive Complex-Coefficient Filter and PLL. *2023 XX Technical Scientific Conference on Aviation Dedicated to the Memory of N.E. Zhukovsky (TSCZh)*, 44–49. <https://doi.org/10.1109/tsczh58792.2023.10233364>.
12. Schasny V. P., Zhukouski A. I. (2022) Electromagnetic Compatibility of Compensating Devices and Converters of an Adjustable Electric Drive in Electrical Networks of Industrial Enterprises. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (1), 37–51. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-37-51> (in Russian).
13. Vasilev B. U., Nguyen T. H. (2023) Influence of Semiconductor Converters on Asynchronous Drive Battery and Motor in Mining Machines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, (9-1), 299–318 (in Russian).
14. Xie L., Yao L., Cheng F., Li Y., Liang S. (2020) Coordinate Control Strategy for Stability Operation of Offshore wind Farm Integrated with Diode-Rectifier HVDC. *Global Energy Interconnection*, 3 (3), 205–216. <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2020.07.002>.
15. Verrelli C. M., Bigarelli L., di Benedetto M., Lidozzi A., Solero L. (2023) A New Nonlinear Control of an Active Rectifier for Variable Speed Generating Units. *Control Engineering Practice*, 139, 105653. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2023.105653>.
16. Taha M., Almaktoof A., Khan M. T. E. (2023) 12 Pulse High power Active Rectifier for Electric Vehicle Charging. *Transportation Research Procedia*, 70, 299–306. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.033>.
17. Belsky A. A., Glukhanich D. Y. (2023) Standalone Power System with Photovoltaic and Thermoelectric Installations for Power Supply of Remote Monitoring and Control Stations for Oil Pipelines. *Renewable Energy Focus*, 47, 100493. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2023.100493>.
18. Fortes R. R. A., Buzo R. F., de Oliveira L. C. O. (2020) Harmonic Distortion Assessment in Power Distribution Networks Considering DC Component Injection From PV Inverters. *Electric Power Systems Research*, 188, 106521. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106521>.
19. Yarar N., Yagci M., Bahceci S., Onen A., Ustun T. S. (2023) Artificial Neural Networks Based Harmonics Estimation for Real University Microgrids Using Hourly Solar Irradiation and Temperature Data. *Energy Nexus*, 9, Art. 100172. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100172>.
20. Buslaev G., Lavrik A., Lavrik A., Tsvetkov P. Hybrid System of Hydrogen Generation by Water Electrolysis and Methane Partial Oxidation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48 (63), 24166–24179. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.098>.
21. Sychev Y. A., Zimin R. Y. (2021) Improving the Quality of Electricity in the Power Supply Systems of the Mineral Resource Complex with Hybrid Filter-Compensating Devices. *Journal of Mining Institute*, 247, 132–140. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.14> (in Russian).
22. Skamyin A. N., Dobush V. S., Jopri M. H. (2023) Determination of the Grid Impedance in Power Consumption Modes with Harmonics. *Journal of Mining Institute*, 261, 443–454. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.25> (in Russian).

23. Araoye T. O., Ashigwuike E. C., Adeyemi A. C., Egoigwe S. V., Ajah N. G., Eronu E. (2023) Reduction and Control of Harmonic on Three-Phase Squirrel Cage Induction Motors with Voltage Source Inverter (VSI) Using ANN-Grasshopper Optimization Shunt Active Filters (ANN-GOSAF). *Scientific African*, 21, e01785. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01785>.
24. Sychev Y. A., Aladin M. E. (2023) Overall Performance Analysis of General-Purpose Power Quality Controls on the Basis of Active Converters in Nonlinearly Loaded Industrial Power Lines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, (11), 159–181 (in Russian).
25. CIGRE (2019) *Network Modelling for Harmonic Studies*. 241.
26. Arrillaga J., Watson N. R. (2003) *Power System Harmonics*. 2nd ed. John Wiley & Sons, Ltd. 399. <https://doi.org/10.1002/0470871229>.
27. Zhezhelenko I. V. (2006) *Higher Harmonics in Power Supply Systems of an Industrial Enterprise*. 4th ed. Moscow, Energatomizdat Publ. 331 (in Russian).
28. Simon S., Winkens A., Monti A., Andreas A. (2022) Extraction of Frequency-Dependent Impedances of Residential Loads in Low-Voltage Grids for Harmonic Stability Assessment. *Electric Power Systems Research*, 212, 108528. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108528>.
29. Smirnov S. S. (2010) *Higher Harmonics in High Voltage Networks*. Novosibirsk, Nauka Publ. 327 (in Russian).
30. Yamashita K., Djokic S., Matevosyan J., Resende F. O., Korunovic L. M., Dong Z. Y., Milanovic J. V. (2012) Modelling and Aggregation of Loads in Flexible Power Networks – Scope and Status of the Work of CIGRE WG C4.605. *IFAC Proceedings Volumes*, 45 (21), 405–410. <https://doi.org/10.3182/20120902-4-fr-2032.00072>.
31. Singhal A., Wang D., Reiman A. P., Liu Y., Hammerstrom D. J., Kundu S. Harmonic Modeling, Data Generation, and Analysis of Power Electronics-Interfaced Residential Loads. *2022 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, New Orleans, LA, USA, 2022, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ISGT50606.2022.9817492>.
32. Kuzmenko V. P., Solynoyj S. V., Shishlakov V. F., Solyonaya O. Ya. (2019) Measurement of Power Quality in the Power Supply System with LED Lightning Devices. *Nauchnyi Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science Bulletin of the Novosibirsk State Technical University*, (1), 197–212. <https://doi.org/10.17212/1814-1196-2019-1-197-212>.
33. Liu W., Wang C., Li Y. (2021) Aggregation Method of Distributed Load Resources Based on Non-Intrusive Load Identification. *Journal of Physics: Conference Series*, 2138, 012004. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2138/1/012004>.
34. Moreira-Júnior J. R., Abreu T., Minussi C. R., Lopes M. L. M. (2022) Using Aggregated Electrical Loads for the Multinodal Load Forecasting. *Journal of Control Automation and Electrical Systems*, 33, 1592–1600. <https://doi.org/10.1007/s40313-022-00906-1>.
35. Ribeiro L. C., Vieira F. L., Bonatto B. D., de Souza A. C. Z., Ribeiro P. F. (2020) Chapter 5 – Modeling and Simulation of Active Electrical Distribution Systems Using the OpenDSS. Abdel Aleem H. E., Abdelaziz A. Y., Zobaa A. F., Bansal R. (eds.). *Decision Making Applications in Modern Power Systems*. Academic Press, 121–152. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816445-7.00005-0>.
36. Zhao Y., Ren L., Lin G., Peng F. (2020) Research on the Harmonics Penetration Characteristics of the Traction Network to Three-Phase 380 V Power System of the Traction Substation and Suppression Scheme. *IEEE Access*, 8, 195359–195369. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3033889>.
37. Viktorov V. A., Meshalkin V. A., Saltykov V. M. The research of the Levels and Spectra of Higher Harmonics of Current in Electrical Power Networks of Computer Equipment and the Basic Activities of the Electromagnetic Compatibility Provision. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, (4), 381–402. <https://doi.org/10.24411/2410-9916-2019-10415> (in Russian).
38. Kosarev B. A., Fedorov V. K. (2019) Model of an Electrical System with Distributed Generation. *Omsk Scientific Bulletin*, (5), 64–71. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2019-167-64-71> (in Russian).
39. Skamyin A., Shklyarskiy Y., Lobko K., Dobush V., Sutikno T., Jopri M. H. (2024) Impedance analysis of squirrel-cage induction motor at high harmonics condition. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 33 (1), 31–41. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v33.i1.pp31-41>.

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-4-300-314>

УДК 621.315.2

Длительно допустимые токи нагрузки одножильных кабелей напряжением 10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена различного конструктивного исполнения

М. Э. Высоцкий¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. На длительно допустимые токи нагрузки силовых кабелей влияет большое количество факторов, включая условия окружающей среды, способ прокладки, а также геометрические, тепловые и электрические характеристики конструкции кабеля. В каталогах производителей силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена не уточняются значения длительно допустимых токов нагрузки, которые бы учитывали площадь поперечного сечения экрана, наличие алюмополимерной ленты и брони из алюминиевых проволок. Эти компоненты могут оказывать значительное воздействие на допустимую нагрузку из-за индуцированных в них токов при двустороннем заземлении, что ведет к дополнительному нагреву кабеля. Целью данной работы является анализ влияния вышеупомянутых факторов на длительно допустимые токи нагрузки. В работе представлены формулы для расчета длительно допустимого тока нагрузки, которые учитывают особенности конструкции рассматриваемых кабелей. Расчеты показали, что допустимая нагрузка при увеличении площади поперечного сечения экрана из номинального ряда на одну ступень может уменьшаться на 6 %. Введение алюмополимерной ленты в конструкцию кабеля изменяет допустимую нагрузку не более чем на 2 %, наличие брони может привести к уменьшению допустимой нагрузки до 18 % и ее увеличению до 13 % в зависимости от сечения жилы и экрана, способа и условий прокладки. Полученные результаты расчетов отличаются от данных из каталогов до 25 %. Погрешности указывают на необходимость расчета длительно допустимой токовой нагрузки кабелей, отличающихся своей конструкцией.

Ключевые слова: кабельные линии, площадь поперечного сечения, алюмополимерная лента, броня из алюминиевых проволок, экран из медных проволок

Для цитирования: Высоцкий, М. Э. Длительно допустимые токи нагрузки одножильных кабелей напряжением 10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена различного конструктивного исполнения / М. Э. Высоцкий // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 4. С. 300–314. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-4-300-314>

Адрес для переписки

Высоцкий Максим Эдуардович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 33 661-76-75
vysotskiymmm@yandex.by

Address for correspondence

Vysotski Maksim E.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 33 661-76-75
vysotskiymmm@yandex.by

Long-Term Permissible Load Currents of Single-Core Cables with a Voltage of 10 kV with Cross-Linked Polyethylene Insulation of Various Designs

M. E. Vysotski¹⁾

¹⁾Belarussian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. There is a large number of factors that affect the long-term permissible load currents of power cables, including environmental conditions, the method of laying, as well as the geometric, thermal and electrical characteristics of the cable structure. The catalogs of manufacturers of power cables with cross-linked polyethylene insulation do not specify the long-term permissible load currents, which would take into account the cross-sectional area of the screen, the presence of aluminum polymer tape and armor made of aluminum wires. These components can have a significant impact on the permissible load due to the currents induced in them during two-way grounding, which leads to additional heating of the cable. The purpose of this study is to analyze the influence of the above-mentioned factors on the long-term permissible load currents. The paper presents formulas for calculating the long-term permissible load current, which take into account the design features of the cables under consideration. The calculations have shown that the permissible load can decrease by 6 % with an increase in the cross-sectional area of the screen from the nominal row by one step. The introduction of an aluminum polymer tape into the cable structure changes the permissible load by no more than 2 %. The presence of armor can lead to a decrease in the permissible load by up to 18 % and its increase by up to 13 %, depending on the section of the core and screen, the method and conditions of laying. The calculation results obtained differ from the catalog data by up to 25%. While the obtained errors indicate the need to form coefficients for a more accurate determination of the long-term permissible cable currents.

Keywords: cable lines, cross-sectional area, aluminum polymer tape, aluminum wire armor, copper wire screen

For citation: Vysotski M. E. (2024) Long-Term Permissible Load Currents of Single-Core Cables with a Voltage of 10 kV with Cross-Linked Polyethylene Insulation of Various Designs. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (4), 300–314. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-4-300-314> (in Russian)

Введение

В исследованиях [1, 2] доказана эффективность применения силовых кабелей напряжением 6–110 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена. Значения длительно допустимых токов нагрузки силовых электрических кабелей определяют надежность и безопасность эксплуатации электрических сетей. Исследования, проведенные в [3–5], подчеркивают значительное влияние таких параметров, как тепловое сопротивление грунта, глубина укладки кабеля в землю, интенсивность солнечного излучения, расстояние между кабелями, а также материал и площадь поперечного сечения токоведущих жил на значения длительно допустимых токов нагрузки.

В производственных каталогах на силовые кабели [6–8] приводятся значения токовых нагрузок на одножильные кабели, учитывающие класс напряжения, материал и площадь поперечного сечения жил, способ и условия прокладки (треугольником или в плоскости; в земле или в воздухе). Однако на тепловой режим работы кабеля влияют также площадь поперечного сечения экрана и наличие защитных металлических слоев в конструк-

ции кабеля, например алюмополимерной ленты для поперечной герметизации и проволочной брони из алюминия. Кабели, оснащенные защитными металлическими слоями, имеют из-за этого измененные геометрические характеристики. При двустороннем заземлении отмеченных слоев в них индуцируются токи, что в конечном итоге способствует повышению температуры нагрева жилы. Это предполагает возможность снижения допустимой нагрузки. Недогрузка кабельной линии может указывать на целесообразность использования кабеля с меньшей площадью поперечного сечения жилы, в то время как перегрузка может привести к сокращению срока службы кабеля и повышению риска возникновения аварийных ситуаций.

Цель данной работы заключается в оценке степени влияния площади поперечного сечения экрана, наличия алюмополимерной ленты и проволочной брони из алюминия на значения длительно допустимых токов. Для достижения поставленной цели предполагается выполнить расчет длительно допустимых токов для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена и наружной полимерной оболочкой на напряжение 10 кВ с сечением токоведущих жил S от 50 до 1000 мм² и сечением медного экрана S_s от 16 до 240 мм². То есть необходимо выявить зависимость между конструктивными особенностями кабелей и их способностью выдерживать определенные уровни нагрузки без риска для долговечности и безопасности эксплуатации.

Определение длительно допустимого тока нагрузки

В соответствии с [9] допустимое значение токовой нагрузки для одножильных кабелей, проложенных в почве, высыхание которой не происходит, или кабелей, проложенных в воздухе, без учета диэлектрических потерь (для изоляции из сшитого полиэтилена учет диэлектрических потерь ведут при фазном напряжении от 63,5 кВ) определяется по формуле

$$I = \left[\frac{\Delta\theta}{RT_1 + R(1 + \lambda_1)T_2 + R(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)} \right]^{0,5}, \quad (1)$$

где I – ток, проходящий по одной жиле кабеля, А; $\Delta\theta = \theta_{\text{доп}} - \theta_0$ – превышение температуры жилы кабеля над средней температурой окружающей среды, °С; $\theta_{\text{доп}} = 90$ °С – для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена; температуру окружающей среды θ_0 примем для прокладки в земле 15 °С, в воздухе 25 °С [10]; R – сопротивление жилы кабеля переменному току на единицу длины кабеля при максимальной рабочей температуре, Ом/м; T_1 – тепловое сопротивление изоляции между жилой и экраном, К·м/Вт; T_2 – то же подушки (внутренней оболочки) между экраном и броней (для бронированных кабелей), К·м/Вт; T_3 – то же наружного защитного покрытия (наружной оболочки), К·м/Вт; T_4 – то же между поверхностью

кабеля и окружающей средой, $K \cdot \text{м/Вт}$; λ_1 – отношение потерь мощности в экране к общим потерям в жилах кабеля; λ_2 – то же в броне к общим потерям в жилах кабеля.

Геометрические и электрические параметры кабелей 10 кВ. Диаметр кабеля d в общем случае можно записать в виде формулы [11]

$$d = d_{\text{ж}} + 2(\Delta_{\text{эж}} + \Delta_{\text{из}} + \Delta_{\text{эи}} + \Delta_{\text{разд}} + \Delta_{\text{экр}} + \Delta_{\text{ал}} + \Delta_{\text{вн}} + \Delta_{\text{бр}} + \Delta_{\text{обол}}), \quad (1)$$

где $d_{\text{ж}}$ – диаметр жилы; $\Delta_{\text{эж}}$, $\Delta_{\text{эи}}$ – толщина экрана по жиле и по изоляции (0,6 мм); $\Delta_{\text{из}}$ – то же изоляции (3,4 мм); $\Delta_{\text{разд}}$ – то же разделительного слоя (0,2 мм); $2\Delta_{\text{экр}}$ – то же экрана из медных проволок для сечений экрана 16; 25; 35; 50; 70; 95; 120; 150; 185; 240 соответственно 1,1; 1,2; 1,4; 1,7; 2,0; 2,4; 2,7; 3,0; 4,0; 5,0 мм [12]; $\Delta_{\text{ал}}$ – то же алюмополимерной ленты (толщина алюминиевой части 0,15 мм, толщина полимерной части 0,05 мм); $\Delta_{\text{вн}}$ – то же внутренней оболочки (подушки) (2,0 мм); $\Delta_{\text{бр}}$ – диаметр проволок брони для кабелей с диаметром под броней 25–35 мм; 35–60 мм соответственно 2,0; 2,5 мм [12]; $\Delta_{\text{обол}}$ – то же наружного защитного покрытия 3,0; 3,2; 3,4; 3,6 мм при диаметре под оболочкой до 40; 40–50; 50–60; свыше 60 мм соответственно.

При этом если в кабеле отсутствует алюмополимерная лента, то в формуле (1) опускается $\Delta_{\text{ал}}$, если отсутствует броня, то опускается $\Delta_{\text{вн}} + \Delta_{\text{бр}}$.

Площадь поперечного сечения алюмополимерной ленты

$$S_{\text{л}} = \pi(r_{2\text{л}}^2 - r_{1\text{л}}^2) / 2,$$

где $r_{2\text{л}}$ – наружный радиус алюминиевой части алюмополимерной ленты;

$r_{1\text{л}}$ – внутренний радиус алюминиевой части алюмополимерной ленты;

Площадь поперечного сечения брони из алюминиевых проволок

$$S_{\text{бр}} = Ns_{\text{бр}},$$

где $N = \left[\frac{\pi(D_{\text{бр}} + \Delta_{\text{бр}})}{F\Delta_{\text{бр}}} \right]$ – количество проволок брони [13]; $D_{\text{бр}} = d - 2(\Delta_{\text{обол}} + \Delta_{\text{бр}})$ – диаметр кабеля под броней; F – коэффициент укладки, примем 1,048;

$s_{\text{бр}} = \frac{\pi \cdot \Delta_{\text{бр}}^2}{4}$ – площадь одной проволоки брони.

Сопротивление жилы переменному току [9]

$$R = R'(1 + y_s + y_p),$$

где y_s – коэффициент поверхностного эффекта; y_p – то же эффекта близости; R' – сопротивление постоянному току при максимальной рабочей температуре

$$R' = R_{20} [1 + \alpha_{20} (\theta_{sc} - 20)],$$

где R_{20} – сопротивление переменному току при температуре 20 °С, Ом/м (удельное электрическое сопротивление жилы и экрана для меди $1,7241 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, для алюминия $2,8264 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, алюминиевой части алюмополимерной ленты и брони из алюминиевых проволок $2,84 \cdot 10^{-8}$ Ом·м); α_{20} – температурный коэффициент для меди 0,00393 1/°С, для алюминия 0,00403 1/°С; θ_{sc} – максимальная рабочая температура (жилы 90 °С, экрана и защитных слоев 80 °С), °С.

Потери в экране трех одножильных кабелей, расположенных треугольником, экраны которых заземлены с двух сторон [9]:

$$\lambda_1 = \frac{R_s}{R} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X}\right)^2}, \quad (2)$$

где R_s – сопротивление экрана Ом/м; X – реактивное сопротивление оболочки или экрана на единицу длины кабеля, Ом/м, вычисляемое по формуле [9]

$$X = 2\omega \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{2s}{d_s}\right), \quad (3)$$

где $\omega = 2\pi f$, 1/с; s – расстояние между осями жил в данной электрической секции, мм; d_s – средний диаметр экрана, мм.

Потери в экранах трех одножильных кабелей, расположенных в одной плоскости, экраны которых заземлены с двух сторон [9]:

– для внешнего кабеля с наибольшими потерями

$$\lambda_{11} = \frac{R_s}{R} \left[\frac{0,75P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{0,25Q^2}{R_s^2 + Q^2} + \frac{2R_s PQX_m}{\sqrt{3}(R_s^2 + P^2)(R_s^2 + Q^2)} \right]; \quad (4)$$

– для внешнего кабеля с наименьшими потерями

$$\lambda_{12} = \frac{R_s}{R} \left[\frac{0,75P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{0,25Q^2}{R_s^2 + Q^2} - \frac{2R_s PQX_m}{\sqrt{3}(R_s^2 + P^2)(R_s^2 + Q^2)} \right]; \quad (5)$$

– для среднего кабеля

$$\lambda_{1m} = \frac{R_s}{R} \frac{Q^2}{R_s^2 + Q^2}, \quad (6)$$

где $P = X + X_m$;

$$Q = X - \frac{X_m}{3},$$

X_m – взаимное реактивное сопротивление на единицу длины кабеля между оболочкой наружного кабеля и жилами двух других при расположении кабелей в одной плоскости, Ом/м, вычисляемое по формуле

$$X_m = 2\omega \cdot 10^{-7} \cdot \ln(2).$$

Для прокладки в земле в формуле (1) вместо λ_1 используется λ_{1m} , для прокладки в воздухе λ_{11} . Это обусловлено тем, что в земле средний кабель будет наиболее нагретым из-за влияния кабелей по бокам. В воздухе же это влияние гораздо слабее и наиболее нагретым будет кабель с большими потерями в экране.

Для кабелей с немагнитной броней или защитным усиливающим покрытием потери рассчитывают совместно с потерями в экране. При этом сопротивление экрана заменяют параллельной комбинацией сопротивлений экрана и защитного усиливающего покрытия кабеля [9, 14]

$$R_e = \frac{R_s R_A}{R_s + R_A},$$

где R_A – сопротивление защитного усиливающего покрытия (алюмополимерной ленты или проволочной брони из алюминия), Ом/м; R_e – эквивалентные сопротивления экрана и защитных металлических покрытий (ЗМП), соединенные параллельно, Ом/м.

Среднее значение диаметра экрана и защитного покрытия заменяют на средний диаметр d' , вычисляемый по формуле [9, 14]:

$$d' = \sqrt{\frac{d^2 + d_2^2}{2}},$$

где d' – средний диаметр экрана и ЗМС, мм; d_2 – то же ЗМС, мм.

Для кабелей с защитными металлическими покрытиями вычисленные значения доли потерь по выражениям (3)–(6) представляют сумму потерь в экране (и алюмополимерной ленте) λ_1 и броне λ_2 . В кабелях с броней при расчете длительно допустимого тока (1) требуется определить, какая часть из всех потерь будет приходиться на экран. Запишем долю потерь мощности в экране λ_s (или же λ_1 в формуле (1)), выраженную через значения доли суммарных потерь и сопротивления:

$$\lambda_s = (\lambda_1 + \lambda_2) \frac{R_e}{R_s}.$$

Расчет тепловых сопротивлений элементов кабеля и окружающей среды. Запишем формулы для расчета тепловых сопротивлений в соответ-

ствии с [15] с учетом уже принятых обозначений. Тепловое сопротивление между жилой и оболочкой

$$T_1 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{2t_1}{d_{ж}} \right),$$

где ρ_T – удельное тепловое сопротивление материала (3,5 К·м/Вт для полиэтиленовой изоляции); $t_1 = \Delta_{эж} + \Delta_{из} + \Delta_{эи}$ – толщина изоляции между жилой и экраном, мм.

Тепловое сопротивление между медным экраном и броней (только для бронированных кабелей)

$$T_2 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{2\Delta_{вн}}{D_s} \right),$$

где ρ_T – для ПВХ пластика 6 К·м/Вт; $D_s = d_c + 2(\Delta_{эж} + \Delta_{из} + \Delta_{эи} + \Delta_{разд} + \Delta_{экр})$ – наружный диаметр медного экрана, мм.

Тепловое сопротивление наружного защитного покрытия

$$T_3 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{2\Delta_{обол}}{D_a} \right),$$

где $\rho_T = 3,5$ К·м/Вт – для полиэтилена; $D_a = d_c + 2(\Delta_{эж} + \Delta_{из} + \Delta_{эи} + \Delta_{разд} + \Delta_{экр} + \Delta_{разд} + \Delta_{вн} + \Delta_{бр})$ – диаметр кабеля под оболочкой, мм.

Тепловое сопротивление окружающей среды:

– грунта для трех кабелей с разными потерями в экране, расположенных в горизонтальной плоскости, равноудаленных друг от друга:

$$T_4 = \frac{\rho_T}{2\pi} \left[\ln(u + \sqrt{u^2 + 1}) + \left(\frac{1 + 0,5(\lambda_{11} + \lambda_{12})}{1 + \lambda_{1m}} \right) \cdot \ln \left(1 + \left(\frac{2L}{s_1} \right)^2 \right) \right],$$

где $\rho_T = 1,2$ К·м/Вт – принимаем для грунта; $u = \frac{2L}{d}$; $L = 700$ мм – расстояние от поверхности земли до оси кабеля; s_1 – межосевое расстояние между соседними кабелями, мм;

– грунта для трех однофазных кабелей, расположенных треугольником вплотную с неметаллическими оболочками, имеющих экран из медных проволок:

$$T_4 = \frac{\rho_T}{2\pi} \left[\ln(u + \sqrt{u^2 + 1}) + 2 \ln(u) \right];$$

– грунта для трех однофазных кабелей, расположенных треугольником вплотную с алюмополимерной лентой и (или) броней (при этом T_3 нужно умножить на коэффициент 1,6):

$$T_4 = \frac{1,5 \cdot \rho_T}{\pi} \left[\ln(u + \sqrt{u^2 + 1}) - 0,630 \right];$$

– воздуха для кабелей, защищенных от прямого солнечного излучения:

$$T_4 = \frac{1}{\pi \cdot D_e \cdot h \cdot (\Delta\theta_s)^{1/4}},$$

где $h = \frac{Z}{(D_e)^g} + E$; h – коэффициент теплового рассеяния, где используются константы Z , E , g , значения которых для прокладки треугольником составляют 0,96; 1,25; 0,20 и для прокладки в вертикальной плоскости с расстоянием между кабелями в свету, равным диаметру кабеля 1,31; 2,00; 0,20 соответственно; $\Delta\theta_s$ – превышение температуры поверхности кабеля над температурой окружающей среды; $(\Delta\theta_s)^{1/4}$ определим методом последовательных приближений.

Определим коэффициент K_A

$$K_A = \frac{\pi D_e h}{1 + \lambda_1 + \lambda_2} [T_1 + T_2(1 + \lambda_1) + T_3(1 + \lambda_1 + \lambda_2)].$$

Затем проведем расчет по формуле

$$(\Delta\theta_s)_{n+1}^{1/4} = \left[\frac{\Delta\theta}{1 + K_A \cdot (\Delta\theta_s)_n^{1/4}} \right].$$

Устанавливая начальное значение $(\Delta\theta_s)_n^{1/4} = 2$ и повторяя вычисления до достижения $(\Delta\theta_s)_{n+1}^{1/4} - (\Delta\theta_s)_n^{1/4} \leq 0,001$ (достаточными оказываются четыре итерации). Здесь $\Delta\theta = 90 - 25 = 65$ °C – допустимое превышение температуры жилы над температурой окружающей среды.

Влияние сечения медного экрана, наличия брони и алюмополимерной ленты на длительно допустимый ток нагрузки кабеля

Исходя из сложности расчетов длительно допустимых токов, которые включают в себя множество переменных, промежуточных вычислений и логических операций, целесообразно использование программного обеспечения для табличных расчетов, такого как Microsoft Excel. Это обеспечит высокую точность расчета, облегчит процесс управления данными и позволит одновременно проводить вычисления для всех сечений жил и экранов кабелей.

В табл. 1–4 представлены результаты расчетов длительно допустимых токов кабелей с алюминиевыми жилами и медными экранами.

Таблица 1

Длительно допустимые токи нагрузки в зависимости от площади поперечного сечения медного экрана при прокладке кабелей треугольником в земле

Long-term permissible load currents depending on the cross-sectional area of the copper shield when underground cable laying in a trefoil

$S, \text{ мм}^2$	$S_s, \text{ мм}^2$									
	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240
50	182	182	182							
70	218	218	218	218						
95	258	258	258	257	257					
120	293	293	292	292	292	291				
150		331	330	330	329	328	327			
185		371	370	369	368	366	365	363		
240		427	426	424	422	420	418	415	414	
300		482	480	478	475	471	468	465	463	460
400			560	556	551	546	541	535	532	527
500			630	625	618	610	603	596	590	583
630			710	703	693	681	672	662	654	644
800			800	790	776	761	748	735	723	710
1000			892	878	860	840	823	805	791	772

Таблица 2

Длительно допустимые токи нагрузки в зависимости от площади поперечного сечения медного экрана при прокладке кабелей в плоскости в земле

Long-term permissible load currents depending on the cross-sectional area of the copper shield when underground cable laying in a flat

$S, \text{ мм}^2$	$S_s, \text{ мм}^2$									
	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240
50	189	189	188							
70	227	226	226	225						
95	268	267	266	264	263					
120	305	303	301	299	296	294				
150		341	339	335	331	328	326			
185		381	378	373	368	363	361	359		
240		437	432	425	417	411	407	404	404	
300		491	483	474	463	454	449	445	445	448
400			557	542	527	514	506	501	500	503
500			619	599	580	563	552	546	544	548
630			687	662	636	614	600	592	590	593
800			761	727	694	667	651	640	637	640
1000			832	791	750	717	697	684	679	683

Таблица 3

Длительно допустимые токи нагрузки в зависимости от площади поперечного сечения медного экрана при прокладке кабелей треугольником в воздухе
 Long-term permissible load currents depending on the cross-sectional area of the copper shield when overhead cable laying in a trefoil

$S, \text{мм}^2$	$S_s, \text{мм}^2$									
	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240
50	198	198	199							
70	243	243	244	244						
95	293	293	293	294	295					
120	338	338	339	339	340	340				
150		388	389	389	389	389	389			
185		443	443	443	442	442	442	441		
240		521	521	520	519	518	517	515	518	
300		599	599	597	595	593	590	588	590	590
400			717	714	710	705	700	696	696	694
500			824	819	812	805	798	791	789	785
630			950	943	933	920	910	899	894	887
800			1097	1086	1071	1054	1039	1024	1015	1003
1000			1252	1236	1215	1192	1172	1150	1137	1116

Таблица 4

Длительно допустимые токи нагрузки в зависимости от площади поперечного сечения медного экрана при прокладке кабелей в плоскости в воздухе
 Long-term permissible load currents depending on the cross-sectional area of the copper shield when overhead cable laying in a flat

$S, \text{мм}^2$	$S_s, \text{мм}^2$									
	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240
50	223	222	222							
70	273	272	272	271						
95	329	327	326	324	322					
120	380	377	375	372	368	366				
150		431	428	423	418	414	412			
185		490	484	478	470	464	461	460		
240		572	564	554	543	533	528	526	530	
300		654	642	627	611	598	591	587	592	602
400			756	733	709	690	678	672	677	689
500			855	824	792	766	751	743	747	761
630			967	925	883	846	827	816	820	836
800			1089	1033	978	935	910	896	900	918
1000			1213	1141	1073	1020	989	972	975	992

При прокладке кабелей в воздухе длительно допустимые токи нагрузки возрастают по сравнению с прокладкой в земле в связи с тем, что тепловое сопротивление T_4 между поверхностью кабеля и окружающей средой выше в земле, чем в воздухе, несмотря на то что температура воздуха принимается на 10 °С выше.

Увеличение площади поперечного сечения экрана приводит к снижению максимально допустимого тока нагрузки из-за возрастания индуцированного в экране тока, повышения в связи с этим потерь мощности и, как следствие, температуры жилы, несмотря на снижение активного сопротивления. Вместе с тем при расположении кабелей в плоскости допустимый ток в зависимости от сечения экрана имеет минимально возможное значение, что отмечено серым цветом в табл. 2 и 4. С дальнейшим увеличением сечения экрана максимально допустимый ток начинает расти. Это обусловлено повышением теплового сопротивления окружающей среды вместе с размером сечения экрана из-за использования медных проволок большего диаметра, что приводит к увеличению наружного диаметра кабеля. Максимум произведения $(1 + \lambda_1) \cdot T_4$ определяет минимально возможное значение тока.

Для кабелей с сечениями жил 50 и 70 мм² влияние сечения экрана на длительно допустимый ток относительно незначительное. С ростом сечения жилы влияние сечения экрана становится более существенным. Для кабеля с сечением жилы 1000 мм² при разных сечениях экрана наибольший допустимый ток кабеля больше наименьшего на: 16 % – при прокладке треугольником в земле; 23 % – в плоскости в земле; 12 % – треугольником в воздухе; 25 % – в плоскости в воздухе. Допустимая нагрузка при изменении площади поперечного сечения экрана из номинального ряда на одну ступень для жилы 1000 мм² отличается до 6 %.

Построим графики зависимости длительно допустимого тока при различных сечениях экрана для жил кабелей сечением 240 и 1000 мм² (рис. 1, 2).

Результаты расчетов (рис. 1, 2) указывают на сложную зависимость длительно допустимого тока от площади поперечного сечения экрана при внесении защитных металлических слоев. Кабели с этими слоями могут иметь как более высокие, так и более низкие значения длительно допустимого тока по сравнению с кабелями без них. Для прокладки в земле в плоскости кабель с сечением жилы 1000 мм² и экрана 185 мм² без защитных покрытий имеет длительно допустимый ток 679 А, а с броней 718 А (рис. 2а). При внесении брони в кабель в формуле (1) появляется T_2 , равное 0,027 К·м/Вт. За счет увеличения диаметра кабеля под оболочкой T_3 уменьшается с 0,068 до 0,058 К·м/Вт. За счет увеличения наружного диаметра кабеля T_4 уменьшается с 2,01 до 1,82 К·м/Вт. Суммарная доля потерь в среднем кабеле без брони $\lambda_1 = 0,92$, а с броней $\lambda_1 + \lambda_2 = 0,99$. Несмотря на уменьшение активного сопротивления R_e в два раза (площадь поперечного сечения брони для данного кабеля равна 315 мм²), доля потерь изменилось не столь значительно, поскольку она зависит еще и от индуктивности.

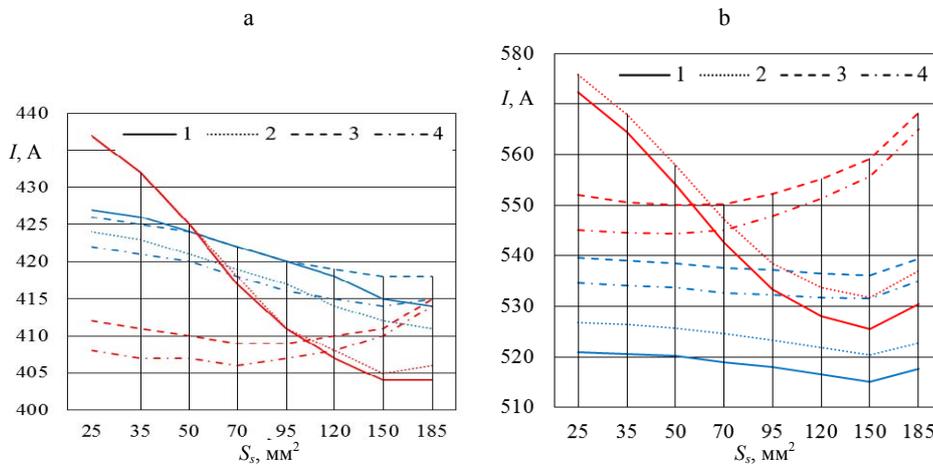


Рис. 1. Длительно допустимые токи нагрузки в зависимости от площади поперечного сечения экрана для жилы площадью поперечного сечения 240 мм² для прокладки: а – в земле, б – в воздухе; 1 – без защитных металлических покрытий, 2 – с алюмополимерной лентой, 3 – с броней, 4 – с броней и алюмополимерной лентой; красный – прокладка в плоскости, синий – прокладка треугольником

Fig. 1. Long-term permissible load currents depending on the cross-sectional area of the screen for a core with a cross-sectional area of 240 mm² for laying: a – underground, b – overhead; 1 – without protective metal coatings; 2 – with aluminum polymer tape; 3 – with armor; 4 – with armor and aluminum polymer tape; red – the gasket is in the plane, blue – the gasket is in a trefoil

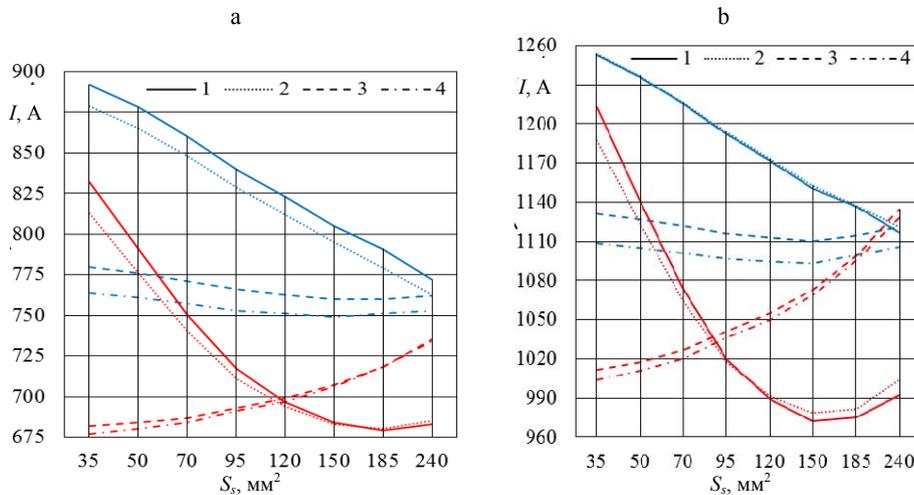


Рис. 2. Длительно допустимые токи нагрузки в зависимости от площади поперечного сечения экрана для жилы площадью поперечного сечения 1000 мм² для прокладки: а – в земле, б – в воздухе; 1 – без защитных металлических покрытий, 2 – с алюмополимерной лентой, 3 – с броней, 4 – с броней и алюмополимерной лентой; красный – прокладка в плоскости, синий – прокладка треугольником

Fig. 2. Long-term permissible load currents depending on the cross-sectional area of the screen for a core with a cross-sectional area of 1000 mm² for laying: a – underground; b – overhead; 1 – without protective metal coatings; 2 – with aluminum polymer tape; 3 – with armor; 4 – with armor and aluminum polymer tape; red – the gasket is in the plane; blue – the gasket is in a trefoil

Значительное влияние на значение длительно допустимого тока оказывают тепловое сопротивление окружающей среды и доля потерь в экране и броне кабеля. Допустимая нагрузка у кабеля с броней получилась выше за счет уменьшения T_4 и малого увеличения доли потерь. Для кабеля с тем же сечением жилы и сечением экрана 35 мм² при внесении брони T_4 уменьшается с 2,08 до 1,92 К·м/Вт. Доля потерь в среднем кабеле при внесении брони увеличивается с 0,25 до 1,04, что и уменьшает значение допустимой нагрузки.

Длительно допустимый ток кабеля при внесении алюмополимерной ленты изменяется не более чем на 2 %. Внесение же брони в кабель при сечении жилы 240 и 1000 мм² при прокладке в плоскости в земле показывает уменьшение длительно допустимого тока соответственно до 6 % и 18 %. При прокладке в воздухе показывает увеличение до 13 %.

При одинаковых условиях окружающей среды и глубине прокладки кабеля сравним полученные по расчетам значения длительно допустимых токов I со значениями, приведенными в каталоге [4], $I_{\text{кат}}$ (табл. 5).

Сопоставление данных, приведенных в табл. 5, показывают, что длительно допустимые токи нагрузки, представленные в каталоге, занимают промежуточное положение между показателями, полученными в результате расчетов (за исключением случаев прокладки кабелей в воздухе в плоскости). Расчетные значения отличаются от каталожных до 25 %, что указывает на недостаточную точность представленных длительно допустимых токов в каталоге.

Таблица 5

**Сравнение длительно допустимых токов нагрузки,
полученных по расчетам, с данными каталога**
**Comparison of long-term permissible load currents obtained
by calculations with catalog data**

S , мм ²	Условия прокладки	В земле		В воздухе	
	Способ прокладки	Треугольником	В плоскости	Треугольником	В плоскости
95	$I_{\text{кат}}$	253	263	300	349
	I	262–257	270–263	316–293	340–322
	$I_{\text{кат}}/I$	0,96–0,98	0,97–1	0,95–1,02	1,03–1,08
240	$I_{\text{кат}}$	422	426	531	607
	I	427–411	437–404	538–518	573–530
	$I_{\text{кат}}/I$	0,99–1,03	0,97–1,05	0,98–1,03	1,06–1,14
1000	$I_{\text{кат}}$	845	800	1180	1220
	I	892–753	832–680	1253–1093	1213–972
	$I_{\text{кат}}/I$	0,95–1,12	0,96–1,18	1,08–0,94	1,01–1,25

Для повышения точности расчетов при определении длительно допустимых токов кабелей стоит учитывать влияние таких факторов, как наличие и тип брони кабеля, а также площадь поперечного сечения экрана. Принимая во внимание эти параметры, можно получить более корректные и надежные значения допустимых токовых нагрузок, что позволит обеспечить их безопасную и эффективную эксплуатацию в различных условиях применения. Увеличение трудоемкости в выборе площади поперечного

сечения жилы из-за большого количества марок кабелей может быть снижено за счет автоматизации с использованием специализированного программного обеспечения.

ВЫВОДЫ

1. Приведены выражения и выполнены расчеты значений длительно допустимых токов нагрузки кабелей напряжением 10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена с алюминиевой жилой и медным экраном при наличии поперечной герметизации из алюмополимерной ленты, а также проводочной брони из алюминия.

2. Различия в допустимой нагрузке при различных сечениях экрана для одинакового сечения жилы достигают 25 %. Внесение алюмополимерной ленты в конструкцию кабеля изменяет допустимую нагрузку не более чем на 2 %. Введение брони может приводить как к уменьшению (до 18 %), так и увеличению (до 13 %) допустимого тока нагрузки, что зависит от площади поперечного сечения жилы и экрана, способа и условий его прокладки. Расчетные значения длительно допустимых токов различаются с данными каталога до 25 %.

3. Имеет смысл выполнять определение длительно допустимых токов нагрузки индивидуально для каждого типа кабеля, отличающегося своей конструкцией.

ЛИТЕРАТУРА

1. Короткевич, М. А. Эффективность применения кабелей напряжением 6–110 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена. Ч. 1 / М. А. Короткевич, С. И. Подгайский, А. В. Голомуздов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 5. С. 417–432. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-5-417-432.
2. Короткевич, М. А. Эффективность применения кабелей напряжением 6–110 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена. Ч. 2 / М. А. Короткевич, С. И. Подгайский, А. В. Голомуздов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 6. С. 505–522. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-6-505-522.
3. De Leon, F. Major Factors Affecting Cable Ampacity / F. de Leon // 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting. Montreal, QC, Canada, 2006. <https://doi.org/10.1109/PES.2006.1708875>.
4. Factors Affecting Current Ratings for Underground and Air Cable / S. H. Alwan [et al.] // International Journal of Energy and Power Engineering. 2016. Vol. 10, No 11. P. 1422–1428.
5. Metwally, I. A. Factors Influencing Ampacity and Temperature of Underground Power Cables / I. A. Metwally, A. H. Al-Badi, A. S. Al Farsi // Electrical Engineering. 2013. Vol. 95. P. 383–392. <https://doi.org/10.1007/s00202-012-0271-5>.
6. Каталог кабельно-проводниковой продукции. Витебск: Производственное объединение «Энергокомплект», 2023. 194 с.
7. Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена низкое и среднее напряжение до 35 кВ. М.: Завод «Москабель», 2023. 48 с.
8. Кабели силовые с изоляцией из сшитого полиэтилена на среднее напряжение. Каталог продукции. М.: ТД «Ункомтех», 2019. 40 с.
9. IEC 60287-1-1:2023. Electric cables – Calculation of the Current Rating. Part 1–1: Current Rating Equations (100 % Load Factor) and Calculation of Losses General [Electronic Resource]. Mode of access: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/164f72dc-b67a-496b-af43-97e28a944a7b/iec-60287-1-1-2023>.
10. Силовые кабельные линии напряжением 6–110 кВ. Нормы проектирования по прокладке кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена пероксидной сшивки: ТКП 611–2017. Минск: Мин-во энергетики Республики Беларусь, 2017. 103 с.
11. Подгайский, С. И. Силовые электрические кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / С. И. Подгайский; Белорусский национальный технический университет. Минск, 2022. 154 с.

12. IEC 60502-2:2014. Power Cables with Extruded Insulation and their Accessories for Rated Voltages from 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV). Part 2: Cables for Rated Voltages from 6 kV ($U_m = 7,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV). [Electronic Resource]. Mode of access: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/822b961a-7509-42d8-907a-9fbbb79baad9/iec-60502-2-2014>.
13. Thue, W. A. *Electrical Power Cable Engineering* / W. A. Thue. Third Ed. CRC Press, 2011. 463 p.
14. Ларина, Э. Т. Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии / Э. Т. Ларина. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1996. 448 с.
15. IEC 60287-2-1:2023. Calculation of the Current Rating. Part 2–1: Thermal Resistance – Calculation of Thermal Resistance [Electronic Resource]. Mode of access: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/9a2a6795-afb1-4194-97ae-9eef8d36e808/iec-60287-2-1-2023>.

Поступила 12.03.2024 Подписана в печать 20.05.2024 Опубликована онлайн 31.07.2024

REFERENCES

1. Korotkevich M. A., Podgaiskiy S. I., Golomuzdov A. V. (2017) The Efficacy of the Cables of 6–110 kV with XLPE Insulation. Part 1. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (5), 417–432. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-5-417-432 (in Russian).
2. Korotkevich M. A., Podgaiskiy S. I., Golomuzdov A. V. (2017) The Efficacy of the Cables of 6–110 kW with XLPE Insulation. Part 2. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (6), 505–522. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-6-505-522 (in Russian).
3. De Leon F. (2006). Major Factors Affecting Cable Ampacity. *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*. Montreal, QC, Canada. <https://doi.org/10.1109/PES.2006.1708875>.
4. Alwan S. H., Jasni J., Ab Kadir M. Z. A., Aziz N. (2016) Factors Affecting Current Ratings for Underground and Air Cables. *International Journal of Energy and Power Engineering*, 10 (11), 1422–1428.
5. Metwally I. A., Al-Bad, A. H., Al Farsi A. S. (2012). Factors Influencing Ampacity and Temperature of Underground Power Cables. *Electrical Engineering*, 95 (4), 383–392. <https://doi.org/10.1007/s00202-012-0271-5>.
6. *Catalog of Cable and Wire Products*. Vitebsk, Production Association “Energokomplekt”, 2023. 194 (in Russian).
7. *Cables with Cross-Linked Polyethylene Insulation: Low and Medium Voltage up to 35 kV*. Moscow, Moskabel' Plant, 2023. 48 (in Russian).
8. *Power Cables with Cross-Linked Polyethylene Insulation for Medium Voltage. Production Catalog*. Moscow, TH “Unkomtech”, 2019. 40 (in Russian).
9. IEC 60287-1-1:2023. *Electric Cables – Calculation of the Current Rating. Part 1–1: Current Rating Equations (100 % Load Factor) and Calculation of Losses – General*. Available at: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/164f72dc-b67a-496b-af43-97e28a944a7b/iec-60287-1-1-2023>.
10. ТКР 611-2017. *Power Cable Lines with a Voltage of 6-110 kV. Design Standards for Laying Cables with Insulation Made of Cross-Linked Polyethylene Peroxide Crosslinking*. Minsk, Ministry of Energy of the Republic of Belarus, 2017. 103 (in Russian).
11. Podgaiskiy S. I. (2022) *Power Electric Cables with Cross-Linked Polyethylene Insulation* [Dissertation]. Minsk, Belarusian National Technical University. 154 (in Russian).
12. IEC 60502-2:2014. *Power Cables with Extruded Insulation and Their Accessories for Rated Voltages from 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV). – Part 2: Cables for Rated Voltages from 6 kV ($U_m = 7,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV)*. Available at: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/822b961a-7509-42d8-907a-9fbbb79baad9/iec-60502-2-2014>.
13. Thue W. A. (2011) *Electrical Power Cable Engineering*. Third Ed. Boca Raton, CRC Press. 463. <https://doi.org/10.1201/b11507>.
14. Larina E. T. (1996) *Power Cables and High-Voltage Cable Lines*. 2nd ed. Moscow, Energoatomizdat Publ. 448 (in Russian).
15. IEC 60287-2-1:2023. *Calculation of the Current Rating. – Part 2–1: Thermal Resistance – Calculation of Thermal Resistance*. Available at: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/9a2a6795-afb1-4194-97ae-9eef8d36e808/iec-60287-2-1-2023>.

Received: 12 March 2024

Accepted: 20 May 2024

Published online: 31 July 2024

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-4-315-331>

УДК 620.97

Анализ и оптимизация режимов работы мини-ТЭЦ на местных видах топлива в условиях профицита электроэнергетических мощностей в Объединенной энергетической системе Беларуси

Часть 2

Р. С. Игнатович¹⁾, В. А. Седнин¹⁾, Е. С. Зуева²⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Филиал «Витебские тепловые сети» РУП «Витебскэнерго»
(Витебск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. Современное развитие энергетики сопровождается рядом тенденций, среди которых можно отметить декарбонизацию процессов производства энергии, увеличение доли электроэнергии в балансе потребления энергии за счет глубокой электрификации промышленности, транспорта, теплоснабжения, децентрализацию источников энергии, увеличение доли возобновляемых источников энергии, в том числе вовлечение в оборот вторичных энергоресурсов и энергии от утилизации органических отходов, развитие практики активного потребления и просьюмерства. Для Республики Беларусь, в которой лес являются одним из основных возобновляемых природных ресурсов и важнейших национальных богатств, обеспечивающих устойчивое социально-экономическое развитие страны, ее экономическую, энергетическую, экологическую и продовольственную безопасность, в условиях декарбонизации энергетики актуальным является определение значения и места энергогенерирующего оборудования, использующего местные виды топлива (МВТ), особенно это касается теплофикационных мощностей и полигенерационных установок. В работе представлены результаты проведенного исследования оценки эффективности применения мини-ТЭЦ на МВТ. Анализ архивных данных АСУ ТП действующей мини-ТЭЦ с теплофикационной ORC-установкой (Turboden 14 CHP) позволил оценить ее маневренные характеристики с привязкой к режимам работы к системе централизованного теплоснабжения с преобладанием в ней коммунально-бытовой тепловой нагрузки. Показано, что средняя скорость изменения мощности составляет 1,5–3,0 %/мин, соответственно время выхода на номинальную мощность в обычных условиях превышает 40 мин, время пуска установки из «холодного состояния» варьируется от 20 мин до 2 ч, тем самым было подтверждено предположение, что исследуемая ORC-установка в частности и мини-ТЭЦ аналогичного типа в целом не могут рассматриваться и использоваться в качестве маневренного энергоисточника без осуществления дополнительной модернизации. Проведенное численное исследование позволило показать возможность планирования эффективных режимов работы

Адрес для переписки

Игнатович Роман Сергеевич
Белорусский национальный технический университет
пр. Независимости, 65/2,
220113, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 308-26-25
ignarovich.roma@gmail.com

Address for correspondence

Ignatovich Roman S.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavistimosti Ave.,
220113, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 308-26-25
ignarovich.roma@gmail.com

теплофикационной ORC-установки в конфигурации принципиальной тепловой схемы мини-ТЭЦ на МВТ с интеграцией в нее модуля производства водорода на базе прогноза суточного графика потребления тепловой энергии с учетом динамики изменения температуры наружного воздуха. Также представлены концептуальные структурные схемы интегрированных полигенерационных систем, отличающиеся применением оборудования генерации водорода из избыточно производимой электроэнергии при работе мини-ТЭЦ по тепловому графику и участием в покрытии графика электрической нагрузки Объединенной энергетической системы Беларуси. Показана перспективность для вновь проектируемых мини-ТЭЦ на МВТ применения тепловых схем с термохимической технологией производства водорода и режимом работы блока ОРЦ на номинальной мощности.

Ключевые слова: водород, блок ОРЦ, генерация, мини-ТЭЦ, местные виды топлива, теплоснабжение, тепловая энергия, хранение энергии, электроэнергия

Для цитирования: Игнатович, Р. С. Анализ и оптимизация режимов работы мини-ТЭЦ на местных видах топлива в условиях профицита электроэнергетических мощностей в Объединенной энергетической системе Беларуси. Часть 2 / Р. С. Игнатович, В. А. Седнин, Е. С. Зуева // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 4. С. 315–331. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-67-4-315-331>

Analysis and Optimization of Operating Modes of Mini-CHP on Local Fuels in Conditions of Surplus Electric Power Capacities in the Unified Energy System of Belarus

Part 2

R. S. Ignatovich¹⁾, V. A. Sednin¹⁾, Ye. S. Zuyeva¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾“Vitebsk Heat Networks” Branch of RUE “Vitebskenergo” (Vitebsk, Republic of Belarus)

Abstract. The modern development of power engineering is accompanied by a number of trends, among which one can note the decarbonization of energy production processes; an increase in the share of electricity in the balance of energy consumption due to the deep electrification of industry, transport and heat supply; decentralization of energy sources; an increase in the share of renewable energy sources, including the involvement in the turnover of secondary energy resources and energy from the disposal of organic waste; the development of practice active consumption and prosumerism. For the Republic of Belarus, in which forests are one of the main renewable natural resources and the most important national wealth that ensure the sustainable socio-economic development of the country, its economic, energy, environmental and food security, in the context of decarbonization of the power engineering sector, it is relevant to determine the importance and location of energy generating equipment using local fuels (LF), especially for heating capacities and polygeneration plants. The paper presents the results of a study conducted to evaluate the effectiveness of using mini-CHP plants on LF. The analysis of the archived data of the automated process control system of an operating mini-CHP with a heating ORC unit (Turboden 14 CHP) made it possible to evaluate its maneuverable characteristics with reference to the operating modes of the centralized heat supply system with a predominance of municipal and household heat load in it. It has been shown that the average rate of change in power is 1.5...3.0 % min; respectively, the time to reach rated power under normal conditions exceeds 40 minutes; the time to start the unit from a “cold state” varies from 20 minutes to 2 hours. Therefore the assumption has been confirmed that the studied ORC unit in particular and mini-CHP plants of a similar type as a whole cannot be considered and used as a maneuverable energy source without additional modernization. The conducted numerical study made it possible to show the opportunity of planning effective operating modes of a heating ORC unit in the configuration of the basic thermal

circuit of a mini-CHP on LF with the integration of a hydrogen production module into it based on the forecast of the daily schedule of thermal energy consumption and taking into account the dynamics of changes in outdoor air temperature. Conceptual block diagrams of integrated polygeneration systems are also presented; they stand out for the use of hydrogen generation equipment from over-produced electricity during the operation of mini-CHP plants according to a thermal schedule and participation in the coverage of the electric load schedule of the Unified Energy System of Belarus. The use of thermal circuits with thermochemical hydrogen production technology and the operating mode of the ORC unit at rated power is shown to be promising for newly designed mini-CHPs on LF.

Keywords: hydrogen, ORC block, generation, mini-CHP, local fuels, heat consumption, thermal energy, energy storage, electricity

For citation: Ignatovich R. S., Sednin V. A., Zuyeva Ye. S. (2024) Analysis and Optimization of Operating Modes of Mini-CHP on Local Fuels in Conditions of Surplus Electric Power Capacities in the Unified Energy System of Belarus. Part 2. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (4), 315–331. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-67-4-315-331> (in Russian)

Введение

Переход к безуглеродной энергетике сопровождается рядом тенденций, характеризующих процесс развития как энергетике, так общества в целом. В числе этих тенденций можно выделить: увеличение доли электроэнергетики в балансе потребления энергии за счет глубокой электрификации промышленности, транспорта, теплоснабжения, децентрализацию источников энергии, увеличение доли возобновляемых источников энергии, включая вовлечение в оборот вторичных энергоресурсов и энергии от утилизации органических отходов, развитие практики активного потребления и генерации энергии самим потребителем (просьюмерства) [1, 2]. С целью достижения оптимального баланса между экономичностью, надежностью и экологичностью энергетике реализация вышеуказанных тенденций в совокупности требует повышения гибкости энергетических систем, в том числе путем адаптации существующих генерирующих мощностей к условиям функционирования в рамках интегрированных энергетических систем. Гибкость энергосистемы, в первую очередь, определяется по степени взаимодействия генерирующих мощностей в рамках покрытия графика потребления энергии. Поддержания гибкости энергосистемы на требуемом уровне добиваются применением высокоманевренного генерирующего оборудования, интеграцией в энергосистему систем накопления энергии, развитием логистики передачи энергии, систем оперативного и краткосрочного прогнозирования потребности в энергии. Энергетическая гибкость становится в этом контексте системообразующим свойством энергосистемы, а эффективное управление ею – главным условием для перехода к новому энергетическому укладу [2]. Для Республики Беларусь, в которой лес является одним из основных возобновляемых природных ресурсов, актуальным является определение значения и места в составе энергогенерирующего оборудования страны теплофикационных мощностей и полигенерационных установок, использующих местные виды топлива (МВТ) в виде отходов переработки древесины [3, 4].

Анализ маневренности генерирующего оборудования мини-ТЭЦ

Как известно, понятие маневренности генерирующего оборудования ТЭС [6, 7] складывается из ряда характеристик: скорости изменения нагрузки, которая измеряется в процентах номинальной мощности в минуту; диапазона изменения мощности от номинальной до минимальной, возможности кратковременной перегрузки максимальной мощности, а также пусковых характеристик энергоблока, включая длительность пусков после простоев в резерве, вероятность успешного пуска в соответствии с нормативными графиками пуска, допустимого с точки зрения малоцикловой усталости элементов блока, числа пусков в год и за время службы, пусковых потерь топлива. Очевидно, что паросиловые установки на МВТ не соответствуют этим требованиям в полной мере, однако, учитывая широкий регулировочный диапазон ОРС-блоков для оценки динамики набора мощности исследуемой ОРС-установкой, рассмотрены графики изменения электрической мощности в дни ее запуска (рис. 1). На основе архивных данных изучены маневренные характеристики АСУ ТП мини-ТЭЦ на МВТ с теплофикационной ОРС-установкой Turboden 14 СНР по улице Павловского, 66, входящей в состав РТС-6 ГП «Минсккоммунтеплосеть» [5]. Это позволило показать возможность планирования эффективных режимов работы теплофикационной ОРС-установки, работающей в составе мини-ТЭЦ на МВТ, с интеграцией в ее принципиальную тепловую схему модуля производства водорода и использованием прогноза суточного графика потребления тепловой энергии с учетом динамики изменения температуры наружного воздуха, а также обосновать состав концептуальных структурных схем интегрированных полигенерационных систем.

Анализ вышеуказанных графиков показал, что средняя скорость роста мощности энергоблока составляет 1,5–3,0 %/мин, при этом время выхода на номинальную мощность составляет чуть больше 40 мин. Также была сделана оценка продолжительности пуска установки из «холодного состояния», под которым подразумевается время от начала потребления ею электрической мощности на собственные нужды до начала отпуска мощности от установки в электрическую сеть. Для приведенных на рис. 1 графиков переходных процессов продолжительность пусков из «холодного состояния» варьируется от 20 мин до 2 ч. Это позволяет сделать вывод о том, что исследуемая ОРС-установка в частности и мини-ТЭЦ в целом не могут рассматриваться как маневренный энергоисточник без осуществления дополнительной модернизации.

Для оценки рациональности интеграции генерирующего оборудования мини-ТЭЦ к условиям работы Объединенной энергетической системы (ОЭС) Беларуси необходимо осуществлять прогнозирование вида суточных графиков потребления тепловой энергии. На основании прогноза профиля графиков потребления тепловой энергии в системе теплоснабжения (СТ) и отпуска в сеть ОЭС Беларуси электрической энергии возможно планирование оптимальных режимов работы комбинированной установки на базе ОРС-блока и, как следствие, определение эффективности работы мини-ТЭЦ на МВТ. В качестве примера на рис. 2 приведен суточный график электрической нагрузки ОЭС Беларуси в зимний рабочий день [8].

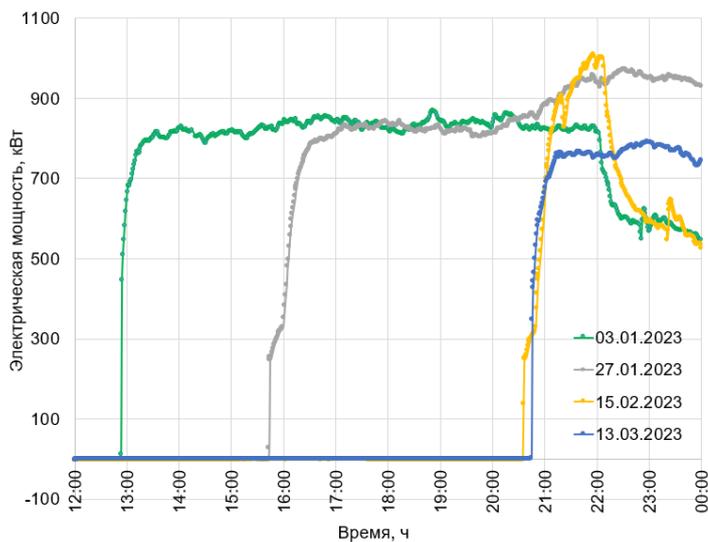


Рис. 1. Динамика изменения электрической мощности ORC-установки при ее запуске

Fig. 1. Dynamics of changes in the electrical power of an ORC unit when it is started

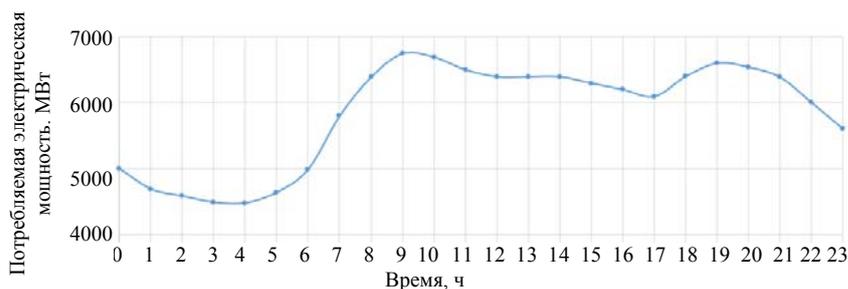


Рис. 2. Прогноз примерного профиля графика покрытия электрической нагрузки ОЭС Беларуси в зимний рабочий день

Fig. 2. Forecast of the approximate profile of the schedule for covering the electric load of the Belarusian UES on a winter working day

Ввиду отсутствия полных данных о суточном потреблении тепловой энергии непосредственно потребителями мини-ТЭЦ и котельной по улице Павловского, 66, для оценки вида прогнозируемого профиля графика суточного потребления тепловой энергии в отопительный период использована информация АСУ ТП мини-ТЭЦ котельной по улице Франциска Скорины, 48, с установленной тепловой мощностью 120 МВт и аналогичной мини-ТЭЦ по улице Павловского, 66, структурой тепловых нагрузок. На рис. 3 приведены характерные суточные графики потребления тепловой энергии соответственно в летний и зимний периоды (в относительных единицах к установленной мощности). К летнему периоду отнесен промежуток времени с мая по сентябрь включительно. Следует отметить, что приведенные графики построены для суток с наиболее характерной для рассматриваемой котельной мощностью.

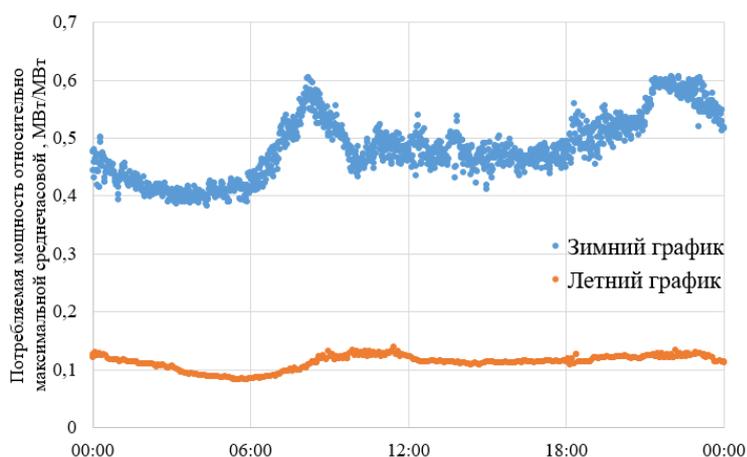


Рис. 3. Суточный график потребления тепловой энергии от котельной по улице Скорины (в относительных единицах к максимальной потребляемой мощности)

Fig. 3. Daily schedule of thermal energy consumption from the boiler house on Skaryna Str. (in relative units to the maximum power consumption)

Как известно [9], на профиль суточного графика потребления тепловой энергии оказывает влияние ряд факторов, наибольшее из которых имеют календарный день недели (рабочий, выходной, праздничный день), а также температура наружного воздуха. Общий вид суточного графика потребления тепловой энергии можно аппроксимировать системой из четырех уравнений по временным периодам суток. На рис. 4 приведены зависимости среднечасового потребления тепловой мощности (в относительных единицах к максимальной потребляемой мощности) от температуры наружного воздуха.

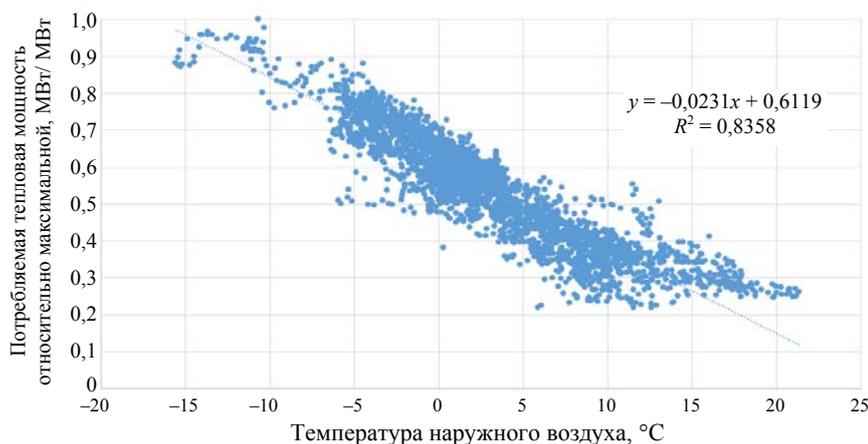


Рис. 4. Зависимость среднечасовой потребляемой тепловой мощности (в относительных единицах к максимальной мощности) от температуры наружного воздуха

Fig. 4. Dependence of the average hourly consumed thermal power (in relative units to the maximum power) on the outdoor temperature

Экспериментальные данные, представленные на этом рисунке, отражают близкую к линейной зависимость тепловой нагрузки теплоисточника от температуры наружного воздуха. На рис. 5 приведена зависимость тепловой мощности (в относительных единицах к максимальной мощности) от температуры наружного воздуха и текущего времени суток. Для осуществления кратко- и среднесрочного прогнозирования тепловой мощности построена функциональная модель с разбивкой суток на четыре временных периода, которая представлена в табл. 1.

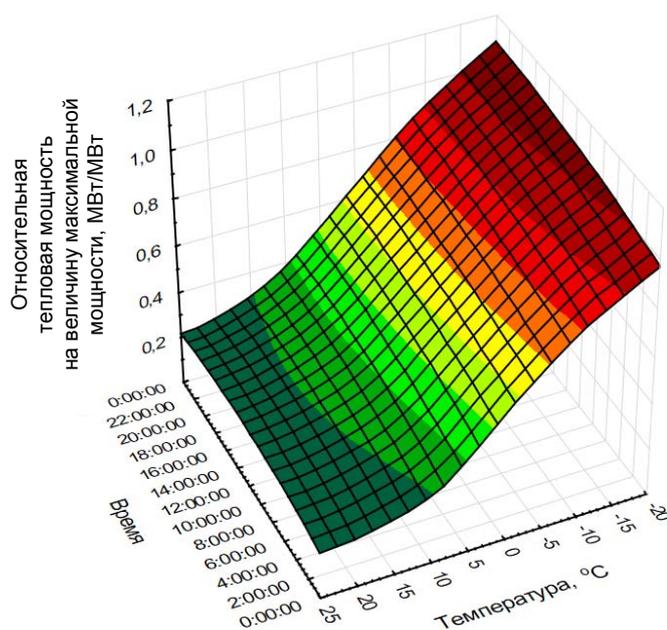


Рис. 5. Зависимость относительной тепловой мощности (в относительных единицах к максимальной мощности) от температуры наружного воздуха и текущего времени суток

Fig. 5. Dependence of the relative thermal power (in relative units to the maximum power) on the outdoor temperature and the current time of day

В качестве исходных данных для построения модели использованы значения среднечасовой температуры наружного воздуха и относительной мощности котельной в отопительный период 2023 г. Границы интервалов отрезков времени при этом определены в соответствии с предполагаемыми периодами пиков суточного потребления тепловой энергии, а также минимизации суммарного для каждого уравнения коэффициента детерминации R^2 . Следует отметить, что полученная система уравнений характеризуется коэффициентом детерминации порядка 0,9, в то время как общее уравнение без разбиения на интервалы по времени суток обладает коэффициентом детерминации, равным 0,14.

Таблица 1

Функциональная модель относительной тепловой нагрузки Q (МВт/МВт) в зависимости от среднечасовой температуры наружного воздуха t ($^{\circ}\text{C}$) и текущего времени суток τ (ч)

Functional model of relative thermal load Q (MW/MW) depending on the hourly average outdoor temperature t ($^{\circ}\text{C}$) and the current time of day τ (h)

Уравнение потребляемой мощности относительно максимальной среднечасовой мощности	Интервал времени	Коэффициент детерминации R^2
$Q_1 = 0,597 + 0,003494\tau^2 - 0,02589\tau - 0,00001300t^2 - 0,02577t$	При $0 < T \leq 9$	0,89
$Q_2 = 0,466 - 0,001011\tau^2 + 0,02613\tau + 0,0003540t^2 - 0,02626t$	При $9 < T \leq 16$	0,93
$Q_3 = 0,829 + 0,000777\tau^2 - 0,02478\tau + 0,0002640t^2 - 0,02592t$	При $16 < T \leq 21$	0,93
$Q_4 = 1,343 - 0,03106\tau - 0,00005200t^2 - 0,02714t$	При $21 < T < 24$	0,91

Адаптация ORC-установки к условиям работы энергосистемы

Как отмечалось [5], при оптимизации режимов эксплуатации мини-ТЭЦ на МВТ, работающей параллельно с ОЭС, имеющей значительный профицит электрогенерирующих мощностей, следует разделять варианты для существующих станций и для вновь строящихся. В первом случае ввиду того, что мощность оборудования известна, целесообразно рассматривать два крайних варианта, а именно работу теплофикационного блока по электрическому или тепловому графику нагрузки. В каждом из этих случаев для выдерживания суточного трафика потребления необходимо предусматривать аккумулярование соответственно тепловой или электрической энергии. Для вновь строящихся электростанций оптимизируемым параметром может выступать электрическая мощность генерирующего оборудования, поэтому целесообразно предпочтение отдать варианту с максимальным числом часов использования номинальной мощности.

Ниже представлен анализ для варианта модернизации существующей станции по целевому критерию достижения максимума коэффициента выработки электрической энергии на тепловом потреблении (максимальная доля комбинированной выработки энергии от ORC-установки мини-ТЭЦ на МВТ) в режиме работы по графику теплового потребления. В численном эксперименте установленная электрическая мощность установки принималась 1,280 МВт, а тепловая – 5,3 МВт. В условиях Республики Беларусь, не обладающей существенными запасами природного газа, водород целесообразно производить методами разложения воды. Хотя среди данных технологий производства H_2 наиболее перспективными для мини-ТЭЦ на МВТ являются электролиз и четырех- и пятиступенчатые термохимические циклы $\text{Cu}-\text{Cl}$ [10], в данном случае рассматривался вариант структуры мини-ТЭЦ с модулем производства водорода электролизом, как наиболее апробированный в энергетике [5]. На рис. 6 приведен общий вид структуры интегрированной системы с допустимой вариантностью использования генерируемого водорода.

В случае применения водорода в качестве промежуточного энергоносителя для аккумуляции избыточной электрической энергии при адаптации ORC-установки к условиям работы энергосистемы перспективным выглядит использование наиболее дешевой установки щелочного электролиза (АЕС). При этом интеграция в схему мини-ТЭЦ модуля производства H_2 посредством электролиза потребует достижения соответствующего качества исходной воды, что обычно требует дополнительной установки модуля очистки исходной воды. Согласно [11, 12], современные установки обратного осмоса потребляют от 2,8–3,3 кВт·ч энергии на 1 м^3 воды в зависимости от ее качества. С учетом того, что для производства 1 кг H_2 требуется около 9 кг H_2O , дополнительное потребление электрической энергии на 1 кг водорода составит около 0,03 кВт·ч/кг H_2 , что несопоставимо меньше, чем потребление электрической энергии коммерчески используемыми электролизерами [5]. Побочным продуктом электролиза является кислород, который в случае рассматриваемого энергоисточника может быть использован в котлах пиковой котельной путем смешивания его с воздухом, подаваемым в горелочные устройства, либо может накапливаться и направляться на нужды внешних потребителей.

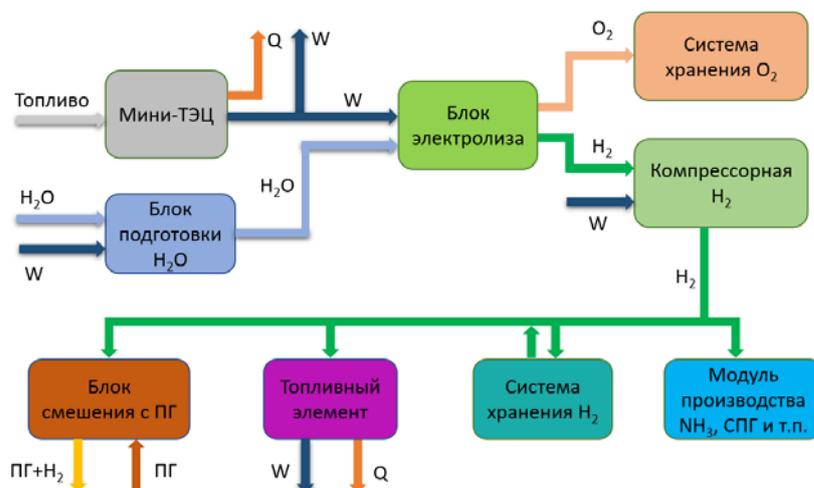


Рис. 6. Возможная конфигурация структуры мини-ТЭЦ с модулем производства и накопления H_2

Fig. 6. Possible configuration of the mini-CHP structure with the H_2 production and accumulation module

Для аккумуляции и использования избыточной электрической энергии путем преобразования ее в водород дополнительно необходим блок компримирования. Последующее использование водорода возможно по ряду вариантов, к наиболее приемлемым, согласно схеме рис. 6, можно отнести: непосредственное добавление водорода в трубопроводы природного газа для снижения его потребления по месту генерации, хранение в газообразном виде с последующим использованием в топливном элемен-

те для производства электрической энергии в периоды пиков суточного графика ОЭС; использование водорода для производства аммиака NH_3 либо синтетического природного газа (СПГ). Наиболее дорогостоящим, с точки зрения капитальных вложений и текущих расходов, вариантом из предложенных является накопление водорода с последующим его использованием в топливных элементах [13]. При этом значительные капитальные затраты вызваны непосредственной стоимостью электролизера, сопоставимой с нею стоимостью топливных элементов, а также стоимостью емкости для хранения водорода (чаще всего чистый водород в газообразном состоянии хранят при давлении в диапазоне от 35 до 70 МПа [13]). Затраты электрической энергии на сжатие H_2 до такого давления оцениваются до 6 кВт·ч на 1 кг H_2 , что оказывает существенное влияние на текущие расходы.

Для внешнего использования водорода более привлекательным выглядит вариант с производством аммиака или СПГ. Производство СПГ подразумевает дополнительный блок улавливания CO_2 из уходящих дымовых газов мини-ТЭЦ с последующим его использованием в реакции метанирования. Сравнительный анализ коммерчески доступных технологий улавливания углекислоты из дымовых газов приведен в [14]. К преимуществам производства СПГ следует отнести то, что мини-ТЭЦ на МВТ, использующая такую технологию, будет считаться энергоисточником с отрицательными выбросами загрязняющих веществ в атмосферу, а получаемый СПГ, в связи с тем что Республика Беларусь является одной из самых газифицированных стран мира с развитой системой газоснабжения [15], может быть использован в существующих газопроводах, благодаря чему отпадает необходимость в дорогостоящих системах разрядки накопленной энергии. В случае государственной поддержки ввода энергоисточников с такими характеристиками данная конфигурация схемы может стать оптимальной. Важным преимуществом использования варианта с аммиаком [16] является то, что процесс его сжижения похож на хорошо известный и отлаженный процесс сжижения пропана (сжижение производится при температуре окружающего воздуха при давлении 1,0 МПа), а организация системы хранения аммиака требует затрат существенно ниже, чем организация системы хранения чистого водорода. Но, естественно, что вариант с использованием аммиака в качестве промежуточного энергоносителя требует наличия дополнительного оборудования для синтеза аммиака, его транспорта и разрядки накопленной энергии [17].

Очевидно, что в нашем случае наиболее доступным из рассмотренных вариантов схем мини-ТЭЦ с модулем производства и накопления H_2 является вариант с непосредственным использованием произведенного водорода в существующей сети ПГ. Но следует учитывать, что перевод газопотребляющего оборудования на сжигание водородосодержащего топлива может потребовать дополнительной режимной оптимизации и наладки горелочных устройств, а также, что добавление в ПГ H_2 оказывает существенное влияние на теплотворную способность топлива, скорость распро-

странения и температуру пламени, время воспламенения топливно-воздушной смеси, требуемый для полного сжигания топлива коэффициент избытка воздуха и количество образующихся выбросов CO_2 и NO_x . Степень этого влияния зависит от концентрации H_2 в ПГ [18]. Отдельным вопросом из вышеперечисленных следует выделить влияние концентрации H_2 на скорость распространения пламени, так как последняя напрямую оказывает влияние на безопасность эксплуатации газопотребляющего оборудования и его срок службы. Таким образом, для оценки возможности добавления H_2 в газораспределительную сеть энергоисточника необходимо определить рабочий диапазон генерации водорода, обозначенные выше параметры и также оценить предполагаемую экономию природного газа.

Возвращаясь к анализу режима работы мини-ТЭЦ, следует отметить, что максимальная мощность модуля производства водорода электролизом, необходимая для преобразования избыточной электрической энергии, вырабатываемой ORC-установкой, может быть определена исходя из номинальной электрической мощности установки, равной 1,28 МВт. Расход генерируемого посредством щелочного электролиза водорода при удельных затратах электрической энергии в диапазоне 47–66 кВт·ч на 1 кг H_2 [5, табл. 2] соответственно будет находиться в интервале 27–19 кг/ч. С учетом обозначенных режимов работы ORC-установки по графику тепловой нагрузки текущая мощность блока электролизеров большую часть времени суток будет не полной, что позволит производить отбор избыточной электрической энергии из электрической сети ОЭС в периоды провалов потребления энергии, если это будет экономически обосновано тарифной политикой. Количество вырабатываемого водорода при работе ORC-установки рассматривалось и оценивалось в соответствии с характерным суточным графиком тепловой нагрузки (рис. 3). В период ночного провала потребления электроэнергии с 0:00 до 9:00 суммарная генерация водорода без выдачи электрической мощности в ОЭС составит около 110 кг зимой и 25 кг летом при удельных затратах на электролиз 47 кВт·ч на 1 кг H_2 или 78 кг зимой и 18 кг летом при удельных затратах на электролиз 66 кВт·ч на 1 кг H_2 . Как отмечалось выше, при использовании на мини-ТЭЦ водорода в виде его добавки в ПГ непосредственно перед пиковой котельной целесообразно рассчитать его допустимое содержание в получаемом топливном газе для определения граничных условий эксплуатации существующего газопотребляющего оборудования.

На рис. 7 приведена зависимость содержания водорода в топливном газе от текущей мощности газовой котельной. КПД котлов принят 92 %, теплота сгорания ПГ $33,16 \text{ МДж/нм}^3$, а расход водорода принят как максимальное значение при работе ORC-установки на максимальной установленной электрической мощности 1,28 МВт (максимальный расход водорода 27 кг/ч). Из зависимости, представленной на этом рисунке, следует, что допустимый верхний предел содержания водорода в ПГ, равный 10 %, не будет превышен при тепловой мощности котельной более 20 МВт, т. е. в данном случае не потребуются дополнительное проведение суще-

ственных режимно-наладочных работ на газопотребляющем оборудовании. В противном случае содержание в топливной смеси водорода более 10 % мол. может оказать существенное влияние на ключевые аспекты безопасной эксплуатации оборудования.

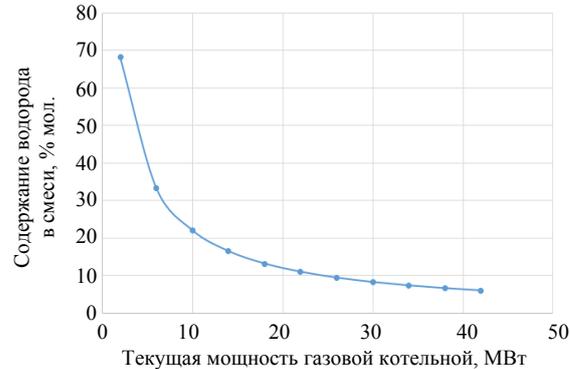


Рис. 7. Зависимость содержания водорода в топливном газе от текущей мощности газовой котельной

Fig. 7. Dependence of the hydrogen content in the fuel gas from the current capacity of the gas boiler

С учетом работы ORC-установки в соответствии с графиком тепловой нагрузки в период отсутствия выдачи электрической мощности в ОЭС с 0:00 до 9:00 избыточная электрическая энергия может быть полностью преобразована в водород. В остальное время суток вырабатываемая на ORC-установке электрическая энергия может передаваться в ОЭС. Исходя из этого система уравнений, приведенная в табл. 2, может быть преобразована для прогнозирования выработки водорода (кг/ч) и электрической энергии в зависимости от температуры наружного воздуха и текущего времени суток.

Таблица 2

Функциональная модель выработки водорода G_{H_2} (кг/ч) и электрической мощности W (МВт) в зависимости от среднечасовой температуры наружного воздуха t ($^{\circ}C$) и текущего времени суток τ (ч)

Functional model of hydrogen generation G_{H_2} (kg/h) and electric power W (MW) depending on the hourly average outdoor temperature t ($^{\circ}C$) and the current time of day τ (h)

Уравнение выработки водорода и электрической мощности	Интервал времени
$G_{H_2} = 16,26 + 0,0951\tau^2 - 0,705\tau - 0,000400t^2 - 0,702t$	При $0 < T \leq 9$
$W_2 = 0,596 - 0,001300\tau^2 + 0,03344\tau + 0,000450t^2 - 0,03360t$	При $9 < T \leq 16$
$W_3 = 1,061 + 0,000990\tau^2 - 0,03170\tau + 0,000340t^2 - 0,03320t$	При $16 < T \leq 21$
$W_4 = 1,719 - 0,03970\tau - 0,0000670t^2 - 0,03473t$	При $21 < T < 24$

Следует отметить, что, помимо рассмотренного варианта прогнозирования мощности мини-ТЭЦ в соответствии с графиком потребления тепловой энергии, возможна организация работы энергоисточника в номиналь-

ном режиме загрузки генерирующего оборудования в течение всех суток, что существенно упрощает эксплуатацию комбинированной установки, положительно сказывается на надежности ее работы и способствует более глубокому вовлечению в процесс генерации энергии комбинированной выработки. Для этого тепловая схема мини-ТЭЦ дополнительно к модулю производства водорода оснащается аккумуляторами электроэнергии и теплоты. Оптимальная мощность последних подбирается в соответствии с прогнозируемым графиком потребления тепловой энергии на основании описанных ранее факторов. В часы ночного падения потребления электрической и тепловой энергии осуществляются зарядка электрических аккумуляторов, производство водорода или избыточная выработка теплоты идет на зарядку аккумулятора теплоты. В дневное время вырабатываемая и запасенная электрическая энергия может быть выдана в ОЭС в требуемом объеме в часы характерных пиков потребления. Потребление же тепловой энергии покрывается путем отпуска непосредственно от работающих блоков мини-ТЭЦ и посредством разрядки накопленной в аккумуляторе теплоты. Общий вид концептуальной структуры мини-ТЭЦ с модулями производства водорода и аккумулятором теплоты приведен на рис. 8.

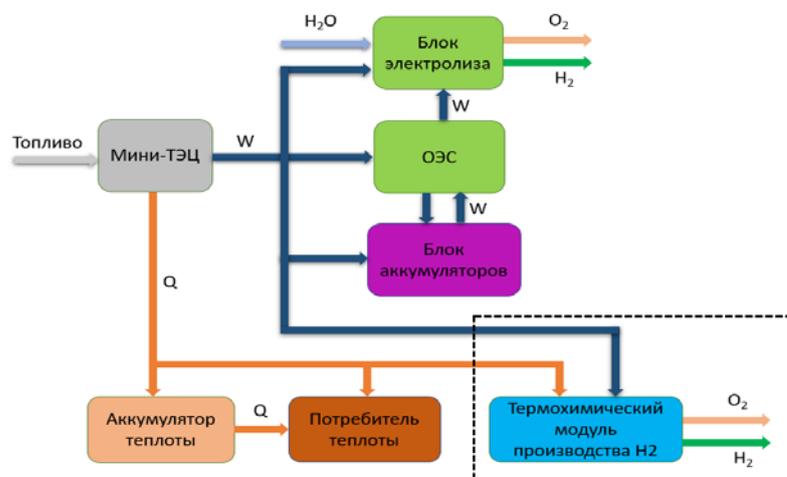


Рис. 8. Концептуальная схема мини-ТЭЦ с модулями производства H_2 и аккумулятором теплоты

Fig. 8. Conceptual diagram of a mini-CHP plant with H_2 production modules and a heat accumulator

Согласно приведенной на этом рисунке схеме электрическая энергия, вырабатываемая на мини-ТЭЦ в течение суток, может быть использована тремя способами: непосредственный отпуск в ОЭС, накопление избыточной электрической энергии в аккумуляторах электрической энергии с последующим отпуском электроэнергии в ОЭС в часы пик ее потребления,

а также обозначенный ранее вариант производства H_2 посредством электролиза в часы суточного падения потребления энергии. Следует отметить, что в условиях внедрения модуля производства водорода на существующем энергоисточнике использование электролизеров безальтернативно. Однако при проектировании новых мини-ТЭЦ на МВТ, подразумевающих установку дополнительного модуля производства водорода, имеет смысл рассматривать также внедрение термохимических циклов производства водорода, возможная принципиальная схема которых приведена в [10].

Тепловая энергия в рамках концептуальной схемы, приведенной на рис. 8, может использоваться двумя основными путями: непосредственный отпуск в тепловую сеть либо накопление в аккумуляторе теплоты с последующим потреблением. В качестве альтернативного решения для электролизеров и аккумуляторов электрической энергии в схеме выделен модуль производства водорода термохимическим методом (в синей пунктирной рамке), требующий подвода и тепловой и электрической энергии. Анализ эффективности и определение практической целесообразности применения данной концептуальной схемы интегрированной системы представляют как теоретический, так и практический интерес и являются предметом дополнительного исследования.

ВЫВОДЫ

1. Важным свойством энергетической системы является гибкость, определяемая степенью взаимодействия генерирующих мощностей в рамках покрытия графика потребления энергии. Анализ режимных характеристик генерирующего оборудования (действующая мини-ТЭЦ с теплофикационной ОРС-установкой (ОРС-установка Turboden 14 СНР мини-ТЭЦ на МВТ по улице Павловского, 66, входящей в состав РТС-6 ГП «Минском-мунтепелосеть»)) показал, что средняя скорость изменения мощности составляет 1,5–3,0 %/мин, при этом время выхода на номинальную мощность из «холодного состояния» варьировалось от 20 мин до 2 ч. Это позволило констатировать, что исследуемая ОРС-установка в частности и мини-ТЭЦ в целом не могут рассматриваться как маневренный энергоисточник без осуществления дополнительной модернизации. С целью повышения экономической привлекательности мини-ТЭЦ на МВТ рассмотрены варианты развития ее структуры посредством перехода на полигенерационные технологии и адаптации к сформировавшимся условиям работы ОЭС Беларуси.

2. Для минимизации потребления природного газа пиковыми водогрейными мощностями исследован режим загрузки ОРС-установки по варианту модернизации мини-ТЭЦ на МВТ в соответствии с тепловым графиком потребления мощности по критерию максимума электрической выработки. Проведенное численное исследование позволило показать возможность планирования эффективных режимов работы теплофикационной

ORC-установки в конфигурации принципиальной тепловой схемы мини-ТЭЦ на МВТ с интеграцией в нее модуля производства водорода на базе прогноза суточного графика потребления тепловой энергии с учетом динамики изменения температуры наружного воздуха. Разработана функциональная модель для прогнозирования выработки водорода и генерации электрической мощности в зависимости от среднечасовой температуры наружного воздуха t (°C) и текущего времени суток.

3. Представлены концептуальные структурные схемы интегрированных полигенерационных систем, отличающиеся применением оборудования генерации водорода из избыточно производимой электроэнергии при работе мини-ТЭЦ по тепловому графику и участием в покрытии графика электрической нагрузки Объединенной энергетической системы. Показана перспективность для вновь проектируемых мини-ТЭЦ на МВТ применения тепловых схем с термохимической технологией производства водорода и режимом работы блока ОРЦ на номинальной мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Илюшин, П. В. Интеграция электростанций на основе возобновляемых источников энергии в Единую энергетическую систему России: обзор проблемных вопросов и подходов к их решению / П. В. Илюшин // Вестник МЭИ. 2022. № 4. С. 98–107. <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2022-4-98-107>.
2. Холкин, Д. В. Энергетический переход в контексте «Форсайта столетия» / Д. В. Холкин, И. С. Чаусов // Энергетическая политика. 2022. № 1 (167). С. 70–81.
3. Седнин, В. А. О целесообразности строительства мини-ТЭЦ на местных видах топлива в условиях Республики Беларусь. Ч. 1: Состояние использования местных видов топлива в системах теплоснабжения / В. А. Седнин, Р. С. Игнатович, И. Л. Иокова // Наука и техника. 2023. Т. 22, № 5. С. 418–427. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-418-427>.
4. Седнин, В. А. О целесообразности строительства мини-ТЭЦ на местных видах топлива в условиях Республики Беларусь. Ч. 2: Роль мини-ТЭЦ в системах теплоснабжения городов и населенных пунктов Беларуси / В. А. Седнин, Р. С. Игнатович, И. Л. Иокова // Наука и техника. 2023. № 6. С. 508–518. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-508-518>.
5. Игнатович, Р. С. Анализ и оптимизация режимов работы мини-ТЭЦ на местных видах топлива в условиях профицита электроэнергетических мощностей в Объединенной энергетической системе Беларуси. Ч. 1 / Р. С. Игнатович, В. А. Седнин, Е. С. Зуева // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2024. Т. 67, № 3. С. 241–256. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-67-3-241-256>
6. Безлепкии, В. П. Регулировочный диапазон тепловых электростанций / В. П. Безлепкии. Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1980. 168 с.
7. Гиршфельд, В. Я. Режимы работы и эксплуатация ТЭС / В. Я. Гиршфельд, А. М. Князев, В. Е. Куликов. М.: Энергия, 1980. 288 с.
8. Бобич, А. А. Комплекс энергосберегающих мероприятий на ТЭЦ при адаптации к условиям работы энергосистемы с вводом Белорусской АЭС: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14 / А. А. Бобич. Минск, 2018. 224 с.
9. Седнин, В. А. Энергоэффективность применения гибридных тепловых пунктов в условиях интеграции электрических и тепловых сетей городских микрорайонов. Ч. 1: Обоснование целесообразности применения гибридных тепловых пунктов / В. А. Седнин, М. И. Позднякова // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 6. С. 552–566. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-6-552-566>.

10. Седнин, В. А., Игнатович Р.С. Анализ эффективности технологии производства водорода на мини-ТЭЦ на местных видах топлива термохимическим методом / В. А. Седнин, Р. С. Игнатович // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 4. С. 354–373. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-354-373>.
11. Green Hydrogen Cost Reduction. Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5 C Climate Goal [Electronic Resource] / IRENA. 2020. Mode of access: <https://www.irena.org/publications/2020/Dec/Green-hydrogen-cost-reduction>.
12. Caldera, U. Learning Curve for Seawater Reverse Osmosis Desalination Plants: Capital Cost Trend of the Past, Present, and Future / U. Caldera, C. Breyer // Water Resources Research. 2017. Vol. 53, No 12. P. 10523–10538. <https://doi.org/10.1002/2017WR021402>.
13. 2022 grid energy storage technology cost and performance assessment [Electronic Resource]: Technical Report Publ. No PNNL-33283 / V. Viswanathan [et al.]. US Department of Energy, 2022. Mode of access: <https://www.pnnl.gov/sites/default/files/media/file/ESGC%20Cost%20Performance%20Report%202022%20PNNL-33283.pdf>.
14. Patonia, A. Hydrogen storage for a net-zero carbon future [Electronic Resource]: OIES Paper: ET 23 / A. Patonia, R. Poudineh. Oxford Institute for Energy Studies, 2023. Mode of access: <https://energycentral.com/system/files/ece/nodes/644778/et23-hydrogen-storage-for-a-net-zero-carbon-future.pdf>.
15. Седнин, В. А. Анализ эффективности технологий извлечения диоксида углерода из продуктов сгорания / В. А. Седнин, Р. С. Игнатович // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 6. С. 524–538. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-524-538>.
16. Aziz, M. Ammonia as Effective Hydrogen Storage: A Review on Production, Storage and Utilization / M. Aziz, A. T. Wijayanta, A. B. D. Nandiyanto // Energies. 2020. Vol. 13, No 12. P. 3062. <https://doi.org/10.3390/en13123062>.
17. Савостьянов, А. П. Водородная энергетика и технологии. Аммиак – аккумулятор и средство доставки водорода (обзор) / А. П. Савостьянов, О. А. Кравченко // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2021. № 1 (209). С. 50–55.
18. Addressing the Combustion Challenges of Hydrogen Addition to Natural Gas: ETN Position Paper, European Turbine Network / ETN Global. 2022. 18 p.

Поступила 14.02.2024 Подписана в печать 23.04.2024 Опубликована онлайн 31.07.2024

REFERENCES

1. Ilyushin P. V. (2022) Integration of RES-based Power Plants into the Unified Energy System of Russia: Problematic Issues and Approaches to Solving Them. *Vestnik Moskovskogo Energeticheskogo Instituta = Bulletin of MPEI*, (4), 98–107. <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2022-4-98-107> (in Russian).
2. Holkin D., Chausov I. (2022) Energy Transition in the Context of the “Foresight of the Century”. *Energy Policy*, (1), 70–81 (in Russian).
3. Sednin V. A., Ignatovich R. S., Iokova I. L. (2023) On the Feasibility of Building Mini-Thermal Power Plant Using Local Fuels in the Conditions of the Republic of Belarus. Part 1. State of Use of Local Fuels in Heat Supply Systems. *Nauka I Tehnika = Science & Technique*, 22 (5), 418–427. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-418-427> (in Russian).
4. Sednin V. A., Ignatovich R. S., Iokova I. L. (2023) On the Feasibility of Building Mini-Thermal Power Plant Using Local Fuels in the Conditions of the Republic of Belarus. Part 2. Role of Mini-Thermal Power Plant in Heat Supply Systems of Cities and Settlements in Belarus. *Nauka I Tehnika = Science & Technique*, 22 (6), 508–518. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-6-508-518> (in Russian).
5. Ignatovich R. S., Sednin V. A., Zuyeva Ye. S. (2024) Analysis and Optimization of Operating Modes of Mini-CHP on Local Fuels in Conditions of Surplus Electric Power Capacities in the Unified Energy System of Belarus. Part 1. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Edu-*

- ation Institutions and Power Engineering Associations, 67 (3), 241–256. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-3-241-256> (in Russian).
6. Bezlepkin V. P. (1980) *Regulating Range of Thermal Power Plants*. Leningrad, Energoatomizdat Publ., Leningrad Branch. 168 (in Russian).
 7. Girshfeld V. Ya., Knyazev A. M., Kulikov V. E. (1980) *Modes of Operation and Functioning of Thermal Power Plants*. Moscow, Energiya Publ. 288 (in Russian).
 8. Babich A. A. (2018) *A Complex of Energy-Saving Measures at a CHP Plant when Adapting to the Operating Conditions of the Power System with the Commissioning of the Belarusian NPP* [Dissertation]. Minsk. 224 (in Russian).
 9. Sednin A. V., Pozdnyakova M. I. (2023) Energy Efficiency of Using Hybrid Heating Points in Conditions of Integration of Electrical and Thermal Networks of Urban Neighborhoods. Part 1. Justification of the Feasibility of Using Hybrid Thermal Points. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (6), 552–566. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-6-552-566> (in Russian).
 10. Sednin V. A., Ignatovich R. S. (2023) Analysis of the Efficiency of Hydrogen Production Technology at Mini-CHP Plants Using Local Fuels by Thermochemical Method. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (4), 354–373. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-354-373> (in Russian).
 11. IRENA (2020). *Green Hydrogen Cost Reduction*. Available at: <https://www.irena.org/publications/2020/Dec/Green-hydrogen-cost-reduction>.
 12. Caldera U., Breyer C. (2017) Learning Curve for Seawater Reverse Osmosis Desalination Plants: Capital Cost Trend of the Past, Present, and Future. *Water Resources Research*, 53, 10523–10538. <https://doi.org/10.1002/2017WR021402>.
 13. Viswanathan V., Mongrid K., Franks R., Li X., Baxter R. (2022) *2022 Grid Energy Storage Technology Cost and Performance Assessment*. Technical Report Publ. No. PNNL-33283. US Department of Energy. Available at: <https://www.pnnl.gov/sites/default/files/media/file/ESGC%20Cost%20Performance%20Report%202022%20PNNL-33283.pdf>
 14. Patonia A., Poudineh R. (2023) *Hydrogen Storage for a Net-Zero Carbon Future*: OIES Paper: ET 23. Oxford Institute for Energy Studies. Available at: <https://energycentral.com/system/files/ece/nodes/644778/et23-hydrogen-storage-for-a-net-zero-carbon-future.pdf>.
 15. Sednin V.A., Ignatovich R.S. Analysis of the Efficiency of Technologies for Extraction Carbon Dioxide from Combustion Products. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (6), 524–538. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-524-538> (in Russian).
 16. Aziz M., Wijayanta A. T., Nandiyanto A. B. D. (2020) Ammonia as Effective Hydrogen Storage: A Review on Production, Storage and Utilization. *Energies*, 13 (12), 3062. <https://doi.org/10.3390/en13123062>.
 17. Savostyanov A. P., Kravchenko O. A. (2021) Hydrogen Energy and Technologies. Ammonia–Hydrogen Storage and Supply Means (Review). *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus region. Technical Sciences*, (1), 50–55. <http://doi.org/10.17213/0321-2653-2021-1-50-55> (in Russian).
 18. ETN Global (2022). *Addressing the Combustion Challenges of Hydrogen Addition to Natural Gas*. ETN Position Paper, European Turbine Network. 18 p.

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-4-332-344>

УДК 676.056.521.3

Computational and Experimental Study of the Patterns of Formation of a Fluidized Bed of Inert Haydite Particles Material

A. V. Mitrofanov¹⁾, S. V. Vasilevich²⁾, S. O. Stojko²⁾

¹⁾Toraighyrov University (Pavlodar, Kazakhstan),

²⁾Belarusian State Academy of Aviation (Minsk, Republic of Belarus)

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Abstract. At present, an actual trend in the development of fuel and energy complexes in a number of countries is the diversification of generation via the involvement of local types of solid fuel. In this case, thermochemical processing of fuel is often carried out in a fluidized state. A significant proportion of dispersed fuels cannot be transferred to a state of stable fluidization. The solution in such cases is to create a fluidized bed of inert carrier, into which particles of the target fuel component are then introduced. In this work, a computational and experimental study of the fluidization of inert bulk material (haydite granules) was carried out. The key purpose of the work was to develop a mathematical model for the formation of a fluidized bed, which makes it possible to calculate the process based on its local characteristics, as well as to identify the model parameters and test it using experiment data. During the study the problems of developing a numerical method for calculating the distribution of velocities and concentrations along the height of the apparatus were solved, parametric identification of the proposed mathematical model was carried out, and empirical verification of the modeling results was carried out. The mathematical apparatus of the theory of Markov chains was used as the mathematical basis for constructing the model. The data from our own laboratory full-scale experiment were used to identify the parameters of the model and verify it. A comparison of calculated and experimental data showed the high predictive efficiency of the model for the given granulometric composition of the fluidizing product. The results of the laboratory full-scale experiments also showed a significant evolution of the granulometric composition of haydite granules during their long-term stay in a fluidized bed, which requires a separate study, as well as the introduction of appropriate amendments to the mathematical model for its further improvement.

Keywords: fluidized bed, numerical simulation, Markov chains, gas velocity profile, haydite particles

For citation: Mitrofanov A. V., Vasilevich S. V., Stojko S. O. (2024) Computational and Experimental Study of the Patterns of Formation of a Fluidized Bed of Inert Haydite Particles Material. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (4), 332–344. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-4-332-344>

Адрес для переписки

Василевич Сергей Владимирович
Белорусская государственная академия авиации
ул. Уборевича, 77,
220096, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 249-97-65
svasilevich@yandex.ru

Address for correspondence

Vasilevich Sjarhei V.
Belarusian State Academy of Aviation
77, Uborevichst str.,
220096, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 249-97-65
svasilevich@yandex.ru

Расчетно-экспериментальное исследование закономерностей формирования кипящего слоя инертного керамзитового материала

А. В. Митрофанов¹⁾, С. В. Василевич²⁾, С. О. Стойко²⁾

¹⁾Торайгыров университет (Павлодар, Казахстан),

²⁾Белорусская государственная академия авиации (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. В настоящее время актуальной тенденцией развития топливно-энергетических комплексов ряда стран является диверсификация генерации за счет вовлечения местных видов твердого топлива. При этом термохимическая переработка топлива часто реализуется в псевдооживленном состоянии. Существенная доля дисперсных видов топлива не может быть переведена в состояние стабильного псевдооживления. Выходом в таких случаях является создание псевдооживленного слоя инертного носителя, в который затем вводят частицы целевого топливного компонента. В настоящей работе предпринято расчетно-экспериментальное исследование псевдооживления инертного сыпучего материала (гранул керамзита). Целью настоящей работы является разработка математической модели формирования псевдооживленного слоя, позволяющей вести расчет процесса по его локальным характеристикам, а также идентификация параметров модели и ее проверка по данным натурного эксперимента. В ходе исследования решены задачи разработки численного метода расчета распределения скоростей и концентраций по высоте аппарата, выполнена параметрическая идентификация предложенной математической модели, эмпирическая проверка результатов моделирования. В качестве математической основы построения модели использован математический аппарат теории цепей Маркова. Для идентификации параметров модели и ее верификации использованы данные собственного натурного эксперимента. Сравнение расчетных и экспериментальных данных показало высокую прогностическую эффективность модели для известного гранулометрического состава ожижаемого продукта. Результаты натурных экспериментов показали также значительную эволюцию гранулометрического состава частиц керамзита при их длительном пребывании в псевдооживленном слое, что требует отдельного исследования, а также введения соответствующих поправок в математическую модель для ее дальнейшего совершенствования.

Ключевые слова: псевдооживленный слой, численное моделирование, цепи Маркова, профиль скорости газа, частицы керамзита

Для цитирования: Митрофанов, А. В. Расчетно-экспериментальное исследование закономерностей формирования кипящего слоя инертного керамзитового материала / А. В. Митрофанов, С. В. Василевич, С. О. Стойко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 4. С. 332–344. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-4-332-344>

Introduction

Currently, the efforts of many countries are aimed at improving technologies for processing solid fuels and increasing electricity generation through the use of various types of renewable solid fuels [1–3]. These trends are supported by very reasonable considerations. The use of renewable local solid fuels allows for diversification of generation and provides affordable, functional and sustainable energy in all weather conditions for rural electrification [4]. Compared with fossil fuels, the use of biomass also supports the trend towards transition to more clean and low-carbon energy systems [4, 5]. Due to the desire to intensify

technological processing processes, industry traditionally uses equipment with active hydrodynamic flow regimes [6–8]. These apparatuses can be divided into three groups depending on the flow configuration of the combustor: vortexing, swirling and cyclonic fluidized-bed combustors [9–11]. However, some granular media due to its physical and mechanical characteristics do not form a sufficiently stable and predictable fluidization pattern [12–15]. Researchers associate the reasons for these difficulties with the peculiar shape of the particles, which is characterized by many objective characteristics (particles sizes, densities, shapes, proportions etc.) [13–15]. The peculiar shape of fluidized particles leads to problems in fluidization, such as particle agglomeration, defluidization, elutriation, and segregation [14, 15]. These difficulties are noted by many researchers when fluidizing many types of local bulk biofuels: rice husk [16, 17], cotton stalk [13], palm shell [18] etc. To provide fluidization state of the biomass, it is necessary to incorporate an inert material such as sand, glass beads, alumina [19–21].

It's noted that the use of such binary mixtures makes it possible to improve several aspects of the operation of equipment for thermochemical processing of solid fuels. On the one hand, finely dispersed inert material provides stable fluidization at lower flow rates of the fluidizing medium, and, on the other hand, such modes provide more intense gas-solid heat exchange in the equipment [20, 22].

However, the transition to a multicomponent (in particular, binary) mixture also means that the situation becomes more complicated. Obviously, to describe and predict such systems, it is necessary to understand the characteristics of each component. At the same time, it is necessary to establish the order of influence of one component on another and on the entire process as a whole. The above considerations mean that if we think in terms of mathematical modeling, then there is no need to change the approaches to mathematical modeling when working with mixtures; however, identifying model parameters when working with mixtures becomes more difficult. One can see that the existing numerical studies for biomass pyrolysis in fluidized-bed reactors are mainly based on Eulerian–Eulerian and Eulerian–Lagrangian multiphase flow models (DEM-CFD) [23–25]. Such models are based on the consideration of a conditionally infinitesimal volume, therefore they are very detailed and require the identification of a large number of parameters [23, 26–31]. In this regard, in our study, the choice was made in favor of the concept of stochastic modeling based on the theory of Markov chains [32, 33]. In common case the device space in such models is not subject to decomposition into such small volumes as in DEM-CFD models [33–36]; however, if necessary, the level of detail can be increased, and the results obtained will be comparable to those obtained in DEM-CFD models [37].

The key aim of the present stage of the work is to construct a mathematical model of fluidization of inert material, identification of the most significant parameters of this model and their identification, as well as subsequent verification of the predictive capabilities of the model by comparing the modeling results with data from independent experiments.

Materials and methods

Theoretical methods. The transition from a continuous process representation to its description with a Markov chain model based on separation of operating volume of a reactor into n perfectly mixed cells of the length $\Delta x = H/n$ where H is the height of the reactor. The principal scheme of the proposed model design is shown in Fig. 1.

The property of the system that interests us is the content of particles (their number or mass) and gas content in each cell. It is convenient to organize all the specified contents in a state column vectors S (size $n \times 1$), then for a certain point in time the distribution of observable content along the height of the apparatus can be characterized as [32, 33, 36]:

$$S = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \dots \\ S_N \end{bmatrix} \quad (1)$$

The total duration of the process observation can also be divided into finite intervals of time Δt , and the current time can be presented as a sequence of discrete values $t_k = (k - 1)\Delta t$, where k is the time step number ($k = 1, 2, \dots, N$; where N is the total number of observation time periods) [32, 33, 36].

During the k -th observation period, the state vector S^k changes and becomes S^{k+1} . The correlation between S^k and S^{k+1} can be described by the recurrent matrix formula [32, 33, 36]:

$$S^{k+1} = P^k \cdot S^k, \quad (2)$$

where P is the transition probability matrix or transition matrix, which can be called the main operator of the Markov chain model [32, 33, 36].

In the case of a batch fluidization process, the specified matrix equality (2) can be adapted to construct models of gas flow and particle flow, represented as [36, 38, 39]:

$$S_s^{k+1} = P_s^k \cdot S_s^k, \quad (3)$$

$$S_g^{k+1} = P_g^k \cdot S_g^k + F, \quad (4)$$

where indexes ‘s’ and ‘g’ assign the corresponding matrices to the solid and gas phases respectively, F is the vector of supply and discharge of fluidizing gas.

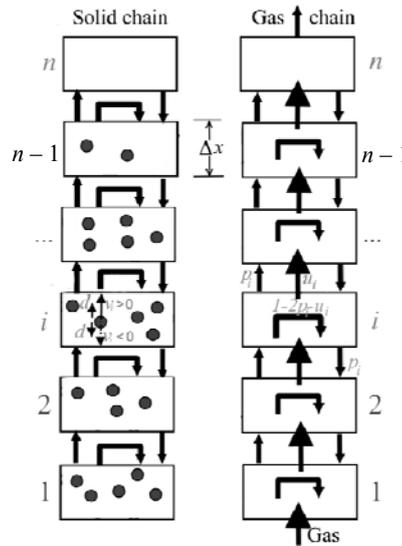


Fig. 1. The principal scheme of the proposed Markov chain model of fluidization process

The vector \mathbf{F} has two non-zero elements equal in modulus to the volume of gas supplied to the apparatus in one time interval Δt :

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} q \cdot \Delta t \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ -q \cdot \Delta t \end{bmatrix}, \quad (5)$$

where q is the volumetric gas flow rate, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

The matrix \mathbf{P} is the key operators of any Markov chain model. It consists of transition probabilities and can be constructed can be designed based on the following provisions: the j -th column of the matrix consists of probabilities related to the j -th cell, and the probability to transit into the i -th cell is placed in the i -th row of this column [36, 38, 39]. The book by A. Tamir [40] has brought much systematization into the field of general rules of Markov chain model construction, but the strategy of application of the theory to modeling in powder technology are examined and detailed in more recent works [32–34].

In the case of modeling a particular process a researcher have to solve two interrelated problems [32, 34]. The first is how to choose the structure of the model so that it best supports a qualitative description of the process, and the second is how to quantify the transition probabilities for the formation of the transition matrix. Depending on how both of these problems are solved, and how these solutions are coordinated with each other, quite diverse models of fluidized bed can be obtained [33, 36, 37, 39].

It should be noted that our work is generally focused on solving the second problem, since ultimately we need to have a predictive effective model capable of predicting a concrete process. However, it must be borne in mind that both problems are closely interrelated, since the issues of identifying model parameters depend on the adopted calculation scheme. The previous stages of work [36, 39, 41] have shown that the issues of parameter identification can, to a certain extent, be considered resolved. This doesn't mean that further work should not be carried out in this direction, but as a first approximation the convective-diffusion approach (one can read more about it in the works [33, 41]) for transition probabilities can be used. The obtained with way models are efficient to predict the expansion of the fluidized bed and the distribution of particles along its height [33, 36, 41].

In the considered models [36, 39, 41] under consideration the main attention is paid to identifying the probabilities of transition along a chain of cells of solid phase particles (elements of the matrix \mathbf{P}). The convective-diffusion concept of forming matrices of transition probabilities involves separating the symmetrical (diffusion) component of the transfer probability and its asymmetrical part (convective). The transition matrix for the solid phase looks like follows [39]:

$$\mathbf{P}_s = \begin{bmatrix} 1-v_i-d_i & d_i & 0 & \dots & 0 & 0 \\ v_i+d_i & 1-v_i-2\cdot d_i & d_i & \dots & 0 & 0 \\ 0 & v_i+d_i & 1-v_i-2\cdot d_i & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1-v_{n-1}-2\cdot d_{n-1} & d_n \\ 0 & 0 & 0 & \dots & v_{n-1}+d_{n-1} & 1-d_n \end{bmatrix}, \quad (6)$$

where d is symmetrical part of the probability associated with random walk of particles (diffusion probability), v is asymmetrical part of the probability of particle transfer from a cell (convective probability).

The scheme for calculating these transition probabilities for the solid phase of a fluidized bed migration have been established and verified in previous works [36, 39, 41].

The diffusion probability is assumed to be related to a dispersion coefficient [33, 34, 41]:

$$d = D \frac{\Delta t}{\Delta x^2}, \quad (7)$$

where the dispersion coefficient D can be quantified from the empirical relationship in the literature.

The following relation [42] is used in the present work to calculate the dispersion coefficient:

$$D = 0.051 \cdot \left(\frac{U_0}{U_{mf}} \right) (U_0 - U_{mf})^{1.471}, \quad (8)$$

where U_0 is a superficial gas velocity, U_{mf} is a minimum fluidization velocity.

The asymmetric part of the probability of particle transition from cell to cell is considered to be associated with the local gas velocity U_i in the i -th cell and particle settling velocity in the considered cell V_{si} [36, 41]:

$$v_i = |U_i - V_{si}| \frac{\Delta t}{\Delta x}. \quad (9)$$

The local gas velocity can be calculated as follows [36, 41]:

$$U_i = \frac{U_0}{1 - \pi \left(\frac{S_{s(i)}}{8S_{\max(i)}} \right)^{2/3}}, \quad (10)$$

where S_s and S_{\max} are the corresponding (k -th) moment of time and the maximum (for a dense bed state) values of the particle content in the cell.

The particle settling velocity V_s is considered to be related to the weight of the particle G as follows [36, 41]:

$$G = C_{d(i)} f \rho_g \frac{V_{s(i)}^2}{2}, \quad (11)$$

where C_d is a drag force coefficient for identification of which, within the framework of this study, the following empirical formula was used [43]:

$$C_{d(i)} = \left(2.25 \operatorname{Re}_i^{-0.31} + 0.36 \operatorname{Re}_i^{0.06} \right)^{0.45}, \quad (12)$$

where Re is the dimensionless Reynolds number.

Thus, the calculation scheme used assumes that convective transport probabilities are calculated for each computational domain separately, and probabilities of diffusion particle transfer are calculated for the entire fluidized bed as a whole. This calculation scheme is used quite often [36, 41], and good agreement between calculated predictions and experimental data is provided mainly by the choice of correlations for identifying model parameters.

Another traditional assumption for such cell models is the assumption that the gas moves from bottom to top in the ideal plug mode [36, 39, 41]. The transition matrix with such a movement has only two non-zero diagonals. The novelty of constructing the calculation scheme in this study is determined by the fact that the probability of gas backflow into previous cells is introduced into the model. This process is considered as stochastic and proportional to the diffusion of particles in the volume of the fluidized bed. In this case, the transition matrix already has three non-zero diagonals:

$$P_g = \begin{bmatrix} 1-u_i-p_i & p_i & 0 & \dots & 0 & 0 \\ u_i+p_i & 1-u_i-2 \cdot p_i & p_i & \dots & 0 & 0 \\ 0 & u_i+p_i & 1-u_i-2 \cdot p_i & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1-u_{n-1}-2 \cdot p_{n-1} & p_n \\ 0 & 0 & 0 & \dots & u_{n-1}+p_{n-1} & 1-p_n \end{bmatrix}, \quad (13)$$

where u is a part of the gas transferred to the next cell in the chain and p is the proportion of gas transferred to neighboring cells due to random reasons.

Calculation of the fraction of gas displaced by the flow from the i -th cell is calculated as in previous works as a function of the local gas velocity U [36, 39]:

$$u_i = U_i \frac{\Delta t}{\Delta x}. \quad (14)$$

One of the assumptions of the model that determines the novelty is that gas is allowed to be thrown back into previous cells, and not just its ideal displacement forward along the chain. Obviously, such a view of the process increases the adequacy of the description, since the flow regime of the fluidizing medium in equipment with a fluidized bed is far from strictly laminar. In this study, the assumption was made that the random scatter of gas portions is associated with random walk of particles; accordingly, the following assumption was made:

$$p_i = k_u d_i, \quad (15)$$

where k_u is an empirical parameter of the proposed model.

Experimental setup. A schematic of the experimental setup is shown in Fig. 2. The main component of the setup was a cylindrical glass column with internal diameter 50 mm. There were 5 holes along the height of the apparatus, in which sensors (Testo-330) were installed to measure local gas flow rates. The sensor readings were taken during 10 minutes of the fluidization process at 1-minute intervals. The values obtained in this way for each height position were averaged over time. The averaged values were used to convert into solid phase concentration values according to the formula (10).

A narrow fraction of haydite particles was used as a bulk material for the experiments (fraction boundaries were limited using sieves 0.1 mm and 0.125 mm). The equivalent monofraction size was taken as 0.11 mm. The experiment was carried out at superficial gas velocities of 0.3 m/s, 0.4 m/s and 0.5 m/s (at each velocity was repeated three times and the results were averaged). In each individual experiment,

target measurements were taken during the first 10 minutes of the fluidization process. Then the fluidization process was stopped, the sensors were removed (to prevent its erosion), the holes were plugged, the air supply was restored, and fluidization continued for another 100 minutes. After this, the sensors were again placed in the apparatus and the measurements were repeated. Thus, the measurements were repeated after 110 minutes of fluidization of a sample of haydite particles in the apparatus. As a result, the distribution of particles along the height of the fluidized bed was established for each test sample of material for two time intervals (from 0 to 10 min and from 110 to 120 min). This repetition of the experiment was required because the particle size distribution of the product can change during fluidization process due to attrition [44–47].

Results and discussion

The obtained experimental results were used to achieve two goals. The first of these is the identification of model parameters. Fundamentally, the model has three parameters that require experimental identification, namely the particle drag coefficient C_d , the dispersion coefficient D , and the empirical coefficient k_u .

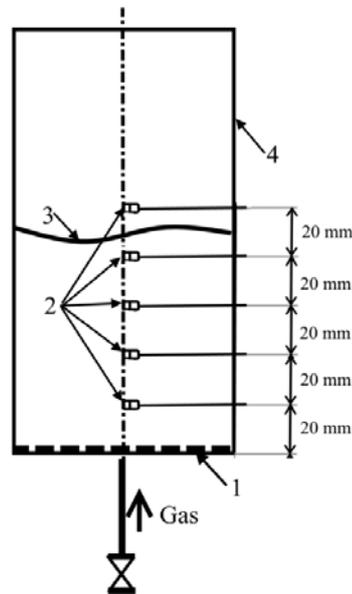


Fig. 2. Installation diagram for the implementation of experimental research: 1 – gas distributor; 2 – gas velocity sensors; 3 – fluidized bed; 4 – glass column

To calculate the first two indicated values, dependencies (8) and (12) were adopted, which have been used in the previous stages of the work [38, 39, 41, 48]. Thus, the fitting parameter was only the coefficient k_u characterizing the deviation of the gas flow characteristics from the ideal plug flow regime. To establish the value of this parameter experimental data at the gas superficial velocity of 0.4 m/s were used (the obtained values were used in modeling for other gas rates). For the fitting procedure itself, the least squares method was used to minimize the discrepancy between the calculated and experimental particle concentrations along the height of the apparatus. The coefficient values were sorted in steps of 0.1 for the range 0...1. The coefficient values were subject to enumeration in steps of 0.05 for the range $k_u = [0...1]$. On the Fig. 3 the comparison of the particle distributions obtained from the model (lines) and in the experiment (markers) at the superficial gas velocity of 0.4 m/s is shown.

The Fig. 3a allows comparing the experimental results with calculation results obtained under the assumption that the gas moves in the ideal plug mode. The Fig. 3a allows comparing the experimental results with calculation results obtained under the assumption that the gas moves has a stochastic component with $k_u = 0,35$ (at this value, the best agreement between the calculated and experimental data for this mode was obtained, so it was subsequently used for other fluidization modes within the framework of this study). As it can be seen from the Fig. 3, the inclusion of the parameter $k_u > 0$ in the model made it possible to more reliably describe the distribution of particles along the height of the fluidized bed.

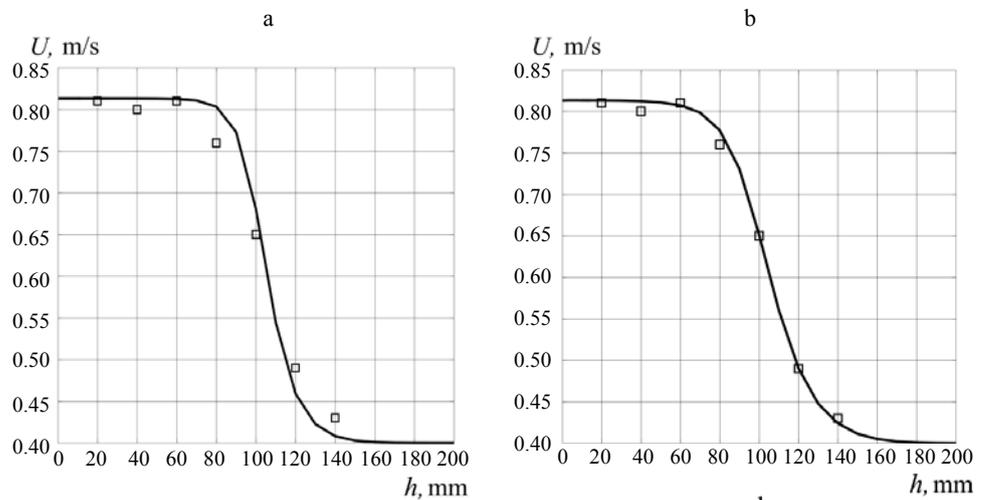


Fig. 3. Distribution of local gas filtration velocity along the height of the fluidized bed apparatus (markers – experimental data; lines – calculated prediction) at superficial gas velocity 0.4 m/s: a – with model parameter $k_u = 0$; b – with model parameter $k_u = 0.35$

As can be seen from Fig. 4, the established value of the parameter $k_u > 0$ made it possible to describe more reliably the distribution of particles along the

height of the fluidized bed for other hydrodynamic regimes. Fig. 5 illustrates two trends. On the one hand, the model is well capable of predicting the distribution of gas velocities (and particles, respectively) with a known equivalent particle diameter. On the other hand, over time there appears to be a decrease in particle size due to attrition (after 110 minutes of fluidization, the equivalent particle size decreased from 1.1 to 1 mm). When substituting the last size into the model, the quality of prediction remains quite sufficient for engineering purposes; however, the gradual evolution of particle size is not taken into account in the model.

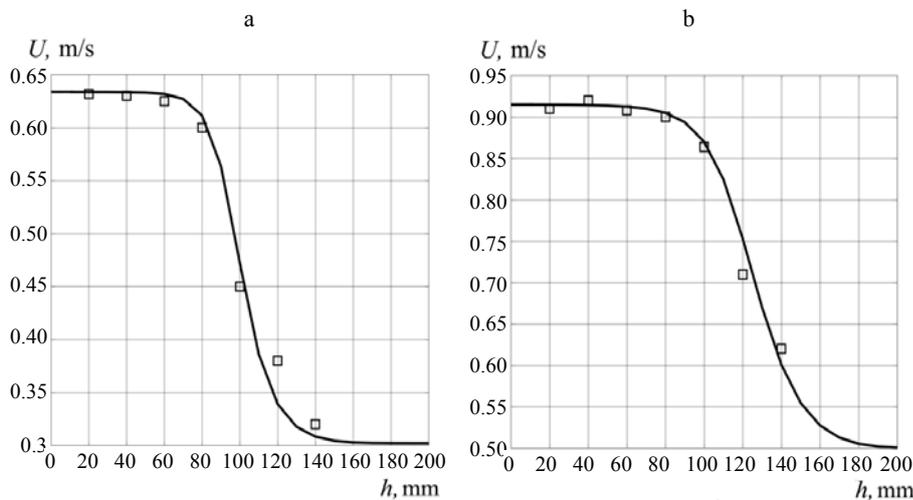


Fig. 4. Distribution of local gas filtration velocity along the height of the fluidized bed apparatus with model parameter $k_u = 0.35$ (markers – experimental data; lines – calculated prediction): a – at superficial gas velocity 0,3 m/s; b – at superficial gas velocity 0.5 m/s

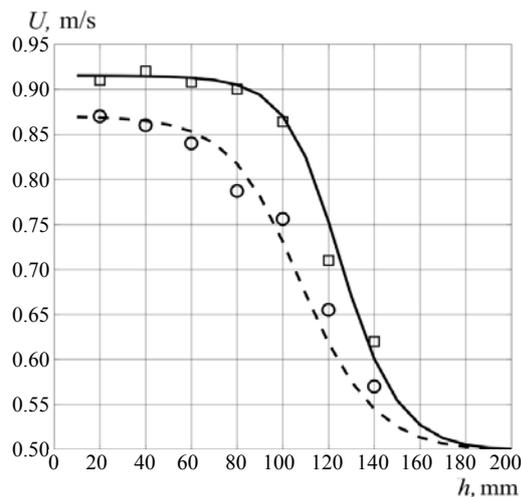


Fig. 5. Distribution of local gas filtration velocity along the height of the fluidized bed apparatus with model parameter $k_u = 0.35$ and with superficial gas velocity 0,5 m/s (markers – experimental data: \square – at first 10 minutes of fluidization process and \circ – after 110 minutes of fluidization process; lines – calculated prediction)

CONCLUSIONS

In the work, the model of fluidization of an ensemble of solid particles in an batch apparatus was constructed based on the mathematical approach of the theory of Markov chains. The model has a cellular structure, which makes it possible to describe the fluidization process by local parameters of its state. The movement of solid particles is considered in the model based on the convective-diffusion approach traditional for such models, which made it possible to identify the model parameters using dependencies known from the literature quite simply. At the same time, the novelty of the calculation scheme is ensured by the rejection of the traditional model of gas filtration in the ideal displacement mode and the introduction of a random scatter of gas portions between cells, proportional to the diffusion of particles with a proportionality coefficient k_u . Our own experiments on measuring local gas velocities in the laboratory unit with a fluidized bed made it possible to identify this parameter based on the consideration of one fluidization mode. The results of a comparison of calculation and experiment showed that the proposed calculation scheme increases the adequacy of the description of the fluidization process, and the identified value of the parameter k_u can be used to describe other fluidization modes with a given bulk material. It has also been shown that during the fluidization process the material changes particle size distribution due to attrition. It was shown that the proposed model describes the velocity distribution for narrow fractions of expanded clay with sufficient accuracy; however, the very evolution of the particle size distribution (equivalent diameter of the monofraction) should be taken into account when modeling, which is a promising direction for the development of the proposed model.

REFERENCES

1. Fortov V. E., Popel' O. S. (2014) The Current Status of the Development of Renewable Energy Sources Worldwide and in Russia. *Thermal Engineering*, 61 (6), 389–398. <https://doi.org/10.1134/s0040601514060020>.
2. Karpunin I. I., Kuzmich V. V., Balabanova T. (2011) Usage of Vegetal Wastes for Energy Production *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (6), 72–75 (in Russian).
3. Korsak E. P. (2019) Formation of the System of Threats to Energy Security of the Republic of Belarus. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (4), 388–398. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-388-398> (in Russian).
4. Pode R. (2016) Potential Applications of Rice Husk Ash Waste From Rice Husk Biomass Power Plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1468–1485. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.051>.
5. Pysmenna U. Ye., Trypolska G. S. (2020) Sustainable Energy Transitions: Overcoming Negative Externalities. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (4), 312–327. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-312-327>.
6. Grammelis P. (ed.) (2011) *Solid Biofuels for Energy*. London, Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-1-84996-393-0>.
7. Yates J. G., Lettieri P. (2016) *Fluidized-Bed Reactors: Processes and Operating Conditions*. Cham, Springer International Publishing. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-39593-7>.
8. Perry's Chemical Engineers' Handbook. (1998). *Choice Reviews Online*, 35 (06), 35-3079-35-3079. <https://doi.org/10.5860/choice.35-3079>.
9. Arromdee P., Kuprianov V. I. (2012) A Comparative Study on Combustion of Sunflower Shells in Bubbling and Swirling Fluidized-Bed Combustors with a Cone-Shaped Bed. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 62, 26–38. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2012.10.002>.

10. Kaewklum R., Kuprianov V. I. (2010) Experimental Studies on a Novel Swirling Fluidized-Bed Combustor Using an Annular Spiral Air Distributor. *Fuel*, 89 (1), 43–52. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.07.027>.
11. Madhiyanon T., Lapirottanakun A., Sathitruangsak P., Soponronnarit S. (2006) A Novel Cyclonic Fluidized-Bed Combustor (ψ -FBC): Combustion and Thermal Efficiency, Temperature Distributions, Combustion Intensity, and Emission of Pollutants. *Combustion and Flame*, 146 (1–2), 232–245. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2006.03.008>.
12. Wu X., Li K., Song F., Zhu X. (2017) Fluidization Behavior of Biomass Particles and its Improvement in a Cold Visualized Fluidized Bed. *BioResources*, 12 (2), 3546–3559. <https://doi.org/10.15376/biores.12.2.3546-3559>.
13. Zhong W., Jin B., Zhang Y., Wang X., Xiao R. (2008) Fluidization of Biomass Particles in a Gas–Solid Fluidized Bed. *Energy Fuels*, 22 (6), 4170–4176. <https://doi.org/10.1021/ef800495u>.
14. Bannon D., Deza M., Masoumi M., Estejab B. (2023) Assessment of Irregular Biomass Particles Fluidization in Bubbling Fluidized Beds. *Energies*, 16 (4), 2051. <https://doi.org/10.3390/en16042051>.
15. Deza M., Franka N. P., Heindel T. J., Battaglia F. (2009) CFD Modeling and X-Ray Imaging of Biomass in a Fluidized Bed. *Journal of Fluids Engineering*, 131 (11), 111303. <https://doi.org/10.1115/1.4000257>.
16. Leon M. A., Dutta A. (2010) Fluidization Characteristics of Rice Husk in a Bubbling Fluidized Bed. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 88 (1), 18–22. <https://doi.org/10.1002/cjce.20245>.
17. Armesto L., Bahillo A., Veijonen K., Cabanillas A., Otero J. (2002) Combustion Behaviour of Rice Husk in a Bubbling Fluidised Bed. *Biomass and Bioenergy*, 23 (3), 171–179. [https://doi.org/10.1016/s0961-9534\(02\)00046-6](https://doi.org/10.1016/s0961-9534(02)00046-6).
18. Minimum and Complete Fluidization Velocity for Sand-Palm Shell Mixtures, Part I: Fluidization Behavior and Characteristic Velocities (2010). *American Journal of Applied Sciences*, 7 (6), 763–772. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2010.763.772>.
19. Oliveira T. J. P., Cardoso C. R., Ataíde C. H. (2013) Bubbling Fluidization of Biomass and Sand Binary Mixtures: Minimum Fluidization Velocity and Particle Segregation. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 72, 113–121. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2013.06.010>.
20. Toschi F., Zambon M. T., Sandoval J., Reyes-Urrutia A., Mazza G. D. (2020) Fluidization of Forest Biomass-Sand Mixtures: Experimental Evaluation of Minimum Fluidization Velocity and CFD Modeling. *Particulate Science and Technology*, 39 (5), 549–561. <https://doi.org/10.1080/02726351.2020.1786202>.
21. Clarke K. L., Pugsley T., Hill G. A. (2005) Fluidization of Moist Sawdust in Binary Particle Systems in a Gas–Solid Fluidized Bed. *Chemical Engineering Science*, 60 (24), 6909–6918. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2005.06.004>.
22. Pérez N. P., Pedroso D. T., Machin E. B., Antunes J. S., Verdú Ramos R. A., Silveira J. L. (2017) Fluid Dynamic Study of Mixtures of Sugarcane Bagasse and Sand Particles: Minimum fluidization Velocity. *Biomass and Bioenergy*, 107, 135–149. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.08.015>.
23. Chen T., Ku X., Lin J., Ström H. (2020) CFD-DEM Simulation of Biomass Pyrolysis in Fluidized-Bed Reactor with a Multistep Kinetic Scheme. *Energies*, 13 (20), 5358. <https://doi.org/10.3390/en13205358>.
24. Deen N. G., Van Sint Annaland M., Van der Hoef M. A., Kuipers J. A. M. (2007) Review of Discrete Particle Modeling of Fluidized Beds. *Chemical Engineering Science*, 62 (1), 28–44. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2006.08.014>.
25. Sommerfeld M., Cui Y., Schmalfuß S. (2019) Potential and Constraints for the Application of CFD Combined with Lagrangian Particle Tracking to Dry Powder Inhalers. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 128, 299–324. <https://doi.org/10.1016/j.ejps.2018.12.008>.
26. Wang T., Zhang F., Furtney J., Damjanac B. (2022) A Review of Methods, Applications and Limitations for Incorporating Fluid Flow in the Discrete Element Method. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14 (3), 1005–1024. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.10.015>.
27. Ma H., Zhao Y. (2018) CFD-DEM Investigation of the Fluidization of Binary Mixtures Containing Rod-Like Particles and Spherical Particles in a Fluidized Bed. *Powder Technology*, 336, 533–545. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.06.034>.
28. Ma H., Xu L., Zhao Y. (2017) CFD-DEM Simulation of Fluidization of Rod-Like Particles in a Fluidized Bed. *Powder Technology*, 314, 355–366. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.12.008>.
29. Feng Y. Q., Xu B. H., Zhang S. J., Yu A. B., Zulli P. (2004) Discrete Particle Simulation of Gas Fluidization of Particle Mixtures. *AIChE Journal*, 50 (8), 1713–1728. <https://doi.org/10.1002/aic.10169>.

30. Xiong Q., Choi H. S., Lan X., Wang S. (2022). Editorial: Recent Advances in Multiscale CFD Simulation of Pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 165, 105569.
31. de Munck M. J. A., Peters E. A. J. F., Kuipers J. A. M. (2023) Fluidized Bed Gas-Solid Heat Transfer Using a CFD-DEM Coarse-Graining Technique. *Chemical Engineering Science*, 280, 119048. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.119048>
32. Berthiaux H., Mizonov V., Zhukov V. (2005) Application of the Theory of Markov Chains to Model Different Processes in Particle Technology. *Powder Technology*, 157 (1–3), 128–137. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2005.05.019>.
33. Dehling H. G., Hoffmann A. C., Stuet H. W. (1999) Stochastic Models for Transport in a Fluidized Bed. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 60 (1), 337–358. <https://doi.org/10.1137/s0036139996306316>.
34. Berthiaux H., Mizonov V. (2008) Applications of Markov Chains in Particulate Process Engineering: A Review. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 82 (6), 1143–1168. <https://doi.org/10.1002/cjce.5450820602>.
35. Catak M., Bař N., Cronin K., Tellez-Medina D., Byrne E. P., Fitzpatrick J. J. (2010) Markov Chain Modelling of Fluidised Bed Granulation. *Chemical Engineering Journal*, 164 (2–3), 403–409. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.02.022>.
36. Mitrofanov A., Mizonov V., Tannous K., Ovchinnikov L. (2016) A Markov Chain Model to Describe Fluidization of Particles with Time-Varying Properties. *Particulate Science and Technology*, 36 (2), 244–253. <https://doi.org/10.1080/02726351.2016.1243180>.
37. Zhuang Y., Chen X., Liu D. (2016) Stochastic Bubble Developing Model Combined with Markov Process of Particles for Bubbling Fluidized Beds. *Chemical Engineering Journal*, 291, 206–214. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.01.095>.
38. Mizonov V., Mitrofanov A. (2020) Application of the Theory of Markov Chains to Model Different Processes in Particle Technology. *Advances in Engineering Research. Nova Science Publishers*. New-York, 2020. Vol. 33. P. 1–74. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2005.05.019>.
39. Mitrofanov A. V., Mizonov V. E., Shpeynova N. S., Vasilevich S. V., Kasatkina N. K. (2021) Experimental and Theoretical Study of the Axial Distribution of Solid Phase Particles in a Fluidized Bed. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (4), 349–362 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-4-349-362>.
40. Tamir A. (1998) Applications of Markov Chains in Chemical Processes. *Applications of Markov Chains in Chemical Engineering*. Elsevier, 498–589. <https://doi.org/10.1016/B978-044482356-4/50007-9>.
41. Mizonov V., Mitrofanov A., Ogurtzov A., Tannous K. (2014) Modeling of Particle Concentration Distribution in a Fluidized Bed by Means of the Theory of Markov Chains. *Particulate Science and Technology*, 32 (2), 171–178. <https://doi.org/10.1080/02726351.2013.839016>.
42. Esin A., Altun M. (1984) Correlation of Axial Mixing of Solids in Fluidized Beds by a Dispersion Coefficient. *Powder Technology*, 39 (2), 241–244. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(84\)85041-x](https://doi.org/10.1016/0032-5910(84)85041-x).
43. Khan A. R., Richardson J. F. The Resistance to Motion of a Solid Sphere in a Fluid. *Chemical Engineering Communications*, 62 (1–6), 135–150. <https://doi.org/10.1080/00986448708912056>.
44. Nawaz Z., Xiaoping T., Wei X., Wei F. (2010) Attrition Behavior of Fine Particles in a Fluidized Bed with Bimodal Particles: Influence of Particle Density and Size Ratio. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 27 (5), 1606–1612. <https://doi.org/10.1007/s11814-010-0240-5>.
45. Wu D., Gu Z., Li Y. (2015) Attrition of Catalyst Particles in a Laboratory-Scale Fluidized-Bed Reactor. *Chemical Engineering Science*, 135. P. 431–440. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2015.01.005>.
46. Ghods N., Golshan S., Zarghami R., Sotudeh-Gharebagh R. (2019) CFD-DEM Modelling of Particles Attrition in Jet-In-Fluidized Beds. *Chemical Engineering Research and Design*, 148, 336–348. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.06.015>.
47. Alonso M., Arias B., Fernández J. R., Bughin O., Abanades C. (2018) Measuring Attrition Properties of Calcium Looping Materials in a 30 kW Pilot Plant. *Powder Technology*, 336, 273–281. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.06.011>.
48. Mitrofanov A., Mizonov V., Camelo A., Tannous K. (2019) Application of the Theory of Markov Chains to Theoretical Study of Processes in a Circulating Fluidized Bed. *Particulate Science and Technology*, 37 (8), 1032–1037. <https://doi.org/10.1080/02726351.2018.1525459>.

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-4-345-362>

УДК 004.4+621.1+621.373.8

Самопроизвольное зарастание трещиноватости в рабочих камерах энергетических газожидкостных тепловых установок – диффузионные динамические процессы

Т. В. Рыжова¹⁾, Д. Н. Бухаров²⁾, М. М. Аракелян³⁾, С. М. Аракелян²⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых (Владимир, Российская Федерация),

³⁾Ереванский государственный университет (Ереван, Республика Армения)

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. Рассмотрены вопросы образования неоднородностей и трещин и эффекты их самопроизвольного заживления на известных принципах и представлениях нелинейной динамики и квантовых технологий для полноты описания картины возможных процессов. При этом самопроизвольное зарастание микрон неоднородностей в твердотельных/металлических изделиях, подобные дефекты в которых возникают при различных режимах их эксплуатации, обсуждается на примере теплоэнергетических установок разного типа с циклическими процессами и вибрациями. Механизм такого заживления/холодной сварки определяется динамическими процессами нестационарной диффузии с временными характеристиками в рамках соответствующих модельных представлений. Рассматривается модель диффузионно-ограниченной агрегации дефектов/частиц, реализованная методом клеточного автомата с окрестности Неймана, модель случайного и баллистического осаждения, а также перколяционный подход. Описывается процесс модификации и развития 3D-трещиноватой структуры на основании теории нагрузок Гриффитса для дислокаций с учетом поэтапного последовательного перехода от устойчивого состояния к стадии роста. В результате действия таких динамических нагрузок в твердотельном объекте наблюдается быстрое изменение параметров микротрещиноватости, которое можно представлять как локальные микровзрывы: рост и слияние природных микротрещин в более крупные; зарождение новых микротрещин; раскрытие крупных микротрещин с образованием дефектов следующего иерархического уровня. В обзорном аспекте рассмотрены хорошо известные в математике и физике универсальные режимы функционирования нелинейной динамической системы, пригодные для анализа стабильности и устойчивости работы тепловых энергетических установок. Происходящие процессы связываются с разными типами и стратегиями развития неоднородностей, такими как: коллапс и стагнация, устойчивая периодичность, параметры «в разнос», хаотическое развитие в определенных рамках, срыв/внезапный кризис, резкий скачок и рывок в развитии. Предложенные подходы могут быть

Адрес для переписки

Рыжова Татьяна Викторовна
Белорусский национальный технический университет
Партизанский проспект, 77,
220107, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 250-36-95
tatsiana.rizhova@yandex.by

Address for correspondence

Ryzhova Tatiana V.
Belarusian National Technical University
77, Partizansky Ave.,
220107, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 250-36-95
tatsiana.rizhova@yandex.by

полезны в задачах повышения реального эксплуатационного состояния камер с рабочим веществом в энергетических установках при их функционировании в различных режимах работы.

Ключевые слова: камеры теплоэнергетических установок, нестационарная диффузия, заживление трещин, профили реконструкции трещин

Для цитирования: Самопроизвольное зарастание трещиноватости в рабочих камерах энергетических газожидкостных тепловых установок – диффузионные динамические процессы / Т. В. Рыжова [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 67, № 4. С. 345–362. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-67-4-345-362>

Spontaneous Overgrowth of Jointing in the Working Chambers of Power Gas-Liquid Thermal Installations – Diffusion Dynamic Processes

T. V. Ryzhova¹⁾, D. N. Bukharov²⁾, M. M. Arakelian³⁾, S. M. Arakelyan²⁾

¹⁾ Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾ Vladimir State University A. G. and N. G. Stoletovs (Vladimir, Russian Federation),

³⁾ Yerevan State University (Yerevan, Republic of Armenia)

Abstract. The issues of the formation of inhomogeneities and cracks as well as the effects of their spontaneous healing are considered on the well-known principles and concepts of nonlinear dynamics and quantum technologies in order to fully describe the picture of possible processes of the genesis of heterogeneities and their self-organization. At the same time, the process of spontaneous overgrowth of micro-inhomogeneities in solid-state/metal products, such defects in which occur under different operating conditions, is discussed on the example of thermal power plants of various types with cyclic processes and vibrations. The mechanism of such healing is determined by dynamic processes of unsteady diffusion with certain temporal characteristics evaluated within the framework of the corresponding model concepts. A model of diffusion-limited aggregation of defects/particles implemented by the cellular automaton method from the Neumann neighborhood, a model of random and ballistic deposition, as well as a percolation approach are considered. The process of modification and development of a 3D fractured structure based on the Griffiths load theory for dislocations is described, taking into account the gradual sequential transition from a stable state to a growth stage. As a result of the action of such dynamic loads in a solid-state object, a rapid change in the parameters of microcracking is observed, which can be represented as local micro-explosions, viz. the growth and fusion of natural microcracks into larger ones; the emergence of new microcracks; the disclosure of large microcracks with the formation of defects of the next hierarchical level. In the overview aspect, the universal modes of operation of a nonlinear dynamic system, well-known in mathematics and physics and suitable for analyzing the stability and sustainability of thermal power plants, are considered. The ongoing processes are associated with different types and strategies for the development of heterogeneities, such as: collapse and stagnation; stable periodicity; parameters “at odds”; chaotic development within certain limits; disruption/sudden crisis; a sharp leap and a breakthrough in development. The proposed approaches can be useful in improving the real operational condition of chambers with working matter in power plants when they operate in various operating modes.

Keywords: chambers of thermal power plants, unsteady diffusion, crack healing, crack reconstruction profiles

For citation: Ryzhova T. V., Bukharov D. N., Arakelian M. M., Arakelyan S. M. (2024) Spontaneous Overgrowth of Jointing in the Working Chambers of Power Gas-Liquid Thermal Installations – Diffusion Dynamic Processes. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (4), 345–362. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-4-345-362> (in Russian)

Введение

Изучение динамических процессов развития микронеоднородностей и трещиноватости от локальных очагов напряжения и дефектов в твердо-

тельных материалах внутренней камеры с рабочим веществом энергетических газожидкостных устройств в разных режимах их эксплуатации с циклическими процессами в конечном итоге определяет надежность и долговечность их работы. Принципиально, что даже вибрации рабочей установки малой интенсивности могут вызывать кардинальную модификацию 3D-структуры сети трещин (как поверхностных, так и объемных), которая может происходить непрерывно даже в рамках в целом устойчивого с определенной топологией состояния системы (с внутренними связями) под действием разных факторов. Результатом данного воздействия может быть перестройка всей, даже некритической для работы устройства, системы трещин и дефектов с реализацией новых взаимодействий внутри такой 3D-сети.

При этом рост трещины и, следовательно, разрушение объекта происходят, как правило, поэтапно, с последовательным переходом от устойчивого состояния к стадии роста. Каждый этап характеризуется специфическим энергетическим состоянием как самой трещины, так и всего объекта в целом.

Однако в условиях сильно нестационарных рабочих режимов энергетической установки такой процесс перестройки 3D-сети неоднородностей с транзитом масс веществ, даже микроскопических, приводит к их заживлению для некоторых пространственно-временных масштабов.

Подобное «сплавление» неоднородностей в материале возможно, в частности, в связи с эффектами тиксотропии в жидкостно-твердотельной смеси при прекращении вибраций (ср. с [1]).

Проанализируем (в относительных единицах) физические причины заживления микрон неоднородностей фрактального типа в твердотельном устройстве с поверхностно-объемными дефектами, заполненными газожидкостной фазой рабочего вещества энергетической установки в процессе ее эксплуатации. Это происходит благодаря развивающимся процессам нестационарной самодиффузии вещества в определенных условиях в рамках ряда анализируемых нами моделей.

Обсуждение возможности обратимости таких процессов – образования неоднородностей и трещин и эффектов самопроизвольного их заживления – ведется на известных принципах и представлениях нелинейной динамики и квантовых технологий. Это сделано для полноты описания картины возможных процессов генезиса неоднородностей и их самоорганизации при эксплуатации реальных тепловых энергоустановок разного класса.

Диффузионная модель

Рассмотрим процесс самозарастания/залечивания трещины, который моделируется в рамках самодиффузии дефектов/частиц.

Присоединение групп объектов/частиц к выделенной трещине, направление которой задается, в частности, внешним воздействием, изучим на примере модели диффузионно-ограниченной агрегации (DLA) [2], позволяющей генерировать структуры с фрактальными размерностями из указанных выше объектов и учитывать тепловые процессы. Модель трещины в виде 1D-структуры – нити в приближении DLA – реализована как клеточный автомат Неймана/Мура [3]. Влияние теплоэнергетических условий

при разных режимах работы устройства учитывалось с помощью коэффициента вероятности прилипания p , который представлялся нормированным коэффициентом диффузии из интервала значений вероятности (0; 1].

Алгоритм построения модели зарастания трещины в DLA-приближении формировался из нижеследующих этапов (рис. 1): 1 – на этапе инициализации в расчетной области с наложенной равномерной сеткой генерировалась стартовая структура, состоящая из системы частиц-зародышей, расположенных на нижней границе, а также задавался размер центральной трещины/нити (максимальное число частиц в расчетной области); 2 – на верхней границе расчетной области генерировалось заданное количество частиц; 3 – они совершали случайные смещения вниз и в стороны с одинаковой или различной вероятностью; 4 – в случае их приближения к занятой ячейке расчетной области в рамках окрестности Мура реализовывалась их агрегация к занятой ячейке, иначе бы движение продолжалось; затем – повторение шагов 2–4. Критерием остановки итерационного процесса было достижение центральной трещиной требуемого размера, когда количество частиц в расчетной области достигало заданного значения или происходило касание объектов диффузии верхней границы трещины.

Модельное уравнение решалось в дискретном виде в приближении диффузионно-ограниченной агрегации [2, 3] в ходе реализации итерационного процесса. Начальное состояние системы описывалось через расположение на границах трещины модельных частиц материала изделия, выполнявших роль центров агрегации (ср. с [4]). Каждая итерация начиналась введением в расчетную область нового модельного дефекта. Далее реализовывалось DLA-приближение (рис. 1а).

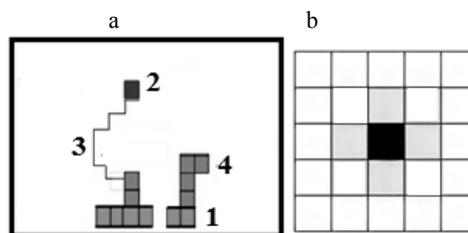


Рис. 1. Схема динамической модели: одна итерация DLA-процесса: а – 1 – очаг дефектной структуры с ансамблем частиц материала; 2 – локализованный дефект/шероховатость с новой частицей; 3 – траектория его случайного блуждания; 4 – сформированная ранее структура с агрегированными объектами; б – окрестность Неймана для развития дефекта с переносом вещества

Fig. 1. Dynamic model diagram: one iteration of the DLA process:

- а – 1 – a source of defective structure with an ensemble of material particles;
- 2 – localized defect/roughness with a new particle; 3 – trajectory of its random walk;
- 4 – previously formed structure with aggregated objects;
- б – Neumann neighborhood for the development of a defect with matter transfer

Процесс зарастания трещины формировался как случайное блуждание дефекта/частицы от верхней границы расчетной области, где располагался условный очаг дефекта, к нижней, где была условная начальная структура. Если в окрестности Неймана (рис. 1б) блуждающего дефекта или частицы появлялась занятая ранее область, то с заданной вероятностью этот дефект агрегировал с ним.

Для описания случайного блуждания на расчетную область наложена равномерная сетка. Таким образом, случайное блуждание объектов формировалось из множества смещений на одну ячейку на расчетной области с заданной вероятностью. На границах расчетной области, представлявших границы трещины, выполнялось условие прилипания, когда подошедшие к ней локализованные дефекты/частицы закреплялись. Агрегация блуждающего дефекта реализовывалась с заданной вероятностью в случае появления в окрестности Неймана (рис. 1b) занятой ячейки. Под вероятностью агрегации представлялся условный коэффициент самодиффузии частицы [4]. Эта вероятность определяется как условиями и режимами работы устройства, так и материалом его камеры

Предложенная модель реализована в среде MATLAB в относительных единицах. В указанном приближении произведено моделирование динамики развития структур в трещинах, реализующих их зарастание.

На рис. 2 приведена модель DLA для случая зарастания трещины с трех сторон при варьировании вероятности прилипания S , которая может быть рассмотрена как зарастание концов трещины.

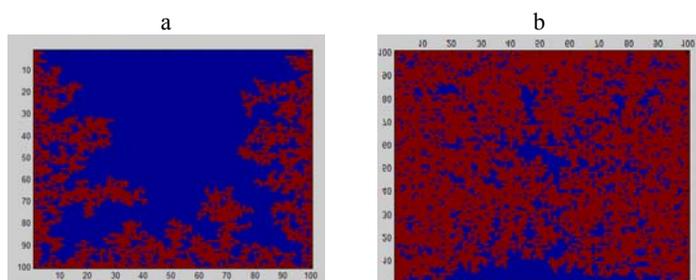


Рис. 2. Модель зарастания с трех сторон при варьировании вероятности прилипания: а – $S = 0,1$; б – $0,3$

Fig. 2. Model of overgrowth from three sides with varying sticking probability: а – $S = 0.1$; б – 0.3

На рис. 3 приведена модель DLA для случая зарастания трещины с двух сторон при варьировании вероятности прилипания S , которая может быть рассмотрена как зарастание середины трещины.

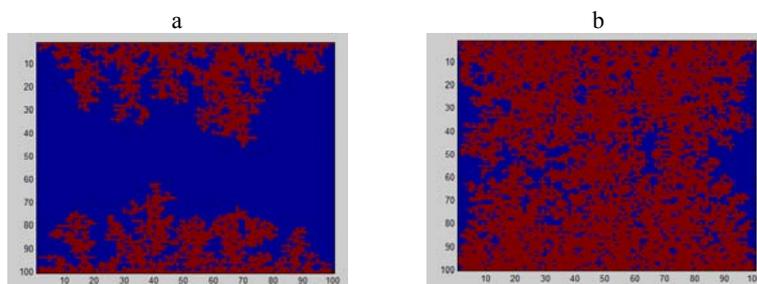


Рис. 3. Модель зарастания с двух сторон при варьировании вероятности прилипания: а – $S = 0,1$; б – $0,3$

Fig. 3. Model of overgrowing on two sides with varying sticking probability: а – $S = 0.1$; б – 0.3

На рис. 4 приведена модель DLA для случая зарастания трещины с одной стороны.

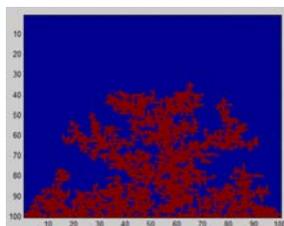


Рис. 4. Модель зарастания трещины с одной стороны при $S = 0,1$
 Fig. 4. Model of crack healing on one side at $S = 0.1$

Модель осаждения

В предложенной модели расчетная область представляется в виде прямоугольной решетки размерами $M \times L$ и дефекты/частицы по заданным правилам осаждаются вдоль вертикального направления на ранее сформированную структуру, фиксируясь в узлах квадратной решетки. Таким образом, с течением времени образуется кластер или агрегат с конкретной геометрией. Для описания процесса используются две функции: средняя высота поверхности $\overline{h}(t)$, определяющая положение базовой линии для поверхности исследуемого образца, и шероховатость $W(t)$.

В модели случайного роста по всем направлениям все колонки заполняются случайным образом (рис. 5a). Тогда после случайного осаждения N частиц материала возможно вычислить высоту осажденной структуры h , определяющей процесс из соотношения $h = \sqrt{Nf(1-f) + (Nf)^2}$, где $f = 1/L$ – вероятность заполнения произвольной колонки; L – ширина расчетной области, т. е. $h_i = h_i + 1$; i – номер шага по времени [5]. В данной модели осаждения частица фиксируется в точке первого контакта с уже осажденной структурой (правило ближайшего соседа) (рис. 5b).

Таким образом, при осаждении учитывается высота ближайших левой и правой колонок как $h_i = \max(h_{i-1}, h_i + 1, h_{i+1})$ [6]. В отличие от предыдущей DLA-модели частица таким образом может прилипнуть боковой поверхностью к уже сформированной структуре [7], т. е. учитывается возможность роста вдоль локальной нормали к поверхности, что может приводить к расширению локальных выступов на поверхности фронта, а значит, к усилению роста поверхности в латеральном направлении за счет так называемого баллистического осаждения по определенному направлению.

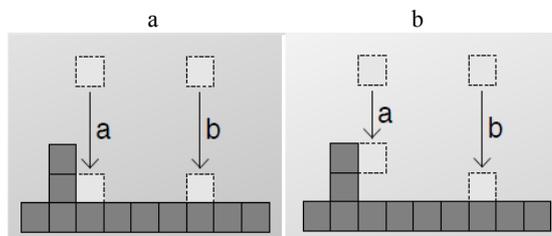


Рис. 5. Схема осаждения: а – случайного; б – баллистического
 Fig. 5. Scheme of deposition: a – random one and b – ballistic one

На рис. 6 приведено изображение смоделированного профиля (бокового сечения) структуры зарастания трещины h_i высотой 250 о. е. за относительное время (число расчетных шагов) $T = 100$ о. е., при скорости осаждения 100 (рис. 6a) и 200 (рис. 6b) частиц в единицу времени в рамках модели баллистического осаждения [7].

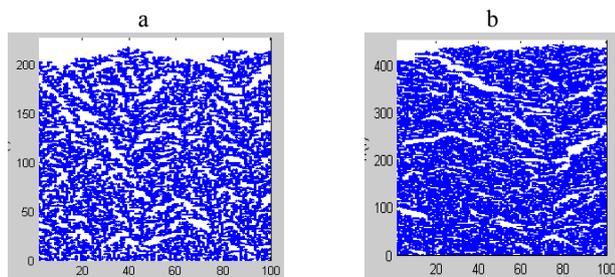


Рис. 6. Профиль структуры, образованной во время зарастания трещины в рамках модели баллистического осаждения при скорости осаждения: а – 100 частиц/с; б – 200 частиц/с

Fig. 6. Profile of the structure formed during crack healing within the framework of the ballistic deposition model at a deposition rate of: а – 100 particles/s; б – 200 particles/s

На рис. 7 приведено изображение смоделированного профиля (бокового сечения) структуры, образующейся при зарастании трещины за время $T = 100$ о. е. при скорости осаждения 100 (рис. 8a) и 200 (рис. 8b) частиц в единицу времени в рамках модели случайного осаждения объектов.

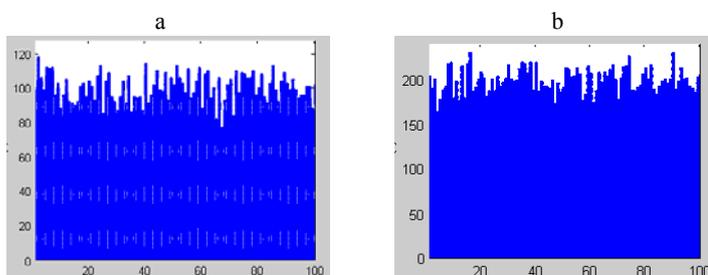


Рис. 7. Профиль структуры, образованной во время зарастания трещины в рамках модели случайного осаждения при скорости осаждения: а – 100 частиц/с; б – 200 частиц/с

Fig. 7. Profile of the structure formed during crack healing within the framework of the random deposition model at a deposition rate of: а – 100 particles/s; б – 200 particles/s

Перколяционная модель

В данной модели трещина представляется агрегатом дефектов. В перколяционном приближении [8, 9] рассматривается процесс их растекания из трещины по материалу с определенным порогом реализации перколяционного механизма.

Перколяционная структура задается в виде квадратной со стороной m решетки ($m \times m$). Ячейки этой решетки содержат 0 (пустой участок) или 1 (занятый участок).

Каждая ячейка занимается с вероятностью p независимо от состояния соседних ячеек. При этом осуществляется следующая процедура [9].

1. Для каждой ячейки решетки реализуется случайное число $a = \text{Random}$.

2. Если a меньше или равно p , его значение в ячейку записывается 1, в противном случае 0.

На рис. 8 приведено изображение смоделированного профиля (бокового сечения) структуры по данной схеме, образующейся во время зарастания трещины в рамках модели ячеечной перколяции при варьировании порога наступления перколяционного процесса.

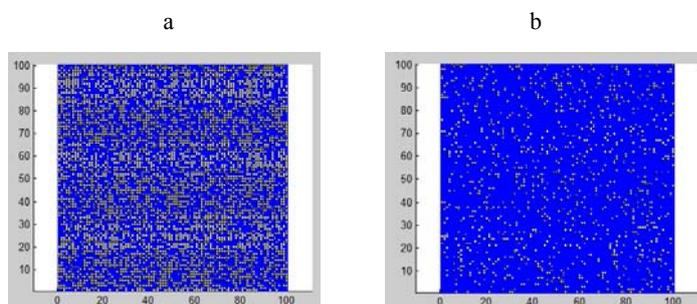


Рис. 8. Профиль структуры, образованной во время зарастания трещины в рамках модели ячеечной перколяции при вероятности: а – $p = 0,5$; б – $0,9$

Fig. 8. Profile of the structure formed during crack healing within the framework of the cell percolation model with probability: а – $p = 0.5$; б – 0.9

Отметим, что обычно процесс разрушения твердотельного материала начинается с зарождения микронеоднородностей и дефектов в нем. Однако наш анализ показал, что возможна обратимость таких процессов образования неоднородностей, когда реализуются эффекты самопроизвольного их заживления на известных принципах и представлениях нелинейной динамики и квантовых технологий [10, 11]. Такие рассматриваемые в последнее время удивительные динамические эффекты в возможные их самопроизвольные «заживления» с переходом к другой структуре неоднородностей [12–15] дают принципиальный путь нахождения оптимальных условий и режимов в численных параметрах для управления этими явлениями и повышения надежности работающих теплоэнергетических устройств.

При этом для практических целей должна быть сделана проекция полученных модельных физико-технических принципов на реальные условия эксплуатации энергетических установок разного типа. Это требует обязательного метрологического обеспечения в численных параметрах режимов их работы в разных условиях и с различным составом и эксплуатационным состоянием рабочего вещества в циклических процессах воздействия на него при работе энергоустановки.

Здесь требуется знание как фундаментальных принципов технической термодинамики [16, 17], так и конкретных эксплуатационных характери-

стик для компонент каждой анализируемой теплоэнергетической установки (ср. с [16, 18–20]).

В полной мере эта задача вряд ли может быть решена при мониторинге работы подобных многофункциональных устройств с разными конструкторскими схемами и режимами эксплуатации. Однако даже выявление трендов и тенденций с возможным повышением надежности и долговечности их работы с выбором соответствующих режимов может иметь практическое значение в аспекте предварительного анализа и предсказательного моделирования в условиях нестационарных динамических процессов.

Модификации и развитие 3D трещиноватой структуры в материале

Принципиально, что даже вибрации рабочей установки малой интенсивности способны вызывать кардинальную модификацию 3D-структуры сети трещин, которая может происходить непрерывно даже в рамках в целом устойчивой конфигурации с определенной топологии (с внутренними связями) под действием разных факторов. При подобном воздействии должна происходить полная перестройка всей системы трещин с реализацией новых взаимодействий внутри такой 3D-сети.

Рост трещины и, следовательно, разрушение объекта происходят, как правило, поэтапно, с последовательным переходом от устойчивого состояния к стадии роста. При этом каждый этап характеризуется специфическим энергетическим состоянием как самой трещины, так и всего объекта в целом.

В общем же случае оказывается, что существует граничное (минимальное) значение длины трещины, выше которого величина разрушающего напряжения зависит от длины, а ниже – не зависит [15, 21]. При этом значительную роль играют физико-механические свойства рабочей камеры.

Так, согласно теории Гриффитса, длина равновесной (устойчиво сохраняющейся) трещины l связывается с разрушающим напряжением σ , характеризующим прочность материала, следующим соотношением [21]:

$$l = \frac{4\gamma E}{p\sigma^2(1-\nu^2)},$$

где γ – поверхностное натяжение материала; p – константа формы материала; E – модуль упругости; ν – коэффициент Пуассона для упругой деформации.

Считается, что теоретическая прочность монолитного материала без трещин является бесконечной, и не учитывается также скорость роста трещин (не только быстрый рост, но и медленный – даже когда разрывающие нагрузки превосходят предел прочности породы).

Несмотря на то что такое соотношение выведено для пластинки в условиях плоской деформации, тем не менее доказано, что характер данной за-

висимости соответствует и механизму разрушения произвольных объектов [21–23]. Это соотношение помогает понять, какие основные параметры определяют процесс хрупкого разрушения рабочего устройства.

Образование трещины длиной l снимает напряжение на площади $\pi l^2/4$. Поэтому, действительно, появление первичных трещин в рабочей камере означает ее релаксацию к равновесию.

Следует отметить, что на процесс зарождения первичных трещин могут оказывать влияния не только физико-механические параметры материала, но и другие – геометрические факторы формы.

Растущая снизу вверх по телу камеры трещина подобно клину создает в своем окружении некоторую неоднородную энергетическую зону, наиболее интенсивную в области кончика трещины. В этой локальной области начинают развиваться пластические деформации [24, 25].

Как и в кристаллах, где пластические деформации локализуются не в одной, а в нескольких плоскостях (отстоящих друг от друга на некотором расстоянии – линии Людерса), так и в твердых массивах данные нарушения возникают, растут и далее сливаются друг с другом по определенным правилам. Вполне правомерно предположить, что такая активная трещина формирует в породе зону напряжения (для простоты ее можно считать круглой), энергетические характеристики которой увеличиваются с уменьшением размера/радиуса зоны. Здесь усиливаются процессы образования дислокаций и новых трещин (ср. с [15, 24]).

Известно, что концентрация напряжения на краях образовавшейся трещины σ' (или на ее шероховатостях) значительно превышает среднее значение напряжения; при длине трещины $2l$ и радиусе закругления на ее конце r напряжение составляет [24, 25]

$$\sigma' = 2\sigma\sqrt{l/r}.$$

Если σ' превышает предел прочности материала при растяжении, трещина растет. Таким образом, происходит дальнейшая стадия разрушения объекта.

Предел прочности или сцепления C , Па, функционально зависит от величины пределов прочности при сжатии $\sigma_{сж}$ и растяжении σ_p и вычисляется по формуле

$$C = B\sigma_p,$$

где $B = \sqrt{\frac{\sigma_{сж}}{\sigma_p} + 1} - 1$.

Зная величины $\sigma_{сж}$ и σ_p , легко вычислить пределы прочности C .

Таким образом, рост трещины действительно происходит с различной эффективностью, определяемой характером материала – толщиной, составом, распределением нагрузки, устойчивостью к деформациям и т. д.

С ростом в материале величины пластической деформации (при фиксированном объеме тела) происходит возрастание дисперсии статистического

распределения микродеформаций по их длинам: сумма этих микродеформаций и составляет собственно проявляющуюся пластическую макродеформацию. Вслед за этим появляется асимметрия пространственного распределения деформации, что является характерным признаком наступления будущего разрушения. Простейшая схема такого развития приводит к возникновению в итоге двухвершинного распределения деформации, т. е. одна трещина в области своего кончика ветвится на две – появляется точка бифуркации деформации [22, 26]. Каждая образовавшаяся трещина далее растет самостоятельно. Этот динамический нелинейный процесс самоорганизации системы происходит под влиянием различных причин.

В результате действия таких динамических нагрузок в твердотельном объекте наблюдается быстрое изменение параметров микротрещиноватости, которое можно представлять, как локальные микровзрывы [24, 27]:

- рост и слияние природных микротрещин в более крупные;
- зарождение новых микротрещин;
- раскрытие крупных микротрещин с образованием дефектов следующего иерархического уровня.

При этом микротрещиноватость наводится на всех иерархических уровнях, и такое динамическое воздействие приводит к резкому увеличению концентрации микротрещин в ближней и средней зоне действия микровзрыва.

Дальнейший анализ устойчивости работы теплоэнергетических установок требует проведения анализа процессов развития дислокаций в теле рабочей камеры с возможным их выходом на ее поверхность при разных режимах эксплуатации.

Однако не будем останавливаться на этом, поскольку это требует решения сложных нелинейных уравнений в определенных приближениях для каждого конкретного случая [16, 17, 28].

Самоорганизующиеся системы развития неустойчивостей в алгоритмах нелинейной динамики и квантовых технологий

Обсудим в обзорном аспекте хорошо известные в математике и физике универсальные режимы функционирования нелинейной динамической системы, которые оказываются пригодными для анализа стабильности и устойчивости работы не только тепловых энергетических установок, но и различных устройств со многими технологическими циклами в условиях развития многофакторных процессов в них. Это позволит рассмотреть в едином целостном контексте базовые явления, которые должны приниматься во внимание при функционировании комплексных динамических систем с нелинейностью и обратной связью. Для энергоустановок разного класса такой подход не является традиционным, но необходим при реализации технологий предсказательного моделирования и прогноза надежности их работы и предупреждения выхода на критические режимы.

В любом случае материал данного раздела может быть полезен для сотрудников энергетического сектора экономики и промышленности/маши-

ностроительных отраслей при повышении их квалификации в этой области знаний.

Кроме того, понимание возникающих здесь ограничений, которые могут быть ассоциированы с закономерностями в области квантовых технологий, также дает алгоритмы для реализации тех или иных маршрутных карт, например, при проведении многопараметрических испытаний по длительности и тестировании состояния оборудования во временном масштабе – как текущего, так и на перспективу.

Материал будем излагать в относительно простом качественном представлении с помощью соответствующих графических схем и изображений. Это позволит оценить:

1) явления, способные привести к возможному разрушению изделия (переход в новое состояние);

2) циклические процессы (возвращение к исходному состоянию и удаление от него);

3) возможность совместимости переходов между различными режимами работы. При этом регулярность и детерминированность, а также стохастичность может реализовываться по разным хорошо известным сценариям (проиллюстрированы ниже с рассматриваемыми режимами на рис. 9–12 [22, 29–31]) с комментариями по процессам в энергоустановках. Происходящие процессы можно связать, например, со следующими разными типами и стратегиями развития неоднородностей – поверхностных и объемных в твердотельном материале (вплоть до его разрушения), такими как:

- коллапс и стагнация;
- устойчивая периодичность;
- параметры «в разнос»;
- хаотическое развитие в определенных рамках;
- срыв/внезапный кризис;
- резкий скачок и рывок в развитии.

Эти возможные комбинации показаны на рис. 9.



Рис. 9. Эволюция элементарного фазового объема – состояния системы – на плоскости в случаях: а – устойчивого состояния равновесия; б – предельного цикла; с – сепаратрисы, идущей из седла (данные термины приняты в нелинейной динамике, но их смысл, в принципе, понятен)

Fig. 9. Evolution of the elementary phase volume – the state of the system – on a plane in the cases of: a – a stable state of equilibrium; b – limit cycle; с – a separatrix coming from the saddle (these terms are accepted in nonlinear dynamics, but their meaning is clear in principle)

В каждое начальное (время $t = 0$) состояние не является фиксированным числом, а имеет некоторую конечную неточность ξ . Задача – определить состояние / вероятностное распределение при разных t в динамике с такой неопределенностью.

Здесь важна последовательность событий: в случае 1, когда $\xi \rightarrow 0$, а $t \rightarrow \infty$, будет реализовываться полная предсказуемость/детерминированность процесса развития системы.

В случае 2, когда, хотя изначально $\xi \neq 0$ и поведение траекторий развития представляет поперечное сечение трубки разных траекторий для $t \rightarrow \infty$ (рис. 10), но при $\xi \rightarrow 0$ возникают разные варианты, в том числе, например, явления самоорганизации к устойчивому состоянию (рис. 9а). Однако и в случае 2 могут возникнуть состояния как с устойчивым, так и неустойчивым равновесным состоянием, когда (рис. 10) даже малый разброс начальных неточностей при большом промежутке развития во времени приводит к тому, что состояния системы кардинально отличаются. Поэтому малые возмущения на начальном этапе для такого реализуемого сценария так принципиально меняют итоговые результаты и требуют очень деликатного подхода при принятии того или иного режима работы системы. Для изменяющихся режимов это приводит к их существенно разным состояниям в процессе развития, и поэтому возможен переход к несовместимости без возврата назад – в частности, в условиях преодоления пределов прочности объекта.

Другой режим развития показан на рис. 11.



Рис. 10. Эволюция элементарного фазового объема на плоскости в случае неустойчивого состояния равновесия

Fig. 10. Evolution of an elementary phase volume on a plane in the case of an unstable equilibrium state

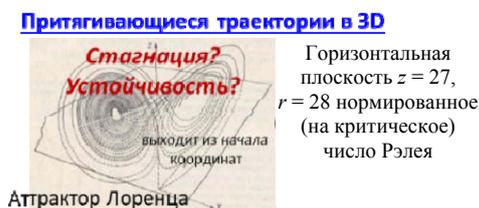


Рис. 11. Жесткий режим (скачком) возникновения стохастических автоколебаний при непрерывном изменении некоторого управляющего параметра

Fig. 11. Hard mode (abruptly) the occurrence of stochastic self-oscillations with a continuous change in some control parameter

Здесь реализуется непериодическое поведение системы с постоянной во времени неустойчивостью: вроде бы идет развитие, но оно происходит с такими неустойчивыми циклами, что его итог не ясен и требует сложного анализа с учетом нелокальных откликов системы. При этом могут реализовываться и уникальные состояния с притягивающим множеством – так называемый аттрактор Лоренца, когда вроде бы при рутинном плавном изменении управляющего параметра состояние системы внезапно меняется скачком. Хотя пути возникновения подобных состояний и каждый из их фрагментов могут быть разными, но число таких сценариев развития в

определенных режимах вполне конечно. Поэтому так важно проводить полноценный анализ с предсказательным моделированием при выборе конкретных режимов работы.

Иная, более простая, ситуация показана на рис. 12.



Рис. 12. Простой пример возвращающейся неустойчивой траектории: раскручивающаяся плоская спираль, которая в определенный момент времени выходит из плоскости, но возвращается к ее началу и вновь раскручивается

Fig. 12. A simple example of a returning unstable trajectory, an unwinding flat spiral, which at a certain point in time leaves the plane, but returns to its beginning and unwinds again

Этот выход из плоскости, например при дополнительном привлечении управляющего параметра, приводит к запутанности, хотя и дает возможность возврата к исходному состоянию при достижении определенного управления процессом.

В диссипативной (трение/вязкость – процессы развития с торможением, сопротивлением и потерей ресурсов) системе появление случайности и стохастических черт в поведении динамической системы связано с двумя обстоятельствами. Во-первых, в определенном смысле случайна почти каждая из незамкнутых траекторий развития, располагающихся внутри ограниченного объема. Во-вторых, естественным образом появляется понятие ансамбля состояний системы в аспекте приложений к теории вероятности. В данном случае оказывается возможным проанализировать, каковы шансы того или иного развития. Разнообразные состояния (отрезки траектории внутри нашего неустойчивого объема) могут сильно влиять на картину работы энергетического устройства.

Для динамических систем вместо рядов статистических метрологических наблюдений рассматривают и мониторят средние по времени характеристики подобных траекторий развития. Такой характеристикой может быть, например, доля времени, проводимая системой в данном состоянии – с промежутком времени T в определенной ячейке фазового пространства состояний рабочих циклов.

Даже малое число управляющих параметров для ряда процессов (степеней свободы) может приводить к принципиально случайным/хаотическим состояниям системы. Например, отдельные, изолированные, на первый взгляд, технические показатели могут кардинально изменяться в совершенно разных динамических режимах при малых возмущениях и варьировании условий и рабочих режимов. Здесь может происходить разрушение объекта или, наоборот, фиксация состояния системы при росте показателей ее работы.

Если речь идет о принятии определенной стратегии и выборе режима работы, например A или B , то тогда становится важной последовательность действий для развития системы: что первично, A или B ?

Здесь возможны несовместимые или последовательные процессы с моделью управления $H = f(A, B, U)$, где U – выбранный рабочий управляющий параметр системы. Задача – искать оптимальную/совместимую комбинацию разных факторов. Эти условия важны при выборе последовательных операций при испытаниях и апробировании различных режимов работы теплоэнергетической установки в разных условиях. Именно этот фактор был, по-видимому, проигнорирован во время испытаний в Чернобыле и привел к глобальной катастрофе.

Но важна также и v – скорость/темп реализации в системе состояний, идущих с процессами A и B , для определенного требуемого конечного состояния системы с показателем/индексом E за промежуток времени Δt : $\Delta E \Delta t \geq \text{const}$, где v определяет E , которое также зависит и от U . Если $v = \text{const}$ (ресурсы для реализации процесса работы, уровень внедрения/развития и т. д.), то, например:

а) требование $\Delta E \equiv \Delta B \rightarrow 0$, во-первых, происходит только при $t \rightarrow \infty$, и, во-вторых, делает неопределенным параметр A : $\Delta A \rightarrow \infty$, или то же самое и для $\Delta A \rightarrow 0$;

б) желание $\Delta E \equiv \Delta A \rightarrow \infty$ реализуется при $\Delta t \rightarrow 0$, или то же самое – в альтернативе для $\Delta B \rightarrow \infty$.

ВЫВОДЫ

1. Поскольку обычно процесс разрушения твердотельного материала начинается с зарождения микронеоднородностей и дефектов в нем [32], то рассматриваемые динамические эффекты (возможные их самопроизвольные «заживления» с переходом к другой структуре неоднородностей) дают принципиальный путь нахождения оптимальных условий и режимов в численных параметрах для управления этими явлениями и повышения надежности работающих устройств.

2. Проведен качественный анализ на основе процессов самопроизвольного зарастания трещиноватости и дефектов на примере рабочих камер энергетических тепловых установок с газожидкостным рабочим веществом [33]. Предложенные модели и подходы после установления связи их параметров и параметров рабочих камер позволяют в первом приближении производить управление ими.

Частично работа выполнена в рамках государственных заданий в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации FZUN-2023-0003 и FZUN-2024-0018.

ЛИТЕРАТУРА

1. Strong Interplay Between Stripe Spin Fluctuations, Nematicity and Superconductivity in FeSe / Q. Wang [et al.] // Nature Materials. 2015. Vol. 15, No 2. P. 159–163. <https://doi.org/10.1038/nmat4492>.
2. Беланков, А. Б. Применение клеточных автоматов для моделирования микроструктуры материала при кристаллизации / А. Б. Беланков, В. Ю. Столбов // Сиб. журн. индустр. матем. 2005. Т. 8, № 2. С. 12–19.
3. Formation of Fractal Dendrites by Laser-Induced Melting of Aluminum Alloys / A. Kucherik [et al.] // Nanomaterials. 2021. Vol. 11, No 4. P. 1043. <https://doi.org/10.3390/nano11041043>.
4. Mehrer, H. Diffusion in Intermetallics / H. Mehrer // Materials Transactions, JIM. 1996. Vol. 37, No 6. P. 1259–1280. <https://doi.org/10.2320/matertrans1989.37.1259>.

5. Forgerini, F. L. A Brief Review of Mathematical Models of Thin Film Growth and Surfaces / F. L. Forgerini, R. Marchiori. *Biomater.* 2014. Vol. 4, No 1. P. e28871. <https://doi.org/10.4161/biom.28871>.
6. Björk, M. Discrete Simulation Models of Surface Growth: SA104X Degree Project in Engineering Physics, First Level / M. Björk, E. Deng. Royal Institute of Technology, 2014. 19 pp.
7. Family, F. Scaling of the Active Zone in the Eden Process on Percolation Networks and the Ballistic Deposition model / F. Family, T. Vicsek // *Journal of Physics A: Mathematical and General*. 1985. Vol. 18, No 2. P. L75–L81. <https://doi.org/10.1088/0305-4470/18/2/00>.
8. Москалев, П. В Анализ структуры перколяционного кластера / П. В. Москалев // *Журнал технической физики*. 2009. Т. 79, вып. 6. С. 1–7.
9. Autonomous Healing of Fatigue Cracks via Cold Welding / C. M. Barr [et al.] // *Nature*. 2023. Vol. 620. P. 552–556. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06223-0>.
10. Suresh, S. Oxide-Induced Crack Closure: An Explanation for Near-Threshold Corrosion Fatigue Crack Growth Behavior / S. Suresh, G. F. Zamiski, D. R. O. Ritchie // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 1981. Vol. 12, No 8. P. 1435–1443. <https://doi.org/10.1007/bf02643688>.
11. Xu, G. Crack Healing in Nanocrystalline Palladium / G. Xu, M. J. Demkowicz // *Extreme Mechanics Letters*. 2016. Vol. 8. P. 208–212. <https://doi.org/10.1016/j.eml.2016.03.011>.
12. Van Dijk, N. Self-Healing Phenomena in Metals / N. Van Dijk, S. van der Zwaag // *Advanced Materials Interfaces*. 2018. Vol. 5, Iss. 17. Art. 1800226. <https://doi.org/10.1002/admi.201800226>.
13. Хрусталеv, Б. М. Техническая термодинамика: в 2 ч. / Б. М. Хрусталеv, А. П. Несенчук, В. Н. Романюк. Минск: Технопринт, 2004. Ч. 1. 486 с.
14. Техническая термодинамика: учеб для машиностроительных специальностей вузов / В. И. Крутов [и др.]; под ред. В. И. Крутова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1991. 384 с.
15. Шашин, В. М. Гидромеханика: учеб. для техн. вузов / В. М. Шашин. М.: Высш. шк., 1990. 384 с.
16. Несенчук, А. П. Тепловые расчеты пламенных печей для нагрева и термообработки металла / А. П. Несенчук, Н. П. Жмакин. Минск: Вышэйш. шк., 1974. 295 с.
17. Рекуператор для регенеративного теплоиспользования тепловых отходов промышленных печей: пат. ВУ 13292 / А. П. Несенчук, В. И. Тимошпольский, А. П. Ракомсин, П. С. Гурченко, Н. Л. Мандель, В. Н. Шишков, Т. В. Рыжова, С. М. Кабишов, С. С. Ковалев, В. А. Хлебцевич. Оpubл.: 30.06.2010.
18. Стойкость унифицированного модульного чугунного рекуператора нагревательных печей высокотемпературных теплотехнологий машиностроительных и автотракторных предприятий / А. П. Несенчук [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2010. № 3. С. 48–54.
19. Рыжова, Т. В. Идентификация математической модели процессов тепло- и массопереноса в псевдооживленном слое по результатам эксперимента // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 1999. № 6. С. 75–78.
20. К расчету унифицированного модульного рекуператора (модули М-I и М-II) для нагревательных и термических печей заготовительного и механосборочного производств машиностроительных и автотракторных заводов Республики Беларусь / А. П. Несенчук [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2007. № 4. С. 47–51.
21. Griffith, A. A. (1921). The Phenomena of Rupture and Flow in Solids / A. A. Griffith // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 1921. Vol. 221, N 582–593. P. 163–198. <https://doi.org/10.1098/rsta.1921.0006>.
22. Scott, A. Nonlinear Science: Emergence and Dynamics of Coherent Structures / A. Scott. New York: Oxford University Press, 2003. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198528524.001.0001>.
23. Mandelbrot, B. B. Fractals and Chaos: The Mandelbrot Set and Beyond / B. B. Mandelbrot. New York: Springer-Verlag, 2004. 308. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-4017-2>.
24. Чернышев, С. Н. Трещины горных пород / С. Н. Чернышев. М.: Наука, 1983. 293 с.
25. Трифонова, Т. А. Горное речное русло: энергетическая модель формирования / Т. А. Трифонова // *Доклады Академии наук*. 1994. Т. 337, № 3. С. 398–400.
26. Zaitsev, D. A. A Generalized Neighborhood for Cellular Automata / D. A. Zaitsev // *Theoretical Computer Science*. 2017. Vol. 666. P. 21–35. <https://doi.org/10.1016/j.tcs.2016.11.002>.
27. Кулаков, А. В. Введение в физику нелинейных процессов / А. В. Кулаков, А. А. Румянцев; отв. ред. В. Е. Фортов; кол. авт. Академия наук СССР, Ин-т физики высоких давлений имени Л. Ф. Верещагина. М.: Наука, 1988. 160 с.

28. Связь поверхностной самодиффузии и подвижности пузырей в твердом теле: теория и атомистическое моделирование / А. С. Антропов [и др.] // ЖЭТФ. 2019. Т. 156, вып. 1. С. 125–134. <https://doi.org/10.1134/S0044451019070137>.
 29. Рабинович, М. И. Введение в теорию колебаний и волн / М. И. Рабинович, Д. И. Трубецков. М.: Наука, 1984. 432 с.
 30. Арнольд, В. И. Теория катастроф / В. И. Арнольд. Изд. 3-е, доп. М.: Наука, 1990. 128 с.
 31. Путь в синергетику. Экскурсы в десяти лекциях / Б. П. Безручко [и др.] // Известия вузов. ПНД. 2005. Т. 13, вып. 6. С. 170–175. <https://doi.org/10.18500/0869-6632-2005-13-5-170-175>.
 32. Численный анализ характеристик процесса тепловой обработки многослойных композитных изделий в теплотехнологических установках / В. Н. Романюк [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 1. С. 52–66. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-52-66>.
 33. Динамические процессы развития трещиноватости фрактального типа: модели для твердотельного материала камеры энергетической установки в процессе ее эксплуатации / Т. В. Рыжова [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2024. Т. 67, № 2. С. 152–172. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-152-172>.
- Поступила 11.01.2024 Подписана в печать 20.03.2024 Опубликована онлайн 31.07.2024

REFERENCES

1. Wang Q., Shen Y., Pan B., Hao Y., Ma M., Zhou F., Steffens P., Schmalzl K., Forrest T. R., Abdel-Hafiez M., Chen X., Chareev D. A., Vasiliev A. N., Bourges P., Sidis Y., Cao H., Zhao J. (2015) Strong Interplay Between Stripe Spin Fluctuations, Nematicity and Superconductivity in FeSe. *Nature Materials*, 15 (2), 159–163. <https://doi.org/10.1038/nmat4492>.
2. Belankov A. B., Stolbov V. Yu. (2005) The Use of Cellular Automata for Modeling the Microstructure of a Material during Crystallization. *Sibirskii Zhurnal Industrial'noi Matematiki = Siberian Journal of Industrial Mathematics*, 8 (2), 12–19 (in Russian).
3. Kucherik A., Samyshkin V., Prusov E., Osipov A., Panfilov A., Buharov D., Arakelian S., Skryabin I., Kavokin A. V., Kutrovsкая S. (2021) Formation of Fractal Dendrites by Laser-Induced Melting of Aluminum Alloys. *Nanomaterials*, 2021, 11 (4), 1043. <https://doi.org/10.3390/nano11041043>.
4. Mehrer H. (1996) Diffusion in Intermetallics. *Materials Transactions, JIM*, 37 (6), 1259–1280. <https://doi.org/10.2320/matertrans1989.37.1259>.
5. Forgerini F. L., Marchiori R. (2014). A Brief Review of Mathematical Models of Thin Film Growth and Surfaces. *Biomatter*, 4 (1), e28871. <https://doi.org/10.4161/biom.28871>.
6. Björk M., Deng E. (2014) *Discrete Simulation Models of Surface Growth: SA104X Degree Project in Engineering Physics, First Level*. Royal Institute of Technology. 19.
7. Family F., Vicsek T. (1985). Scaling of the Active Zone in the Eden Process on Percolation Networks and the Ballistic Deposition model. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 18 (2), L75–L81. <https://doi.org/10.1088/0305-4470/18/2/005>.
8. Moskalev P. V. (2009) Analysis of the Percolation Cluster Structure. *Technical Physics*, 54 (6), 763–769. <https://doi.org/10.1134/s1063784209060012>.
9. Barr C. M., Duong T., Bufford D. C., Milne Z., Molkeri A., Heckman A., Adams D. P., Srivastava A., Hattar K., Demkowicz M. J., Boyce B. L. (2023) Autonomous Healing of Fatigue Cracks via Cold Welding. *Nature*, 620, 552–556. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06223-0>.
10. Suresh S., Zamiski G. F., Ritchie D. R. O. (1981). Oxide-Induced Crack Closure: An Explanation for Near-Threshold Corrosion Fatigue Crack Growth Behavior. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 12 (8), 1435–1443. <https://doi.org/10.1007/bf02643688>.
11. Xu G., Demkowicz, M. J. (2016) Crack Healing in Nanocrystalline Palladium. *Extreme Mechanics Letters*, 8, 208–212. <https://doi.org/10.1016/j.eml.2016.03.011>.
12. Van Dijk N., van der Zwaag S. (2018) Self-Healing Phenomena in Metals. *Advanced Materials Interfaces*, 5 (17), 1800226. <https://doi.org/10.1002/admi.201800226>.
13. Khrustalev B. M., Nesenchuk A. P., Romanyuk V. N. (2004) *Technical Thermodynamics. Part 1*. Minsk, Technoprint Publ. 486 (in Russian).
14. Krutov V. I., Isaev S. I., Kozhinov I. A., Kozlov N. P., Kofanov V. I., Mironov B. M., Nikitin V. M., Petrazhitskii G. B., Pylaev A. M., Khvostov V. I., Shishov E. V. (1991) *Technical Thermodynamics*. 3rd Ed. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 384 (in Russian).
15. Shashin V. M. (1990) *Fluid Mechanics*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 384 pp. (in Russian).
16. Nesenchuk A. P., Zhmakin N. P. *Thermal Calculations of Flame Furnaces for Heating and Heat Treatment of Metal*. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ. 295 (in Russian).

17. Nesenchuk A. P., Timoshpol'skii V. I., Rakomsin A. P., Gurchenko P. S., Mandel' N. L., Shishkov V. N., Ryzhova T. V., Kabishov S. M., Kovalev S. S., Khlebtsevich V. A. (2010) *Recuperator for Regenerative Heat Utilization of Thermal Waste from Industrial Furnaces*. Patent No 13292 Republic of Belarus (in Russian).
18. Nesenchouk A. P., Shidlovsky V. V., Ryzhova T. V., Shklovchik D. I., Kovalev S. S. (2010) Resistance of Cast Iron Unified Module Recuperator of Heating Furnaces with High-Temperature Thermal Technologies at Machine Building, Automotive and Tractor Enterprises. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (3), 48–54 (in Russian).
19. Ryzhova T. V. (1999) Identification of a Mathematical Model of Heat and Mass Transfer Processes in a Fluidized Bed Based on Experimental Results. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (6), 75–78 (in Russian).
20. Nesenchuk A. P., Mandel N. L., Shishkov V. N., Novgorodova G. S., Ryzhova T. V., Pshonik M. G., Kachar A. R. (2007) About Calculation of Unified Module Recuperator (Module M-I and M-II) for Heating and Thermal Furnaces at Blanking and Machine Assembling Shops of Engineering, Automotive and Tractor Plants in Republic of Belarus. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (4), 47–51 (in Russian).
21. Griffith A. A. (1921). The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 221 (582–593), 163–198. <https://doi.org/10.1098/rsta.1921.0006>.
22. Scott A. (2003) *Nonlinear Science: Emergence and Dynamics of Coherent Structures*. New York, Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198528524.001.0001>.
23. Mandelbrot B. B. (2004) *Fractals and Chaos: The Mandelbrot Set and Beyond*. New York, Springer-Verlag. 308. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-4017-2>.
24. Chernyshev S. N. (1983) *Mountain Rock Cracks*. Moscow, Nauka Publ. 293 (in Russian).
25. Trifonova T. A. (1994) Mountain Riverbed: an Energy Model of Formation. *Doklady Akademii Nauk*, 337 (3), 398–400 (in Russian).
26. Zaitsev D. A. (2017). A Generalized Neighborhood for Cellular Automata. *Theoretical Computer Science*, 666, 21–35. <https://doi.org/10.1016/j.tcs.2016.11.002>.
27. Kulakov A. V., Rumyantsev A. A. (1988) *Introduction to the Physics of Nonlinear Processes*. Moscow, Nauka Publ. 160 (in Russian).
28. Antropov A. S., Ozrin V. D., Stegailov V. V., Tarasov V. I. (2019) Relationship between Surface Self-Diffusion and Bubble Mobility in Solids: Theory and Atomistic Simulation. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 129 (1), 103–111. <https://doi.org/10.1134/S1063776119060098>.
29. Rabinovich M. I., Trubetskov D. I. (1984) *Introduction to the Theory of Oscillations and Waves*. Moscow, Nauka Publ. 432 (in Russian).
30. Arnold V. I. (1990) *Catastrophe Theory. 3rd ed.* Moscow, Nauka Publ. 128 (in Russian).
31. Bezruchko B. P., Koronovskii A. A., Trubetskov D. I., Hramov A. E. The way to Synergy. Excursion in ten Lectures. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 2005, vol. 13, iss. 6, pp. 170–175 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/0869-6632-2005-13-5-170-175>.
32. Romaniuk V. N., Niyakovskii A. M., Chichko A. N., Yatskevich Yu. V., Ryzhova T. N. (2022) Numerical Analysis of the Characteristics of the Heat Treatment Process of Multilayer Composite Products in Heat Technology Installations. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (1), 52–66. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-52-66> (in Russian).
33. Ryzhova T. V., Bukharov D. N., Arakelian M. M., Arakelyan S. M. (2024) Dynamic Processes of 33. Development Jointing of a Fractal Type: Models for a Solid-State Material of the Chamber in a Power Facility during its Operation. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (2), 152–172. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-152-172> (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-4-363-376>

УДК 66.047.7

Обобщенные комплексные переменные кинетики сушки в расчетах длительности сушки плоских тонких влажных материалов

А. И. Ольшанский¹⁾, А. Н. Голубев¹⁾

¹⁾Витебский государственный технологический университет
(Витебск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. Статья посвящена обработке экспериментальных данных в отношении сушки тонких влажных материалов. Расчетные кинетические зависимости, необходимые для определения длительности сушки, могут быть получены из решения дифференциальных уравнений массопереноса, однако эта задача сложна в аналитическом отношении, поскольку сушка является нестационарным процессом, а коэффициенты переноса зависят от влагосодержания и температуры материала в очень сложной форме. Это вызывает необходимость экспериментальных исследований с разработкой приближенных простых эмпирических уравнений для определения длительности сушки с минимальным количеством постоянных, определяемых из эксперимента. В качестве устойчивых комплексных обобщенных переменных при обработке эксперимента были приняты: относительная скорость сушки, обобщенное время сушки, отношение времени сушки по периодам, отношение текущего влагосодержания к критическому. Все переменные взаимосвязаны скоростью сушки в первом периоде (периоде постоянной скорости). В результате обработки опытных данных по конвективной сушке керамики, асбеста, войлока получены формулы, позволяющие определить ее длительность в периоде падающей скорости. Создаваемая такой обработкой эксперимента инвариантность позволяет переходить от одних переменных к другим, от одной системы координат к другой, что значительно сокращает число необходимых экспериментов. Обработка данных и анализ полученных формул показывают, что кривые сушки представляют собой сложные экспоненты, а главными связующими переменными являются относительная скорость сушки и относительное влагосодержание. Представлена проверка точности обработки опытных данных и достоверности полученных эмпирических уравнений, позволяющих рассчитать длительность сушки для указанных материалов. Разброс расчетных значений по сравнению с экспериментальными составляет около 10 %, что находится в пределах точности обработки опытных данных.

Ключевые слова: скорость сушки, относительная скорость сушки, скорость сушки в первом периоде, длительность сушки, влагосодержание

Для цитирования: Ольшанский, А. И. Обобщенные комплексные переменные кинетики сушки в расчетах длительности сушки плоских тонких влажных материалов / А. И. Ольшанский, А. Н. Голубев // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 4. С. 363–376. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-4-363-376>

Адрес для переписки

Голубев Алексей Николаевич
Витебский государственный технологический университет
просп. Московский, 72,
220035, г. Витебск, Республика Беларусь
Тел.: +375 29 112-79-25
tm@vstu.by

Address for correspondence

Golubev Aleksei N.
Vitebsk State Technological University
72, Moskovsky Ave.,
220035, Vitebsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 29 112-79-25
tm@vstu.by

Generalized Complex Variables of Drying Kinetics in Calculations of Drying Duration of Flat Thin Wet Materials

A. I. Ol'shanskii¹⁾, A. N. Golubev¹⁾

¹⁾Vitebsk State Technological University (Vitebsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article is devoted to the processing of experimental data regarding the drying of thin wet materials. The calculated kinetic dependencies necessary to determine the drying duration can be obtained from solving differential mass transfer equations, but this task is analytically complex, since drying is a non-stationary process, and the transfer coefficients depend on the moisture content and temperature of the material in a very complex form. This necessitates experimental studies with the development of approximate simple empirical equations for determining the drying duration with a minimum number of constants determined from the experiment. When processing the experiment, the relative drying rate, generalized drying time, the ratio of drying time by periods and the ratio of the current moisture content to the critical one were accepted as stable complex generalized variables when processing the experiment. All variables are interrelated by the drying rate in the first period (the period of constant rate). As a result of processing experimental data on convective drying of ceramics, asbestos, felt, formulas were obtained that make it possible to determine its duration in the period of falling rate. The invariance caused by such experimental processing allows one to move from one variable to another, from one coordinate system to another, which significantly reduces the number of necessary experiments. Data processing and analysis of the resulting formulas shows that the drying curves are complex exponentials, and the main mediating variables are the relative drying rate and relative moisture content. Verification of the accuracy of experimental data processing and the reliability of the obtained empirical equations, which make it possible to calculate the drying duration for the specified materials, is presented. The spread of the calculated values compared to the experiment is about 10 %, which is within the accuracy of experimental data processing.

Keywords: drying rate, relative drying rate, drying rate in the first period, drying time, moisture content

For citation: Ol'shanskii A. I., Golubev A. N. (2024) Generalized Complex Variables of Drying Kinetics in Calculations of Drying Duration of Flat Thin Wet Materials. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (4), 363–376. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-4-363-376> (in Russian)

Введение

Сушка является необходимым процессом, в котором материалы приобретают окончательные технологические свойства. Время сушки определяет качество конечного продукта, влияет на размеры сушильной камеры, способ подвода энергоносителя, параметры теплоносителя [1–4]. Поэтому основная задача кинетики и технологии сушки – определение ее длительности.

Все необходимые расчетные кинетические зависимости можно получить из решения дифференциальных уравнений массопереноса [1–3]. Однако эта задача очень сложна в аналитическом отношении, поскольку сушка – нестационарный процесс, причем коэффициенты переноса зависят от влагосодержания и температуры материала в очень сложной форме [3–5]. Невозможность точного математического решения уравнений массопереноса вызывает необходимость экспериментальных исследований

с разработкой приближенных простых эмпирических уравнений, по которым можно рассчитать длительность сушки, при этом количество входящих в уравнения постоянных, определяемых из эксперимента, должно быть минимальным [1–3].

Обобщенные переменные кинетики сушки

Понятие обобщенной кривой сушки в практику ввел Г. К. Филоненко [6]. Это сыграло значительную роль в развитии способов обработки опытных данных сушки и создании методов расчета ее длительности [1–5]. Обобщенная кривая сушки представлена в координатах $(\bar{u}_0 - u_p) = f(N\tau)$, где \bar{u}_0 , u_p – начальное и равновесное влагосодержание материала; N – скорость сушки (постоянная) в первом периоде; τ – время сушки.

В. В. Красников, развивая метод Г. К. Филоненко, установил [1], что при сушке любого материала для всех режимов с заданным начальным влагосодержанием \bar{u}_0 сохраняется неизменной величина $N\tau$ [1–3], названная обобщенным временем сушки [1, 2].

Одновременно с введением в кинетику сушки комплексной переменной $N\tau$ Г. К. Филоненко и А. В. Лыковым была введена очень важная для кинетики сушки переменная N^* – относительная скорость сушки [1–6]:

$$N^* = \frac{1}{N} \frac{d\bar{u}}{d\tau} = f(\bar{u}, N\tau).$$

Из обобщенной кривой сушки Г. К. Филоненко $\bar{u} = f(N\tau)$ следует, что при данном значении \bar{u} относительная скорость сушки N^* численно равна тангенсу угла наклона кривой сушки к оси $N\tau$ в точке со значением \bar{u} . Таким образом, N^* не зависит от режима сушки и для конкретного материала является только функцией влагосодержания [1]. Обобщенную кривую скорости сушки $N^* = f(\bar{u})$, имеющую сложный вид, можно получить графическим дифференцированием одной обобщенной кривой сушки $\bar{u} = f(N\tau)$. Анализ обобщенных кривых скорости сушки различных материалов показывает, что в периоде падающей скорости сушки кривые образуют две сопряженные сложные экспоненты в точке второго критического влагосодержания $\bar{u}_{кр2}$ [1, 2]. Закон изменения $N^* = f(\bar{u})$ для второго периода сушки позволяет записать зависимости:

$$N^* = \exp[f(N\tau)];$$

$$N^* = \exp \left[f \left(\frac{\tau_{II}}{\tau_I} \right) \right];$$

$$N^* = \exp \left[f \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right) \right].$$

Анализ опытных данных по сушке ряда влажных материалов показал, что комплексы $\bar{u} / \bar{u}_{кр}$ и τ_{II} / τ_I также относятся к обобщенным переменным [7, 8] и связаны с величиной скорости сушки в первом периоде N . Переменная $\bar{u} / \bar{u}_{кр}$ связывает между собой все комплексные переменные.

Обработка опытных данных в обобщенных переменных создает инвариантность величин $N\tau$, τ_{II} / τ_I , $\bar{u} / \bar{u}_{кр}$ от влагосодержания \bar{u} материала независимо от режима сушки и представляет собой наиболее общую закономерность кинетики сушки [1]. Инвариантность обобщенных переменных позволяет переходить от одних переменных к другим, от одной системы координат к другой, что значительно сокращает число проводимых часто сложных и трудоемких экспериментов [1, 4, 7].

Обработка эксперимента и вывод формул

На рис. 1 представлены кривые (экспоненты) обработки опытных данных в процессах сушки керамики, войлока и асбеста при различных режимах сушки. Их можно выразить зависимостью [9]

$$N^* = \exp \left(-m \frac{\tau_{II}}{\tau_I} \right).$$

Запишем

$$-\frac{d\bar{u}}{d\tau} = N \exp \left(-\frac{\tau_{II}}{\tau_I} \right).$$

Интегрированием уравнения получим

$$\tau_{II} \approx -\frac{\tau_I}{m} \ln \left[1 - \frac{(\bar{u}_{кр} - \bar{u})m}{N\tau_I} \right]. \tag{1}$$

Время сушки в первом периоде

$$\tau_I = \frac{\bar{u}_0 - \bar{u}_{кр}}{N}.$$

Подставляя τ_I в (1), получим длительность сушки

$$\tau \approx -\frac{\bar{u}_0 - \bar{u}_{кр}}{Nm} \ln \left[1 - \left(\frac{\bar{u}_{кр} - \bar{u}}{\bar{u}_0 - \bar{u}_{кр}} \right) m \right],$$

где \bar{u} – текущее влагосодержание материала.

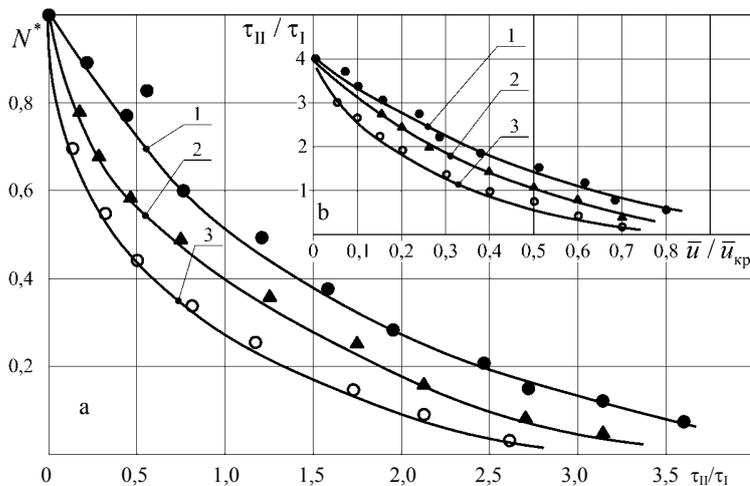


Рис. 1. Зависимость относительной скорости сушки N^* от безразмерного времени τ_{II}/τ_I по периодам (а) и безразмерного времени сушки τ_{II}/τ_I от относительного влагосодержания материала (б) в процессах сушки: войлока (1), керамики (2), асбеста (3) (а); керамики (1), войлока (2), асбеста (3) (б); режимы сушки: температура воздуха $t_c = 90$ и 120 °С; скорость воздуха $v = 3$ и 5 м/с; относительная влажность воздуха $\varphi = 5\%$

Fig. 1. Dependence of the relative drying rate N^* on the dimensionless drying time τ_{II}/τ_I by drying periods (a) and the dimensionless drying time τ_{II}/τ_I on the relative moisture content of the material (b) in the drying processes of: felt (1), ceramics (2), asbestos (3) (a); ceramics (1), felt (2), asbestos (3) (b); drying modes: air temperature $t_c = 90$ and 120 °С; air velocity $v = 3$ and 5 m/s; relative air humidity $\varphi = 5\%$

Были обработаны экспериментальные данные более 17 видов материалов при различных режимах сушки с разными значениями влагосодержания \bar{u}_0 и $\bar{u}_{кр}$, в результате чего получена зависимость для постоянной m из уравнения (1) [9]

$$m \approx 0,67 \frac{\bar{u}_0}{\bar{u}_{кр}} - 0,35. \tag{2}$$

Для процессов сушки асбеста, керамики и войлока получены более точные соотношения, приведенные в табл. 1 [7, 8].

Из метода обобщенных кривых сушки следует, что обобщенное время $N\tau_{II}$ и относительная скорость N^* являются только функциями влагосодержания \bar{u} . Следовательно, можно записать [8, 10]

$$N^* = \frac{1}{N} \frac{d\bar{u}}{d\tau} = \exp(-aN\tau_{II}). \tag{3}$$

На рис. 2 показаны результаты обработки экспериментальных данных по уравнению (3) для сушки войлока (1), асбеста (2) и керамики (3).

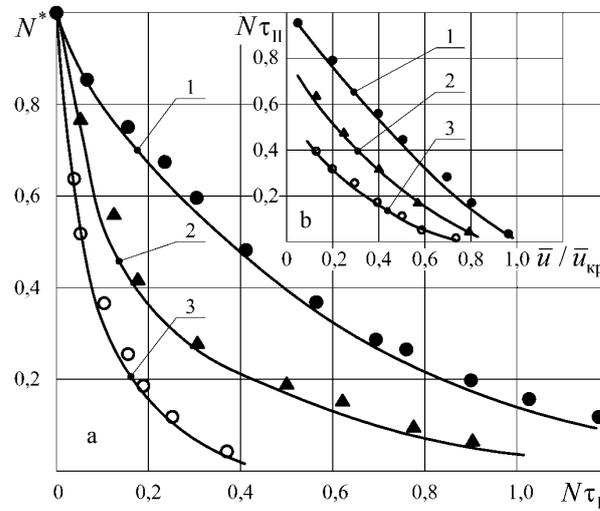


Рис. 2. Зависимость относительной скорости сушки N^* от обобщенного времени $N\tau_{II}$ (a) и обобщенного времени сушки $N\tau_{II}$ от относительного влагосодержания $\bar{u} / \bar{u}_{кр}$ (b) в процессах сушки войлока (1), асбеста (2), керамики (3) (режимы сушки указаны на рис. 1)

Fig. 2. Dependence of the relative drying rate N^* on the generalized drying time $N\tau_{II}$ (a) and the generalized drying time $N\tau_{II}$ on the relative moisture content $\bar{u} / \bar{u}_{кр}$ (b) in the drying processes of felt (1), asbestos (2), ceramics (3) (drying modes are shown in fig. 1)

Запишем (3) в виде

$$-\int_{\bar{u}_{кр}}^{\bar{u}} d\bar{u} = N \int_{\tau}^0 \exp(-aN\tau_{II}) d\tau.$$

Интегрируя, получим

$$\tau_{II} \approx -\frac{1}{aN} \ln \left[1 - a(\bar{u}_{кр} - \bar{u}) \right]. \tag{4}$$

Для целого ряда влажных материалов постоянная a определяется по выражению [7, 8]

$$a \approx \frac{0,8}{\bar{u}_{кр}}.$$

Уравнение (3) можно решить, не прибегая к интегрированию, если кривую скорости сушки аппроксимировать прямой (однозональный метод расчета длительности сушки) [1–4]. Скорость сушки [1–4]

$$\frac{d\bar{u}}{d\tau} = K(\bar{u}_{кр} - u_p).$$

Коэффициент сушки

$$K \approx \frac{N}{\bar{u}_{\text{кр}} - u_p}.$$

Подставляя в (3), получим

$$N^* \approx \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{\text{кр}} - u_p} \approx \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\text{кр}}} \approx \exp(-a_0 N \tau_{\text{II}}). \quad (5)$$

При температурах теплоносителя $t_c > 90$ °С величина $u_p = 0$. Длительность сушки во втором периоде из уравнения (5)

$$\tau_{\text{II}} \approx -\frac{1}{a_0 N} \left(1 - \ln \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\text{кр}}} \right). \quad (6)$$

Постоянную a_0 можно приближенно определить по соотношению [7]

$$a_0 \approx B_0 \exp \left(-2 \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\text{кр}}} \right). \quad (7)$$

В табл. 1 приведены значения коэффициента B_0 для листового асбеста, керамической плитки и шерстяного войлока.

На рис. 2в изображены кривые $N\tau_{\text{II}} = f(\bar{u}/\bar{u}_{\text{кр}})$, которые аппроксимируются формулой [10]

$$N\tau_{\text{II}} = B \exp \left(-2,2 \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\text{кр}}} \right).$$

Длительность сушки

$$\tau_{\text{II}} \approx \frac{1}{N} B \exp \left(-2,2 \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\text{кр}}} \right). \quad (8)$$

Коэффициент B – линейная функция относительного влагосодержания $\bar{u}/\bar{u}_{\text{кр}}$. Формулы для определения коэффициента B даны в табл. 1.

На рис. 3а даны обобщенные кривые сушки войлока (1), асбеста (2) и керамики (3) для различных режимов сушки. Изображенные кривые описываются зависимостью [8]

$$\frac{\bar{u}}{\bar{u}_0} = \exp(-SN\tau). \quad (9)$$

Таблица 1

Значения коэффициентов и формулы в расчетных уравнениях длительности сушки для процессов сушки листового асбеста, керамической плитки и шерстяного войлока

Values of the coefficients and formulas in the calculation equations for the duration of drying for the drying processes of sheet asbestos, ceramic tiles and wool felt

Материал	Коэффициенты и формулы					
	m	B_0	B	Z	M	S
Листовой асбест	$0,56 \frac{\bar{u}_0}{\bar{u}_{кр}}$	5,5	$0,85 - 0,4 \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}}$	$0,7 - 0,75 \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}}$	$3,2 - 2,35 \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}}$	$\frac{1,7}{\bar{u}_0}$
Керамическая плитка	$0,45 \frac{\bar{u}_0}{\bar{u}_{кр}}$	9,2	$0,4 - 0,2 \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}}$	$0,8 - 0,76 \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}}$	$3,3 - 2,0 \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}}$	$\frac{1,5}{\bar{u}_0}$
Шерстяной войлок	$0,43 \frac{\bar{u}_0}{\bar{u}_{кр}}$	1,3	$2,4 - 1,1 \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}}$	$1 - 0,80 \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}}$	$5,4 - 3,5 \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}}$	$\frac{1,3}{\bar{u}_0}$

Уравнение (9) дает время сушки от начального влагосодержания \bar{u}_0 , включая оба периода сушки:

$$\tau = -\frac{1}{SN} \ln \frac{\bar{u}}{\bar{u}_0 - u_p}.$$

Длительность сушки во втором периоде

$$\tau_{II} = \tau - \tau_I = -\left(\frac{\bar{u}_0 - \bar{u}_{кр}}{N} + \frac{1}{SN} \ln \frac{\bar{u}}{\bar{u}_0 - \bar{u}_{кр}} \right). \quad (10)$$

Постоянная S в формуле (9) для ряда влажных материалов (рис. 3б) приближенно аппроксимируется зависимостью

$$S \approx 9 \exp(-2\bar{u}_0). \quad (11)$$

Для войлока, асбеста и керамики постоянная S определяется более точными соотношениями, приведенными в табл. 1.

Относительная скорость сушки N^* , являясь функцией влагосодержания \bar{u} , связывает теплообмен с влагообменом в уравнениях кинетики сушки А. В. Лыкова и Г. К. Филоненко, что позволяет вести расчет теплообмена без определения коэффициентов теплоотдачи [1, 2, 6, 11–14]. Зависимость для обобщенной переменной N^* можно выразить формулой

$$N^* = \frac{1}{N} \frac{d\bar{u}}{d\tau} = A \exp\left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right). \quad (12)$$

Запишем

$$-\int_{\bar{u}_{кр}}^0 \frac{d\bar{u}}{\exp(\bar{u}/\bar{u}_{кр})} = NA \int_{\tau_{II}}^0 d\tau,$$

$$-\frac{1}{NA} \int_{\bar{u}_{кр}}^0 \exp\left(-\bar{u} / \bar{u}_{кр}\right) d\bar{u} = \int_{\tau_{II}}^0 d\tau. \quad (13)$$

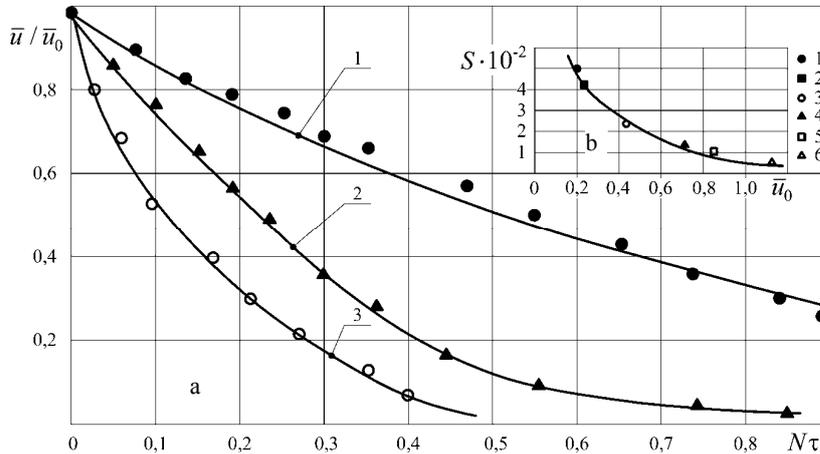


Рис. 3. Зависимость отношения влагосодержания \bar{u} / \bar{u}_0 от обобщенного времени сушки $N\tau$ (а) для войлока (1), асбеста (2), керамики (3) (режимы сушки указаны на рис. 1); зависимость коэффициента S от начального влагосодержания \bar{u}_0 в уравнении (10) (b) в процессах сушки керамики (1), пластин глины (2), асбеста (3), картона (4), кожи (5), войлока (6); режимы сушки: $t_c = 90$ и 120 °С, $v = 3$ и 5 м/с – для сушки керамики, глины, асбеста, войлока; $t_c = 90$ и 110 °С, $v = 3$ и 5 м/с – для сушки картона; $t_c = 40, 50$ и 60 °С, $v = 0,5$ и $1,5$ м/с – для сушки кожи; $\phi = 0,35; 0,45; 0,60$

Fig. 3. Dependence of the ratio of moisture content \bar{u} / \bar{u}_0 on the generalized drying time $N\tau$ (a) for drying processes of felt (1), asbestos (2), ceramics (3) (drying modes are given in fig. 1); dependence of the coefficient S on the initial moisture content \bar{u}_0 in equation (10) (b) in the drying processes of ceramics (1), clay plates (2), asbestos (3), cardboard (4), leather (5), felt (6); drying modes: $t_c = 90$ and 120 °C, $v = 3$ and 5 m/s – for drying of ceramics, clay, asbestos, felt; $t_c = 90$ and 110 °C, $v = 3$ and 5 m/s – for drying of cardboard; $t_c = 40, 50$ and 60 °C, $v = 0.5$ and 1.5 m/s – for drying of the skin; $\phi = 0.35; 0.45; 0.60$

Интегрирование уравнения дает

$$\tau_{II} = \frac{\bar{u}_{кр}}{NA} \left[1 - \exp\left(-\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}}\right) \right]. \quad (14)$$

Уравнение (14) можно представить в более простой и удобной для расчетов форме

$$\tau_{II} \approx \frac{\bar{u}_{кр}}{NA} \left[\ln\left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} + 1\right) \right]. \quad (15)$$

Коэффициент A – сложная функция относительного влагосодержания $\bar{u} / \bar{u}_{кр}$. На рис. 4 дана обработка опытных данных для сушки керами-

ки (1), асбеста (2), картона (3) и войлока (4). Изображенные кривые аппроксимируются уравнением

$$A \approx A_0 \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{2,5},$$

где A_0 – линейная функция критического влагосодержания $\bar{u}_{кр}$ (рис. 4), определяемая уравнением

$$A_0 \approx 2,36 + 2\bar{u}_{кр} \dots$$

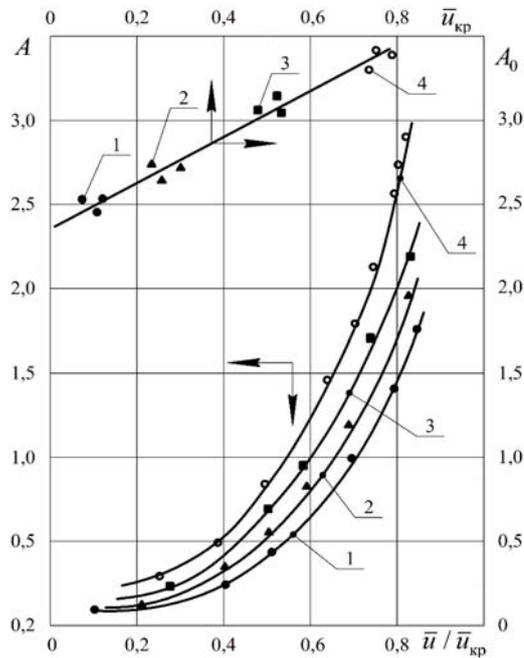


Рис. 4. Зависимости коэффициентов $A = f(\bar{u} / \bar{u}_{кр})$ и $A_0 = f(\bar{u}_{кр})$ в процессах сушки керамики (1), асбеста (2), картона (3) и войлока (4) (режимы сушки указаны на рис. 1)

Fig. 4. Dependences of coefficients $A = f(\bar{u} / \bar{u}_{кр})$ and $A_0 = f(\bar{u}_{кр})$ in the processes drying of ceramics (1), asbestos (2), cardboard (3) and felt (4) (drying modes are given in fig. 1)

Относительная скорость сушки N^* – важная обобщенная переменная, не зависящая от режима сушки. Для конкретного материала при данном методе сушки она является функцией влагосодержания [1–3].

В результате обработки кривых сушки и кривых скорости сушки для керамики, асбеста, войлока в широком диапазоне изменения режимных параметров была получена приближенная зависимость для $N^* = f(\bar{u} / \bar{u}_{кр})$ (рис. 5), которая аппроксимируется формулой

$$N^* \approx \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{1,3} \tag{16}$$

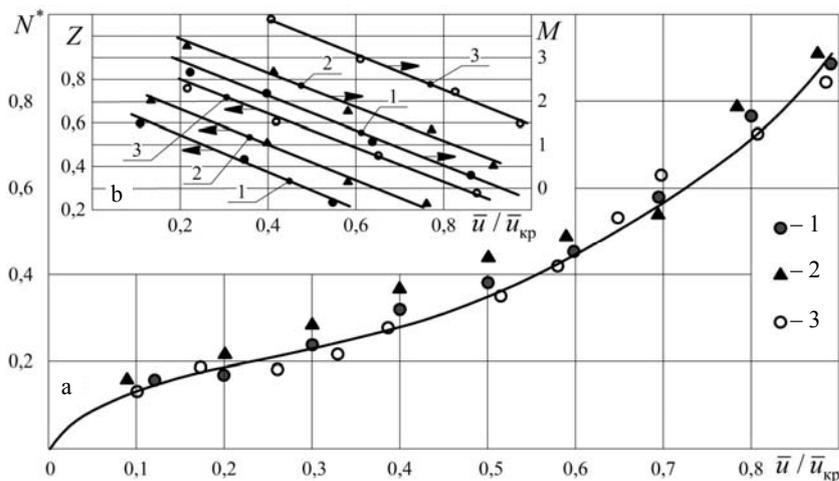


Рис. 5. Зависимости относительной скорости сушки N^* (а) и коэффициентов Z, M от относительного влагосодержания $\bar{u} / \bar{u}_{кр}$ (б) в процессах сушки асбеста (1), керамики (2), войлока (3) (режимы сушки указаны на рис. 1)

Fig. 5. Dependence of the relative drying rate N^* (a) and coefficients Z, M on the relative moisture content $\bar{u} / \bar{u}_{кр}$ (b) in the drying processes of asbestos (1) ceramics (2), felt (3) (drying modes are given in fig. 1)

На рис. 1б дана зависимость $\tau_{II} / \tau_I = f(\bar{u} / \bar{u}_{кр})$ для процессов сушки керамики (1), войлока (2) и асбеста (3). Обработка опытных данных методом наименьших квадратов была проведена степенной и экспоненциальной зависимостями [7, 11]:

$$\frac{\tau_{II}}{\tau_I} = Z \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{-0,8}; \quad \tau_{II} = \frac{\bar{u}_0 - \bar{u}_{кр}}{N} \cdot Z \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{-0,8}; \quad (17)$$

$$\frac{\tau_{II}}{\tau_I} = M \exp\left(-2,5 \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}}\right); \quad \tau_{II} = \frac{\bar{u}_0 - \bar{u}_{кр}}{N} \cdot M \exp\left(-2,5 \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}}\right). \quad (18)$$

В формулах (17) и (18) коэффициенты Z и M являются линейными функциями относительного влагосодержания $\bar{u} / \bar{u}_{кр}$. Графические зависимости коэффициентов Z и M от влагосодержания даны на рис. 5б, формулы для расчета этих коэффициентов – в табл. 1.

В табл. 2 приведены результаты расчетов длительности сушки в периоде падающей скорости, выполненных с использованием полученных формул, в сравнении с экспериментом. Разброс значений составляет около 10 %, что находится в пределах точности обработки экспериментальных данных.

Таблица 2

Результаты расчета длительности сушки во втором периоде для асбеста, керамики, войлока в сопоставлении с экспериментальными данными

Results of calculation of drying duration in the second period for asbestos, ceramics, felt in comparison with experimental data

Листовой асбест: пластина $130 \times 80 \times 6$ мм; $\rho = 770$ кг/м ³ ; $\bar{u}_0 = 0,46$; $\bar{u}_{кр} = 0,2$; $N = 0,026$ мин ⁻¹ ; $\tau_1 = 9$ мин. Режим сушки: $t_c = 120$ °С; $v = 5$ м/с; $\phi = 5$ %									
$\bar{u} / \bar{u}_{кр}$	τ_{II} мин (эксп.)	τ_{II} мин (1)	τ_{II} мин (4)	τ_{II} мин (6)	τ_{II} мин (8)	τ_{II} мин (10)	τ_{II} мин (15)	τ_{II} мин (17)	τ_{II} мин (18)
0,8	2,5	2,7	2,6	2,2	2,5	2,4	2,3	2,4	2,7
0,7	3,5	3,4	4,2	3,9	3,6	3,7	4,1	4,1	4,2
0,6	5,5	5,6	5,5	5,8	5,9	5,8	6,0	5,9	5,7
0,4	9,5	9,6	9,2	10,2	10,1	10,3	9,4	10,1	10,2
0,2	12,5	13,6	12,6	13,2	12,8	13,2	13,5	13,2	13,0
Керамика: пластина $120 \times 80 \times 5$ мм; $\rho = 1860$ кг/м ³ ; $\bar{u}_0 = 0,2$; $\bar{u}_{кр} = 0,1$; $N = 0,019$ мин ⁻¹ ; $\tau_1 = 6$ мин. Режим сушки: $t_c = 90$ °С; $v = 10$ м/с; $\phi = 6$ %									
0,8	1,5	1,35	1,24	1,9	2,0	1,8	1,7	1,8	1,9
0,6	3,0	2,95	2,7	3,5	3,8	2,6	3,4	3,3	3,4
0,4	5,0	5,2	4,4	5,6	5,2	5,5	5,3	5,5	5,5
0,2	9,5	8,4	8,4	9,2	8,7	10,5	12,4	11,2	11,5
Шерстяной войлок: пластина $200 \times 100 \times 8$ мм; $\rho = 200$ кг/м ³ ; $\bar{u}_0 = 1,14$; $\bar{u}_{кр} = 0,75$; $N = 0,045$ мин ⁻¹ ; $\tau_1 = 8,5$ мин. Режим сушки: $t_c = 120$ °С; $v = 3$ м/с; $\phi = 5$ %									
0,80	3,0	3,1	2,9	3,1	3,2	3,8	3,2	3,5	3,5
0,67	5,5	5,8	5,6	5,2	6,1	5,5	5,4	5,8	5,9
0,53	9,0	8,6	7,8	8,3	8,8	8,5	8,2	9,2	9,4
0,40	11,5	11,5	11,7	12,4	12,7	13,6	12,0	12,5	12,8
0,27	17,5	17,2	16,5	17,5	17,7	19,4	17,8	19,7	20,2

ВЫВОДЫ

1. В результате обработки опытных данных по конвективной сушке керамики, асбеста, войлока группой обобщенных комплексных переменных получены формулы для определения длительности сушки в периоде падающей скорости. Создаваемая такой обработкой эксперимента инвариантность позволяет переходить от одних переменных к другим, что значительно сокращает число необходимых опытов.

2. Обработка данных и анализ формул показали, что кривые сушки представляют сложные экспоненты. Главными связующими переменными

являются относительная скорость сушки N^* и относительное влагосодержание $\bar{u} / \bar{u}_{кр}$. Такой метод обработки опытных данных представляет наиболее общую закономерность кинетики сушки влажных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Красников, В. В. Кондуктивная сушка / В. В. Красников. М.: Энергия, 1973. 288 с.
2. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. М.: Энергия, 1968. 472 с.
3. Акулич, П. В. Расчеты сушильных и теплообменных установок / П. В. Акулич. Минск: Беларус. наука, 2010. 443 с.
4. Рудобашта, С. П. Массоперенос в системах с твердой фазой / С. П. Рудобашта. М.: Химия, 1980. 248 с.
5. Васильев, В. Н. Технология сушки. Основы тепло- и массопереноса / В. Н. Васильев, В. Е. Куцакова, С. В. Фролов. Санкт-Петербург: ГИОРД, 2013. 224 с.
6. Филоненко, Г. К. Сушильные установки / Г. К. Филоненко, П. Д. Лебедев. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1952. 264 с.
7. Ольшанский, А. И. Тепло- и массообмен обобщенными комплексными переменными при термической обработке и сушке теплоизоляционных материалов / А. И. Ольшанский, А. А. Котов, С. М. Кузьменков // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2022. Т. 67, № 2. С. 191–203. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-2-191-203>.
8. Ольшанский, А. И. Исследование сушки тонких материалов с использованием обобщенных комплексных переменных / А. И. Ольшанский // Инженерно-физический журнал. 2016. Т. 89, № 4. С. 884–894.
9. Куц, П. С. Некоторые закономерности тепловлагообмена и приближенные методы расчета кинематики процесса сушки влажных материалов / П. С. Куц, А. И. Ольшанский // Инженерно-физический журнал. 1977. Т. 32, № 5. С. 1007–1014.
10. Ольшанский, А. И. Исследование тепломассообмена в процессах тепловой обработки и сушки теплоизоляционных материалов / А. И. Ольшанский, С. В. Жерносек, А. М. Гусаров // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 2. С. 156–168. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-2-156-168>.
11. Ольшанский, А. И. Экспериментальное исследование кинетики сушки тонких плоских влажных материалов методом регулярного режима с использованием обобщенных комплексных переменных / А. И. Ольшанский, А. М. Гусаров // Инженерно-физический журнал. 2017. Т. 90, №3. С. 700–713.
12. Сажин, Б. С. Научные основы техники сушки / Б. С. Сажин. М.: Наука, 1997. 447 с.
13. Кошелева, М. К. Особенности процесса сушки нетканых текстильных материалов / М. К. Кошелева, С. П. Рудобашта // Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе: сб. науч. ст. Первых Международных Лыковских науч. чтений. Курск: Ун-тская кн., 2015. С. 205–210.
14. Ольшанский, А. И. Исследование тепло- и массообмена в процессе конвективной термообработки и сушки теплоизоляционных материалов и приближенное уравнение кривой сушки / А. И. Ольшанский, А. Н. Голубев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 5. С. 461–477. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-461-477>.

Поступила 22.03.2024 Подписана в печать 23.05.2024 Опубликовано онлайн 31.07.2024

REFERENCES

1. Krasnikov V. V. (1973) *Conductive Drying*. Moscow, Energiya Publ. 288 (in Russian).
2. Lykov A. V. (1968) *Theory of Drying*. Moscow, Energiya Publ. 472 (in Russian).

3. Akulich P. V. (2010) *Calculations of Drying and Heat Exchange Installations*. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ. 443 (in Russian).
4. Rudobashta S. P. (1980) *Mass Transfer in Systems with a Solid Phase*. Moscow, Khimiya Publ. 248 (in Russian).
5. Vasiliev V. N., Kutsakova V. E., Frolov S.V. (2013) *Drying Technology. Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. St. Petersburg, GIORД Publ. 224 (in Russian).
6. Filonenko G. K., Lebedev P. D. (1952) *Drying Plants*. Moscow–Leningrad, Gosenergoizdat Publ. 264 (in Russian).
7. Ol'shanskii A. I., A. A. Kotow, S. M. Kuzmenkov (2022) Heat and Mass Transfer by Generalized Complex Variables During Heat Treatment and Drying of Thermal Insulation Materials. *Vestsi Natsyyanal'nai Akademii Navuk Belarusi. Seryya Fizika-Tekhnichnykh Navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*, 67 (2), 191–203. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-2-191-203> (in Russian).
8. Ol'shanskii A. I. (2016) Investigation of the Drying of Thin Materials with the use of Generalized Complex Variables. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 89, 886–895. <https://doi.org/10.1007/s10891-016-1450-4>.
9. Kuts P. S., Ol'shansky A. I. (1977) Some Features of Heat and Moisture Transfer and Approximate Methods of Calculating the Drying Kinetics of Moist Materials. *Journal of Engineering Physics*, 32, 650–656. <https://doi.org/10.1007/bf00862568>.
10. Ol'shanskii A. I., Zhernosek S. V., Gusarov A. M. (2022) Investigation of Heat and Mass Transfer in the Processes of Heat Treatment and Drying of Thermal Insulation Materials. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (2), 156–168. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-2-156-168> (in Russian).
11. Ol'shanskii A. I., Gusarov A. M. (2017) Experimental Study of the Kinetics of Drying of Thin Plane Moist Materials by the Regular-Regime Method Using Generalized Complex Variables. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 90, 665–678. <https://doi.org/10.1007/s10891-017-1614-x>.
12. Sazhin B. S. (1997) *Scientific Fundamentals of Drying Techniques*. Moscow, Nauka Publ. 447 (in Russian).
13. Kosheleva M. K., Rudobashta S. P. (2015) Features of the Drying Process of Nonwoven Textile Materials. *Aktual'nye Problemy Sushki i Termovlazhnostnoi Obrabotki Materialov v Razlichnykh Otrasyakh Promyshlennosti i Agropromyshlennom komplekse: Sb. Nauch. St. Pervykh Mezhdunarodnykh Lykovskikh Nauch. Chtenii* [Actual Problems of Drying and Thermal and-Moisture Treatment of Materials in Various Industries and Agro-Industrial Complex: Collection of Scientific Articles of the First International Lykov Scientific Readings]. Kursk, Universitetskaya Kniga Publ., 205–210 (in Russian).
14. Ol'shanskii A. I., Golubev A. N. (2023) Investigation of Heat and Mass Transfer in the Process of Convective Heat Treatment and Drying of Thermal Insulation Materials and Approximate Equation of the Drying Curve. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (5), 461–477. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-461-477> (in Russian).