

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ  
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕДИНЕНИЙ СНГ  
**ЭНЕРГЕТИКА** Том 67, № 2  
2024

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ  
ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1958 ГОДА

**Учредитель**

Белорусский национальный технический университет

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

**СОДЕРЖАНИЕ**

**ОБЩАЯ ЭНЕРГЕТИКА**

- Узаков Г. Н., Седнин В. А., Сафаров А. Б., Мамедов Р. А., Хатамов И. А.** CFD-моделирование аэродинамического профиля лопастей ветроэнергетической установки с вертикальной осью в системе Ansys Fluent ..... 97

**ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА**

- Новаш И. В., Румянцев В. Ю., Дерюгина Е. А., Булойчик Е. В., Конохов М. С.** Использование аварийных составляющих в качестве входных информационных сигналов микропроцессорных защит ..... 115
- Пехота А. Н., Галушко В. Н., Хрусталева Б. М., Мирош Д. В.** Анализ электромагнитных и тепловых процессов асинхронного двигателя с помощью 3D-моделирования ..... 125

**ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА**

- Струцкий Н. В., Романюк В. Н.** Оценка объемов работ по эксплуатационному контролю стальных подземных газопроводов с учетом организационно-логистического фактора ..... 137
- Рыжова Т. В., Бухаров Д. Н., Аракелян М. М., Аракелян С. М.** Динамические процессы развития трещиноватости фрактального типа: модели для твердотельного материала камеры энергетической установки в процессе ее эксплуатации ..... 152
- Седнин А. В., Дюсенов К. М.** Проблемы развития гибридных систем теплоснабжения ..... 173

**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. ЖУКОВСКИЙ* (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. ПИСЬМЕННЫЙ* (Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, Украина),  
*Ф. А. РОМАНЮК* (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 «Белинвестэнергоcбережение», 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 29.03.2024. Формат бумаги 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага мелованная.  
Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 12,0. Уч.-изд. л. 7,74. Тираж 100 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](mailto: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 2  
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**

GENERAL POWER ENGINEERING

- Uzakov G. N., Sednin V. A., Safarov A. B., Mamedov R. A., Khatamov I. A.** CFD-Modeling of the Airfoil of the Blades of a Wind Power Plant with a Vertical Axis in the Ansys Fluent System . . . . . 97

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

- Novash I. V., Rumiantsev V. Yu., Dziaruhina A. A., Buloichik E. V., Konakhau M. S.** The Use of Emergency Components as Input Information Signals for Micro-processor Protection . . . . . 115
- Pekhota A. N., Galushko V. N., Khrustalev B. M., Mirosh D. V.** Analysis of Electromagnetic and Thermal Processes of an Induction Motor Using 3D Modeling . . . . . 125

HEAT POWER ENGINEERING

- Strutsky N. V., Romaniuk V. N.** Assessment of the Scope of Work for Operational Control of Steel Underground Gas Pipelines, Taking Into Account the Organizational and Logistical Factor . . . . . 137
- Ryzhova T. V., Bukharov D. N., Arakelian M. M., Arakelyan S. M.** Dynamic Processes of Development Jointing of a Fractal Type: Models for a Solid-State Material of the Chamber in a Power Facility during its Operation . . . . . 152
- Sednin A. V., Dyussenov K. M.** Development of Hybrid District Heating Systems . . . . 173

**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. MIKHILEVICH* (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. RUMIANTSEV* (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 “Belinvestenergosberezhenie”, 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, 19<sup>th</sup>  
Reg. No 1257**

---

Passed for printing 29.03.2024. Dimension of paper 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Coated paper.  
Digital printing. Type face Times. Conventional printed sheet 12,0.  
An edition of 100 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](mailto:energy@bntu.by); <http://energy.bntu.by>

---

Printed in BNTU. License LP 38200000006896 from 03.03.2014.  
220013, Minsk, 65, Nezavisimosty Ave.

© Belarusian National Technical University, 2024

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-97-114>

УДК 621.548.4

## CFD-моделирование аэродинамического профиля лопастей ветроэнергетической установки с вертикальной осью в системе Ansys Fluent

Г. Н. Узаков<sup>1)</sup>, В. А. Седнин<sup>2)</sup>, А. Б. Сафаров<sup>1, 3)</sup>, Р. А. Мамедов<sup>3)</sup>,  
И. А. Хатамов<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Каршинский инженерно-экономический институт (г. Карши, Республика Узбекистан),

<sup>2)</sup>Белорусский национальный технический университет (г. Минск, Республика Беларусь),

<sup>3)</sup>Бухарский инженерно-технологический институт (г. Бухара, Республика Узбекистан)

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

**Реферат.** В статье представлены результаты исследований по моделированию аэродинамического профиля DU-06-W-200, применяемого в ветроэнергетических установках с вертикальной осью, в системе Ansys Fluent, оценке совместимости с экспериментальными данными и определению оптимального значения угла атаки. Аэродинамический профиль DU-06-W-200 смоделирован с углами атаки в промежутке от  $-15^\circ$  до  $+15^\circ$ , граничными условиями и скоростью потока входных данных 15 м/с, рабочей температурой  $23^\circ\text{C}$ , рабочим давлением  $1 \cdot 10^5$  Па, плотностью воздушного потока  $1,23 \text{ кг/м}^3$  (длина хорды аэродинамического профиля 1 м, динамическая вязкость воздушного потока  $1,7894 \cdot 10^{-5} \text{ кг/(м}\cdot\text{с)}$ , тип турбулентных моделей SST  $k - \omega$  ( $k - \omega$ ),  $k - \epsilon$  ( $k - \epsilon$ ), число Рейнольдса  $1,05 \cdot 10^6$ ). Создана область двумерной геометрии и профиль сетки для аэродинамического профиля DU-06-W-200, при этом количество узлов в сетке 37495, а количество элементов 36790. Также было установлено, что коэффициенты сопротивления ( $C_d$ ) SST  $k - \omega$  ( $k - \omega$ ) для модели турбулентности равны: 0,1734, 0,0721, 0,0311, 0,0204, 0,0351, 0,0782, 0,1712,  $k - \epsilon$  ( $k - \epsilon$ ) для модели турбулентности: 0,2065, 0,0789, 0,0318, 0,0212, 0,0359, 0,0787, 0,2019, коэффициенты подъема силы ( $C_l$ ) SST  $k - \omega$  ( $k - \omega$ ) для модели турбулентности равны  $-0,9169$ ,  $-0,9169$ ,  $-0,9239$ ,  $-0,5394$ ,  $0,0842$ ,  $0,7416$ ,  $1,3134$ ,  $1,1229$ ,  $k - \epsilon$  ( $k - \epsilon$ ) для турбулентной модели составили:  $-0,9278$ ,  $-0,8674$ ,  $-0,5336$ ,  $0,0848$ ,  $0,0359$ ,  $0,0787$ ,  $0,2019$  при углах атаки аэродинамического профиля DU-06-W-200, равных:  $-15^\circ$ ,  $-10^\circ$ ,  $-5^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$  соответственно. При оценке совместимости модели и результатов экспериментов аэродинамического профиля DU-06-W-200 использованы критерий соответствия  $\chi^2$ , среднеквадратичная погрешность (RMSE), коэффициент детерминации ( $R^2$ ), средняя погрешность смещения (MBE). По результатам исследования оценки зависимости соотношения коэффициентов сопротивления и подъемной силы от изменения угла атаки, осуществленной с помощью моделей турбулентности SST  $k - \omega$  ( $k - \omega$ ),  $k - \epsilon$  ( $k - \epsilon$ ), установлено, что максимальное значение отношения коэффициентов сопротивления и подъема силы составляет 21 при оптимальном угле наклона атаки, равном  $5^\circ$ .

**Ключевые слова:** аэродинамический профиль DU-06-W-200, Ansys Fluent, CFD-моделирование, турбулентны модель SST  $k - \omega$  ( $k - \omega$ ),  $k - \epsilon$  ( $k - \epsilon$ ), критерий соответствия  $\chi^2$ , среднеквадратичная погрешность (RMSE), коэффициент детерминации ( $R^2$ ), средняя погрешность смещения (MBE)

**Для цитирования:** CFD-моделирование аэродинамического профиля лопастей ветроэнергетической установки с вертикальной осью в системе Ansys Fluent / Г. Н. Узаков [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 67, № 2. С. 97–114. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-67-2-97-114>

### Адрес для переписки

Сафаров Алишер Бекмуродович  
Каршинский инженерно-экономический институт  
просп. Мустакиллик, 225,  
180100, г. Карши, Республика Узбекистан  
Тел.: +998 90 299-41-24  
a-safarov91@mail.ru

### Address for correspondence

Safarov Alisher Bekmurodovich  
Karshi Engineering Economics Institute  
225, Mustakillik Ave.,  
180100, Karshi, Republic of Uzbekistan  
Tel.: +998 90 299-41-24  
a-safarov91@mail.ru

## CFD-Modeling of the Airfoil of the Blades of a Wind Power Plant with a Vertical Axis in the Ansys Fluent System

G. N. Uzakov<sup>1)</sup>, V. A. Sednin<sup>2)</sup>, A. B. Safarov<sup>1, 3)</sup>, R. A. Mamedov<sup>3)</sup>, I. A. Khatamov<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Karshi Engineering Economics Institute (Karshi, Republic of Uzbekistan),

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

<sup>3)</sup>Bukhara Engineering Technological Institute (Bukhara, Republic of Uzbekistan)

**Abstract:** The article presents the results of research on modeling the DU-06-W-200 airfoil used in wind power plants with a vertical axis in the Ansys Fluent system, evaluating compatibility with experimental data and determining the optimal angle of attack. The DU-06-W-200 airfoil was simulated with angles of attack ranging from  $-15^\circ$  to  $+15^\circ$ , boundary conditions and input flow rate being of 15 m/s, operating temperature – of  $23^\circ\text{C}$ , operating pressure – of  $1 \cdot 10^5$  Pa, air flow rate – of  $1.23 \text{ kg/m}^3$  (airfoil chord length is of 1 m, dynamic viscosity of the air flow is  $1.7894 \cdot 10^{-5} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$  and the type of turbulent models is SST  $k - \omega$  ( $k - \omega$ ),  $k - \epsilon$  ( $k - \epsilon$ ), whereas Reynolds number is  $1.05 \cdot 10^6$ ). A two-dimensional geometry domain and a grid profile for the DU-06-W-200 airfoil have been created, with the number of nodes in the grid 37495 and the number of elements 36790. It was also found that the drag coefficients ( $C_d$ ) SST  $k - \omega$  ( $k - \omega$ ) for the turbulence model were equal to 0.1734, 0.0721, 0.0311, 0.0204, 0.0351, 0.0782, 0.1712,  $k - \epsilon$  ( $k - \epsilon$ ) for the turbulence model were equal to 0.2065, 0.0789, 0.0318, 0.0212, 0.0359, 0.0787, 0.2019, lift coefficients ( $C_l$ ) SST  $k - \omega$  ( $k - \omega$ ) for the turbulence model were  $-0.9169$ ,  $-0.9169$ ,  $-0.9239$ ,  $-0.5394$ ,  $0.0842$ ,  $0.7416$ ,  $1.3134$ ,  $1.1229$ ,  $k - \epsilon$  ( $k - \epsilon$ ) for the turbulent model was  $-0.9278$ ,  $-0.8674$ ,  $-0.5336$ ,  $0.0848$ ,  $0.0359$ ,  $0.0787$ ,  $0.2019$  at angles of attack of the DU-06-W-200 airfoil equal to  $-15^\circ$ ,  $-10^\circ$ ,  $-5^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ , respectively. In assessing the compatibility of the model and the experimental results of the DU-06-W-200 airfoil, the conformity criterion  $\chi^2$ , root mean square error (RMSE), coefficient of determination ( $R^2$ ), and average bias error (ABE) were used. Based on the results of a study of the dependence of the ratio of the drag and lift coefficients on changes in the angle of attack, carried out using the SST  $k - \omega$  ( $k - \omega$ ) and  $k - \epsilon$  ( $k - \epsilon$ ) turbulence models, it has been found that the maximum value of the ratio of the drag and lift coefficients is 21 at the optimal angle attack inclination equal to  $5^\circ$ .

**Keywords:** DU-06-W-200 airfoil, Ansys Fluent, CFD modeling, SST  $k - \omega$  ( $k - \omega$ ) and  $k - \epsilon$  ( $k - \epsilon$ ) turbulent model,  $\chi^2$  conformity criterion, root mean square error (RMSE), coefficient of determination ( $R^2$ ), average bias error (MBE)

**For citation:** Uzakov G. N., Sednin V. A., Safarov A. B., Mamedov R. A., Khatamov I. A. (2024) CFD-Modeling of the Airfoil of the Blades of a Wind Power Plant with a Vertical Axis in the Ansys Fluent System. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (2), 97–114. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-97-114> (in Russian)

### Введение

В мире использование возобновляемых источников энергии, в том числе энергии ветра, занимает одно из ведущих мест в стабилизации экологических проблем и экономии природного топлива. Многие страны приняли стратегии по повышению эффективности ветроэнергетических установок и развитию их использования в изменчивых климатических условиях. В настоящее время лидирующими по разработке и внедрению ветроэнергетических установок являются Китай, Индия и ряд европейских государств. Китай – лидер по производству электротроэнергии за счет ветроэнергети-

ческих устройств, установленная мощность которых составляет 82 ГВт в год, затем по выработке электроэнергии за счет ветроэлектростанций следуют европейские страны с установленной мощностью 21,6 ГВт, за ними – США (13,6 ГВт), Индия (11,5 ГВт) и Латинская Америка (6,2 ГВт) [1]. В первой половине 2023 г. было установлено на 38 % больше новых ветроэнергетических установок, чем в 2022 г., что прибавило 100 ГВт с июня 2022 г. по июнь 2023 г., а темп годового роста установленной мощности увеличился на 11,4 % [2].

Республика Узбекистан также разработала меры по повышению эффективности реформ, направленных на переход к «зеленой» экономике к 2030 г. Ведется практическая работа по увеличению производственной мощности возобновляемых источников энергии до 15 ГВт и их доли более чем 30 % от общего объема производства электроэнергии [3]. Проводятся научные исследования по разработке и повышению эффективности возобновляемых источников энергии, адаптированных к климатическим условиям Узбекистана [4–8].

Важно усовершенствование конструкций ветроэнергетических установок с целью повышения их эффективности при изменчивых скоростях ветра главным образом за счет изучения аэродинамики их лопастей. Поэтому в данной статье проанализированы научные работы по созданию и исследованию аэродинамических профилей различной формы, используемых в ветроэнергетических установках.

Группа ученых под руководством Фархана Л. Рашида провела аэродинамическое исследование влияния воздушного потока вокруг профиля NASA 2412 различной геометрии с использованием методов CFD. Основным направлением научных исследований является разработка эффективных инженерных процедур анализа воздушного потока вокруг модифицированного профиля NASA 2412, связанного с CFD-моделью. Моделирование выполнялось путем решения основных уравнений (непрерывности, усредненного, по Рейнольдсу, Навье-Стоксу, и уравнения энергии) в двумерном формате с использованием анализа Fluent при числе Рейнольдса  $1 \cdot 10^6$ . По представленным результатам установлено, что коэффициенты сопротивления и подъемной силы возрастают соответственно с повышением угла атаки до момента достижения остановки. При этом оптимальный угол атаки составил  $4^\circ$  [9].

Шер Афган Хан провел исследование, сравнивающее влияние различных моделей турбулентности на прогнозы CFD аэродинамического профиля NASA 0018. В данном исследовании представлен численный анализ аэродинамических характеристик профиля NASA0018 с использованием различных моделей турбулентности. Для этого численного исследования использовалась модель Ansys Fluent Computational Fluid Dynamics (CFD). Имеющиеся экспериментальные данные аэродинамического профиля NASA0018 использованы для сравнения численных результатов, и оценены различия в коэффициентах подъемной силы, сопротивления и давления соответственно. Замеры аэродинамических коэффициентов

и давления вдоль профиля проводились при  $Re = 0,8 \cdot 10^5$  до  $Re = 0,3 \cdot 10^6$  и углах атаки (от 0 до  $18^\circ$ ). Модель SST  $k - \omega$  обеспечила наилучшие прогнозы коэффициента подъемной силы для малых углов атаки [10].

Брайан Стинвейк и Пабло Друзтта смоделировали воздушный поток вокруг профиля 2D NACA 0012 с использованием модели турбулентного потока RANS SST при различных углах атаки и сравнили его с экспериментальными данными. Модифицированный профиль показал более высокие значения  $C_l$  и  $C_d$  по сравнению со стандартным NACA 0012. Учитывая высокую эффективность предлагаемого аэродинамического профиля, установлено, что он может быть использован в ветроэнергетических установках с вертикальной осью [11].

Насер Шелил разработал 2D-модель аэродинамического профиля DTU-LN221 и проанализировал его в системе Ansys Fluent. ANSYS Fluent смоделировал и сравнил предложенный аэродинамический профиль с семью различными моделями турбулентности. Результаты моделирования аэродинамического профиля с использованием различных моделей турбулентности сравниваются с экспериментальными данными аэродинамической трубы в тех же условиях эксплуатации. На основе экспериментальных данных из аэродинамической трубы обнаружено, что эффективность между предсказанными расчетной гидродинамикой (CFD) коэффициентами аэродинамической силы высока, особенно при угле атаки от  $-5^\circ$  до  $+10^\circ$ . Результаты показывают, что для повышения производительности ветроэнергетической установки рекомендуется использовать аэродинамические профили лопастей ветротурбины при высокой скорости и низкой температуре воздуха [12].

В настоящее время актуально проведение исследований по использованию аэродинамических профилей DU-06-W-200 в ветроэнергетических установках с вертикальной осью и определение их оптимальных параметров в условиях изменчивого потока ветра.

Цель исследования заключается в моделировании аэродинамического профиля DU-06-W-200 для ветроэнергетических установок с вертикальной осью в системе Ansys Fluent, оценке его совместимости с экспериментальными данными и определении оптимального значения угла атаки.

### Метод исследования

Поскольку целью исследования является CFD-моделирование аэродинамического профиля DU-06-W-200 в системе Ansys Fluent и сравнение результатов с экспериментальными данными, следующие аэродинамические параметры являются важными:

число Рейнолдса [13]

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu}; \quad (1)$$

коэффициент подъемной силы [14]

$$C_l = \frac{F_l}{P_l A} = \frac{2F_l}{\rho A V^2}; \quad (2)$$

коэффициент сопротивления [15]

$$C_d = \frac{F_d}{P_d A} = \frac{2F_d}{\rho A V^2}, \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность воздушного потока,  $\text{кг/м}^3$ ;  $V$  – скорость потока,  $\text{м/с}$ ;  $L$  – длина хорды аэродинамического профиля,  $\text{м}$ ;  $\mu$  – динамическая вязкость воздушного потока,  $\text{кг/(м}\cdot\text{с)}$ ;  $F_l$  – подъемная сила,  $\text{Н}$ ;  $P_d$  – динамическое давление,  $\text{Па}$ ;  $A$  – поверхность профиля,  $\text{м}^2$ ;  $F_d$  – сила сопротивления воздуха,  $\text{Н}$ .

**Турбулентные модели  $k$  – epsilon ( $k$  –  $\epsilon$ ) и SST  $k$  – omega ( $k$  –  $\omega$ )** [16–19] являются наиболее распространенными, используемыми в вычислении динамики газа и жидкостей (CFD) для моделирования средних свойств потока в условиях турбулентного потока. На основе данной модели в системе Ansys Fluent можно получить модели зависимости аэродинамических профилей от изменения потока ветра.

Турбулентная модель  $k$  – epsilon ( $k$  –  $\epsilon$ ):

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k; \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \\ + \rho C_1 S_\epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + V_\epsilon} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon. \end{cases} \quad (4)$$

Турбулентная модель SST  $k$  – omega ( $k$  –  $\omega$ ):

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = P - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \sigma_k \mu_t \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]; \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\gamma}{v_t} P - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \sigma_k \mu_t \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \\ + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, \end{cases} \quad (5)$$

где  $u_i$ ,  $u_j$  – составляющие скорости в соответствующем направлении;  $\mu_t$  – вихревая вязкость;  $G_b$  – кинетическая энергия выталкивающей силы;

$G_k$  – турбулентная кинетическая энергия;  $Y_M$  – вклад переменного расширения при турбулентности сжатия в общую скорость диссипации;  $S$  – инвариант тензора деформаций;  $\sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$  – константы;  $k$  – турбулентная кинетическая энергия;  $P$  – производный член  $k$ ;  $\nu_t$  – кинематическая вязкость;  $\omega$  – удельная скорость диссипации;  $F_1$  – функция смешивания.

### Тест на пригодность (Goodness of Fit Test)

Степень соответствия – это статистический тест, который оценивает, насколько хорошо набор наблюдаемых значений соответствует значениям, ожидаемым в действительной модели. Существует множество методов определения соответствия, включая  $\chi^2$ , среднеквадратическую погрешность (RMSE), коэффициент детерминации ( $R^2$ ), среднюю ошибку смещения (MBE) [20, 21].

Степень соответствия ( $\chi^2$ )

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \left( \frac{a_i - b_i}{b_i} \right)^2. \quad (6)$$

Среднеквадратическая погрешность (RMSE)

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (R_{ai} - R_{bi})^2}, \quad (7)$$

где  $N$  – количество данных;  $R_{ai}$  – экспериментальные данные;  $R_{bi}$  – данные модели.

Коэффициент детерминации ( $R^2$ )

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (R_{ai} - R_{bi})^2}{\sum_{i=1}^N (R_{ai} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_{ai})^2}. \quad (8)$$

Средняя ошибка смещения (MBE)

$$\text{MBE} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (R_{ai} - R_{bi})^2. \quad (9)$$

В табл. 1 представлены данные о геометрических размерах аэродинамического профиля DU-06-W-200. Всего по этим данным получена 201 точка по осям  $X$  и  $Y$ . В правой части таблицы расположен модифицированный файл данных аэродинамического профиля DU-06-W-200, закодированный для системы Ansys Fluent.



Таблица 1  
Данные геометрических размеров аэродинамического профиля DU-06-W-200  
Data on the geometric dimensions of the DU-06-W-200 airfoil

| Файл существующих данных аэродинамического профиля DU-06-W-200 |         |   | Модифицированный файл данных профиля DU-06-W-200 |                  |         |         |   |
|----------------------------------------------------------------|---------|---|--------------------------------------------------|------------------|---------|---------|---|
| X                                                              | Y       | → | Номер группы                                     | Количество точек | X       | Y       | Z |
| 1,00300                                                        | 0,00000 |   | 1                                                | 1                | 1,00300 | 0,00000 | 0 |
| 1,00003                                                        | 0,00033 |   | 1                                                | 2                | 1,00003 | 0,00033 | 0 |
| 0,99507                                                        | 0,00099 |   | 1                                                | 3                | 0,99507 | 0,00099 | 0 |
| 0,98874                                                        | 0,00179 |   | 1                                                | 4                | 0,98874 | 0,00179 | 0 |
| 0,98084                                                        | 0,00282 |   | 1                                                | 5                | 0,98084 | 0,00282 | 0 |
| 0,97135                                                        | 0,00413 |   | 1                                                | 6                | 0,97135 | 0,00413 | 0 |

При получении результатов и моделировании аэродинамического профиля DU-06-W-200 при различных углах атаки ( $\alpha$ ) в системе Ansys Fluent необходимо создать сетку и геометрические размеры профиля. На рис. 1а представлена область двумерной геометрии, а на рис 1б – сгенерированный профиль сетки. При этом длина аэродинамического профиля принята равной 1 м. Количество узлов в сетке 37495, количество элементов 36790.

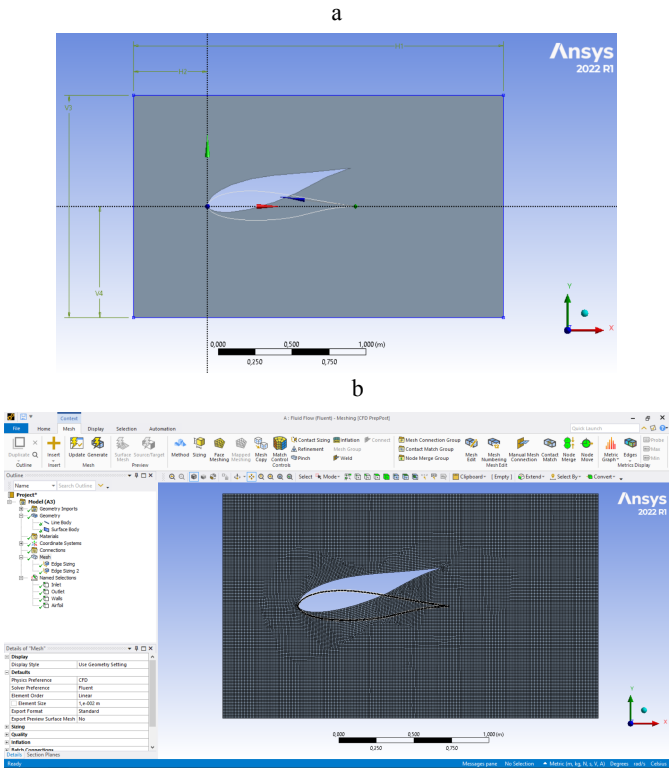


Рис. 1. Область 2D-геометрии аэродинамического профиля DU-06-W-200 (а),  
профиль сетки, созданный для поверхности DU-06-W-200 (b)  
Fig. 1. Domain of 2D geometry of the airfoil DU-06-W-200 (a),  
grid profile created for the surface of DU-06-W-200 (b)

Определение граничных условий является важной частью любой вычислительной задачи динамики жидкостей и газа. Модель исследуемого аэродинамического профиля предполагает переменный угол атаки турбулентного потока над его верхней частью. Для проведения моделирования получены граничные условия задачи и некоторые исходные данные, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

**Граничные условия и исходные данные**  
**Boundary conditions and the initial data**

| Параметр                                | Значение                                                   |
|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Тип анализа                             | Устойчивое состояние                                       |
| Тип аэродинамического профиля           | DU-06-W-200                                                |
| Скорость потока                         | 15 m/s                                                     |
| Рабочая температура                     | 23 °C                                                      |
| Рабочее давление                        | $1 \cdot 10^5$ Pa                                          |
| Плотность воздушного потока             | $1,23 \text{ kg/m}^3$                                      |
| Длина хорды аэродинамического профиля   | $L = 1 \text{ m}$                                          |
| Динамическая вязкость воздушного потока | $\mu = 1,7894 \cdot 10^{-5} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$ |
| Типы турбулентных моделей               | SST $k - \omega$ , $k - \epsilon$ (SST $k - \epsilon$ )    |
| Число Рейнольдса                        | $Re = 1,05 \cdot 10^6$                                     |
| Турбулентный поток                      | $Re > 5 \cdot 10^5$                                        |

На рис. 2 представлена модель обнаружения значений коэффициентов сопротивления и подъемной силы при аэродинамической скорости потока на поверхности DU-06-W-200, равной 15 м/с, число Рейнольдса  $1,05 \cdot 10^6$ , углы атаки  $-15^\circ$ ,  $-10^\circ$ ,  $-5^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ . При этом использовались модели турбулентности SST  $k - \omega$  ( $k - \omega$ ),  $k - \epsilon$  ( $k - \epsilon$ ). Расчеты проводились в количестве 500 итераций.

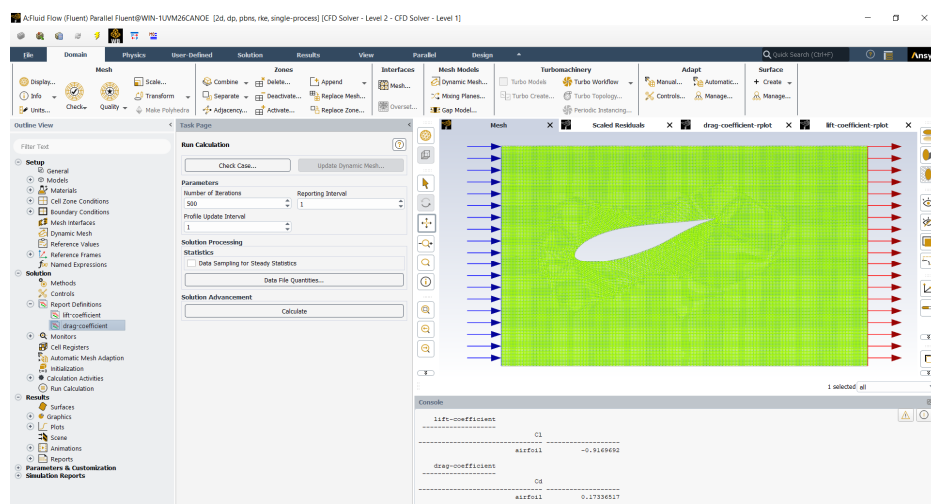


Рис. 2. Моделирование аэродинамической поверхности DU-06-W-200 при различных углах атаки

Fig. 2. Modeling of the DU-06-W-200 airfoil at various angles of attack

## Результаты и обсуждения

По результатам исследований на рис. 3 представлены значения коэффициентов сопротивления и подъемной силы аэродинамического профиля DU-06-W-200. Было установлено, что коэффициенты сопротивления ( $C_d$ ) SST  $k - \omega$  ( $k - \omega$ ) для модели турбулентности равны: 0,1734, 0,0721, 0,0311, 0,0204,  $k - \epsilon$  ( $k - \epsilon$ ) для модели турбулентности: 0,2065, 0,0789, 0,0318, 0,0212, коэффициенты подъемной силы ( $C_l$ ) SST  $k - \omega$  ( $k - \omega$ ) для модели турбулентности: -0,9169, -0,9239, -0,5394, 0,0842,  $k - \epsilon$  ( $k - \epsilon$ ) для турбулентной модели: 0,9278, -0,8674, -0,5336, 0,0848 при углах атаки  $-15^\circ$ ,  $-10^\circ$ ,  $-5^\circ$ , 0 соответственно.

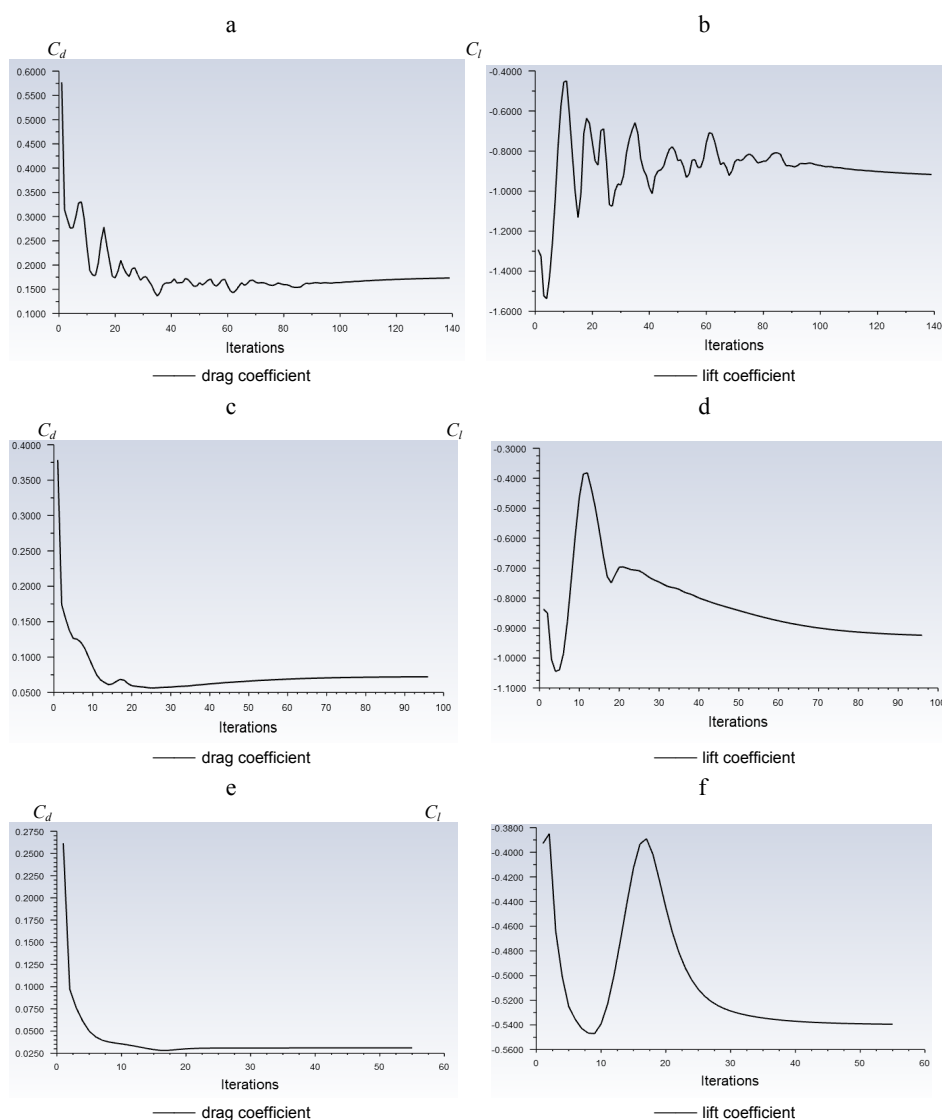


Рис. 3. Кривые коэффициентов сопротивления и подъемной силы аэродинамического профиля DU-06-W-200: а, б –  $\alpha = -15^\circ$ ; в, д –  $-10^\circ$ ; е, ф –  $-5^\circ$ ; г, х – 0 (окончание рис. на с. 106)

Fig. 3. Curves of drag and lift coefficients of the DU-06-W-200 airfoil:  
а, б –  $\alpha = -15^\circ$ ; в, д –  $-10^\circ$ ; е, ф –  $-5^\circ$ ; г, х – 0 (ending of the Fig. is on p. 106)

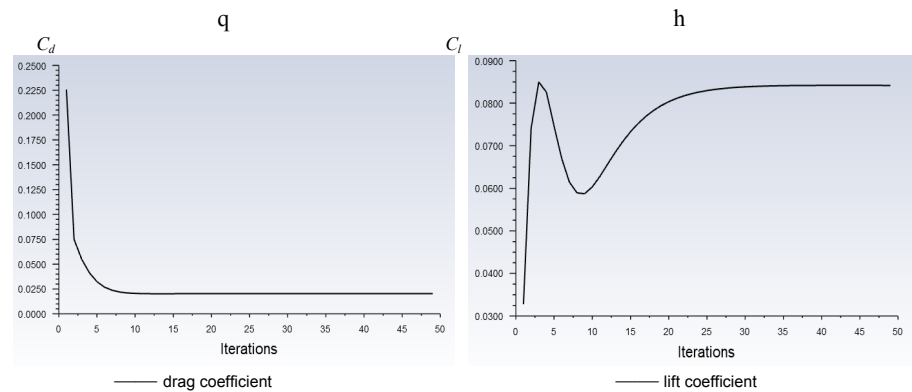


Рис. 3. Окончание

Fig. 3. Ending

Результаты моделирования зависимости давления на аэродинамический профиль DU-06-W-200 изменчивой скорости потока при углах атаки, равных  $-15^\circ$ ,  $-10^\circ$ ,  $-5^\circ$ ,  $0$ , представлены на рис. 4.

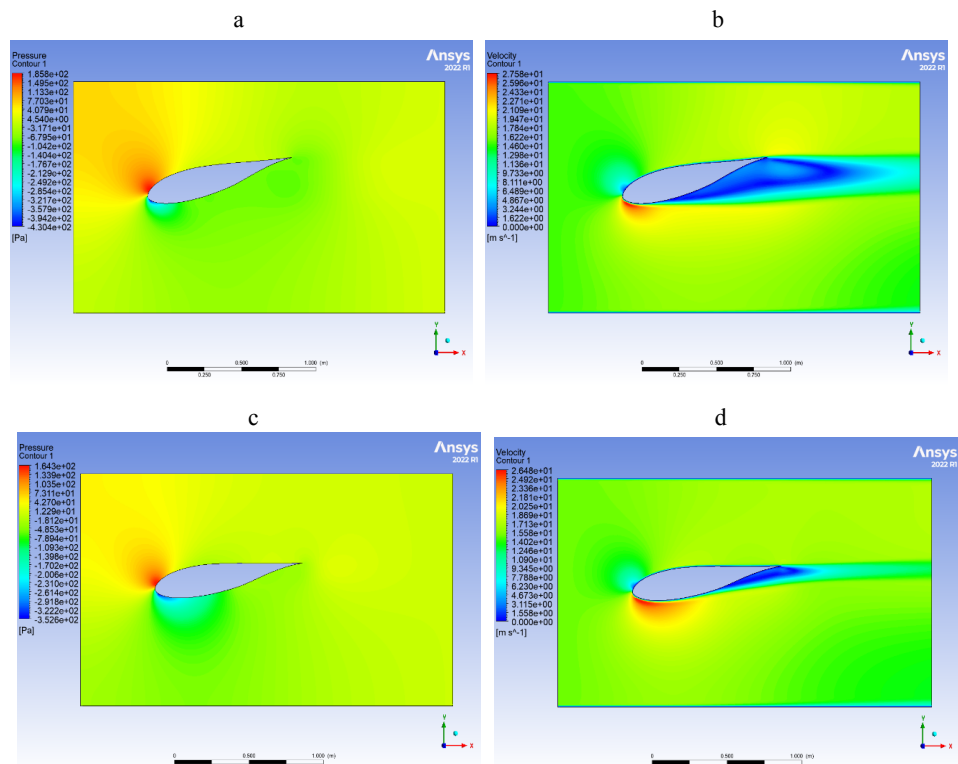


Рис. 4. Результаты зависимости давления от изменчивой скорости потока на аэродинамический профиль DU-06-W-200 при углах атаки, равных  $-15^\circ$ ,  $-10^\circ$ ,  $-5^\circ$ ,  $0$ :  
а, б –  $\alpha = -15^\circ$ ; в, д –  $-10^\circ$ ; е, ф –  $-5^\circ$ ; г, h –  $0$  (окончание рис. на с. 107)

Fig. 4. Results of pressure dependence versus variable flow rate on the DU-06-W-200 airfoil at angles of attack equal to  $-15^\circ$ ,  $-10^\circ$ ,  $-5^\circ$ ,  $0$ : а, б –  $\alpha = -15^\circ$ ; в, д –  $-10^\circ$ ; е, ф –  $-5^\circ$ ; г, h –  $0$  (ending of the Fig. is on p. 107)

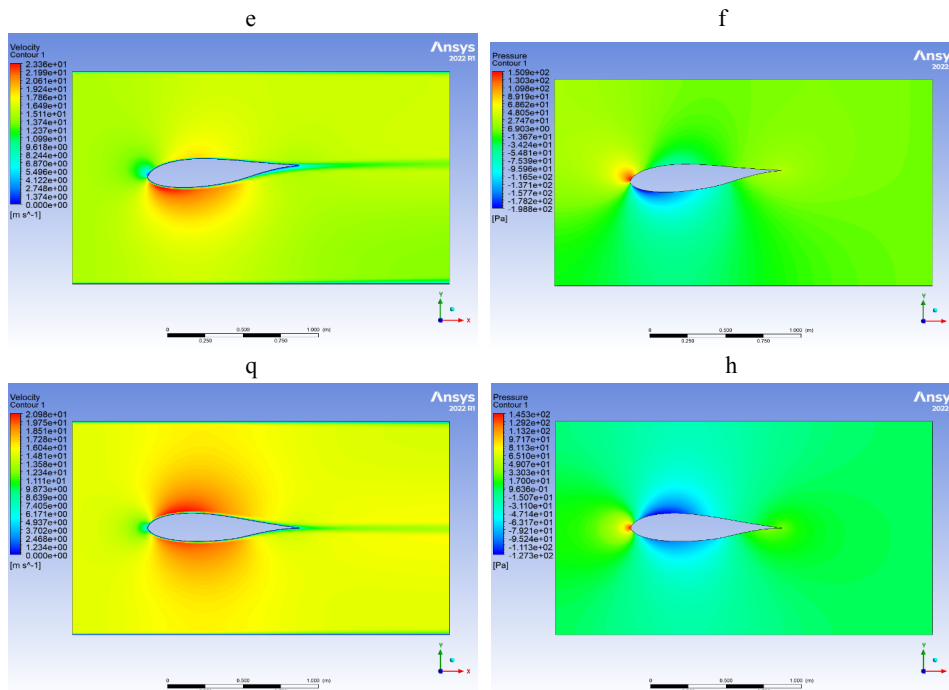


Рис. 4. Окончание

Fig. 4. Ending

На рис. 5 представлены коэффициенты подъемной силы ( $C_l$ ) SST  $k - \omega$  ( $k - \omega$ ) для турбулентной модели, равные: 0,7416, 1,3134, 1,1229,  $k - \epsilon$  ( $k - \epsilon$ ) для модели турбулентности: 0,7394, 1,1215, 1,122, коэффициенты сопротивления ( $C_d$ ) SST  $k - \omega$  ( $k - \omega$ ) для модели турбулентности: 0,0351, 0,0782, 0,1712,  $k - \epsilon$  ( $k - \epsilon$ ) для модели турбулентности: 0,0359, 0,0787, 0,2019, позволяющие определить коэффициенты сопротивления и подъемной силы аэродинамического профиля DU-06-W-200 при углах атаки  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$  соответственно.

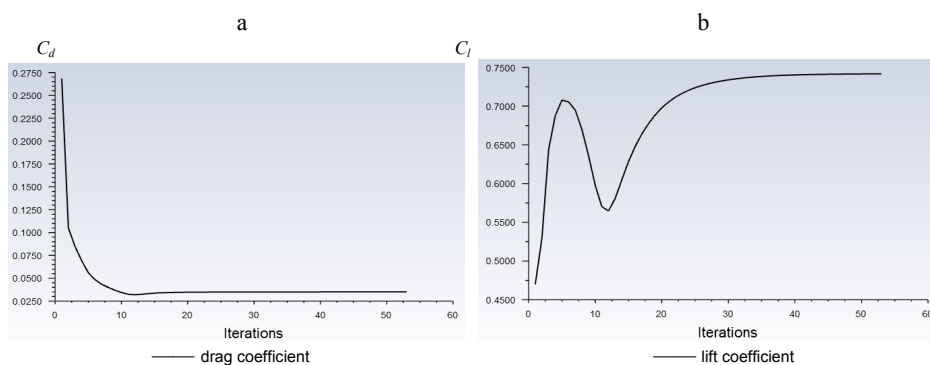


Рис. 5. Результаты определения коэффициентов сопротивления и подъемной силы аэродинамического профиля DU-06-W-200: а, b –  $\alpha = 5^\circ$ ; c, d –  $10^\circ$ ; e, f –  $15^\circ$  (окончание рис. на с. 108)

Fig. 5. Results of determining the drag and lift coefficients of the DU-06-W-200 airfoil: а, b –  $\alpha = 5^\circ$ ; c, d –  $10^\circ$ ; e, f –  $15^\circ$  (ending of the Fig. is on p. 108)

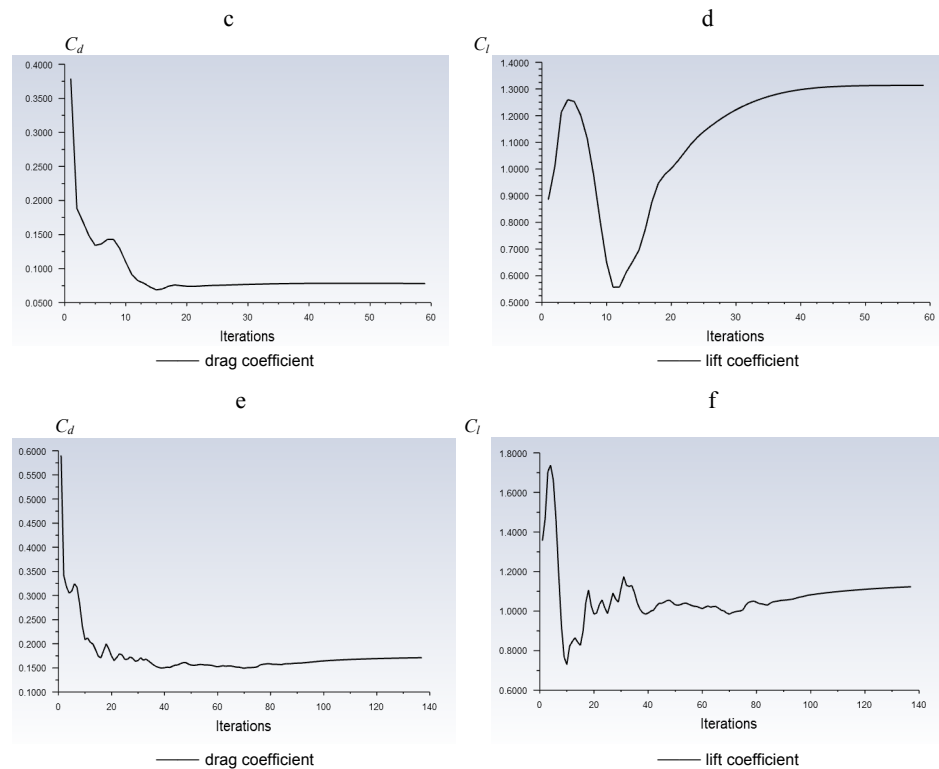


Рис. 5. Окончание

Fig. 5. Ending

Результаты симуляции зависимости давления на аэродинамический профиль DU-06-W-200 от изменчивой скорости потока при углах атаки, равных  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$ , представлены на рис. 6.

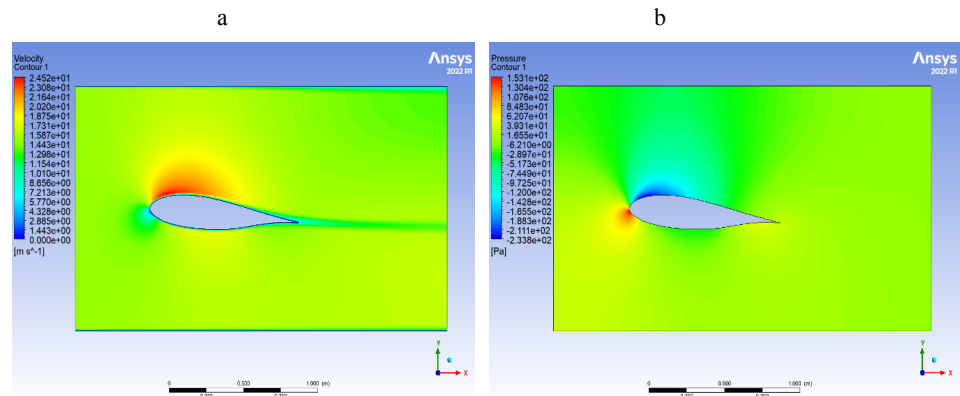


Рис. 6. Результаты симуляции зависимости давления на аэродинамический профиль DU-06-W-200 от изменчивой скорости потока при углах атаки, равных  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$  (окончание рис. на с. 109)

Fig. 6. Results of simulation of pressure dependence on variable flow rate on the DU-06-W-200 airfoil at angles of attack equal to  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$  (ending of the Fig. is on p. 109)

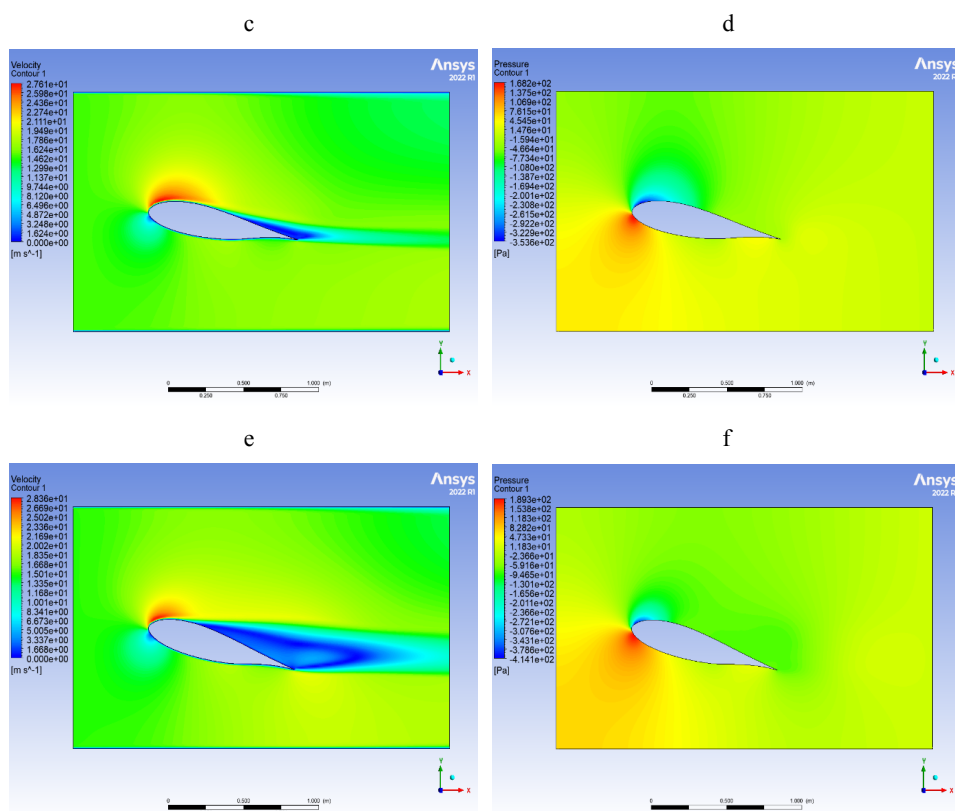


Рис. 6. Окончание  
Fig. 6. Ending

Результаты сравнения коэффициентов сопротивления и подъемной силы модели и экспериментальных [22] в зависимости от изменения угла атаки представлены на рис. 7. Приведены результаты экспериментальных данных и определения коэффициентов сопротивления и подъемной силы при углах атаки, равных  $-15^\circ \dots +15^\circ$ , для SST  $k - \omega$  ( $k - \omega$ ),  $k - \epsilon$  ( $k - \epsilon$ ) турбулентных моделей, полученных в Ansys Fluent, при аэродинамической скорости потока на профиль DU-06-W-200, равной 15 м/с.

На рис. 8 показаны результаты зависимости соотношения коэффициентов сопротивления и подъемной силы от изменения угла атаки. При этом использовались модели турбулентности SST  $k - \omega$  ( $k - \omega$ ),  $k - \epsilon$  ( $k - \epsilon$ ). По результатам исследования установлено, что максимальное значение отношения коэффициентов сопротивления и подъема силы составляет 21 при оптимальном угле наклона атаки, равном  $5^\circ$ .

В табл. 3 приведены результаты оценки соответствия модельных и экспериментальных данных коэффициентов сопротивления и подъемной силы аэродинамического профиля DU-06-W-200. При этом использовались методики критерия соответствия  $\chi^2$ , среднеквадратичной погрешности (RMSE), коэффициента детерминации ( $R^2$ ), средней погрешности смеще-

ния (МВЕ). Исследование показало, что наиболее эффективными оказались моделирование коэффициента подъемной силы ( $C_l$ ) через  $k - \epsilon$  ( $k - \epsilon$ ) и коэффициента сопротивления ( $C_d$ ) через модель SST  $k - \omega$  ( $k - \omega$ ).

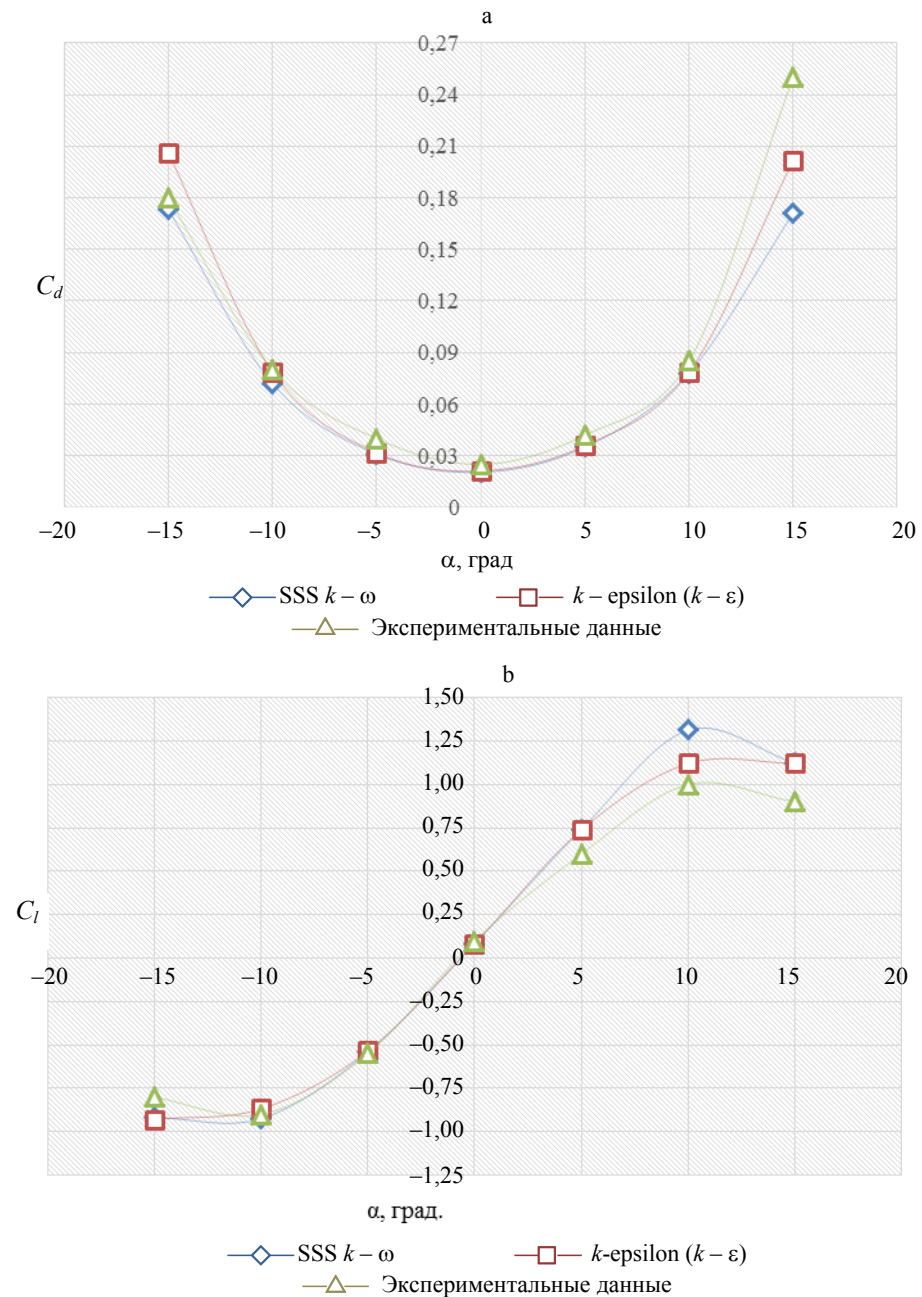


Рис. 7. Результаты сравнения коэффициентов сопротивления (а) и подъемной силы (б) модели и экспериментальных данных в зависимости от изменения угла атаки

Fig. 7. Results of comparison of drag (a) and lift (b) coefficients of the model and experimental data from changing the angle of attack



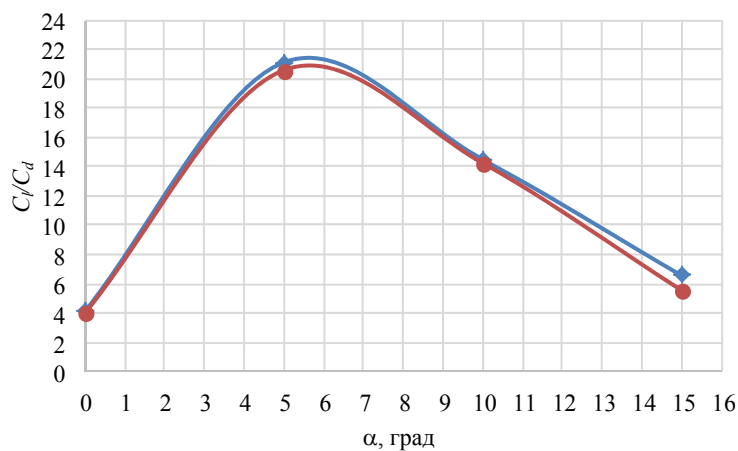


Рис. 8. Кривые зависимости соотношения коэффициентов сопротивления и подъема силы от изменения угла атаки

Fig. 8. Curves of the relationship between the coefficients of drag and lifting force on changes in the angle of attack

Таблица 3

Результаты оценки соответствия результатов эксперимента и модели  
Results of assessing the correspondence between the experimental results and the model

| Вид модели                                  | Коэффициент | $\chi^2$ | RMSE   | $R^2$  | MBE      |
|---------------------------------------------|-------------|----------|--------|--------|----------|
| Модель SST<br>$k - \omega$ ( $k - \omega$ ) | $C_d$       | 0,0303   | 0,0320 | 0,9328 | 0,00093  |
|                                             | $C_l$       | 0,1714   | 0,1614 | 0,9955 | 0,026079 |
| Модель<br>$k - \epsilon$ ( $k - \epsilon$ ) | $C_d$       | 0,0167   | 0,0213 | 0,9327 | 0,000454 |
|                                             | $C_l$       | 0,0821   | 0,1203 | 0,9942 | 0,014482 |

## ВЫВОДЫ

1. Изучена зависимость материала и формы лопастей турбины, позволяющей повышать надежность и эффективность ветроэнергетической установки с вертикальной осью вращения при изменчивых потоках ветра, а также ее аэродинамики. На основании анализа установлено, что использование модели CFD системы ANSYS Fluent при разработке оптимальных размеров лопастей ветротурбины дает положительный эффект.

2. Аэродинамический профиль DU-06-W-200 был смоделирован с углами атаки в промежутке от  $-15^\circ$  до  $+15^\circ$ , граничными условиями и скоростью потока входных данных 15 м/с, рабочей температурой  $23^\circ\text{C}$ , рабочим давлением  $1 \cdot 10^5$  Па, плотностью воздушного потока  $1,23 \text{ кг/м}^3$ , длина хорды аэродинамического профиля 1 м, динамическая вязкость воздушного потока  $1,7894 \cdot 10^{-5} \text{ кг/(м}\cdot\text{с)}$ , типы турбулентных моделей SST  $k - \omega$  ( $k - \omega$ ),  $k - \epsilon$  ( $k - \epsilon$ ), число Рейнольдса  $1,05 \cdot 10^6$ .

3. Установлено, что коэффициенты сопротивления ( $C_d$ ) SST  $k - \omega$  ( $k - \omega$ ) для модели турбулентности: 0,1734, 0,0721, 0,0311, 0,0204,

0,0351, 0,0782, 0,1712,  $k - \epsilon$  для модели турбулентности: 0,2065, 0,0789, 0,0318, 0,0212, 0,0359, 0,0787, 0,2019, коэффициенты подъемной силы ( $C_l$ ) SST  $k - \omega$  ( $k - \omega$ ) для модели турбулентности:  $-0,9169$ ,  $-0,9169$ ,  $-0,9239$ ,  $-0,5394$ , 0,0842, 0,7416, 1,3134, 1,1229,  $k - \epsilon$  для турбулентной модели:  $-0,9278$ ,  $-0,8674$ ,  $-0,5336$ , 0,0848, 0,0359, 0,0787, 0,2019 при углах атаки аэродинамического профиля DU-06-W-200, равных  $-15^\circ$ ,  $-10^\circ$ ,  $-5^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$  соответственно.

4. При оценке совместимости модели и результатов экспериментов аэродинамического профиля DU-06-W-200 были использованы: критерий соответствия  $\chi^2$ , среднеквадратичная погрешность (RMSE), коэффициент детерминации ( $R^2$ ), средняя погрешность смещения (MBE). По результатам исследования установлено, что наиболее эффективными оказались моделирование коэффициента подъемной силы ( $C_l$ ) через  $k - \epsilon$  ( $k - \epsilon$ ) и коэффициента сопротивления ( $C_d$ ) через модель SST  $k - \omega$  ( $k - \omega$ ).

5. Оценка зависимости соотношения коэффициентов сопротивления и подъемной силы от изменения угла атаки осуществлялась с помощью моделей турбулентности SST  $k - \omega$  ( $k - \omega$ ),  $k - \epsilon$  ( $k - \epsilon$ ). По результатам исследования установлено, что максимальное значение отношения коэффициентов сопротивления и подъема силы составляет 21 при оптимальном угле наклона атаки, равном  $5^\circ$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Global Wind Report 2023 [Electronic Resource]. Mode of access: <https://gwec.net/globalwindreport2023/#:~:text=Total%20installed%20global%20capacity%20grew,%2Dyear%20growth%20of%2015%25>.
2. WWEA Half-year Report 2023: Additional Momentum for Windpower in 2023 [Electronic Resource]. Mode of access: <https://wwindea.org/wwea-half-year-report-2023-additional-momentum-for-windpower-in-2023>.
3. О мерах по повышению эффективности реформ, направленных на переход Республики Узбекистан на «зеленую» экономику до 2030 года: постановление Президента Республики Узбекистан, 02 дек. 2022 г., № ПП-436 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://lex.uz/docs/6303233>.
4. Тепловой и материальный баланс гелиопиролизного устройства / Г. Н. Узаков [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 1. С. 57–65. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-57-65>.
5. Design and Modeling of Dynamic modes of Low Speed Electric Generators for Electric Power Generation From Renewable Energy Sources / A. B. Safarov [et al.] // AIP Conference Proceedings. 2022. Vol. 2686, № 1. P. 020013. <https://doi.org/10.1063/5.0111646>.
6. Safarov, A. B. Study of Effective Omni-Directional Vertical Axis Wind Turbine for low Speed Regions / A. B. Safarov, R. A. Mamedov // IIUM Engineering Journal. 2021. Vol. 22, No 2. P. 149–160. <https://doi.org/10.31436/iiumej.v22i2.1565>.
7. Математическое моделирование комбинированной системы теплоснабжения солнечного дома / Г. Н. Узаков [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 5. С. 412–421. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-65-5-412-421>.
8. Assessment of wind and hydropower potential of Bukhara region / N. N. Sadullayev [et al.] // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2020. Vol. 614. P. 012036. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/614/1/012036>.
9. Rashid, F. L. Numerical Study of the Air Flow Over Modified NACA 2412 Airfoil Using CFD / F. L. Rashid, H. S. Abd, E. Q. Hussein // AIP Conference Proceedings. 2022. Vol. 2415, No 1. P. 20005. <https://doi.org/10.1063/5.0092303>.

10. Comparing the Effect of Different Turbulence Models on The CFD Predictions of NACA0018 Airfoil Aerodynamics / S. A. Khan [et al.] // *CFD Letters*. 2020. Vol. 12, Is. 3. P. 1–10. <https://doi.org/10.37934/cfdl.12.3.110>.
11. Steenwijk, B. Numerical Study of Turbulent Flows Over a NACA 0012 Airfoil: Insights Into Its Performance and the Addition of a Slotted Flap / B. Steenwijk, P. Druetta // *Appl. Sci.* 2023. Vol. 13, No 13. P. 7890. <https://doi.org/10.3390/app13137890>.
12. Shelil, N. 2D Numerical Simulation Study of Airfoil Performance [Electronic Resource] / N. Shelil // *Wind Energy Science Discussion [Preprint]*. 2021. Mode of access: <https://wes.copernicus.org/preprints/wes-2021-45/>. <https://doi.org/10.5194/wes-2021-45>.
13. Görgülü, Y. F. CFD Analysis of a Naca 0009 Aerofoil at a Low Reynolds Number / Y. F. Görgülü, M. A. Özgür, R. Köse // *Politeknik Dergisi*. 2021. Vol. 24, No 3. P. 1237–1242. <https://doi.org/10.2339/politeknik.877391>.
14. Kulshreshtha, A. FEM/CFD Analysis of Wings at Different Angle of Attack / A. Kulshreshtha, S. K. Gupta, P. Singhal // *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 26, Part 2. P. 1638–1643. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.342>.
15. CFD Study of Drag and Lift Coefficients of Non-Spherical Particles / A. Ullah [et al.] // *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.10.003>.
16. Shirzadi, M. Improvement of k-epsilon Turbulence Model for CFD Simulation of Atmospheric Boundary Layer Around a High-Rise Building Using Stochastic Optimization and Monte Carlo Sampling Technique / M. Shirzadi, P. A. Mirzaei, M. Naghashadegan // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2017. Vol. 171. P. 366–379. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.10.005>.
17. Wei, H. Assessment of Different Turbulence Models on the Large Scale Internal Heated Water pool Natural Convection Simulation / H. Wei, Y. Chen // *Annals of Nuclear Energy*. 2019. Vol. 131. P. 23–38. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2019.03.018>.
18. Rezaeiha, A. On the accuracy of Turbulence Models for CFD Simulations of Vertical Axis Wind Turbines / A. Rezaeiha, H. Montazeri, B. Blocken // *Energy*. 2019. Vol. 180. P. 838–857. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.053>.
19. Lanzafame, R. Wind Turbine CFD Modeling Using a Correlation-Based Transitional Model / R. Lanzafame, S. Mauro, M. Messina // *Renewable Energy*. 2013. Vol. 52. P. 31–39. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.10.007>.
20. Staudte, R. G. Evidence for Goodness of Fit in Karl Pearson Chi-Squared Statistics / R. G. Staudte // *Statistics*. 2020. Vol. 54, Is. 6. P. 1287–1310. <https://doi.org/10.1080/02331888.2020.1862115>.
21. Chai, T. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE) –Arguments against avoiding RMSE in the literature / T. Chai, R. R. Draxler // *Geoscientific Model Development*. 2014. Vol. 7, No 3. P. 1247–1250. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>.
22. Aerodynamic Performance of VAWT Airfoils: Comparison between Wind Tunnel Testing Using a New Three-Component Strain Gauge Balance and CFD Modelling / L. Santamaria [et al.] // *Energies*. 2022. Vol. 15, Is. 24. P. 9351. <https://doi.org/10.3390/en15249351>.

Поступила 19.12.2023    Подписана в печать 19.02.2023    Опубликовано онлайн 29.03.2024

## REFERENCES

1. *Wind Report 2023*. Available at: <https://gwec.net/globalwindreport2023/#:~:text=Total%20in stalled%20global%20capacity%20grew,%2Dyear%20growth%20of%2015%25>.
2. *WWEA Half-year Report 2023: Additional Momentum for Windpower in 2023*. Available at: <https://wwindea.org/wwea-half-year-report-2023-additional-momentum-for-windpower-in-2023>.
3. *Resolution of the President of the Republic of Uzbekistan “On Measures to Improve the Effectiveness of Reforms Aimed at the Transition of the Republic of Uzbekistan to a “Green” Economy by 2030, dated December 2, 2022, No RP-436*. <https://lex.uz/docs/6303233> (in Russian).
4. Uzakov G. N., Novik A. V., Davlonov X. A., Almardanov X. A., Chuliev S. E. (2023) Heat and Material Balance of Heliopyrolysis Device. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (1), 57–65. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-57-65> (in Russian).

5. Safarov A. B., Davlonov H. A., Mamedov R. A., Charieva M., Kodirov D. (2022) Design and Modeling of Dynamic Modes of Low Speed Electric Generators for Electric Power Generation from Renewable Energy Sources. *AIP Conference Proceedings*, 2686 (1), 020013. <https://doi.org/10.1063/5.0111646>.
6. Safarov A. B., Mamedov R. A. (2021) Study of Effective Omni-Directional Vertical Axis Wind turbine for Low Speed Regions. *IJUM Engineering Journal*, 22 (2), 149–160. <https://doi.org/10.31436/ijumej.v22i2.1565>.
7. Uzakov G. N., Charvinski V. L., Ibragimov U. Kh., Khamraev S. I., Kamolov B. I. (2022) Mathematical Modeling of the Combined Heat Supply System of a Solar House. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (5), 412–421. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-65-5-412-421> (in Russian).
8. Sadullayev N. N., Safarov A. B., Mamedov R. A., Kodirov D. (2020) Assessment of Wind and Hydropower Potential of Bukhara Region. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 614, 012036. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/614/1/012036>.
9. Rashid F. L., Abd H. S., Hussein E. Q. (2022) Numerical Study of the Air Flow over Modified NACA 2412 Airfoil Using CFD. *AIP Conference Proceedings*, 2415 (1), 020005. <https://doi.org/10.1063/5.0092303>.
10. Khan S. A., Bashir M., Baig M. A. A., Ali F. A. G. M. (2020) Comparing the Effect of Different Turbulence Models on The CFD Predictions of NACA0018 Airfoil Aerodynamics. *CFD Letters*, 12 (3), 1–10. <https://doi.org/10.37934/cfdl.12.3.110>.
11. Steenwijk B., Druetta P. (2023) Numerical Study of Turbulent Flows over a NACA 0012 Airfoil: Insights into Its Performance and the Addition of a Slotted Flap. *Applied Sciences*, 13 (13), 7890. <https://doi.org/10.3390/app13137890>.
12. Shelil N. (2021) 2D Numerical Simulation Study of Airfoil Performance. *Wind Energy Science Discussion* [Preprint]. Available at: <https://wes.copernicus.org/preprints/wes-2021-45/>. <https://doi.org/10.5194/wes-2021-45>.
13. Görgülü Y. F., Özgür M. A., Köse R. (2021) CFD Analysis of a Naca 0009 Aerofoil at a Low Reynolds Number. *Politeknik Dergisi*, 24 (3), P. 1237–1242. <https://doi.org/10.2339/politeknik.877391>.
14. Kulshreshtha A., Gupta S. K., Singhal P. (2020) FEM/CFD Analysis of Wings at Different Angle of Attack. *Materials Today: Proceedings*, 26 (2), 1638–1643. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.342>.
15. Ullah A., Zaman M. B., Bhatti M. A., Qasim D., Hamid A., Xiong Q., Khan A. (2021) CFD Study of Drag and Lift Coefficients of Non-Spherical Particles. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences* [in press]. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.10.003>.
16. Shirzadi M., Mirzaei P. A., Naghashzadegan M. (2017) Improvement of k-epsilon Turbulence Model for CFD Simulation of Atmospheric Boundary Layer Around a High-Rise Building Using Stochastic Optimization and Monte Carlo Sampling Technique. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 171, 366–379. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.10.005>.
17. Wei H., Chen Y. (2019) Assessment of Different Turbulence Models on the Large Scale Internal Heated Water Pool Natural Convection Simulation. *Annals of Nuclear Energy*, 131, 23–38. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2019.03.018>.
18. Rezaeiha A., Montazeri H., Blocken B. (2019) On the Accuracy of Turbulence Models for CFD Simulations of Vertical Axis Wind Turbines. *Energy*, 180, 838–857. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.053>.
19. Lanzafame R., Mauro S., Messina M. (2013) Wind Turbine CFD Modeling Using a Correlation-Based Transitional Model. *Renewable Energy*, 52, 31–39. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.10.007>.
20. Staudte R. G. (2020) Evidence for Goodness of Fit in Karl Pearson Chi-Squared Statistics. *Statistics*, 54 (6), 1287–1310. <https://doi.org/10.1080/02331888.2020.1862115>.
21. Chai T., Draxler R. R. (2014) Root Mean Square Error (RMSE) or Mean Absolute Error (MAE) – Arguments Against Avoiding RMSE in the Literature. *Geoscientific Model Development*, 7 (3), 1247–1250. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>.
22. Santamaria L., Vega M. G., Pandal A., Pérez J. G., Velarde-Suárez S., Oro J. M. (2022) Aerodynamic Performance of VAWT Airfoils: Comparison between Wind Tunnel Testing Using a New Three-Component Strain Gauge Balance and CFD Modelling. *Energies*, 15 (24), 9351. <https://doi.org/10.3390/en15249351>.

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-115-124>

УДК 621.316.925

## Использование аварийных составляющих в качестве входных информационных сигналов микропроцессорных защит

И. В. Новаш<sup>1)</sup>, В. Ю. Румянцев<sup>1)</sup>, Е. А. Дерюгина<sup>1)</sup>, Е. В. Булойчик<sup>1)</sup>,  
М. С. Конохов<sup>1)</sup>

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

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

**Реферат.** Предложена методика формирования аварийных составляющих тока и напряжения линии электропередачи методом вычислительного эксперимента в системе динамического моделирования (СДМ) MATLAB-Simulink с целью использования их в качестве входных информационных сигналов дополнительных ступеней микропроцессорных защит с повышенной чувствительностью. Аварийные составляющие тока и напряжения определяются с использованием ортогональных составляющих. Аварийную составляющую тока короткого замыкания (КЗ) определяют как разность между векторами (синусоидами) основной гармоники тока КЗ и тока предшествующего режима, если действующее значение этой разности превышает некоторую заранее установленную величину. Аналогичным образом определяют и аварийную составляющую напряжения с учетом того, что в аварийном режиме напряжение в месте установки защиты не возрастает, а снижается. Разработан компьютерный программный комплекс (КПК) в СДМ MATLAB-Simulink для исследования функциональных свойств микропроцессорной защиты с использованием аварийных составляющих токов и напряжений фаз линии электропередачи 6(10)–35 кВ. Приведены результаты формирования аварийных составляющих моделями цифровых измерительных органов тока и напряжения защиты, подтверждающие работоспособность разработанного программного комплекса. Разработан КПК для расчета аварийных составляющих токов и напряжений линии электропередачи 6(10)–35 кВ с помощью ортогональных составляющих на основе математической модели узла питания защищаемой линии. Приведены результаты расчетов аварийных составляющих, подтверждающие работоспособность разработанного программного комплекса, и проведено сопоставление результатов расчета аварийных составляющих, получаемых моделированием в СДМ MATLAB-Simulink и с помощью КПК на основе математической модели.

**Ключевые слова:** микропроцессорная защита, органы измерения тока и напряжения, ортогональные составляющие, цифровые фильтры, аварийные составляющие, дискретное преобразование Фурье, MATLAB, Simulink

**Для цитирования:** Использование аварийных составляющих в качестве входных информационных сигналов микропроцессорных защит / И. В. Новаш [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 2. С. 115–124. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-115-124>

---

### Адрес для переписки

Новаш Иван Владимирович  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65/2,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 326-89-51  
[novashiv@tut.by](mailto:novashiv@tut.by)

### Address for correspondence

Novash I. V.  
Belarusian National Technical University  
65/2, Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 326-89-51  
[novashiv@tut.by](mailto:novashiv@tut.by)

---

## The Use of Emergency Components as Input Information Signals for Microprocessor Protection

I. V. Novash<sup>1)</sup>, V. Yu. Rumiantsev<sup>1)</sup>, A. A. Dziaruhina<sup>1)</sup>, E. V. Bulovichik<sup>1)</sup>,  
M. S. Konakhau<sup>1)</sup>

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

**Abstract.** A technique is proposed for the formation of emergency components of current and voltage of a power transmission line by a computational experiment in the MATLAB-Simulink dynamic simulating system (DSS) in order to use them as input information signals of additional stages of microprocessor protections with increased sensitivity. The emergency components of current and voltage are determined using orthogonal components. The emergency component of the short-circuit current is defined as the difference between the vectors (sinusoids) of the main harmonic of the short-circuit current and the current of the previous mode, if the effective value of this difference exceeds some predetermined value. Similarly, the emergency component of the voltage is determined, taking into account the fact that in emergency mode, the voltage at the place of installation of protection does not increase, but decreases. A computer software package (CSP) has been developed in the MATLAB-Simulink DSS to study the functional properties of microprocessor protection using emergency components of currents and phase voltages of a power transmission line of 6(10)–35 kV. The results of the formation of emergency components by models of digital measuring bodies of current and voltage protection are presented, confirming the operability of the developed software package. A CSP has been developed for calculating emergency components of currents and voltages of a power transmission line of 6(10)–35 kV using orthogonal components based on a mathematical model of the power supply unit of the protected line. The results of calculations of emergency components are presented, confirming the operability of the developed software package; a comparison of the results of calculating emergency components obtained by modeling in the MATLAB-Simulink DSS and using a CSP based on a mathematical model is also carried out.

**Keywords:** microprocessor protection, current and voltage measuring devices, orthogonal components, digital filters, emergency components, discrete Fourier transform, MATLAB, Simulink

**For citation:** Novash I. V., Rumiantsev Yu. V., Dziaruhina A. A., Bulovichik E. V., Konakhau M. S. (2024) The Use of Emergency Components as Input Information Signals for Microprocessor Protection. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (2), 115–124. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-115-124> (in Russian)

### Введение

В настоящее время повсеместно в распределительных сетях 6(10)–35 кВ применяются микропроцессорные токовые защиты (МПТЗ) [1]. В новых разрабатываемых МПТЗ также сохраняется ступенчатый (канальный) принцип с 2–3 ступенями выдержки времени. Первые 1–2 ступени типовых защит – быстродействующие, в большинстве разработок – токовая отсечка мгновенного действия и токовая отсечка с небольшой выдержкой времени (0,3–0,5 с). Последняя ступень с относительно большой выдержкой времени – защита, отстроенная от нормальных рабочих режимов, – может быть максимальной токовой защитой с изменяющейся уставкой.

Одно из возможных направлений повышения чувствительности защит распределительных сетей 6(10)–35 кВ – введение дополнительных ступеней повышенной чувствительности [2]. Повышение чувствительности защиты осуществляется переходом к другому типу, по своему принципу исполнения обладающему более высокой чувствительностью.

Дополнительные ступени могут выполняться в виде токовой защиты, реагирующей на аварийные составляющие тока. При использовании дополнительной ступени в виде дистанционной защиты (ДЗ) она может реагировать на аварийные составляющие тока и напряжения, на аварийные составляющие входных сопротивлений защищаемой линии.

Токовая защита, реагирующая на аварийные составляющие токов фаз, представляется наиболее пригодной для указанных целей вследствие отсутствия необходимости использования цепей напряжения, возможности использования той же входной информации, что и для основных ступеней защиты.

### **Основная часть.**

#### **Аварийные составляющие**

Аварийная составляющая входного сигнала – это составляющая сигнала в месте установки защиты, обусловленная наличием короткого замыкания (КЗ) в цепи защищаемого объекта. Аварийная составляющая тока – доля тока в цепи защищаемого объекта, по величине равная току в ветви КЗ. Аварийная составляющая напряжения – доля напряжения в месте установки защиты, обусловленная падением напряжения от протекания тока КЗ в элементах цепи от места КЗ до места установки защиты.

Можно отметить положительные свойства аварийных составляющих:

- они связаны только с КЗ и отсутствуют в нагрузочных режимах;
- появляются при всех режимах КЗ, в том числе симметричных.

Входные сигналы РЗ – токи и напряжения, подводимые к измерительным органам, в общем случае несинусоидальные из-за наличия апериодической составляющей и высших гармоник. В этом случае расчетными интегральными параметрами являются действующие значения и фазы основной гармоники входных сигналов.

Для определения информационных параметров контролируемых величин, в том числе и аварийных составляющих, в устройствах РЗ широко используются ортогональные составляющие (ОС) входных токов и напряжений. Формирование ОС указанных сигналов основывается на применении дискретного преобразования Фурье (ДПФ) [3–5].

Аварийную составляющую тока КЗ  $i_{ав}$  определяют как разность между векторами (синусоидами) основной гармоники тока КЗ  $i_k$  и тока предшествующего режима  $i_{пр}$ . Аналогичным образом определяют и аварийную

составляющую напряжения с учетом того, что в аварийном режиме напряжение в месте установки защиты не возрастает, а снижается.

Разность между двумя синусоидальными сигналами тока  $i_k$ ,  $i_{пр}$  одной и той же частоты, но с другой амплитудой и фазой может быть представлена:

$$\begin{aligned} i_{m\text{ ав}} &= I_{m\text{ к}} \sin(\omega t + \psi_{\text{к}}) - I_{m\text{ пр}} \sin(\omega t + \psi_{\text{пр}}) = \\ &= (I_{sn\text{ к}} - I_{sn\text{ пр}}) \cos(\omega t) + (I_{cs\text{ к}} - I_{cs\text{ пр}}) \sin(\omega t) = I_{m\text{ ав}} \sin(\omega t + \psi_{\text{ав}}), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $I_{sn\text{ к}}$ ,  $I_{cs\text{ к}}$  – ортогональные составляющие основной гармоники сигнала режима КЗ;  $I_{sn\text{ пр}}$ ,  $I_{cs\text{ пр}}$  – то же основной гармоники сигнала предшествующего режима.

Действующее значение и фаза основной гармоники аварийной составляющей сигнала тока также может быть определена через ортогональные составляющие:

$$\begin{aligned} I_{\text{ав}} &= I_{m\text{ ав}} / \sqrt{2}, \text{ где } I_{m\text{ ав}} = \sqrt{(I_{sn\text{ ав}} - I_{sn\text{ пр}})^2 + (I_{cs\text{ ав}} - I_{cs\text{ пр}})^2}; \\ \psi_{\text{ав}} &= \arcsin\left(\frac{I_{sn\text{ к}} - I_{sn\text{ пр}}}{I_{m\text{ ав}}}\right) \text{ при } I_{cs\text{ к}} - I_{cs\text{ пр}} > 0; \\ \psi_{\text{ав}} &= \pi - \arcsin\left(\frac{I_{sn\text{ к}} - I_{sn\text{ пр}}}{I_{m\text{ ав}}}\right) \text{ при } I_{cs\text{ к}} - I_{cs\text{ пр}} < 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Для формирования аварийных составляющих тока и напряжения линии электропередачи разработана структурная модель узла питания линии [6] в СДМ MATLAB-Simulink [7, 8].

### Модель узла питания линии электропередачи

Структурная модель узла питания линии в СДМ MATLAB-Simulink для формирования аварийных составляющих тока и напряжения приведена на рис. 1, где S1 – питающая система; CT1 – трехфазная группа трансформаторов тока [9, 10], сигнал вторичного тока фазы A, от которой подается на вход подсистемы, моделирующей измерительный орган тока МПТЗ DIGITAL EC.

Аварийная составляющая тока формируется в подсистеме DIGITAL EC с использованием блоков, моделирующих функции цифровых фильтров и формирователей ОС для получения аварийной составляющей. Аварийная составляющая напряжения фазы A формируется в подсистеме DIGITAL EC1 по тем же принципам, что и аварийная составляющая тока, с использованием сигнала напряжения фазы A, подаваемого на вход подсистемы от трехфазной группы трансформаторов тока CT1.



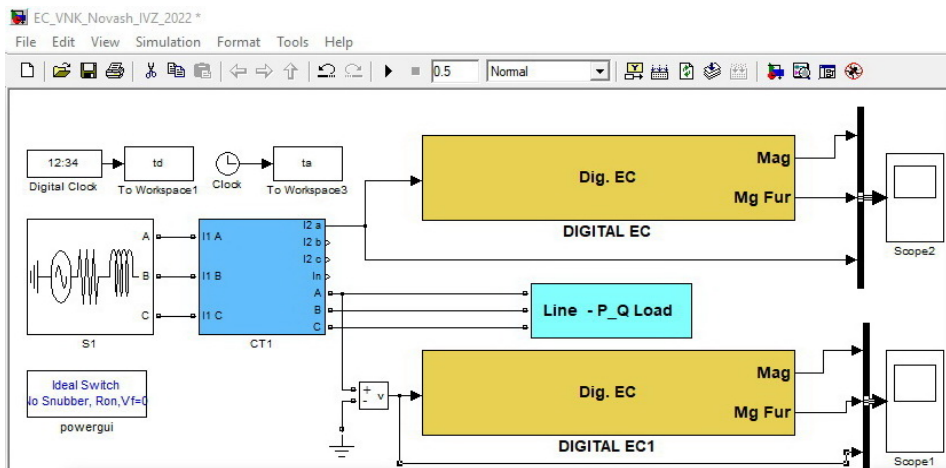


Рис. 1. Структура модели узла питания защищаемой линии

Fig. 1. The structure of the model of the power supply unit of the protected line

### Формирование аварийных составляющих тока и напряжения

На рис. 2 представлена структура подсистем DIGITAL EC и DIGITAL EC1, в которых происходит формирование аварийных составляющих. Основу указанных подсистем (рис. 1) составляют блоки, в которых формируются ОС токов (напряжений) в режиме нагрузки (блок Delay signal) и при КЗ (блок Discrete Furier KZ).

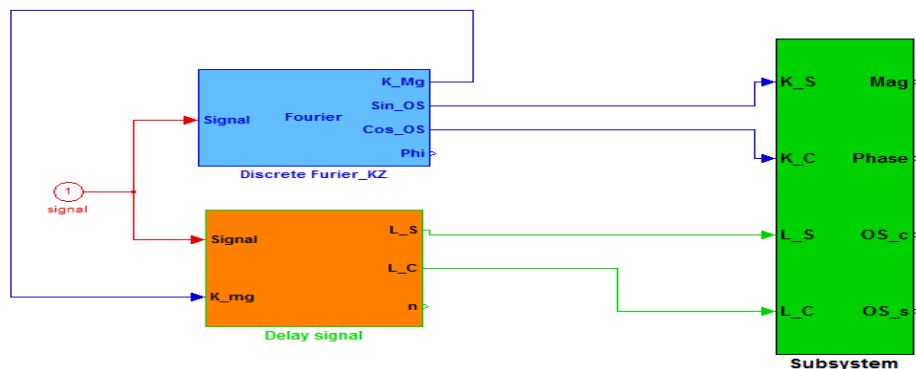


Рис. 2. Структура подсистем DIGITAL EC и DIGITAL EC1, моделирующих измерительные органы формирования аварийных составляющих тока и напряжения

Fig. 2. The structure of DIGITAL EC and DIGITAL EC 1 subsystems, which simulate measuring bodies for the formation of emergency components of current and voltage

В блоке Discrete Furier\_KZ (рис. 2) выполняется моделирование контролируемого тока (напряжения) фазы *A* защищаемой линии в аварийном режиме на основе ОС для дискретного сигнала контролируемого тока (напряжения) линии фазы *A*. Расчет амплитуды контролируемого тока фазы *A* производится на основе теории ортогональных составляющих с применением ДПФ [1, 3].

Моменты возникновения аварийного режима КЗ и отключения КЗ, после которого восстанавливается рабочий послеаварийный режим, определяются с помощью функционального блока контроля возникновения аварийного режима, который входит в состав структур подсистем формирования аварийных составляющих и интегрируется в блок Delay signal. Структура блока Delay signal представлена на рис. 3.

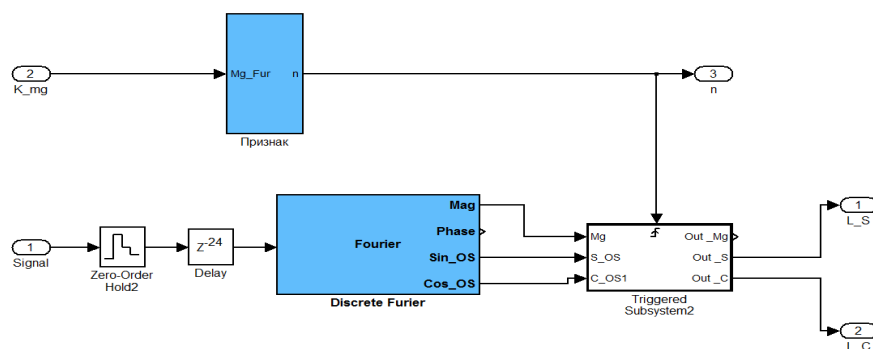


Рис. 3. Структура блока Delay signal

Fig. 3. The structure of Delay signal box

Методика определения момента возникновения КЗ и его отключения состоит в следующем [6]. Через заданные промежутки времени обычно кратные нескольким отсчетам (один отсчет принимается равным  $\frac{0,02}{24}$  с), в блоке «Признак» вычисляется отношение:

$$\Delta = \frac{I_n}{I_{n-1}}. \quad (3)$$

При равенстве отношений в точках неизменного значения контролируемого тока  $\left( \Delta = \frac{I_2}{I_1} = \frac{I_3}{I_2} = 1 \right)$  сигнал, определяющий момент возникновения КЗ  $t_{\text{КЗ}}$ , не формируется. Таким образом, принимается, что при  $\Delta = 1$  значение контролируемого тока не меняется, и такое состояние контролируемого тока соответствует доаварийному или послеаварийному установившемуся режиму.

Если  $\Delta > 1$ , то это будет являться признаком момента возникновения КЗ.

В этом случае в блоке «Признак» вырабатывается прямоугольный импульсный сигнал  $n$ , который определяет момент возникновения КЗ и подается на вход  $f$  блока Triggered Subsystem2. Этим импульсом запускается процесс запоминания предшествующего установившегося режима. Для формирования сигнала с такой же, как в момент КЗ фазой, контролируемый сигнал сдвигается на период (на 24 отсчета). В блоке Discrete Fourier определяются ОС предшествующего режима  $L_c$ ,  $L_s$ , которые поступают в подсистему Subsystem (рис. 2) совместно с ОС режима КЗ –  $K_c$  и  $K_s$ . На основе указанных ОС в соответствии с выражениями (1) и (2) вычисляются амплитуда и фаза аварийных составляющих тока (напряжения).

На рис. 4 представлены графики сигналов контролируемого тока линии (сигнал 1), амплитуды контролируемого тока линии фазы *A* (сигнал 2), получаемый на основе дискретного преобразования Фурье и аварийной составляющей тока (сигнал 3). На рис. 5 представлены графики сигналов контролируемого напряжения фазы *A* линии (сигнал 1), амплитуды контролируемого напряжения линии фазы *A* (сигнал 2), получаемый на основе дискретного преобразования Фурье и аварийной составляющей напряжения (сигнал 3). Сигналы амплитуд тока и напряжения существуют в течение всего расчетного режима, а сигналы аварийных составляющих тока и напряжения формируются только на интервале времени аварийного режима КЗ.

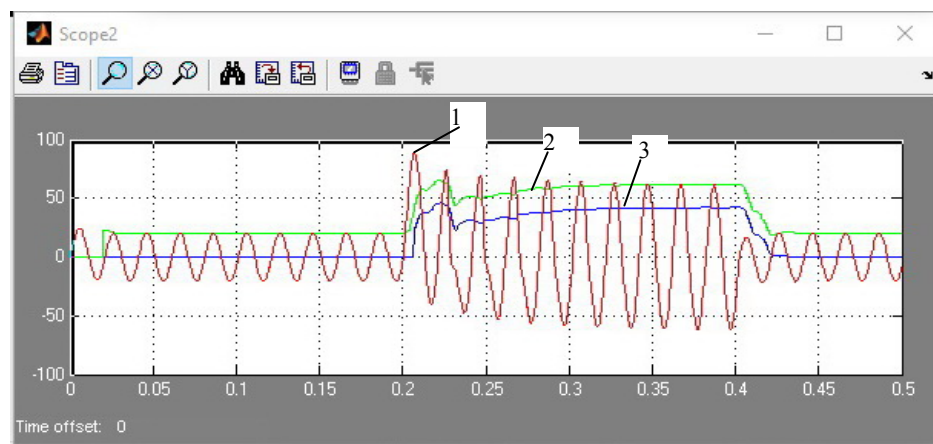


Рис. 4. Сигналы контролируемого тока линии и его аварийная составляющая:

1 – контролируемый токовый сигнал линии фазы *A*; 2 – сигнал амплитуды контролируемого тока линии фазы *A*; 3 – аварийная составляющая тока

Fig. 4. Signals of the controlled line current and its emergency component:

1 – controlled current signal of the phase *A* line; 2 – amplitude signal of the controlled current of the phase *A* line; 3 – emergency current component

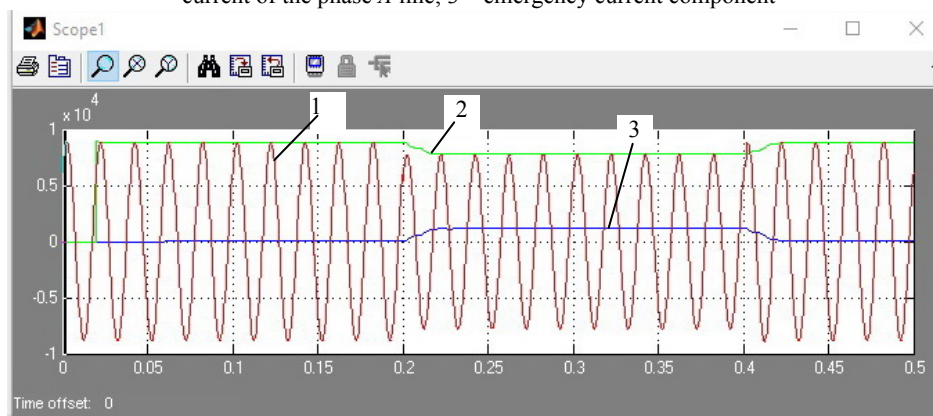


Рис. 5. Сигналы контролируемого напряжения линии и его аварийная составляющая:

1 – контролируемый сигнал напряжения линии фазы *A*; 2 – сигнал амплитуды контролируемого напряжения линии фазы *A*; 3 – аварийная составляющая напряжения

Fig. 5. Signals of the controlled line voltage and its emergency component:

1 – controlled voltage signal of the phase *A* line; 2 – amplitude signal of the controlled voltage of the phase *A* line; 3 – emergency voltage component

### Компьютерный программный комплекс для расчета аварийных составляющих

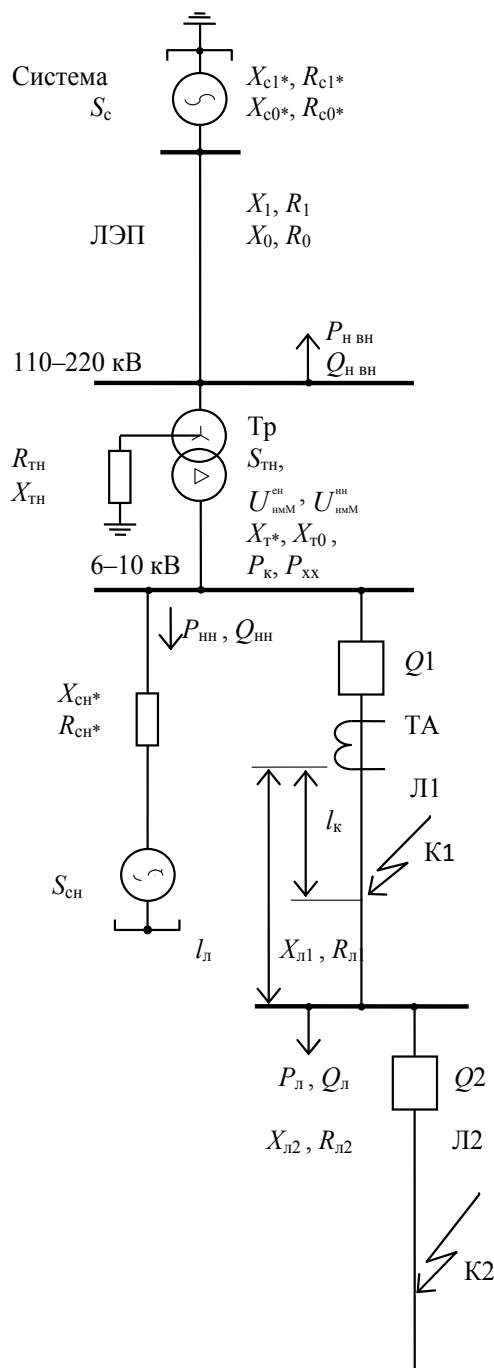


Рис. 6. Однолинейная электрическая схема узла электропитания линии

Fig. 6. Single-line electrical diagram of the power supply unit of the line

Для сопоставления результатов моделирования аварийных составляющих в СДМ MATLAB-Simulink был разработан КПК для расчета аварийных составляющих токов и напряжений линии электропередачи 6(10)–35 кВ с помощью ортогональных составляющих на основе математической модели узла питания защищаемой линии.

КПК последовательно во времени воспроизводит нормальный установившийся режим, предшествующий КЗ, переходный режим внезапного КЗ на линии, режим после отключения КЗ. Исходными данными для расчета являются параметры элементов расчетной схемы рис. 6, параметры режима, предшествующего КЗ, признак вида и места КЗ [6]. Результаты расчета – мгновенные и действующие значения токов в элементах расчетной схемы, напряжений на шинах ВН и НН и аварийных составляющих. Для сохранения результатов расчета используются внешние файлы. Для визуализации результатов расчета использовался математический пакет MathCad [11].

На рис. 7 приведены графики фазных токов линии при двухфазном замыкании фаз *A* и *B*. Графики аварийных составляющих токов линии при двухфазном КЗ на линии фаз *A* и *B* приведены на рис. 8.

Сопоставление результатов моделирования в СДМ MATLAB-Simulink и расчета аварийных составляющих с помощью КПК на основе математической модели узла электропитания линии подтверждают достоверность получаемых результатов.

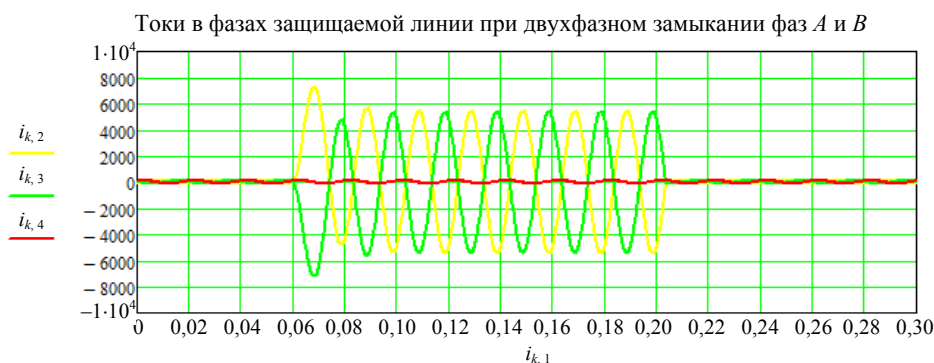


Рис. 7. Графики фазных токов линии при двухфазном замыкании фаз  $A$  и  $B$

Fig. 7. Graphs of the phase currents of the line with two-phase closure of phases  $A$  and  $B$

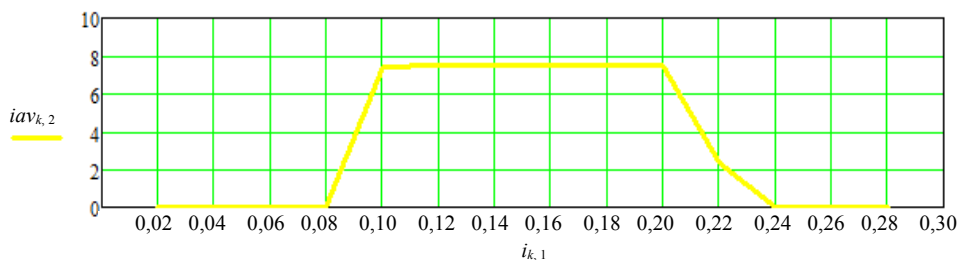


Рис. 8. Аварийная составляющая тока фазы  $A$  защищаемой линии

Fig. 8. Emergency component of phase  $A$  current of the protected line

## ВЫВОДЫ

1. Разработана структурная модель узла питания линии электропередачи совместно с моделями измерительных органов тока и напряжения микропроцессорной защиты, использующей аварийные составляющие тока и напряжения в качестве входных информационных сигналов.
2. Проведены исследования методом вычислительного эксперимента режимов формирования аварийных составляющих при различных КЗ на защищаемой линии.
3. Разработан КПК для расчета аварийных составляющих тока и напряжения линии электропередачи на основе математической модели узла питания защищаемой линии.
4. Сопоставление результатов моделирования в СДМ MATLAB-Simulink и расчета аварийных составляющих тока с помощью КПК на основе математической модели узла питания линии электропередачи подтверждает достоверность получаемых результатов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Романюк, Ф. А. Информационное обеспечение микропроцессорных защит электроустановок / Ф. А. Романюк. Минск: УП «Технопринт», 2001. 133 с.
2. Шнеерсон, Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.
3. Реализация цифровых фильтров в микропроцессорных устройствах релейной защиты / Ю. В. Румянцев [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 5. С. 397–417. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-5-397-417>.
4. Методика повышения быстродействия измерительных органов микропроцессорных защит / Ф. А. Романюк [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 5. С. 403–412. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-403-412>.

5. Динамические свойства алгоритма дистанционных измерений в цифровых органах сопротивления / Ф. А. Романюк [и др.] // Наука и техника. 2023. Т. 22, № 5. С. 411–417. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-411-417>.
6. Разработка методик и средств вычислительного эксперимента для исследования новых функциональных свойств микропроцессорных защит: отчет о НИР (заключительный по ГБ 21-06/1) / БНТУ; рук. темы И. В. Новаш. Минск, 2023. 111 с. № ГР 20211675–2023.
7. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. 288 с.
8. SimPowerSystems. User's Guide. Version 5 [Electronic Resource]. The MathWorks, 2011. Mode of access: <https://all-guidesbox.com/manual/545991/matlab-simpowersystems-5-operation-user-s-manual-403.html>.
9. Новаш, И. В. Упрощенная модель трехфазной группы трансформаторов тока в системе динамического моделирования / И. В. Новаш, Ю. В. Румянцев // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ Энергетика. 2015. № 5. С. 23–38.
10. Romanyuk, F. Wye-Connected Current Transformers Simplified Model Validation in MATLAB–Simulink / F. Romanyuk, I. Novash, Y. Rumiantsev, P. Węgierek // Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review). 2015. Vol. 91, No 11. С. 292–295. <https://doi.org/10.15199/48.2015.11.67>.
11. Макаров, Е. Г. Mathcad: учебный курс (+CD) / Е. Г. Макаров. СПб.: Питер, 2009. 384 с.

Поступила 16.11.2023

Подписана к печати 23.01.2024

Опубликована онлайн 29.03.2024

## REFERENCES

1. Romanyuk F. A. (2001) *Information Support for Microprocessor Protection of Electrical Installations*. Minsk, Technoprint Publ. 133 (in Russian).
2. Shneerson E. M. (2007) *Digital Relay Protection*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 549 (in Russian).
3. Rumiantsev Yu. V., Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Novash I. V. (2016) Digital Filters Implementation in Microprocessor-Based Relay Protection. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 59 (5), 397–417. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-5-397-417> (in Russian).
4. Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Novash I. V., Rumiantsev Yu. V. (2019) Technique of Performance Improvement of the Microprocessor-Based Protection Measuring Element. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (5), 403–412. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-403-412> (in Russian).
5. Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Y., Novash I. V., Rumiantsev Y. V. (2023) Dynamic Properties of Remote Sensing Algorithm in Digital Resistance Elements. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 22 (5), 411–417. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-5-411-417> (in Russian).
6. Novash I. V. (2023) *Development of Methods and Means of Computational Experiment for the Study of New Functional Properties of Microprocessor Protections: Research Work Report (the Final One on GB 21-06/1)*. State Registration Number 20211675. Minsk, BNTU. 111 (in Russian).
7. Chernykh I. V. (2011) *Simulation of Electrical Devices in MatLab, SimPowerSystems and Simulink*. Moscow, DMC Press. 288 (in Russian).
8. SimPowerSystems. User's Guide. Version 5. The MathWorks, 2011. Available at: <https://all-guidesbox.com/manual/545991/matlab-simpowersystems-5-operation-user-s-manual-403.html>.
9. Novash I. V., Rumiantsev Yu. V. (2015) A Simplified Model of Three-Phase Bank of Current Transformers in the Dynamic Simulation System. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (5), 23–38 (in Russian).
10. Romanyuk F., Novash I., Rumiantsev Y., Węgierek P. (2015) Wye-Connected Current Transformers Simplified Model Validation in MATLAB–Simulink. *Przegląd Elektrotechniczny*, 91 (11), 292–295. <https://doi.org/10.15199/48.2015.11.67>.
11. Makarov E. G. (2009) *Mathcad: Training Course (+CD)*. St. Petersburg, Peter Publ. 384 (in Russian).

Received: 16 November 2023

Accepted: 23 January 2024

Published online: 29 March 2024

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-125-136>

УДК 621.3.04; 004.94

## Анализ электромагнитных и тепловых процессов асинхронного двигателя с помощью 3D-моделирования

А. Н. Пехота<sup>1)</sup>, В. Н. Галущко<sup>2)</sup>, Б. М. Хрусталеv<sup>1)</sup>, Д. В. Мирош<sup>2)</sup>

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

<sup>2)</sup>Белорусский государственный университет транспорта (Гомель, Республика Беларусь)

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

**Реферат.** Представлены результаты исследований и анализ электромагнитных и тепловых процессов, проходящих в асинхронном двигателе. Представлены сведения о создании модели конструкции вспомогательного асинхронного двигателя с различными параметрами по методике Гольдберга и описан порядок выбора варианта с наилучшими электромеханическими характеристиками. Определены основные факторы, оказывающие влияние на методы расчета с учетом скорости старения, температуры и распределения температурного поля, а также срока службы изоляции. Исследования позволили разработать и применить 3D-модели электромагнитных процессов с использованием специальных программ, в интерактивном режиме без описания сложных векторных уравнений теории поля, используя при этом происходящие тепловые процессы. Определено совокупное влияние на срок службы изоляции факторов температуры, влажности при различных воздействиях агрессивных сред. Сравнение характеристик реального, модельного и рассчитанного по стандартной методике АД позволило рассчитать ошибку с учетом поправочного коэффициента относительно данных, применяемых в расчетных методах оценки, и использовать данное значение в новых методиках расчета и моделирования. Предложенные 3D-модели электромагнитных и тепловых процессов, протекающих в асинхронных двигателях, позволяют: оценить эффективность электрической машины; усовершенствовать конструкцию с учетом критериев пропускной способности электротехнической стали и температуры обмоток; создать предпосылки для более точных прогнозов при оценке остаточного ресурса изоляции на основе температурных полей.

**Ключевые слова:** асинхронный электродвигатель, электромагнитные процессы, тепловые процессы, 3D-модели электромагнитных процессов, векторные уравнения теории поля, срок службы электроизоляции, скорость старения изоляции

**Для цитирования:** Анализ электромагнитных и тепловых процессов асинхронного двигателя с помощью 3D-моделирования / А. Н. Пехота [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 67, № 2. С. 125–136. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-67-2-125-136>

## Analysis of Electromagnetic and Thermal Processes of an Induction Motor Using 3D Modeling

A. N. Pekhota<sup>1)</sup>, V. N. Galushko<sup>2)</sup>, B. M. Khrustalev<sup>1)</sup>, D. V. Mirosh<sup>2)</sup>

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

<sup>2)</sup>Belarusian State University of Transport (Gomel, Republic of Belarus)

**Abstract.** The results of research and analysis of electromagnetic and thermal processes taking place in an induction motor are presented. Information is presented on the creation of a design

---

### Адрес для переписки

Пехота Александр Николаевич  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 293-93-52  
[tg\\_v\\_fes@bntu.by](mailto:tg_v_fes@bntu.by)

### Address for correspondence

Pekhota Aleksandr N.  
Belarusian National Technical University  
65/2, Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 293-93-52  
[tg\\_v\\_fes@bntu.by](mailto:tg_v_fes@bntu.by)

---

model of an auxiliary induction motor with various parameters according to the Goldberg method and the procedure for selecting the option with the best electromechanical characteristics is described. The main factors influencing the calculation methods, taking into account the aging rate, temperature and distribution of the temperature field, are determined, as well as the service life of the insulation. The research has made it possible to develop and apply 3D models of electromagnetic processes using special programs, interactively without describing complex vector equations of field theory, while using the ongoing thermal processes. The cumulative effect of temperature and humidity factors on the insulation service life under various influences of aggressive media has been determined as well. A comparison of the characteristics of the real induction motor (IM), the model IM and the one calculated according to the standard methodology made it possible to calculate the error taking into account the correction factor relative to the data used in the calculation methods of assessment, and to use this value in new calculation and modeling methods. The proposed 3D models of electromagnetic and thermal processes taking place in asynchronous motors make it possible to evaluate the efficiency of an electric machine; improve the design taking into account the criteria of electrical steel throughput and winding temperature; they also create prerequisites for more accurate forecasts when assessing the insulation residual life based on temperature fields.

**Keywords:** induction electric motor, electromagnetic processes, thermal processes, 3D models of electromagnetic processes, vector equations of field theory, service life of electrical insulation, calculation of insulation aging rate

**For citation:** Pekhota A. N., Galushko V. N., Khurstalev B. M., Mirosh D. V. (2024) Analysis of Electromagnetic and Thermal Processes of an Induction Motor Using 3D Modeling. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (2), 125–136. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-125-136> (in Russian)

## Введение

Более половины мирового энергопотребления в промышленности и энергетике потребляется с применением асинхронных двигателей (АД), что имеет значимый фактор, так как это электрооборудование является наиболее массовой продукцией электромашиностроения.

Диагностика технического состояния двигателей, работающих в качестве ответственных приводов, является важной задачей, авария которых может вызвать задержку целого технологического процесса. Проблема обеспечения высокого уровня надежности при работе электродвигателей ежегодно становится все более актуальной проблемой, ввиду того что устаревание данного вида оборудования значительно опережает темпы модернизации.

В настоящее время применяется ряд методов диагностирования электрических машин, основными из которых являются электромагнитные, вибрационные, тепловые и амплитудно-частотной токовой диагностики. Зачастую использование традиционных методов диагностирования бывает экономически неоправданным. При этом энерго- и ресурсосбережение – приоритетные направления научных исследований для всех стран, а направление научных исследований, представленное авторами, позволяет добиться существенного повышения технико-экономических показателей за счет повышения надежности электромеханического оборудования, применения новых методов диагностирования асинхронных электродвигателей.



## Основная часть

Коллективом белорусских ученых БНТУ и БелГУТ проведены научно-практические исследования, позволившие разработать и применить 3D-модели электромагнитных процессов, проходящих в асинхронном двигателе марки АЭ-92-402 при помощи *Ansys Maxwell*. Применение данной программы позволило с использованием метода конечных элементов выполнить моделирование.

Асинхронный двигатель АЭ-92-402 был выбран для исследования ввиду своей распространенности. Он характеризуется простой конструкцией, высокой надежностью и сравнительно небольшой стоимостью. Данный тип двигателя нашел применение не только на промышленных предприятиях, но и на Белорусской железной дороге, где, в частности, используется на электровозах ВЛ80 С. Так как данный двигатель больше не производится, его замена на такой же невозможна. В случае выхода из строя его необходимо заменять на более современный аналог, например двигатель АНЭ-225L4УХЛ2.

Согласно статистическим данным, ежегодно из строя выходят в среднем 28 двигателей, из них по причине межвиткового замыкания обмотки статора – 27 %; пробоя обмотки статора – 5 %; перегрева обмотки статора – 2 %. С целью разработки энергоэффективного и надежного отечественного АД были поставлены и реализованы следующие задачи исследования:

1) создана модель вспомогательного асинхронного двигателя АЭ92-402 электровоза. Разработаны конструкции с различными параметрами (число пазов, ширина зубца и т.д.) двигателя по методике Гольдберга и выбран вариант с наилучшими электромеханическими характеристиками. Смоделирован и оптимизирован полученный вариант с помощью 3D-проекта электромагнитных полей;

2) получена картина распределения температурного поля в номинальном режиме работы и на холостом ходу с целью прогнозирования наработки на отказ изоляции обмоток статора по температурному критерию.

Известно достаточно много конечно-элементных пакетов прикладных программ (ППП), в которых расчеты электромагнитных систем доведены до совершенства. В данной статье при выборе программного средства были рассмотрены возможности таких программ, как *Ansis Multiphysics*, *Maxwell*, *COMSOL Multiphysics*, *ELCUT*, *Elmer* и *Code Aster (Salome)* [1, 2].

Весь расчет с помощью этих программ проводится обычно в интерактивном режиме. При этом не нужно писать сложные векторные уравнения теории поля. Программа сама разбивает моделируемое пространство на конечные элементы (треугольники, прямоугольники, тетраэдры, параллелепипеды и пр.). Необходимо только построить модель, ввести свойства материалов и граничные условия, запустить расчет и вывести его результаты в числовом и графическом виде. Весь процесс анализа весьма нагляден,

как правило, он сопровождается графическими построениями на экране компьютера.

При разработке проекта большое значение уделялось возможности 3D-моделирования и широкому набору возможностей, поэтому выбор был сделан в пользу Ansys Electronics Desktop от Ansys. Данное программное обеспечение обладает возможностью расчета электромагнитных процессов, электрических машин и проведения междисциплинарных расчетов [4] и позволяет одновременно исследовать механические, электрические и тепловые 3D-параметры электрической машины.

В качестве аналитического расчета использовался источник [8], дополненный расчетом электромеханических характеристик в программе Mathcad и магнитным расчетом в программе Femm. При проектировании использовались следующие требования к исполнению: по степени защиты от внешних воздействий и по способу охлаждения – закрытое исполнение (IP44) с наружным обдувом от вентилятора, расположенного на валу двигателя (IC0141); общие технические данные основаны на ГОСТ 19523; способ охлаждения – по ГОСТ 20459; способ монтажа – по СТ СЭВ 246; климатические условия и категория размещения – по ГОСТ 15150 и 15543; надежность по ГОСТ 27.002.

При аналитическом расчете также применялось решение дифференциальных уравнений для Т-образной схемы замещения в программе Mathcad:

$$\vec{U}_s = R_s \vec{i}_s + \frac{d}{dt} \vec{\Psi}_s + j\omega_k \vec{\Psi}_s; \quad (1)$$

$$0 = R_r \vec{i}_r + \frac{d}{dt} \vec{\Psi}_r + j(\omega_k - \omega) \vec{\Psi}_s; \quad (2)$$

$$M = 1,5 p J_m (\vec{\Psi}_s \times \vec{i}_s); \quad (3)$$

$$J_\Sigma \frac{d}{dt} \omega = M - M_c, \quad (4)$$

где  $\vec{i}_s, \vec{i}_r, \vec{\Psi}_s, \vec{\Psi}_r, \vec{U}_s$  – мгновенные значения обобщенных пространственных векторов токов, потокосцеплений и напряжений обмоток статора и ротора;  $R_s, R_r$  – активные сопротивления фаз обмоток статора и ротора,  $\omega, \omega_k$  – угловые скорости ротора и координатных осей соответственно;  $M, M_c$  – электромагнитный момент двигателя и момент его сопротивления на валу;  $J_\Sigma$  – суммарный момент инерции;  $p$  – число пар полюсов.

Ниже приведены наиболее важные пункты расчетов АД, а затем моделирования.

Проектирование асинхронных двигателей начинают с определения главных размеров: внутреннего диаметра  $D_1$ , длины сердечника статора  $l_1$  и т. д. (табл. 1–4, рис. 1–4) [5, 6].

Таблица 1

Результаты расчета асинхронных двигателей  
 Calculation results for asynchronous motors

| № пункта         | Условные обозначения                                        | Двигатель № 1 | Двигатель № 2 |
|------------------|-------------------------------------------------------------|---------------|---------------|
| 1                | Изоляция класса нагревостойкости                            | $F$           | $F$           |
| 2                | $h$ , мм                                                    | 200           | 200           |
| 3                | $D_{н1}$ , мм                                               | 359           | 359           |
| 4                | $D_1$ , мм                                                  | 239,12        | 239,12        |
| 5                | $A'_1$ , А/см                                               | 433,2         | 421,8         |
| 6                | $B'_\delta$ , Тл                                            | 0,77          | 0,765         |
| 7                | $l_1$ , мм                                                  | 190           | 194           |
| 8                | $q_1$                                                       | 3             | 3             |
| 9                | $z_1$                                                       | 36            | 38            |
| Сердечник ротора |                                                             |               |               |
| 10               | $z_2$                                                       | 38            | 48            |
| Обмотка статора  |                                                             |               |               |
| 11               | $w_1$                                                       | 108           | 104           |
| 12               | $\Phi$ , Вб                                                 | 0,017         | 0,0175        |
| 13               | $B_\delta$ , Тл                                             | 0,749         | 0,757         |
| 14               | $I_1$ , А                                                   | 51,95         | 59,949        |
| 15               | $A_1$ , А/см                                                | 448,35        | 394,21        |
| 16               | $J_1$ , А/мм <sup>2</sup>                                   | 5,63          | 6,98          |
| 17               | $A_1 J_1$ , А <sup>2</sup> /(см · мм <sup>2</sup> )         | 2524,21       | 2751,58       |
| 18               | $(A_1 J_1)_{доп}$ , А <sup>2</sup> /(см · мм <sup>2</sup> ) | 2730          | 2892,5        |

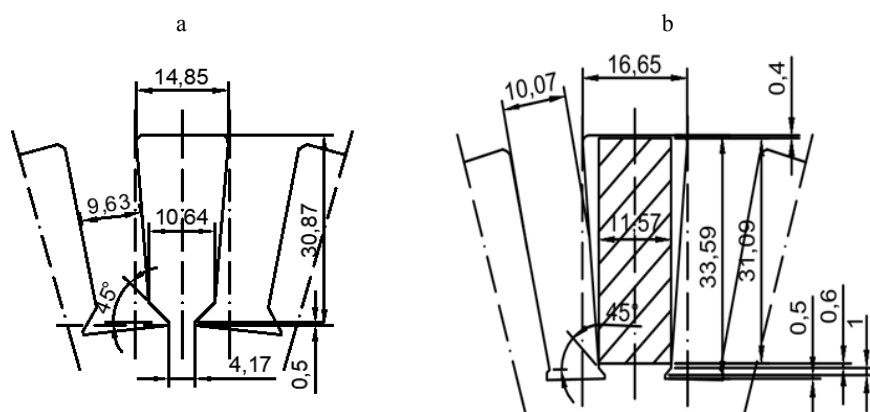


Рис. 1. Вид трапецидального полузакрытого паза статора  
 Fig. 1. Type of trapezoidal semi-closed stator groove

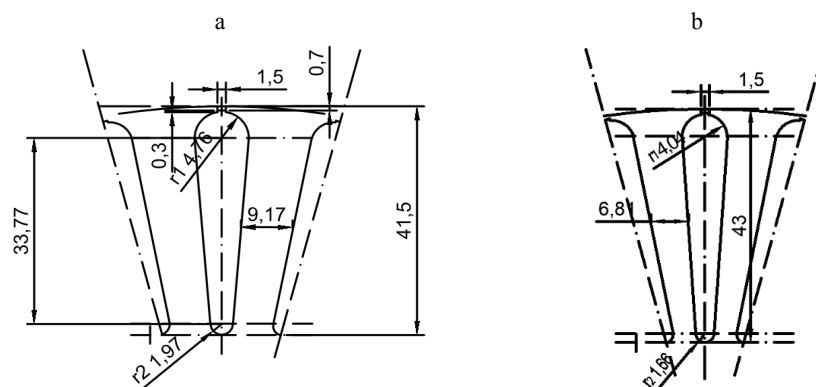


Рис. 2. Вид овальных закрытых пазов короткозамкнутого ротора  
 Fig. 2. View of oval closed slots of a short-circuited rotor

Таблица 2

Расчет режимов холостого хода и номинального  
 Calculation of idle and nominal stroke modes

| № п/п | Условные обозначения                 | Двигатель № 1  | Двигатель № 2  |
|-------|--------------------------------------|----------------|----------------|
| 1     | $I_1$ , А                            | 42,97          | 42,99          |
| 2     | $\cos\varphi_0$                      | 0,884          | 0,886          |
| 3     | $A_1$ , А/см                         | 370,79         | 424,308        |
| 4     | $J_1$ , А/мм <sup>2</sup>            | 4,65           | 10,02          |
| 5     | $A_2$ , А /см                        | 309,87         | 353,86         |
| 6     | $I_{ст}$ , А                         | 612,36         | 466,08         |
| 7     | $J_{ст}$ , А/мм <sup>2</sup>         | 2,28           | 1,96           |
| 8     | $\eta$ , %                           | 92,39          | 91,94          |
| 9     | Проверка<br>$P_1$ , Вт<br>$P_2$ , Вт | 43308<br>40008 | 43465<br>39921 |

Таблица 3

Рабочие характеристики первого варианта двигателя  
 Performance characteristics of the first motor variant

| Характеристика | Отдаваемая мощность в долях от номинальной $P_2$ |           |          |           |          |           |
|----------------|--------------------------------------------------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|
|                | 0                                                | $0,25P_2$ | $0,5P_2$ | $0,75P_2$ | $P_2$    | $1,25P_2$ |
| $P_2$ , Вт     | 0                                                | 10000     | 20000    | 30000     | 40000    | 50000     |
| $s$            | 0,00012                                          | 0,0035    | 0,0071   | 0,011     | 0,0153   | 0,0204    |
| $I_{a1}$ , А   | 1,118                                            | 10,032    | 19,12    | 28,46     | 37,95    | 47,79     |
| $I_{p1}$ , А   | 11,346                                           | 11,76     | 13,24    | 15,95     | 20,073   | 26,083    |
| $I_1$ , А      | 11,401                                           | 15,46     | 23,26    | 32,63     | 42,93    | 54,45     |
| $\cos\psi$     | 0,0981                                           | 0,6489    | 0,822    | 0,87      | 0,884    | 0,8774    |
| $P_1$ , Вт     | 1510,39                                          | 11620,52  | 21933,19 | 32478,29  | 43290,78 | 54462,57  |
| $\eta$         | 0                                                | 86,05     | 91,18    | 92,36     | 92,3984  | 91,806    |
| $M$ , Н·м      | 0                                                | 63,89     | 128,25   | 193,13    | 258,641  | 324,96    |
| $n_2$ , об/мин | 1499,81                                          | 1494,66   | 1489,26  | 1483,4    | 1476,941 | 1469,38   |

Таблица 4

Рабочие характеристики второго варианта двигателя  
 Performance characteristics of the second motor variant

| Характеристика | Отдаваемая мощность в долях от номинальной $P_2$ |           |          |           |         |           |
|----------------|--------------------------------------------------|-----------|----------|-----------|---------|-----------|
|                | 0                                                | $0,25P_2$ | $0,5P_2$ | $0,75P_2$ | $P_2$   | $1,25P_2$ |
| $P_2$ , Вт     | 0                                                | 10000     | 20000    | 30000     | 40000   | 50000     |
| $s$            | 0,00013                                          | 0,0037    | 0,0075   | 0,01161   | 0,01605 | 0,02107   |
| $I_{a1}$ , А   | 1,162                                            | 10,088    | 19,206   | 28,55     | 38,13   | 48,078    |
| $I_{p1}$ , А   | 12,516                                           | 12,85     | 14,11    | 16,39     | 19,86   | 24,81     |
| $I_1$ , А      | 12,569                                           | 16,34     | 23,83    | 32,9301   | 42,99   | 54,105    |
| $\cos\psi$     | 0,0925                                           | 0,61      | 0,805    | 0,8672    | 0,8869  | 0,8886    |
| $P_1$ , Вт     | 1560,82                                          | 11682,9   | 22097,9  | 32693,2   | 43576,4 | 54824,8   |
| $\eta$         | 0                                                | 85,59     | 90,506   | 91,76     | 91,79   | 91,19     |
| $M$ , Н·м      | 0                                                | 63,906    | 128,303  | 193,24    | 258,82  | 325,18    |
| $n_2$ , об/мин | 1499,8                                           | 1494,37   | 1488,67  | 1482,58   | 1475,93 | 1468,4    |

При создании 3D-модели двигателя в Ansys Electronics использовались результаты предварительного расчета. Многие операции создания модели АД автоматизированы, например такие, как визуализация параметров пазов статора и ротора (рис. 3а), укладка трехфазной обмотки статора (рис. 3б), причем имеется аналитический инструментарий редактирования их характеристик.

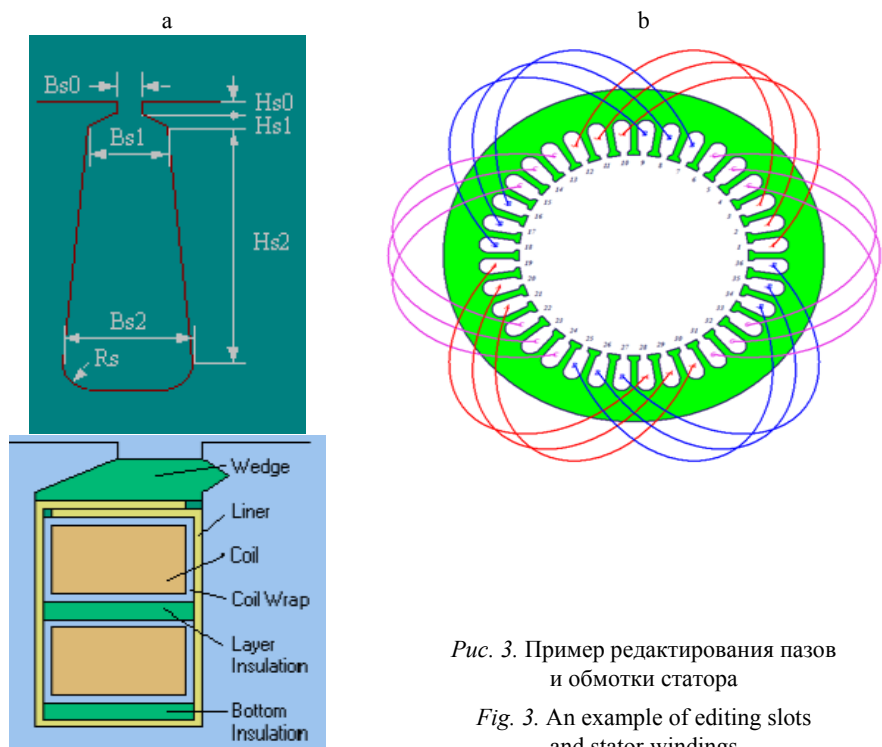


Рис. 3. Пример редактирования пазов и обмотки статора

Fig. 3. An example of editing slots and stator windings

Проверка (Validate) и предварительный расчет (Analyze All) ускоряют выполнение проекта. Результаты представляются в виде таблиц данных, набора характеристик и изображений.

Анимированную модель электромагнитных процессов (рис. 4) можно получить в виде как непосредственно поля с цветовой дифференциацией различных физических величин, так и векторов.

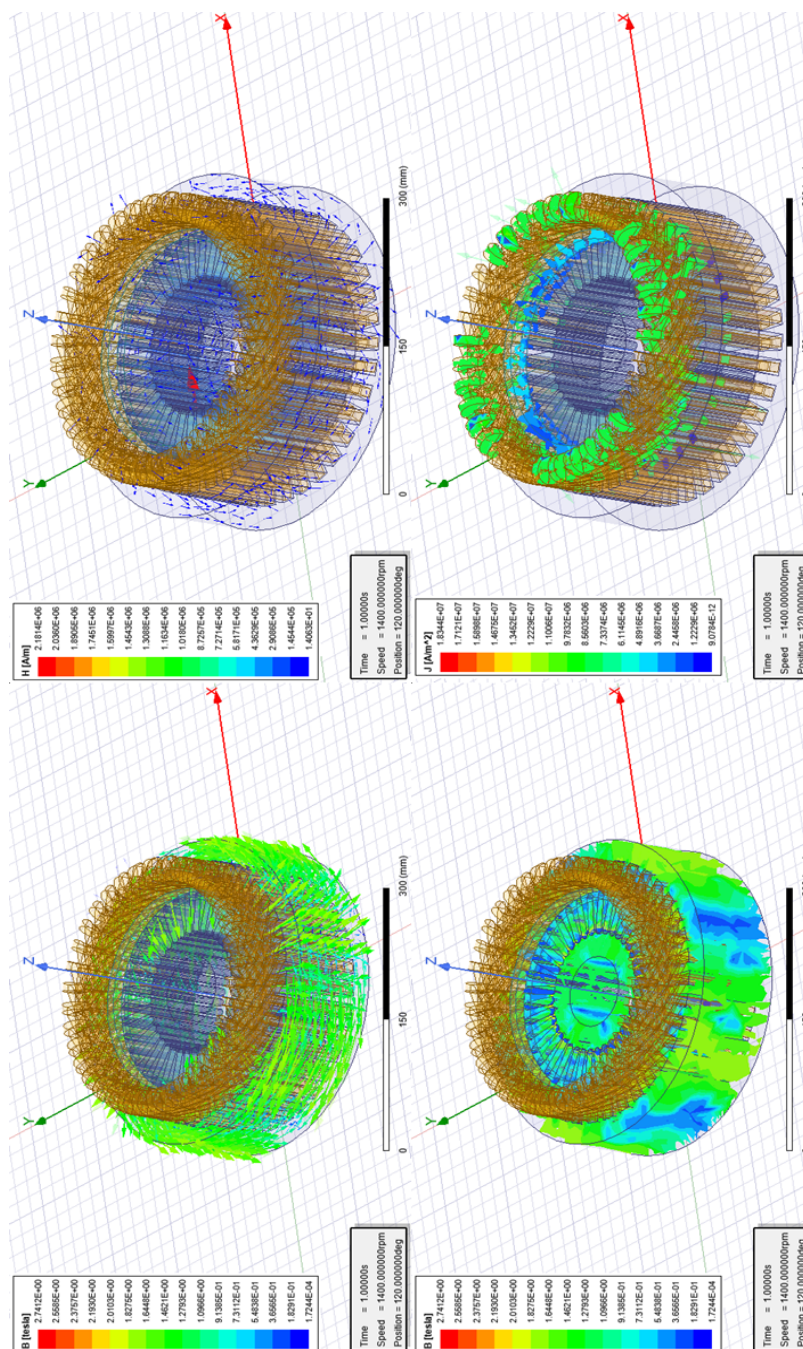


Рис. 4. Анализ 3D-модели различных полей *Ansys Electronics*

Fig. 4. Analysis of 3D model of various *Ansys Electronics* fields

Среди факторов, определяющих срок службы изоляции трансформаторов, одним из основных является старение изоляции под действием температуры. Это явление хорошо поддается количественному учету и поэтому сравнительно подробно исследовано. Особое значение приобретают методы расчета скорости старения и на этой основе – срока службы изоляции.

Первые работы в этом направлении имели, главным образом опытный характер, относились к изоляции класса «А». В результате было сформулировано правило «восьми градусов» (правило Монтзингера), в соответствии с которым повышение температуры на каждые 8 °С сверх предельно допустимой сокращает срок службы изоляции вдвое:

$$T = T_0 e^{-0,0866v}, \quad (5)$$

где  $v$  – температура нагрева изоляции, °С;  $T$  – срок службы изоляции при этой температуре (в годах);  $T_0$  – то же при так называемых «нулевых» условиях (при 105 °С составляет  $6,225 \cdot 10^4$  лет).

Установлено, что 8 °С соответствует только классу «А», а для других классов изоляции она повышается до (10–12) °С, а именно, чем выше класс нагревостойкости, тем медленнее происходит старение.

Несмотря на эмпирический характер, правило Монтзингера позволяет производить ориентировочные расчеты в тех случаях, когда они относятся к сравнительно небольшим отрезкам времени и небольшим диапазонам изменения температуры.

Основная цель исследования в дальнейшем связана с оценкой остаточного ресурса используемых приводов электровоза. Для достижения этой цели, с учетом имеющихся знаний по нагрузке, необходимо определить температурный режим двигателя, что было достигнуто получением картины температурных полей и локализации «узких мест». Также было рассмотрено старение изоляции под действием температуры, электрического поля, механических нагрузок, влаги и химически активных веществ. Отмечается, что скорость старения изоляции определяется в основном эксплуатационными условиями и свойствами применяемых материалов, а на образование местных дефектов оказывают значительное влияние уровень технологии и общей культуры производства, условия хранения трансформатора, его транспортировка и монтаж.

Старение изоляции низковольтных машин, работающих при умеренных температурах обмоток, вообще не может быть объяснено с помощью тепловых или электрических явлений [7]. В этом случае наиболее вероятными причинами, вызывающими постепенное разрушение изоляции, являются механические нагрузки и химическое воздействие окружающей среды.

Определенную роль в процессах разрушения изоляции играют термомеханические явления, связанные с различием коэффициентов теплового расширения изоляции и проводников. Это приводит к образованию трещин, разбуханию изоляции, расслоению ее и взаимному смещению отдельных слоев.



Картина полученных температурных полей, а также сопротивление изоляции  $R_{из}$ , тангенс угла диэлектрических потерь  $\tan\delta$ , емкость изоляционного промежутка  $C_{из}$ , коэффициент диэлектрической абсорбции  $DAR$ , индекс поляризации  $PI$ , коэффициент диэлектрической абсорбции  $DD$  и ток сквозной проводимости  $I_{ут}$  позволят перейти к расчету остаточного ресурса изоляции.

Для проведения температурного анализа 3D модель была импортирована в программную среду Iserak (рис. 5).

Результаты моделирования верифицированы с помощью поверенных пирометра и тепловизора. Разница в максимальных температурах, полученных в ходе эксперимента между моделью и выполненными натурными исследованиями, составила менее 3 °С. Полученные данные исследования позволили рассчитать ошибку с учетом поправочного коэффициента относительно данных, применяемых в расчетных методах оценки при диагностировании асинхронных двигателей. Работы по моделированию с использованием сверточных нейросетей ведутся и с обмотками трансформаторов различной мощности и назначения, применяемых в энергетике [8–13]. Результаты, полученные в ходе исследования электромагнитных и тепловых процессов, проходящих в асинхронных электродвигателях и трансформаторах, позволили разработать и применить 3D-модели с использованием специальных программ в интерактивном режиме без описания сложных векторных уравнений теории поля, используя при этом происходящие тепловые процессы. Применение комплексного анализа позволило выявить совокупное влияние на срок службы изоляции таких факторов, как температура, влажность при различных воздействиях агрессивных сред, в том числе в условиях их эксплуатации во взрывоопасных зонах.

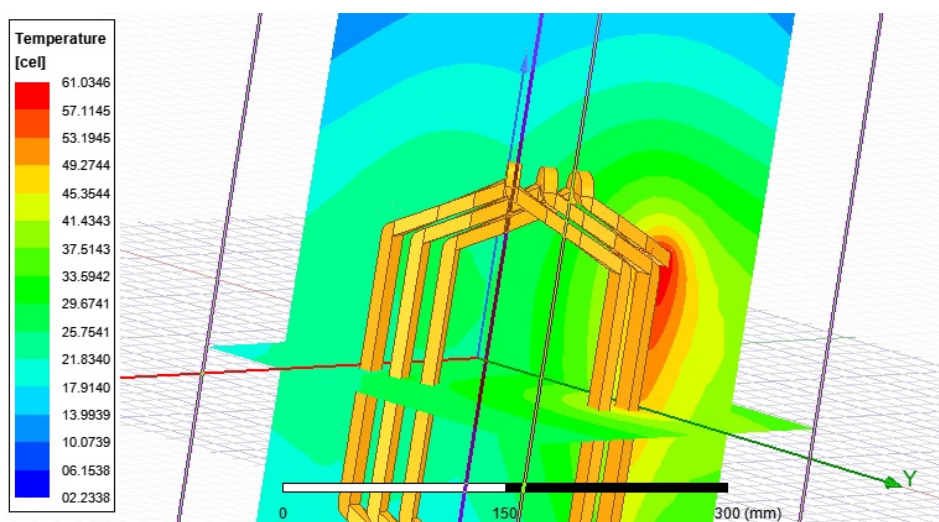


Рис. 5. Температурное поле для одной из точек обмотки

Fig. 5. Temperature field for one of the winding points



## ВЫВОДЫ

1. Сравнение характеристик реального, модельного и рассчитанного по стандартной методике АД позволило рассчитать ошибку с учетом поправочного коэффициента относительно данных, применяемых в расчетных методах оценки, использовать полученное значение в новых методиках расчета и моделирования.

2. Предложенные 3D-модели электромагнитных и тепловых процессов, протекающих в асинхронных двигателях, позволяют:

- оценить эффективность электрической машины;
- усовершенствовать конструкцию с учетом критериев пропускной способности электротехнической стали и температуры обмоток;
- создавать предпосылки для более точных прогнозов при оценке остаточного ресурса изоляции на основе температурных полей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Буль, О. Б. Методы расчета систем электрических аппаратов. Программа ANSYS: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / О. Б. Буль. М.: Изд. центр «Академия», 2006. 288 с.
2. Беззубцева, М. М. Расчет электромагнитного механоактиватора с применением программного комплекса Ansys / М. М. Беззубцева, В. С. Волков, П. С. Прибытков // Известия СПб. государственного аграрного ун-та. 2009. № 15. С. 150–154.
3. Мансурова, А. Р. Применение программного комплекса ANSYS в компьютерном моделировании / А. Р. Мансурова // Молодой ученый. 2018. № 39 (225). С. 31–33.
4. Оконечников, А. С. Прочностные и динамические расчеты в программном комплексе Ansys Workbench: учеб. пособие / А. С. Оконечников, Д. О. Сердюк, Г. В. Федотенков. М.: Изд-во МАИ, 2021. 104 с.
5. Гольдберг, О. Д. Проектирование электрических машин: учеб. для втузов / О. Д. Гольдберг, Я. С. Гурин, И. С. Свириденко. М.: Высш. шк., 1984. 431 с.
6. Галушко, В. Н. Расчет асинхронных двигателей: пособие для выполнения курсовой работы / В. Н. Галушко, И. С. Евдасев, В. А. Пацкевич; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. Гомель: БелГУТ, 2016. 158 с.
7. Воробьев, В. Е. Прогнозирование срока службы электрических машин: письменные лекции / В. Е. Воробьев, В. Я. Кучер. СПб.: СЗТУ, 2004. 56 с.
8. Пехота, А. Н. Технология использования сверхточных нейронных сетей при диагностике состояния трансформаторов / А. Н. Пехота, В. Н. Галушко, И. Л. Громыко. // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. С. Фундаментальные науки. 2021. № 12. С. 63–69.
9. Пехота, А. Н. Диагностирование межвитковых коротких замыканий трансформаторов с помощью комплексного анализа данных приборного учета / А. Н. Пехота, В. Н. Галушко, И. Л. Громыко // Энергоэффективность. 2021. № 2. С. 24–28.
10. Галушко, В. Н. Применение интеллектуальных нейросетей для диагностики межвитковых замыканий трансформаторов / В. Н. Галушко, А. Н. Пехота, И. Л. Громыко // Материалы X Междунар. науч.-практ. конф. «Проблемы безопасности на транспорте», Гомель, 26–27 нояб. 2020 г. Гомель: БелГУТ, 2020. С. 88–89.
11. Пехота, А. Н. Технология применения диагностического комплекса трансформаторов / А. Н. Пехота, В. Н. Галушко, И. Л. Громыко // Энергоэффективность. 2022. № 3. С. 22–26.
12. Пехота, А. Н. Результаты диагностирования различных неисправностей трансформаторов с воздушным охлаждением / А. Н. Пехота, И. Л. Громыко, В. Н. Галушко // Энергоэффективность. 2022. № 8. С. 24–29.

13. Опейко, О. Ф. Синтез на основе линеаризации векторного управления скоростью асинхронного электродвигателя без датчика скорости / О. Ф. Опейко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 2. С. 103–114. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-2-103-114>.

Поступила 17.10.2023    Подписана в печать 19.12.2023    Опубликована онлайн 29.03.2024

#### REFERENCES

1. Bul' O. B. (2006) *Methods of Electrical Apparatus Systems Computaion. The ANSYS Software*. Moscow, Akademiya Publ. 288 (in Russian).
2. Bezzubtseva M. M., Volkov V. S., Pribytkov P. S. (2009) Computation of an Electromagnetic Mechanical Activator Using the ANSYS Software Package. *Sankt-Peterburgskii Gosudarstvennyi Agrarnyi Universitet. Izvestiya*, (15), 150–154 (in Russian).
3. Mansurova A. R. (2018) Application of the ANSYS Software Package in Computer Modeling. *Molodoi Uchenyi* [Young Scientist], (39), 31–33 (in Russian).
4. Okonechnikov A. S., Serdyuk D. O., Fedotenkov G. V. (2021) *Strength and Dynamic Calculations in the ANSYS Workbench Software Package*. Moscow, MAI Publ. 104 (in Russian).
5. Goldberg O. D., Gurin Ya. S., Sviridenko I. S. (1984) *Designing Electric Machines*. Moscow, Vysshaya shkola Publ. 431 (in Russian).
6. Galushko V. N., Evdasev I. S., Patskevich V. A. (2016) *Calculation of Asynchronous Motors*. Gomel, Belarusian State University of Transport. 158 (in Russian).
7. Vorobyov V. E., Kucher V. Ya. (2004) *Forecasting the Service Life of Electrical Machines*. St. Petersburg, North-West State Technical University. 56 (in Russian).
8. Pehota A., Galushko V., Gromyko I. (2021) Technology of Using Convolutional Neural Networks in Diagnosing the State of Transformers. *Vestnik Polotskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya C. Fundamental'nye Nauki = Vestnik of Polotsk State University. Part C. Fundamental Sciences*, (12), 63–69 (in Russian).
9. Pekhota A. N., Galushko V. N., Gromyko I. L. (2021) Diagnostics of Inter-Turn Short Circuits of Transformers Using Comprehensive Analysis of Instrument Data. *Energoeffektivnost' [Energy Efficiency]*, (2), 24–28 (in Russian).
10. Galushko V. N., Pekhota A. N., Gromyko I. L. (2020) The Use of Intelligent Neural Networks for the Diagnosis of Inter-Turn Circuits of Transformers. *Materialy X Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf. «Problemy Bezopasnosti na Transporte», Gomel'*, 26–27 Noyab. 2020 g. [Materials of the X<sup>th</sup> International Scientific and Practical Conference “Problems of Transport Safety”, Gomel, November 26–27, 2020]. Gomel, Belarusian State University of Transport, 88–89 (in Russian).
11. Pekhota A. N., Galushko V. N., Gromyko I. L. (2022) Technology of Application of Diagnostic Complex of Transformers. *Energoeffektivnost' [Energy Efficiency]*, (3), 22–26 (in Russian).
12. Pekhota A. N., Galushko V. N., Gromyko I. L. (2022) The Results of Diagnosing Various Malfunctions of Air-Cooled Transformers. *Energoeffektivnost' [Energy Efficiency]*, (8), 24–29 (in Russian).
13. Opeiko O. F. (2022) Synthesis Based on Linearization of Vector Speed Control of an Induction Motor without a Speed Sensor. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (2), 103–114. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-2-103-114> (in Russian).

Received: 17 October 2023    Accepted: 19 December 2023    Published online: 29 March 2024

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-137-151>

УДК 66.042.945: 519.246.8

## Оценка объемов работ по эксплуатационному контролю стальных подземных газопроводов с учетом организационно-логистического фактора

Н. В. Струцкий<sup>1)</sup>, В. Н. Романюк<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>ГПО «Белтопгаз» (Минск, Республика Беларусь),

<sup>2)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

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

**Реферат.** Одним из основных видов технического обслуживания стальных подземных распределительных газопроводов является периодическое приборное обследование. Данное обследование представляет собой разновидность эксплуатационного контроля, включающего в себя выявление дефектов изоляционного покрытия и утечек газа приборными методами, без вскрытия трубопровода. Этим одновременно контролируются два различных уровня нарушения исправности газопровода, на одном из которых его работоспособность полностью сохраняется, но создается возможность наступления цепочки событий, угрожающих возникновением отказа в будущем (дефект изоляции), а на другом отказ, по сути, уже произошел (потеря герметичности газопровода), но до обследования не был выявлен. Приборному обследованию с определенной нормативной периодичностью подвергаются все распределительные подземные газопроводы. Выявленные повреждения подлежат обязательному устранению, исправность и работоспособность газопровода восстанавливаются. Таким образом, периодическое приборное обследование является ключевым техническим мероприятием, обеспечивающим управление техническим состоянием стальных подземных распределительных газопроводов. А проводимые в ходе обследования и дальнейшего ремонта газопроводов работы являются наиболее масштабными и трудозатратными из всех выполняемых на линейной части газораспределительной системы. Соответственно адекватное планирование в данной области весьма важно с точки зрения как надежности и безопасности газораспределительной сети, так и хозяйственно-экономической. Вместе с тем обеспечить искомую адекватность планирования эксплуатационного контроля и вообще технического обслуживания инженерных объектов на практике достаточно сложно, так как сам процесс обслуживания сочетает в себе регулируемые и нерегулируемые компоненты и имеет значительную инерционность управления. Настоящая статья посвящена вопросам обоснованного прогнозирования объемов работ по приборному обследованию стальных подземных газопроводов с учетом специально выделяемого комплексного организационно-логистического фактора, отражающего влияние сложившейся в сфере газораспределения производственной практики и управленческих подходов. Прогноз выполнен на основе актуальных в настоящий момент методов анализа временных рядов.

**Ключевые слова:** подземный стальной газопровод, эксплуатационный контроль, периодическое приборное обследование, объем работ, планирование, анализ временных рядов

**Для цитирования:** Струцкий, Н. В. Оценка объемов работ по эксплуатационному контролю стальных подземных газопроводов с учетом организационно-логистического фактора / Н. В. Струцкий, В. Н. Романюк // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 67, № 2. С. 137–151. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-67-2-137-151>

### Адрес для переписки

Романюк Владимир Никанорович  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65/2,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 293-92-16  
[pte@bntu.by](mailto:pte@bntu.by)

### Address for correspondence

Romaniuk Vladimir N.  
Belarusian National Technical University  
65/2, Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 293-92-16  
[pte@bntu.by](mailto:pte@bntu.by)

## Assessment of the Scope of Work for Operational Control of Steel Underground Gas Pipelines, Taking Into Account the Organizational and Logistical Factor

N. V. Strutsky<sup>1)</sup>, V. N. Romaniuk<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Beltopgaz SPA (Minsk, Republic of Belarus),

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

**Abstract.** One of the main types of maintenance of steel underground gas distribution pipelines is periodic instrument inspection. This inspection is a kind of operational control, which includes detection of defects of insulation coating and gas leaks by instrumental methods, without opening the pipeline. This simultaneously controls two different levels of failure of the gas pipeline's serviceability, one of which fully preserves its operability, but creates the possibility of a chain of events threatening to cause a failure in the future (insulation defect), while the other level of failure is, in fact, the case when the failure has already occurred (loss of tightness of the gas pipeline), but before the examination was not detected. All underground gas distribution pipelines are subjected to an instrument inspection with a certain regulatory frequency. The identified damages are subject to mandatory elimination, the serviceability and operability of the gas pipeline are being restored. Thus, periodic instrument inspection is a key technical measure that ensures the management of the technical condition of steel underground gas distribution pipelines. It should be mentioned that the work carried out during the inspection and further repair of gas pipelines is the most extensive and labor-consuming of all those performed on the linear part of the gas distribution system. Accordingly, adequate planning in this area is very important from the point of view of both the reliability and safety of the gas distribution network and the economic and economic one. At the same time, it is quite difficult to ensure the required adequacy of operational control planning and maintenance of engineering facilities in practice, since the maintenance process itself combines regulated and unregulated components and has significant inertia of management. The present article is devoted to the issues of reasonable forecasting of the scope of work on the instrument inspection of steel underground gas pipelines, taking into account a specially identified complex organizational and logistical factor reflecting the influence of existing production practices and management approaches in the field of gas distribution. The forecast is based on the currently relevant time series analysis methods.

**Key words:** underground steel gas pipeline, operational control, periodic instrument inspection, scope of work, planning, time series analysis

**For citation:** Strutsky N. V., Romaniuk V. N. (2024) Assessment of the Scope of Work for Operational Control of Steel Underground Gas Pipelines, Taking Into Account the Organizational and Logistical Factor. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (2), 137–151. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-137-151> (in Russian)

### Введение

Периодическое приборное обследование (или, по устоявшейся отраслевой терминологии, комплексное приборное обследование (КПО)) охватывает все без исключения стальные подземные распределительные газопроводы, его периодичность, как правило, составляет 5 лет. Отдельные характерные участки (например, переходы через естественные и искусственные преграды) обследуются чаще – 1 раз в 3 года или ежегодно [1, 2]. Учитывая плановый, периодический характер КПО, регламентируемый (то есть минимально необходимый исходя из нормативных требований) объем работ  $Q_{\text{рег}}$  будет определяться по формуле

$$Q_{\text{регл}} = \sum_{i=1}^n Q_i, \quad (1)$$

где  $Q_i$  – объем работ на участках с  $i$ -й периодичностью обследования ( $T_{\text{КПО}i}$ );  $n$  – количество регламентируемых периодичностей обследования.

Расчет регламентируемых объемов работ естественно производить, отталкиваясь от преобладающей периодичности работ, составляющей для Республики Беларусь, как уже было сказано, 5 лет, участки с меньшей периодичностью обследования в общем объеме работ имеют небольшую, примерно постоянную долю (около 5 %). Таким образом,  $Q_{\text{регл}}$  для каждого пятилетнего периода можно укрупненно рассчитать исходя из протяженности стальных газопроводов в предыдущий период. То есть регламентируемые объемы работ по КПО для периода 2009–2013 гг. рассчитываются на основании данных о протяженностях газопроводов в 2004–2008 гг., для периода 2014–2018 гг. – на основании данных за 2009–2013 гг., и так далее. Соответственно, актуальные протяженности газопроводов в период 2019–2023 гг. составляют базу планирования на пятилетний цикл 2024–2028 гг.

Однако, как показывает практика, значений  $Q_{\text{регл}}$  недостаточно для адекватного планирования работ. Соответственно, для обеспечения необходимого качества планировочного процесса необходим учет дополнительных влияющих факторов.

### Основная часть

Рассмотрим рис. 1, на котором показана динамика объемов обследования подземных газопроводов за период 2009–2023 гг. (точка 1 на горизонтальной оси соответствует 2009 г.). Рассчитанные по протяженности сетей и нормативной периодичности обследования значения  $Q_{\text{регл}}$  показаны на рисунке прерывистой линией зеленого цвета, красной прерывистой линией показаны фактические объемы работ  $Q_{\text{факт}}$ . Как видно, на всем протяжении графика фактические объемы существенно превышают регламентируемые. Действительно, некоторая часть газопроводов может подвергаться повторному обследованию в течение одного календарного года (сезона обследования) в случае появления сомнений в результатах планового обследования, при проведении выборочного контроля или других оговоренных нормативными документами случаях [1, 2]. А главное, на практике часть объектов включается в планы на обследование досрочно в целях равномерного распределения трудозатрат, материальных ресурсов и из соображений логистики.

Такая локальная оптимизация графиков и маршрутов обследования технически и экономически обоснована и носит постоянный характер, из-за чего реальная периодичность выполнения работ всегда несколько уплотняется по отношению к нормативным требованиям. В настоящее

время этот подход нашел свое нормативное отражение. Согласно отраслевому документу [2], при планировании рекомендуется предусматривать укрупненное (по кварталам, микрорайонам) обследование всех подземных газопроводов независимо от срока врезки или предыдущего обследования, а также участка, объединяющего одну или несколько зон электрозащиты.

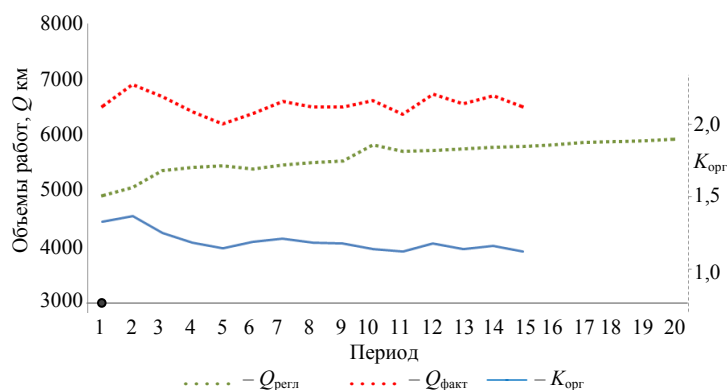


Рис. 1. Динамика регламентируемых и фактических объемов обследования подземных газопроводов

Fig. 1. Dynamics of regulated and actual volumes of inspection of underground gas pipelines

Очевидно, что такое превышение фактических объемов работ над регламентируемыми носит системный характер, особенно при обслуживании протяженных и территориально разнесенных инженерных объектов, и может быть выражено в виде соответствующего показателя (коэффициента)  $K_{\text{орг}}$

$$K_{\text{орг}} = \frac{Q_{\text{факт}}}{Q_{\text{рег}}}. \quad (2)$$

Данный коэффициент (показан на рис. 1 сплошной синей линией, шкала значений справа) будет отражать влияние на фактические объемы работ организационно-логистического фактора, который, в свою очередь, будет включать в себя внеплановую составляющую и естественную избыточность планирования.

При этом  $K_{\text{орг}}$  будет в значительной мере зависеть от установившейся практики производственной деятельности и управленческих подходов в той или иной эксплуатирующей организации (шире – системе, отрасли), которая наряду с нормативной периодичностью работ будет оказывать существенное влияние на плотность обслуживания объектов.

Так, например, централизация работ по эксплуатационному контролю в организации будет вести к укрупнению осуществляющих контроль подразделений (бригад) и соответственно укрупнению зон обслуживания и маршрутов, что на каком-то этапе повысит плотность обслуживания. К тому же результату, в конечном итоге, будет вести и внедрение в работу но-

вой, более производительной приборной техники. При этом эффекты импульсов от структурных перестроек и технического переоснащения должны иметь затухающий, стабилизирующийся со временем характер.

Следует отметить, что особенно сильно влияние производственно-логистического фактора может проявляться на фоне управленческих решений высокого порядка, оказывающих долговременное системное влияние на хозяйственную деятельность в масштабе крупных производственных комплексов и даже отраслей. В качестве примера можно привести проведенную в системе ГПО «Белтопгаз» в течение 2015–2016 гг. оптимизацию штатной численности газоснабжающих организаций, когда штаты были приведены в соответствие с объемами обслуживания, а организационная структура целой отрасли упорядочена и унифицирована на единых принципах.

Определенное искажающее («зашумляющее») влияние на процесс технического обслуживания могут оказывать и субъективные факторы, такие как, например, недостаточное качество планирования и/или управления на одном из структурных уровней.

Рассмотрим динамику значений  $K_{\text{орг}}$  подробнее. Поскольку мы имеем дело с временным рядом (динамическим рядом, рядом динамики, time series) – последовательностью значений некоего показателя (признака), упорядоченной в хронологическом порядке, то есть в порядке возрастания временного параметра [3], используем специальные методы анализа временных рядов.

В практике исследования принято считать, что значения уровней временных рядов могут содержать следующие структурообразующие компоненты:

- тренд, или основную тенденцию,  $(u_t)$  – изменение, определяющее общее направление развития временного ряда под воздействием долговременных факторов;
- сезонную компоненту  $(s_t)$ , отражающую периодически повторяемые в определенное время года колебания;
- циклическую компоненту  $(c_t)$ , отражающую периодические колебания, выходящие за рамки одного года;
- случайную (нерегулярную) компоненту  $(\varepsilon_t)$  – случайный шум, отражающий результат воздействия случайных, внешних факторов.

Неслучайные составляющие часто объединяются в одну, и рассматривается модель вида

$$y_t = f(t, \beta) + \varepsilon_t, \quad (3)$$

где  $f(t, \beta)$  – неслучайная функция времени, заданная с точностью до неизвестных параметров  $\beta$ .

В формировании уровней ряда не обязательно участвуют все перечисленные выше составляющие, некоторые составляющие могут отсутство-

вать в тех или иных рядах. Предметом анализа временного ряда являются выявление и изучение основных компонент исследуемого ряда [4, 5].

При построении регрессионных моделей для временных рядов необходимо учитывать такие их особенности, как зависимость от прошлого (свойство «памяти» или принцип «самоповторения истории», автокорреляция), наличие долго- и краткосрочных зависимостей [6]. В настоящее время методы анализа временных рядов широко востребованы как в сфере своего традиционного применения – экономике (эконометрике), так и в других научных областях. Наиболее важным прикладным аспектом применения данных методов является возможность прогнозирования будущего поведения показателя на основе его прошлых изменений (в сфере энергетики, например, таким показателем зачастую является энергопотребление [7–10], оптимизация которого остается одной из актуальнейших задач).

Рассматриваемый ряд динамики показателя  $K_{орг}$  является одномерным (число уровней  $n = 15$ ), интервальным, эквидистантным (с годовым шагом дискретизации), временным рядом относительных величин (коэффициентов), полученных на основе макроданных – результатов агрегирования первичной статистической информации в процессе сводки и группировки [7]. Как правило, при работе с макроданными бывает небольшое число наблюдений, которое невозможно увеличить (так как изменяется вид или структура зависимости), а также часто встречается феномен «ложной регрессии». В этой связи необходим детальный предварительный анализ имеющихся данных.

Проверка данных на наличие аномальных значений проводилась с помощью критерия Ирвина ( $\lambda$ ) и двустороннего критерия Граббса ( $Gr$ ). Применение критерия Ирвина рекомендовано в стандартах [8, 9]. Использование критерия Граббса предписывается стандартом [10], представляющим собой аутентичный текст международного стандарта ИСО 5725-2: 1994. Так как выбросов выявлено не было ( $\lambda = 1,651$ ;  $Gr = 2,418$ ; здесь и далее при проверке статистических гипотез принят уровень значимости  $\alpha = 0,05$ ), уровни временного ряда подвергались дальнейшей статистической обработке в исходном виде. Описательные статистики ряда представлены в табл. 1.

Таблица 1

Описательные статистики ряда  $K_{орг}$   
Descriptive statistics series of the  $K_{орг}$  series

| Среднее $\bar{x}$ | Стандартная ошибка $\sigma_x$ | Медиана $Me$ | Среднеквадратическое отклонение $\sigma$ | Дисперсия выборки $\sigma^2$ | Размах вариации $R$ | Коэффициент выравнивания $K_v$ |
|-------------------|-------------------------------|--------------|------------------------------------------|------------------------------|---------------------|--------------------------------|
| 1,191             | 0,0184                        | 1,177        | 0,0716                                   | 0,0051                       | 0,247               | 0,819                          |

Для оценки однородности статистической совокупности можно также использовать такие показатели, как коэффициент вариации  $V$  и относительное отклонение выборочного среднего и медианы  $V_{Me}$ :



$$V = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100\%; V_{Me} = \frac{\bar{x} - Me}{\bar{x}} \cdot 100\%. \quad (4)$$

Коэффициент вариации ряда  $V = 6,01\%$  ( $< 10\%$ ), что свидетельствует о незначительной степени рассеивания данных. Относительное отклонение выборочного среднего и медианы  $V_{Me} = 1,23\%$ , подтверждая надежность среднего в выборке. Таким образом, ряд можно считать однородным, а его среднее значение  $\bar{x}$  хорошо характеризующим центральную тенденцию.

Для предварительного анализа скорости и интенсивности изменений можно рассчитать такие общераспространенные показатели динамики ряда, как средние темп роста  $\bar{T}_p$ , темп прироста  $\bar{T}_{пр}$  и абсолютный прирост  $\bar{\Delta y}$  показателя:

$$\bar{T}_p = \sqrt[n-1]{\frac{y_n}{y_0}}; \quad \bar{T}_{пр} = \bar{T}_p - 1; \quad \bar{\Delta y} = \frac{y_n - y_0}{n-1}, \quad (5)$$

где  $n$  – число уровней временного ряда;  $y_0$  – значение базисного уровня (в качестве базисного принимается уровень первого года).

В табл. 2 приведены средние показатели динамики временного ряда и предварительный прогноз изменения  $K_{орг}$  на основе средних темпа роста и абсолютного темпа прироста, рассчитанных по формулам:

$$\hat{y}_{n+L} = y_n + L\bar{\Delta y}; \quad \hat{y}_{n+L} = y_n \bar{T}_p^L, \quad (6)$$

где  $\hat{y}_{n+L}$  – прогнозное значение  $(n + L)$ -го уровня ряда;  $y_n$  – фактическое значение в последней  $n$ -й точке ряда;  $L$  – период упреждения.

Таблица 2

Средние показатели динамики ряда  $K_{орг}$   
Average indicators of the dynamics of the  $K_{орг}$  series

| Средние показатели динамики         | Значения | Точечный прогноз |                |                |                |                |
|-------------------------------------|----------|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                                     |          | $\hat{y}_{16}$   | $\hat{y}_{17}$ | $\hat{y}_{18}$ | $\hat{y}_{19}$ | $\hat{y}_{20}$ |
| Абсолютный прирост $\bar{\Delta y}$ | –0,0146  | 1,108            | 1,094          | 1,079          | 1,064          | 1,049          |
| Темп роста $\bar{T}_p$              | 0,9881   | 1,109            | 1,096          | 1,084          | 1,07           | 1,058          |
| Темп прироста $\bar{T}_{пр}$        | –0,0119  |                  |                |                |                |                |

Период упреждения принят равным 5 годам, так как это, во-первых, соответствует преобладающей периодичности обследования стальных подземных газопроводов, и, во-вторых, удовлетворяет известному правилу, в соответствии с которым период упреждения не должен превышать 1/3 базы прогноза. При этом прогноз на основе среднего абсолютного прироста отражает представление о близком к линейному характере динамики ряда, а прогноз на основе среднего темпа роста – его представление в виде показательной или экспоненциальной кривой [3, 11].

Поскольку уровни ряда имеют тенденцию к уменьшению в абсолютном и относительном выражении, можно выдвинуть гипотезу о присутствии трендовой составляющей. Проверка гипотезы с помощью критерия серий, построенного на медиане ( $v = 4$ ;  $\tau_{\max} = 7$ ), подтверждает вывод о наличии тренда. Дальнейшим шагом в построении модели ряда является определение линии тренда (кривой роста), например, методом аналитического выравнивания. Содержанием этого метода является то, что основная тенденция развития процесса рассчитывается как функция времени. Далее теоретические уровни  $\hat{y}_t$  определяются с использованием той адекватной математической функции, которая наилучшим образом отображает основную тенденцию временного ряда [12].

Известно, что степенной полином может описать любые процессы изменения показателя  $y$  в зависимости от значений  $t$ . Коэффициент детерминации для степенного полинома приближается к единице по мере увеличения числа степеней до числа уровней временного ряда. Однако тем самым линия регрессии приближается к фактическим уровням показателя за прошедшее время, что не позволяет установить тренд и экстраполировать его на перспективу. В этой связи для прогнозирования используют полиномы не выше третьего порядка [13].

Результаты предварительной аппроксимации фактических уровней временного ряда с использованием различных математических функций представлены в табл. 3. В качестве критериев оценки качества уравнения тренда использовались наиболее часто применяемые для данных целей коэффициент детерминации  $R^2$  и средняя абсолютная ошибка аппроксимации  $\bar{A}$ .

Таблица 3

Показатели адекватности аппроксимации для различных функций тренда  $K_{\text{орг}}$ Indicators of the adequacy of the approximation for various trend  $K_{\text{org}}$  functions

| Показатель                                            | Функции  |                     |                     |           |                  |                 |                 |
|-------------------------------------------------------|----------|---------------------|---------------------|-----------|------------------|-----------------|-----------------|
|                                                       | Линейная | Полином 2-й степени | Полином 3-й степени | Степенная | Экспоненциальная | Логарифмическая | Гиперболическая |
| Коэффициент детерминации $R^2$                        | 0,583    | 0,735               | 0,79                | 0,747     | 0,591            | 0,746           | 0,681           |
| Средняя абсолютная ошибка аппроксимации $\bar{A}$ , % | 2,85     | 2,31                | 1,82                | 2,14      | 2,76             | 2,16            | 2,48            |

Наряду с оценкой параметров выбранных кривых, необходима их проверка на адекватность прогнозируемому процессу. Так, наилучшие показатели качества аппроксимации у полиномиального уравнения 3-й степени. Однако, как видно из рис. 2, экстраполяция полиномиального тренда третьей степени уже до наступления 2026 г. приводит к значениям коэффициента  $K_{\text{орг}}$  ниже единицы, что в нашем случае нарушает причинно-следст-

венные связи, означая уменьшение фактических объемов КПО ниже обязательных регламентируемых объемов.

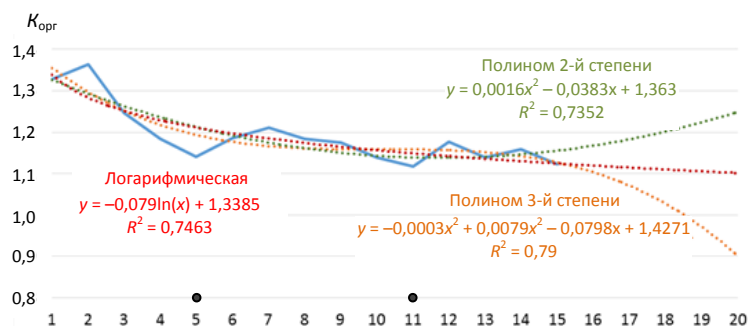


Рис. 2. Подбор модели кривой роста показателя  $K_{орг}$

Fig. 2. Selection of the model of the growth curve of the  $K_{орг}$  index

Наилучшими, практически совпадающими показателями точности аппроксимации обладают степенная и логарифмическая модели тренда. Степенная функция ( $y = ax^b$ ) широко используется в экономических исследованиях в связи с удобной интерпретацией параметра  $b$ , равного коэффициенту эластичности и показывающего процентное изменение результативного признака при изменении факторного признака на 1 %. Однако в нашем случае данная интерпретация не содержит смысла. В то же время, характер кривой роста, описываемой логарифмической зависимостью, полностью отвечает нашим представлениям о постепенном снижении показателя  $K_{орг}$  и его стабилизации со временем, зависимость от которого к тому же выражается в наглядной форме.

Таким образом, принимаем логарифмическую модель кривой роста с уравнением

$$y = 0,08\ln(t) + 1,34. \quad (7)$$

Все входящие в уравнение коэффициенты значимы при уровне  $\alpha = 0,05$  ( $t_{кр} = 2,533$ ), критерий Фишера ( $F = 38,26$ ) подтверждает значимость уравнения регрессии в целом.

Используя линию тренда как наиболее устойчивую компоненту временного ряда, можно переходить к его дальнейшей декомпозиции. Визуальный анализ графика исследуемого ряда позволяет предположить существование циклической составляющей (три цикла, деление происходит в точках 5 и 11 рис. 2). Коррелограмма временного ряда представлена на рис. 3. Статистически значимы коэффициенты автокорреляции  $r_1$ ,  $r_5$  и  $r_6$ , анализ выборочной автокорреляционной функции позволяет сделать вывод о наличии в изучаемом временном ряду наряду с трендом циклических колебаний периодичностью в 5 или 6 лет. Предварительное сравнение качества моделей показало предпочтительный лаг цикла  $l = 6$ .

Циклическую компоненту крайне трудно идентифицировать формальными методами, исходя только из данных изучаемого ряда [14], необходим содержательный анализ причин возникновения колебательной динамики. В нашем случае задачу облегчает то, что газораспределительная система страны исторически объединена в рамках единой республиканской структуры – государственного производственного объединения (ранее – концерна) «Белтопгаз», что обеспечило преемственность в формировании управленческих подходов и производственных практик, а также проведение (с определенными региональными особенностями) единой технической политики.

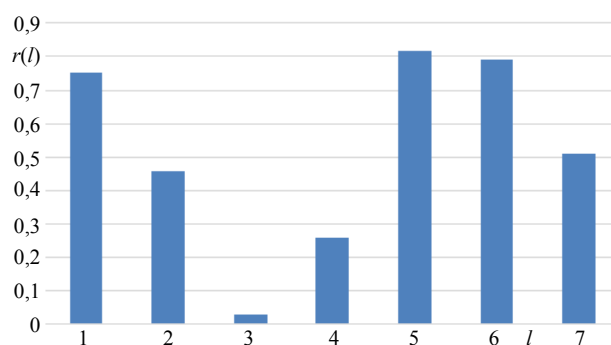


Рис. 3. График выборочной автокорреляционной функции (коррелограмма)

Fig. 3. Graph of the selective autocorrelation function (correlogram)

Таким образом, на основании проведенного анализа 1-й цикл можно связать с переходом на кустовой метод проведения КПО, когда в региональных (областных) газоснабжающих организациях создавались укрупненные бригады для обслуживания сразу несколько районов, с центральной головной бригадой, имеющей расширенную зону обслуживания и наделенной функциями контроля качества проведения работ на местах. Данный принцип был рекомендован решением Ведомственной координационной группы по защите от коррозии, и в конечном итоге реализован в большинстве газоснабжающих организаций. 2-й цикл совпадает с упоминаемой выше оптимизацией организационной структуры в системе ГПО «Белтопгаз», проведенной в 2015–2016 гг. 3-й цикл можно связать с завершающим этапом внедрения отраслевых программных комплексов, автоматизирующих технологический процесс приборного обследования [15], а также появлением отечественной приборной техники контроля качества изоляции с эргономичным интерфейсом управления и цифровыми функциями (запись параметров трассы и т. п.). Возможно, следует также учитывать повышение мотивации работников в связи с частичным переходом на сдельную форму оплаты труда.

В связи со сложностью организационно-территориальной структуры газового хозяйства и неоднородностью условий логистики для различных

сегментов газораспределительной сети можно ожидать повторяемости колебательных эффектов от внешних импульсов различного характера (управленческого, технического) и их частичное наложение, то есть сохранения (во всяком случае в течение какого-то времени) цикличности в развитии изучаемого процесса.

Таким образом, общая точность модели будет определяться не только точностью тренда, но и точностью моделирования циклических колебаний. Учитывая, что амплитуда колебаний около тренда в наблюдаемый период имеет примерно постоянный характер, наиболее адекватной изучаемому процессу будет аддитивная модель вида

$$y_t = u_t + c_t + \varepsilon_t. \quad (8)$$

Выделение циклической составляющей для данной модели производилось методом абсолютных разностей с использованием корректирующего коэффициента, выровненные расчетные значения для шести периодов цикла представлены в табл. 4. Сумма значений равна нулю, что подтверждает корректность расчета циклической компоненты.

Таблица 4

## Показатели циклической компоненты

## Indicators of the cyclic component

| Период цикла                  | 1      | 2      | 3      | 4       | 5       | 6      |
|-------------------------------|--------|--------|--------|---------|---------|--------|
| Циклическая компонента, $c_t$ | 0,0062 | 0,0402 | 0,0018 | -0,0215 | -0,0343 | 0,0076 |

Полученная модель характеризуется: остаточным среднеквадратичным отклонением  $\hat{\sigma} = 0,0223$ ; коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,91$ ; средней абсолютной ошибкой аппроксимации  $\bar{A} = 1,38 \%$ ; средней относительной ошибкой  $\bar{A}_{\text{ск}} = 1,88 \%$ .

Критерий Фишера  $F = 130,59$ , модель статистически значима. Проверка нормальности распределения остаточной компоненты  $RS = 3,551$ . Модель адекватна по нормальности распределения остатков. Статистика Дарбина–Уотсона  $DW = 2,112$ , автокорреляция остатков отсутствует. Проверка на гомоскедастичность: коэффициент ранговой корреляции Спирмена  $\hat{\rho} = -0,507$  ( $T_{\text{кр}} = 0,605$ ). Гетероскедастичность остатков отсутствует.

Следует отметить, что неверная оценка качества модели может быть получена по любому отдельно взятому критерию – значению средней ошибки аппроксимации, или значению коэффициента детерминации, или при проверке статистической значимости уравнения по критерию Фишера. Вместе с тем проявление ошибочного оценивания регрессионной модели по всему комплексу использованных критериев и коэффициентов маловероятно [16].

Таким образом, можно заключить об адекватности и высоких прогностических качествах полученной тренд-циклической модели и использо-

вать ее для расчета значений коэффициента влияния организационно-логистического фактора на интересующий нас период (рис. 4).

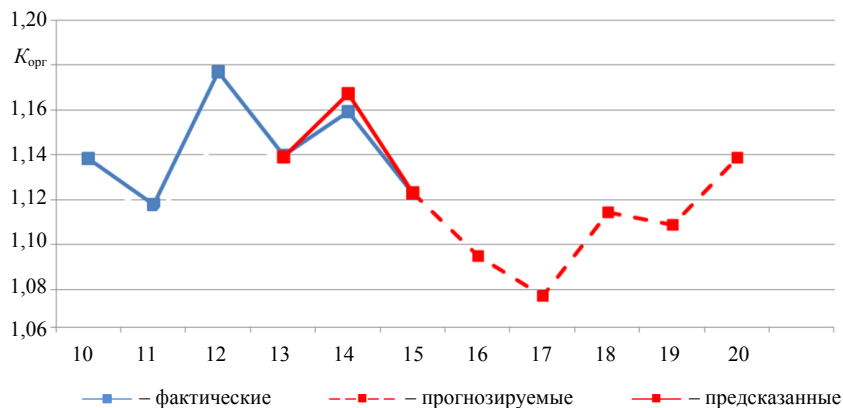


Рис. 4. Прогноз динамики изменения показателя  $K_{орг}$

Fig. 4. Forecast of dynamics of change in the  $K_{орг}$  index

Принимая за базу планирования протяженности газопроводов за 2019–2023 гг., имея значения  $Q_{регл}$  и  $K_{орг}$ , можно рассчитать точечный прогноз объемов работ по КПО стальных подземных распределительных газопроводов в целом по отрасли на пятилетний цикл 2024–2028 гг. (табл. 5).

Таблица 5

Точечный прогноз объемов работ по приборному обследованию газопроводов  
Point forecast of the volume of work on the instrument inspection of gas pipelines

| Показатель            | Год    |        |        |        |        |          |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|
|                       | 2024   | 2025   | 2026   | 2027   | 2028   | $\Sigma$ |
| Объемы работ, тыс. км | 6372,5 | 6309,4 | 6552,9 | 6538,7 | 6738,4 | 32511,9  |

Таким образом, получены научно обоснованные прогнозные значения для обеспечения рационального планирования объема работ по ключевому виду эксплуатационного контроля объектов газораспределительной сети республики. Вместе с тем необходимо учитывать, что данная оценка объемов исходит из условия сохранения сложившихся в газовом хозяйстве республики тенденций и условий, не включает риски внезапных воздействий и форс-мажорных обстоятельств и требует своевременной актуализации по мере прохождения прогнозного периода.

## ВЫВОДЫ

1. На основании анализа динамики объемов обследования подземных распределительных газопроводов в Республике Беларусь за период 2009–2023 гг. впервые выделен организационно-логистический фактор, отражающий воздействие сложившейся на уровне хозяйствующего субъек-

та производственной практики и управленческих подходов на процессы технического обслуживания и оказывающий непосредственное влияние на объемы выполняемых работ и плотность обслуживания объектов. Показано, что действие данного фактора носит системный характер, особенно при обслуживании протяженных и территориально разнесенных трубопроводных сетей, и может быть выражено в виде соответствующего показателя (коэффициента)  $K_{\text{орг}}$ , представляющего собой отношение объемов фактически выполняемых работ к регламентируемым (минимально обязательным) работам.

2. Проведено исследование динамики показателя организационно-логистического фактора  $K_{\text{орг}}$  с использованием имеющих высокую актуальность и прогностический потенциал методов анализа временных рядов. Предложена аддитивная тренд-циклическая модель ряда, чувствительная к влияниям на процесс технического обслуживания эффектов от структурных перестроек, внедрения технических новшеств и изменений в мотивации работников. Построенная модель удовлетворяет общепринятым показателям качества, точности и адекватности.

3. Предложено объяснение причин колебательного характера результирующего действия организационно-логистического фактора, имеющих место в сложности организационно-территориальной структуры газового хозяйства, неоднородности условий логистики для различных сегментов газораспределительной сети и наложении частных эффектов от внешних импульсов различного (управленческого, организационного, технического) происхождения.

4. Выполнен точечный среднесрочный прогноз объемов работ по КПО стальных подземных распределительных газопроводов в целом по газораспределительной системе страны на пятилетний цикл 2024–2028 гг., применимый для расчета отраслевых плановых показателей. Предлагаемая авторами методика прогнозирования может быть использована для планирования работ по техническому обслуживанию различных систем и объектов инженерной инфраструктуры, что имеет непосредственную практическую значимость.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Правила обеспечения промышленной безопасности в области газоснабжения Республики Беларусь. Минск: ГИПК «ГАЗ-ИНСТИТУТ», 2023. 185 с.
2. СТП 03.05–2014. Система технического обслуживания и ремонта систем газоснабжения. Периодическое приборное техническое обследование стальных подземных газопроводов. Минск: УП «НОТ», 2014. 17 с.
3. Дуброва, Т. А. Статистические методы прогнозирования / Т. А. Дуброва. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. 206 с.
4. Хацкевич, Г. А. Эконометрика: учебник / Г. А. Хацкевич, Т. В. Русилко. Минск: РИВШ, 2021. 452 с.
5. Лаптева, Е. В. Статистические методы оценки принятия управленческих решений / Е. В. Лаптева, Л. В. Золотова. Оренбург: ООО ИПК «Университет», 2015. 115 с.

6. Введение в анализ временных рядов: учеб. пособие для вузов / Н. В. Артамонов [и др.]; Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Московская школа экономики. Вологда: ВолНЦ РАН, 2021. 134 с.
7. Сидоров, С. Г. Анализ временных рядов как метод построения прогноза потребления электроэнергии / С. Г. Сидоров, А. В. Никологорская // Вестник ИГЭУ. 2010. № 3. С. 1–3.
8. Малышев, Е. А. Повышение эффективности энергопотребления в бюджетной сфере региона / Е. А. Малышев // Региональная экономика: теория и практика. 2007. № 7. С. 99–108.
9. Бугаева, Т. М. Современные методы планирования энергосистемы города / Т. М. Бугаева, О. В. Новикова // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 4. С. 377–387. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-377-387>.
10. Прогнозирование часов пик энергопотребления региональных энергосистем / С. Р. Саитов [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2024. Т. 67, № 1. С. 78–91. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-1-78-91>.
11. Энциклопедия статистических терминов. Т. 1: Методологические основы статистики. М.: Федеральная служба государственной статистики, 2011. 183 с.
12. ГОСТ 10518–88. Системы электрической изоляции. Общие требования к методам ускоренных испытаний на нагревостойкость. М.: Гос. комитет СССР по стандартам, 1988. 28 с.
13. ГОСТ Р 51372–99. Методы ускоренных испытаний на долговечность и сохраняемость при воздействии агрессивных и других специальных сред для технических изделий, материалов и систем материалов. М.: Изд-во стандартов, 2000. 59 с.
14. ГОСТ Р ИСО 5275–2–2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Ч. 2. М.: Изд-во стандартов, 2002. 51 с.
15. Садовникова, Н. А. Анализ временных рядов и прогнозирование: учеб.-метод. комплекс / Н. А. Садовникова, Р. А. Шмойлова. М.: Ун-т Синергия, 2016. 151 с.
16. Трофимец, А. А. Аналитическое выравнивание временных рядов: теоретические аспекты / А. А. Трофимец, Е. Н. Трофимец // Актуальные научные исследования в современном мире. 2021. № 11–3 (79). С. 262–267.
17. Громова, Н. М. Основы экономического прогнозирования / Н. М. Громова, Н. И. Громова. М.: Академия естествознания, 2007. 112 с.
18. Воскобойников, Ю. Е. Эконометрика в Excel. Ч. 2: Анализ временных рядов: учеб. пособие / Ю. Е. Воскобойников. Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2008. 156 с.
19. Струцкий, Н. В. Некоторые вопросы обеспечения полноты и достоверности эксплуатационных данных, получаемых в ходе приборного обследования стальных подземных газопроводов / Н. В. Струцкий, В. Н. Романюк // Наука и техника. 2024. Т. 23, № 1. С. 58–66. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-1-58-66>.
20. Большакова, Л. В. Проблемы использования средней ошибки аппроксимации в качестве критерия адекватности регрессионной модели / Л. В. Большакова, А. В. Грачев // Региональная информатика и информационная безопасность: материалы междунар. науч.-практ. конф. (Санкт-Петербург, 26–28 октября 2016 г.). Санкт-Петербург: Изд-во Санкт-Петербург. общества информатики, вычислительной техники, систем связи и управления, 2016. С. 162–164.

Поступила 17.10.2023    Подписана в печать 19.12.2023    Опубликовано онлайн 29.03.2024

#### REFERENCES

1. *Rules for Ensuring Industrial Safety in the Field of Gas Supply of the Republic of Belarus*. Minsk, GAZ-INSTITUT, 2023. 185 (in Russian).
2. STP 03.05–2014. *The System of Technical Maintenance and Repair of Gas Supply Systems. Periodic Instrument Technical Inspection of Steel Underground Gas Pipelines*. Minsk, UE “NOT”, 2014. 17 (in Russian).
3. Dubrova T. A. (2003) *Statistical Methods of Forecasting*. Moscow: UNITY-DANA Publ. 206 (in Russian).



4. Khatskevich G. A., Rusilko T. V. (2021) *Econometrics*. Minsk, National Institute for Higher Institute. 452 (in Russian).
5. Lapteva E. V., Zolotova L. V. (2015) *Statistical Methods for Evaluating Managerial Decision-Making*. Orenburg, Universitet Publ. 115 (in Russian).
6. Artamonov N. V., Ivin E. A., Kurbatsky A. N., Fantazzini D. (2021) *Introduction to Time Series Analysis: a Textbook for Universities*. Vologda, Vologda Research Center of the Russian Academy of Sciences. 134 (in Russian).
7. Sidorov S. G., Nikologorskaya A. V. (2010) Time Series Analysis as a Method of Forecasting Electricity Consumption. *Vestnik IGEU*, (3), 1–3 (in Russian).
8. Malyshev E. A. (2007) Improving the Efficiency of Energy Consumption in the Budgetary Sphere of the Region. *Regional Economics: Theory and Practice*, (7), 99–108 (in Russian).
9. Bugaeva T. M., Novikova O. V. (2019) Modern Methods of Urban Energy System Planning. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (4), 377–387. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-377-387> (in Russian).
10. Saitov S. R., Chichirova N. D., Filimonova A. A., Karnitsky N. B. (2024) Forecasting Peak Hours for Energy Consumption in Regional Power Systems. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (1), 78–91. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-1-78-91> (in Russian).
11. *Encyclopedia of Statistical Terms. Vol. 1. Methodological Foundations of Statistics*. Moscow, Federal State Statistics Service, 2011. 183 (in Russian).
12. State Standard 10518–88. *Electrical Insulation Systems. General Requirements for Accelerated Heat Resistance Testing Methods*. Moscow, USSR State Committee for Standards, 1988. 28 p. (in Russian).
13. State Standard of Russia 51372–99. *Methods of Accelerated Tests for Durability and Persistence under the Influence of Aggressive and Other Special Media for Technical Products, Materials and Material Systems*. Moscow, Publishing House of Standards, 2000. 59 (in Russian).
14. State Standard of Russia ISO 5275-2-2002. *Accuracy (Correctness and Precision) of Measurement Methods and Results. Part 2*. Moscow, Publishing House of Standards, 2022. 51 p. (in Russian).
15. Sadovnikova N. A., Shmoylova R. A. (2009) *Time Series Analysis and Forecasting*. Moscow, University “Synergy”. 264 (in Russian).
16. Trofimets A.A., Trofimets E.N. (2021) Analytical Alignment of Time Series: Theoretical Aspects. *Aktual'nye Nauchnye Issledovaniya v Sovremennom Mire*, (11–3), 262–267 (in Russian).
17. Gromova N. M., Gromova N. I. (2007) *Fundamentals of Economic Forecasting*. Moscow, Academy of Natural Sciences. 112 (in Russian).
18. Voskoboynikov Yu. E. (2008) *Econometrics in Excel. Part 2. Time Series Analysis*. Novosibirsk, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (SIBSTRIN). 156 (in Russian).
19. Strutsky N. V., Romaniuk V. N. (2024) Some Issues of Ensuring Completeness and Reliability of Operational Data Obtained in the Course of Instrument Inspection of Steel Underground Gas Pipelines. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 23 (1), 58–66. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2024-23-1-58-66> (in Russian).
20. Bolshakova L. V., Grachev A. V. (2016) Problems of Using the Average Approximation Error as a Criterion for the Adequacy of the Regression Model. *Regional'naya Informatika i Informatsionnaya Bezopasnost': Materialy Mezhdun. Nauch.-Prakt. Konf. (Sankt-Peterburg, 26–28 Oktyabrya 2016 g.)* [Regional Informatics and Information Security: Materials of International Scientific-and-Practical Conference (St. Petersburg, October 26–28, 2016)]. St. Petersburg, Publishing House of the St. Petersburg Society of Informatics, Computer Technology, Communication and Control Systems, 162–164 (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-152-172>

УДК 004.4+621.1+621.373.8

## Динамические процессы развития трещиноватости фрактального типа: модели для твердотельного материала камеры энергетической установки в процессе ее эксплуатации

Т. В. Рыжова<sup>1)</sup>, Д. Н. Бухаров<sup>2)</sup>, М. М. Аракелян<sup>3)</sup>, С. М. Аракелян<sup>2)</sup>

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

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

<sup>3)</sup>Ереванский государственный университет (Ереван, Республика Армения)

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

**Реферат.** Исследованы закономерности формирования и развития дефектов в ответственных металлических деталях и элементах машиностроения, включая энергоустановки и тепловые машины разного класса. Рассмотрены вопросы динамических процессов развития микро- и нанотрещиноватых структур фрактального типа от очагов напряжения в твердотельном материале/металле внутренней камеры с рабочим веществом энергетических устройств в условиях разных режимов их функционирования. При этом регулярность, детерминированность и стохастичность может реализовываться по разным хорошо известным сценариям, что проиллюстрировано на примере ряда режимов. Обсуждается также возможность развития дислокаций и обратимости таких процессов – образования неоднородностей и трещин. Проанализированы модификации и развитие 3D-трещиноватой структуры в материале с использованием простых аналитических соотношений с соответствующими топологическими отображениями внутри материала с выходом фрактальных объектов на поверхность камеры. Хотя проведенный анализ является модельным в общей постановке с известными алгоритмами представления, тем не менее он основан на соответствующих физических принципах, имеет явное практическое значение в аспекте определения тенденций и направлений для оценки надежности и долговечности работы подобных установок. Все это позволяет на качественном уровне оценивать тенденцию в развитии неустойчивостей и дефектов, которые могут приводить в конечном итоге к разрушению твердотельной рабочей камеры различных энергетических установок. Наличие достоверной базы данных по их характеристикам и по режимам работы рабочего вещества в реальных условиях с численными параметрами должно позволить в рамках рассмотренных представлений осуществлять предсказательное моделирование и прогноз долговечности безопасной и устойчивой работы подобных устройств и управлять их режимами с учетом соответствующего метрологического обеспечения.

**Ключевые слова:** динамические процессы, фрактальные модели, поверхностные дефекты и трещиноватые структуры, управляемые процессы, надежность работы энергетических тепловых установок

**Для цитирования:** 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*. 2023. Т. 67, № 2. С. 152–172. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-67-2-152-172>

---

### Адрес для переписки

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

---

## Dynamic Processes of Development Jointing of a Fractal Type: Models for a Solid-State Material of the Chamber in a Power Facility during its Operation

T. V. Ryzhova<sup>1</sup>), D. N. Bukharov<sup>2</sup>), M. M. Arakelian<sup>3</sup>), S. M. Arakelyan<sup>2</sup>)

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

<sup>2</sup>)Vladimir State University A. G. and N. G. Stoletovs (Vladimir, Russian Federation),

<sup>3</sup>)Yerevan State University (Yerevan, Republic of Armenia)

**Abstract.** The patterns of formation and development of defects in critical metal parts and elements of mechanical engineering, including power plants and heat engines of various classes, have been studied. The issues of dynamic processes of development of micro- and nanojointing structures of a fractal type from stress points in the solid material/metal of the internal chamber with the working substance of energy devices under conditions of different modes of their functioning are considered. At the same time, regularity, determinism and stochasticity can be realized according to various well-known scenarios, which is illustrated by the example of a number of modes. The possibility of dislocation development and reversibility of such processes, such as the formation of inhomogeneities and cracks, is also discussed. The modifications and development of the 3D fractured structure in the material are analyzed using simple analytical relations with the corresponding topological mappings inside the material with the emergence of fractal objects on the surface of the chamber. Although the analysis carried out is a model in the general formulation with known representation algorithms, nevertheless it is based on relevant physical principles and has obvious practical significance in terms of determining trends and directions for assessing the reliability and durability of such installations. All this makes it possible to qualitatively assess the trend in the development of instabilities and defects, which can eventually lead to the destruction of the solid-state working chamber of various power plants. The availability of a reliable database of their characteristics and operating modes of the working substance in real conditions with numerical parameters should allow, within the framework of the considered concepts, to fulfil predictive modeling and prediction of the durability of safe and stable operation of such devices and control their modes, taking into account appropriate metrological support.

**Keywords:** dynamic processes, fractal models, surface defects and fractured structures, controlled processes, reliability of operation of thermal power plants

**For citation:** Ryzhova T. V., Bukharov D. N., Arakelian M. M., Arakelyan S. M. (2024) Dynamic Processes of Development Jointing of a Fractal Type: Models for a Solid-State Material of the Chamber in a Power Facility during its Operation. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (2), 152–172. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-152-172> (in Russian)

### Введение

Исследование закономерностей формирования и развития дефектов в ответственных металлических деталях и элементах машиностроения, включая энергоустановки и тепловые машины разного класса, представляет значительный интерес в аспекте надежности и долговечности их работы и предотвращения разрушительных процессов [1, 2]. Поскольку режимы функционирования таких систем с разным фазовым составом рабочего тела (газожидкостным, парогазовым и паротурбинным, реактивным и др.) обычно реализуются в условиях сильных вибраций и с комплексом сложных физико-химических превращений при нестационарных тепловых яв-

лениях с динамическими режимами с разными циклами и вибрациями, как это происходит, например, в рекуператорах разного назначения [3–5], то динамика развития неустойчивостей определенного типа в самом конструкционном материале энергетического оборудования требует детального рассмотрения и анализа в каждом конкретном случае при соответствующем метрологическом обеспечении для предотвращения выхода конструкции из строя.

Однако зарождение таких неоднородностей в металлах начинается в локализованных областях с пространственными масштабами в микро- и нанодиапазоне (ср.: [6–9]). То, какое топологическое развитие они получают в дальнейшем и за какое время, и есть предмет изучения и прогноза. Это требует проведения моделирования на соответствующих физических принципах таких динамических процессов образования дефектов с циклически повторяющимися напряжениями и движениями с определенной возможностью управления их развитием в аспекте как распространения на макромасштабы, так и остановки и даже восстановления – «заживления» (ср.: [10–12]). Подобные эффекты, приводящие к повреждениям исследуемого материала, обычно происходят от зарождения точечных дефектов с дальнейшим образованием трещиноватых структур разной топологии – как поверхностных, находящихся в контакте с рабочим веществом, так и объемных, связанных в том числе с усталостным разрушением материалов, в частности с коррозийным воздействием солевых растворов на металлические элементы установки в рассольного типа теплообмене [13, 14].

В [15, 16] акцент сделан на аналогии этих процессов с моделями лазерного воздействия на поверхность материалов с образованием сложных конфигураций фрактального типа открытого трещиноватого класса и замкнутых кластерных структур на твердой поверхности.

В настоящей фрагментарно обзорной работе предложен ряд достаточно универсальных моделей динамики развития подобных дефектов и протяженных неоднородностей в аспекте их предсказательного моделирования.

Детальное исследование мест возникновения, их распределения, размеров и динамики распространения на определенной поверхности рабочей камеры разрушительных процессов, связанных с режимами и циклическими работами теплоэнергетических установок, представляет ключевую проблему для корректной оценки и предупреждения причин нарушения устойчивости при их эксплуатации [17, 18]. Если мы говорим об исключительной роли рабочего вещества, возникает поразительный феномен в этой концепции: почему и при каких условиях газожидкостная смесь единовременно, в рабочих режимах, нештатно сосредоточивается на отдельном (даже небольшом) участке на поверхности [19, 20]?

Однако в практической деятельности существует большое количество других факторов, которые могут повлиять на процесс такой локализации, приводящих к различным динамическим явлениям. На основе этих утверждений можно сделать вывод о том, что проблема, связанная с режимами

работы, должна рассматриваться на более комплексном уровне и, в частности, с привлечением фундаментальных процессов нелинейной динамики [21, 22].

При этом определенный и часто неконтролируемый поток газожидкостной фазы на разного типа неоднородностях модифицируется и протекает также и по каналам 3D-сети имеющихся трещин разного масштаба в массиве камеры с влиянием ряда факторов. Анализ этих факторов, а также их роль в процессе реконструкции трехмерной сети трещин в аспекте реструктурирования транзитных путей для рабочего вещества при возникновении критических явлений позволяет понять реализующиеся состояния в рабочей камере [23, 24].

Используемые нами материалы и методы исследования связаны с представлением трехмерной сетевой 3D-системы твердотельной камеры, которая подвергается постоянным воздействиям. Это происходит по той причине, что на нее оказывают влияние многочисленные как изолированные и локализованные, так и комплексные явления взаимодействием по разным характеристикам (ср.: [15, 16]).

Неотъемлемое условие такого взаимодействия связано с наличием различных дефектов (трещин), которые сформировались на поверхности и в объеме камеры. Именно эти рассматриваемые объекты и устанавливают общий реализующийся режим работы.

Кроме того, колебания давления в камерах происходят по нескольким причинам, одной из которых является нестационарность процессов. В результате этих явлений циклически выделяется энергия, которая может разрушать твердую основу, не говоря уже о перестройке возникающей 3D-сети трещин и дефектов в ней, и оставляет после себя свободные незаполненные рабочим веществом пространства. Все это оказывает влияние, в том числе на удаленных временных интервалах, на перепад давления в камере, и создает новую структуру трехмерной сети и гидродинамических явлений внутри нее с возможностью последующего разрушения [25–27].

### **Фрактальная модель 3D-трещиноватости камеры с рабочим веществом – топология дефектов внутри материала с ее выходом на поверхность камеры**

Выполнено численное моделирование процесса формирования и модификации 3D-структуры трещиноватости в такой твердотельной системе, который может оказывать влияние на разрушительные процессы в камере (ср.: [15, 16, 28, 29]).

Данный механизм определяется возможностью стремительного выхода на поверхность камеры и объемных дефектов благодаря уже ранее упомянутым двум факторам – динамике изменения давления в трехмерной сети трещин и трансформации ее топологии в соответствующих пространственных локациях.

Основная задача при этом заключается в том, чтобы выявить и детально рассмотреть факторы, а также их роль в процессе такой модификации трехмерной сети неоднородностей в аспекте происходящего реструктурирования транзитных путей распространения рабочего вещества по ним, приводящих к возникновению критических состояний (рис. 1) (ср.: [30–32].

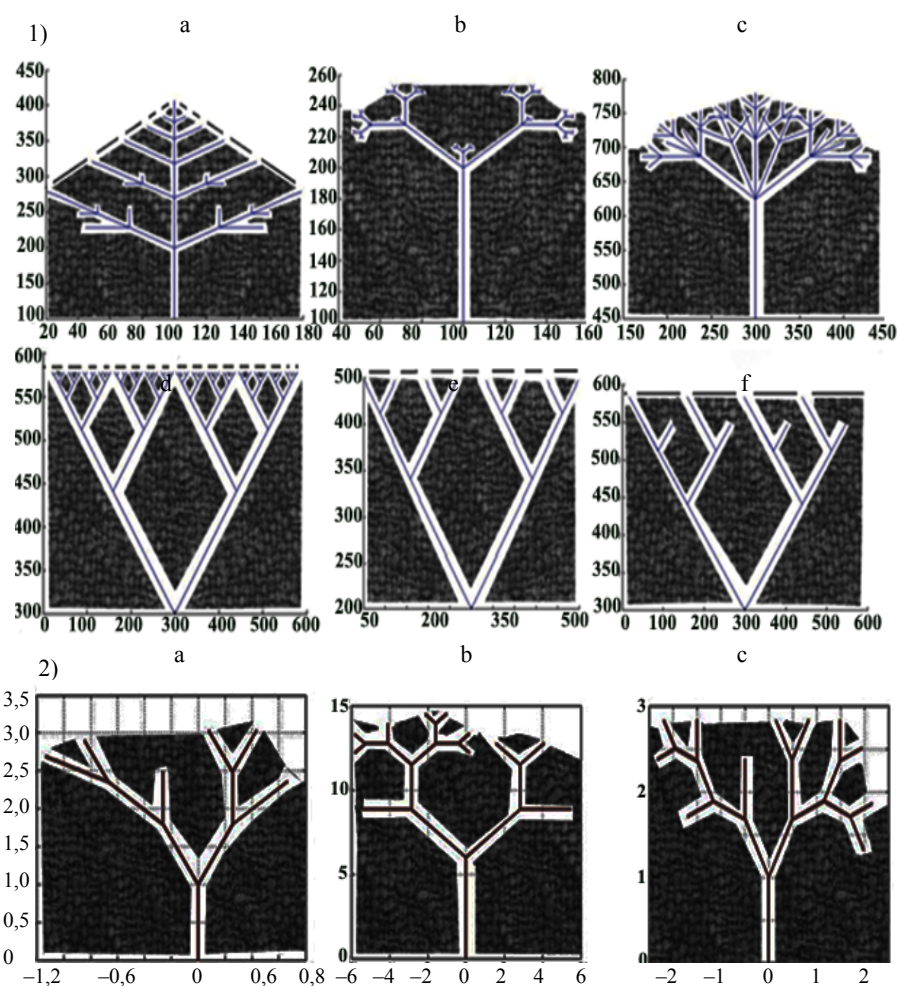


Рис. 1. Детерминированные модели «фрактальных деревьев» – графов, трещиноватости твердотельной основы рабочей камеры, по которым осуществляется транзит газожидкостной смеси (1): а – «основная ветвь»; б – «ветвь при вершине»; с – «ветвь при вершине F-образной формы»; d – насыщенный V-образный граф; е – V-образное дерево с меньшим количеством ветвей; f – дерево с левым доминированием ветвей; 2 – примеры случайных моделей в зависимости от углов формирования ветвей графа (варианты а, б, с)

Fig. 1. Deterministic models of "fractal trees" – graphs, jointings of the solid-state base of the working chamber, through which the gas-liquid mixture is transited (1): a) "main branch"; b) "branch at the top"; c) "branch at the top of an F-shape"; d) saturated V-shaped graph; e) V-shaped tree with fewer branches; f) a tree with left-dominated branches. (2) Examples of random models depending on the angles of formation of graph branches (options a, b, c)

Анализ таких данных предоставляет возможность не только вести речь об исследовании разного рода воздействий, но и сравнивать их на качественном и количественном уровне для конкретной 3D-сетевой структуры объемной трещиноватости/дефектности с выходом ее из объема на внутреннюю поверхность камеры за определенное время с использованием алгоритмов в среде языков программирования высокого уровня (рис. 2) (ср.: [15, 16, 29, 30]).

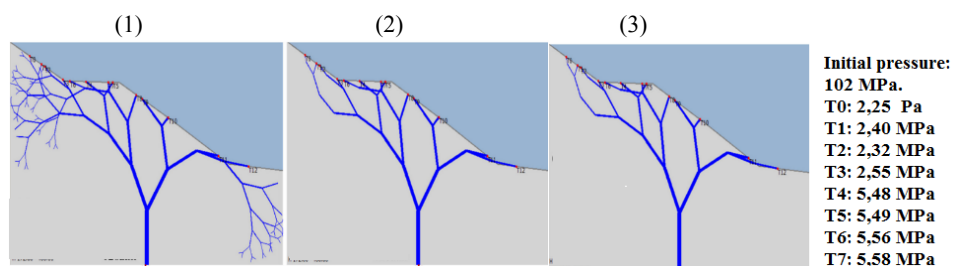


Рис. 2. Моделирование трещиноватости, реализованное в программе Midas GTS, в твердотельном объеме с выходом на поверхность камеры разного профиля (варианты 1–3; 2, 3 – с учетом разного времени формирования)

Fig. 2. Modeling of jointing, implemented in the Midas GTS program, in a solid-state volume with passage to the surface of a chamber of different profiles (1–3 options types, the last two ones – taking into account different terms of formation)

Используемый нами программный комплекс Midas GTS выполняет следующие функции: 1) формирует сетку новых трещин; 2) снимает напряжение с краевых ветвей графа, выходящих наружу; 3) вычисляет и фиксирует показатели давления жидкости в различных объемных зонах интерфейсной карты, в том числе и на ее выходе [28–32].

Дифференциальная диагностика отмеченных факторов, оказывающих первостепенное воздействие на формирование и распространение неустойчивых процессов и, в частности, их корреляция и взаимодействие между собой, является основой в сложноорганизованной процедуре прогнозирования, которая может определить локальную область зарождения критических явлений, а также их координацию при распространении на определенном участке поверхности. Безусловно, эти задачи могут быть решены только тогда, когда будут выявлены и получены подробные метрологические данные об исследуемом устройстве и, в частности, о форме его внутренней поверхности, структуре газо- и гидросистемы в целом и ее резервуаров, объеме проходящей газожидкостной смеси, а также о мощности и частоте возникновения различных режимов работы. Это позволит в оперативном порядке отслеживать ситуацию и составлять прогноз о характеристиках зарождающихся неоднородностей в условиях функционирующих процессов, влияющих на развитие критических явлений, а в итоге и сформировать комплекс мероприятий по обеспечению безопасности работы устройства в определенное время в потенциально опасных режимах его эксплуатации. Кроме того, это должно позволить смоделировать процесс

развития возможной катастрофы в динамике в соответствии и по аналогии с функционально разными газовыми и гидравлическими схемами работы теплоэнергетической установки.

Предсказать точное время наступления того или иного катастрофического события практически невозможно. Это происходит по причине того, что невозможно иметь исчерпывающую базу данных в реальном масштабе времени при наличии огромного количества факторов, которые при непрерывном взаимодействии друг с другом, а также с естественными и наведенными характеристиками оказывают стохастическое динамическое нелинейное влияние на зарождение рассматриваемого критического процесса. Проблема также заключается в том, что ни один программный комплекс ситуационного моделирования не может этот процесс рассчитать полноценно для реализации программно-аналитического управления. Но такой прогноз с вероятностью с определенным весом по складывающимся обстоятельствам вполне реален и представляет значительный интерес. Наш опыт позволил это делать с использованием нейросетевого подхода как элемента систем искусственного интеллекта, но с соответствующей полноценной процедурой их обучения и настройки [7, 31].

Однако если мы говорим о временном интервале развития события, то эта задача становится более корректной и определенной в условиях значимой и выявленной корреляционной зависимости, например между режимами работы и требуемой мощностью при различных нагрузках в энергетической сети. По результатам такого анализа данная корреляция может проявляться с задержкой в течение некоторого времени после наступления нештатной ситуации. Это происходит, например, под действием импульсного процесса высокого давления в рабочей камере и приводит к долговременным перегрузкам в работе энергетического устройства.

В рамках данного подхода можно провести аналогию с хорошо известными пневмо- и газогидравлическими системами, для которых разработаны детальные математические модели управления газовыми и гидрологическими режимами в требуемых направлениях с учетом необходимого метрологического контроля [32, 33].

Систематическое рассмотрение данной проблематики требует знания полноценной информационной картины в динамике, наряду с метрологическими условиями, в первую очередь о таких процессах, как количественный уровень газожидкостной смеси в резервуарах (на основе мониторинга с помощью анализа ее состояния, например датчиками в удаленном доступе), а также о структуре 3D-сети дефектов/трещин в объеме, их поверхностных особенностях. Данные о вариации давлений в камере до и после выбранных по влиянию изменяющихся режимов (в том числе в рамках определенного технологического процесса), могут определять характеристики самого произошедшего нештатного события (ср.: [34, 35]).

Уникальное явление при этих процессах может быть связано с процессами реконструкции твердой структуры, подверженной трещиноватости,



в самопроизвольном формате, но при динамически развивающихся процессах.

Действительно, если смотреть во временной проекции на рис. 1, 2 как берущий свое начало из источника напряжения в объеме материала (исходные точки на нижней границе рисунков), то в динамике их трансформация может происходить по разным направлениям, в том числе и без выхода на рабочую поверхность камеры (тупиковые/скрытые ветви в объеме твердого тела), которая в этом случае будет становится бездефектной. При этом данный процесс может быть управляемым с использованием разных метрологических методов для реализации требуемого воздействия с помощью соответствующих управляющих параметров.

Такой эффект хорошо известен (например, его моделирование в [11]) и недавно наблюдался экспериментально в наноструктурированных металлических поверхностях [10].

Подобное самопроизвольное «залечивание» трещин происходит при локально возникающих внутренних давлениях на границах неоднородностей, особенно в гранулированных структурах, при их случайной миграции. Эта своего рода холодная сварка особенно сильно проявляется на кончиках фрактальных структур и является отражением трещиноватой структуры как открытой системы с происходящими динамическими процессами геометрической перестройки в различные топологические конфигурации. Именно их тип, показанный на рис. 1–2, и подвержен таким процессам (ср. с аналогичными изображениями в [10]). Необходимые условия для этого модельно обсуждаются в [11] для нанокристаллических металлов с учетом неоднородностей/шероховатостей гранулированной структуры и при развитии разного типа дислокаций. Мы этот динамический процесс рассмотрим ниже.

### **1. Модель клеточного автомата для анализа распространения протяженных неоднородностей от локализованного источника напряжений**

Для распространения определенной конфигурации трещиноватости на поверхности твердотельной структуры рабочей камеры теплоэнергетической установки воспользуемся хорошо известной методологией клеточного автомата [36–39], которую использовали в [15, 16].

Результаты, полученные нами в рамках данного алгоритма, представлены на рис. 3–6 в относительных единицах для предмета рассмотрения в настоящей статье без детального описания, но с выявленной динамикой распространения пространственно-распределенной неоднородности и с соответствующими начальными условиями (будем эти объекты неоднородности называть для краткости признаком).

Предложенная модель позволяет задавать следующие параметры: площадь расчетной области, которая составляет количество агентов ( $N$ ); величины  $\beta$  и  $\gamma$  – вероятности принятия или непринятия признака, соответ-

ственно;  $T$  – время. Возможно также задание различных начальных состояний модели, которое реализуется через определение начальной точки, – источника и/или границ – для распространения признака по поверхности объекта (участка образца).

На рис. 3 представлены варианты, когда распространение признака начинается из углов расчетной области, что соответствует возникновению дефекта на краях поверхности участка образца и/или на граничных контактах с другими областями поверхности, где уже существует данный признак (дефект/неоднородность). В этом случае наблюдается небольшая скорость распространения признака по поверхности объекта.

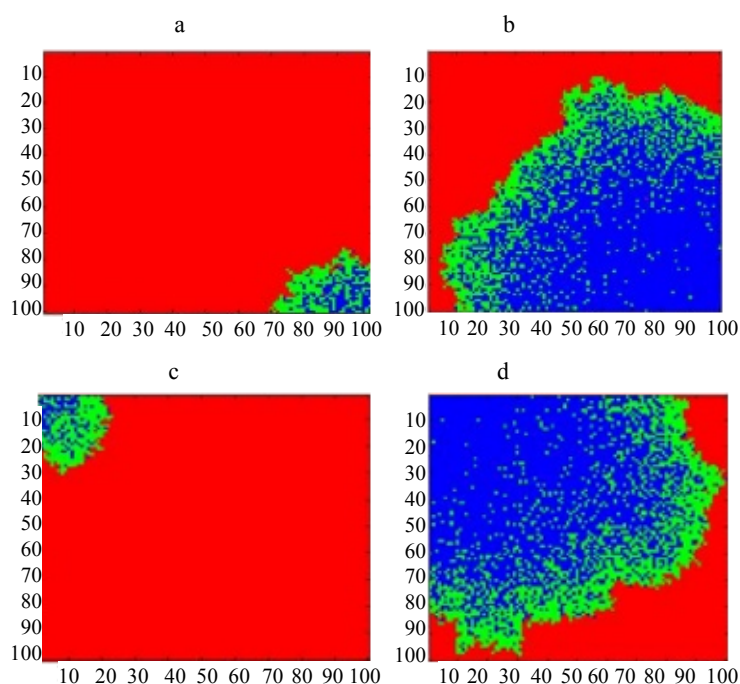


Рис. 3. Решение модели распространения признака методом клеточного автомата для:  $\beta = 0,029$ ,  $\gamma = 0,01$ ,  $N = 10000$ ; а –  $T = 100$  о. е., нижний правый угол; б – 500 о. е., нижний правый угол; с – 100 о. е., верхний левый угол; д – 500 о. е., верхний левый угол

Fig. 3. Solution of the feature propagation model by the cellular automaton method for:  $\beta = 0.029$ ,  $\gamma = 0.01$ ,  $N = 10000$ ; а –  $T = 100$  relative units, lower right corner; б – 500 relative units, lower right corner; с – 100 relative units, upper left corner; д – 500 relative units, upper left corner

На рис. 4 представлены варианты, когда распространение признака начинается с одной из границ расчетной области, что соответствует контакту исследуемого участка с внешней границей к области с данным признаком. В этом случае наблюдается наибольшая скорость распространения признака по поверхности участка.

Анализируя такие разные варианты расчета распространения признака, начинающегося из углов и/или от границ расчетной области, можно пред-

положить, что они соответствуют случаям проникновения признака извне, например приток дефектов из соседних областей при контакте образца с потоком дефектов на плоскости из соседних областей, подверженных какому-то воздействию (внешнему и/или внутреннему из-за соответствующего технологического режима).

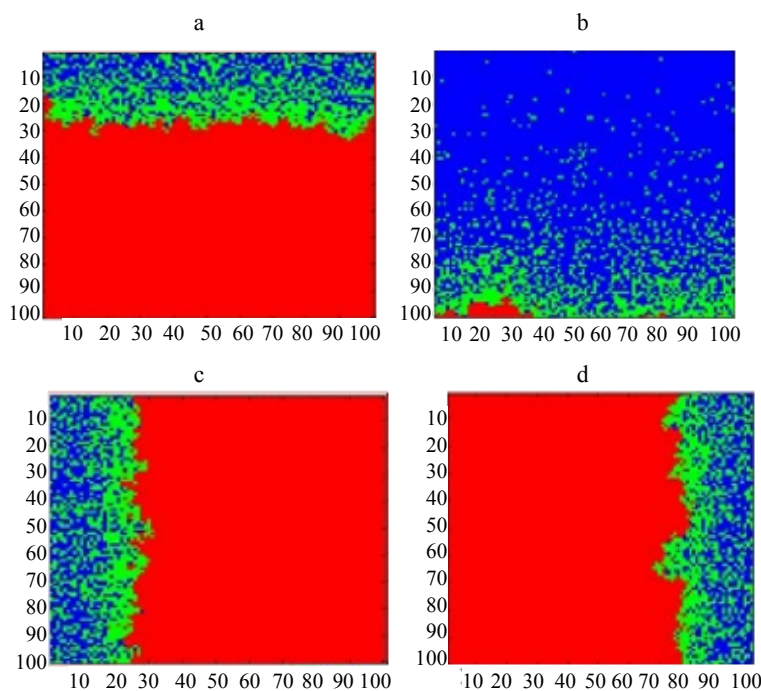


Рис. 4. Решение модели распространения признака методом клеточного автомата для:  $\beta = 0,029$ ,  $\gamma = 0,01$ ,  $N = 10000$ ; а –  $T = 100$  о. е., верхняя граница расчетной области; б – 500 о. е., нижняя граница; с – 100 о. е., левая граница; д – 100 о. е., правая граница

Fig. 4. Solution of the feature propagation model by the cellular automaton method for:  $\beta = 0.029$ ,  $\gamma = 0.01$ ,  $N = 10000$ ; а –  $T = 100$  relative units, upper boundary the computational domain; б – 500 relative units, lower boundary; с – 100 relative units, left boundary; д – 100 relative units, right boundary

Из рис. 5 можно оценить влияние начальных условий. Здесь эти начальные условия представляют собой область радиуса  $r$ , т. е. исходное количество взаимодействующих фрагментов / локальных неоднородностей на поверхности участка образца, принявших рассматриваемый признак (под воздействием каких-то разных причин). Такой подход позволяет оценить (с учетом числа начальных фрагментов на поверхности участка образца с данным признаком) относительное время  $T$  его распространения (число шагов при расчете). Таким образом, благодаря выбранным начальным условиям состояния поверхности (в условиях работы установки) результирующее распределение признака имеет более сильно изрезанные границы, что требует анализа с учетом величины фрактальной размерности.

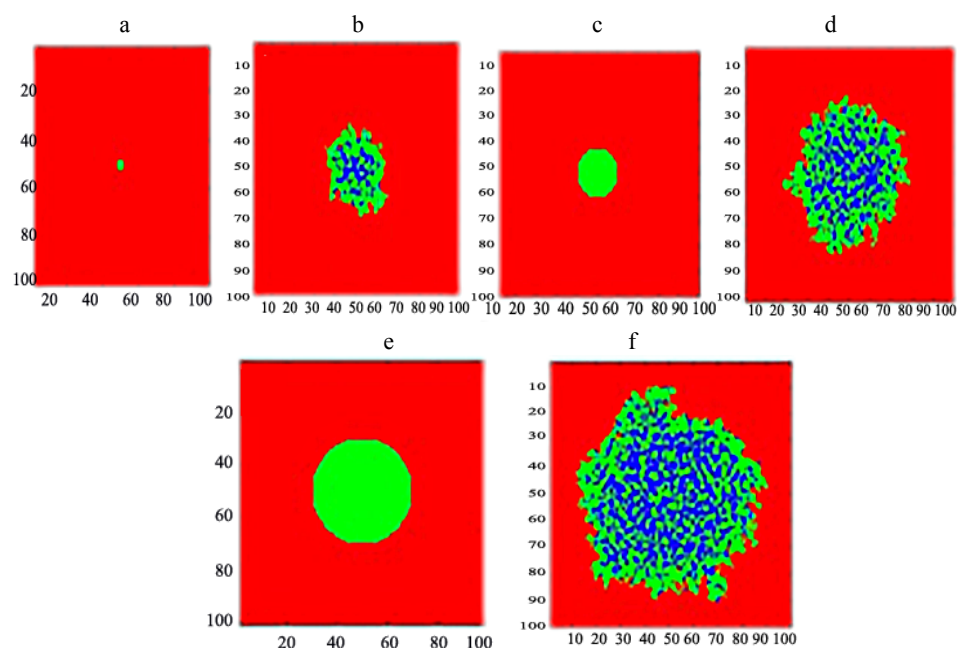


Рис. 5. Начальные условия и решение – изображение для области распространения изучаемого признака состояния: а – начальные условия  $r = 2$  о. е.,  $T = 4$  о. е.; б – соответствующее решение, но для  $T = 100$  о. е.; с – начальные условия  $r = 10$  о. е.,  $T = 4$  о. е.; д – соответствующее решение, но для  $T = 100$  о. е.; е – начальные условия  $r = 20$ ;  $T = 4$ ; ф – соответствующее решение, но для  $T = 100$  о. е.

Fig. 5. Initial conditions and solution – image for the distribution area of the studied state sign: а – initial conditions  $r = 2$  in rel. units,  $T = 4$  in rel. units; б – the corresponding solution but for  $T = 100$ ; с – initial conditions  $r = 10$ ,  $T = 4$ ; д – the corresponding solution, but for  $T = 100$ ; е – initial conditions  $r = 20$ ;  $T = 4$ ; ф – the corresponding solution, but for  $T = 100$

Сравнивая площади фигур, задающих начальные условия и соответствующие результаты расчета, становится возможным провести оценку роста/развития, например, по поверхности признака/состояния – определенного дефекта. Гистограмма такого процесса представлена на рис. 6.

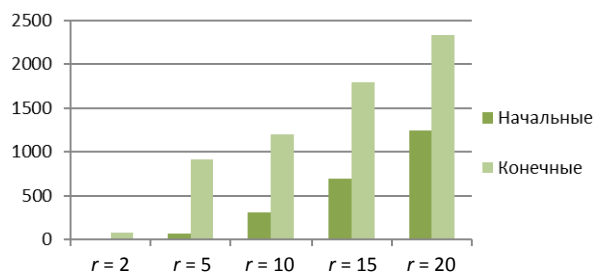


Рис. 6. Индекс роста состояния/признака по поверхности образца (в зависимости от значения параметра  $r$  – зоны образовавшегося дефекта из-за воздействия) во времени через  $T$  шагов (в о. е.)

Fig. 6. Index of growth of a state/feature on the surface of the sample (depending on the value of the parameter  $r$  – the zone of the defect formed due to the impact) in time through  $T$  steps (in relative units)

Из приведенных рисунков видна зависимость изменения характера картины для развития признака/состояния – неоднородностей от размера начальных областей – источников дефектов, возникших по разным причинам, в том числе и находящихся под внешним воздействием – распространение признака для фиксированного (в о. е.) времени  $T$ . Например, наибольшая скорость распространения критического состояния наблюдается при внесении признака в систему извне через протяженную границу с большим числом дефектов – воздействием. Предложенный подход позволяет в первом приближении качественно оценить и проиллюстрировать характер процессов при поверхностных модификациях структур и/или процессах разрушения для экстремального воздействия в разных геометриях и схемах. Основываясь на предложенных моделях, можно оценить относительные темпы роста, например, различных гидродинамических дефектов на поверхности образца.

Таким образом, нами предложен алгоритм для прогнозирования развития новых физических состояний на поверхности изделий, находящихся под внешним воздействием, при соответствующем выборе ключевых управляющих параметров для рассматриваемых процессов. Проблема состоит в переходе от относительных единиц для этих параметров к конкретным их численным значениям в реально используемой схеме и выбранных рабочих условиях. Это и есть центральный пункт при использовании данного подхода в конкретных приложениях по управляемой модификации поверхности материалов и разработке соответствующих практических элементов.

### **Влияние деформационных дислокаций на параметры возникающей трещиноватости**

В связи с внешним воздействием (в частности, из-за технических рабочих вибраций процессов разной интенсивности) на 3D-трещиноватость материала энергетической установки следует хотя бы кратко рассмотреть ее деформационную модификацию по механизму роста плотности дислокаций в процессе деформирования на основе микроподхода в условиях накопления деформации [19–22, 40–42]. Именно эти процессы сильно влияют на степень воздействия газожидкостного рабочего вещества на прочность камеры в процессе ее рабочих циклов. При этом присутствие различных неоднородностей и полостей внутри камеры может явиться дополнительным источником дислокаций и способствовать как разрушению ее материала, так и упрочнению.

Однако в условиях шероховатости поверхности трещин в точках их контакта друг с другом возникают экстремальные локальные напряжения/давления, на несколько порядков превышающие напряжения внутри однородного материала. Это определяет пиковые режимы разгрузки, приводящие к экстремальным условиям для таких динамических параметров трещиноватости. Данные центры генерации дислокаций обусловлены наличием внешнего упругого воздействия (в частности, из-за определен-

ных режимов эксплуатации) и могут кардинально изменять режимы баланса рабочего вещества в 3D-структуре энергетической установки.

Приведем только несколько из полученных нами качественных демонстрационных численных результатов для генезиса дислокаций в рамках модели нелинейной динамической системы с уравнением синус-Гордона с учетом влияния барьера/границы Пайерса [21, 23, 43–45]. Речь будет идти только о демонстрационных зависимостях без конкретных количественных реальных численных данных, которые должны уточняться для каждого конкретного состава и структуры тепловой машины.

В рамках одномерной модели дислокации (в координатах как пространственных  $x$ , так и временных  $t$ ) Френкеля – Конторовой движение дислокаций описывается уравнением синус-Гордона [41, 43, 44]

$$\varphi_{tt} - c_0^2 \varphi_{xx} + \omega_0^2 \sin \varphi = 0,$$

где  $c_0$  – скорость звука (предельная скорость в упругой среде);  $\omega_0$  – характерная частота внешнего вибровоздействия;  $\varphi$  – отклонение дефекта в материале от положения равновесия в угловых единицах, вторые производные для  $\varphi$  по координатам  $x$  и по времени  $t$  обозначены двойными индексами  $(xx)$  и  $(tt)$  соответственно. Моделирование проведено в относительных единицах в окрестности дислокации для самой дислокации ( $\varepsilon$ ) и для возникающих напряжений ( $s$ ).

Граничные условия заключаются в том, что область, в которой распространяется дислокация, считается открытой на обоих концах,

$$\text{т. е. } \left[ \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right]_{x=0} = \left[ \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right]_{x=l} = 0, \text{ где } l - \text{безразмерная длина рассматриваемой}$$

области, которую мы считаем для простоты в виде плоского слоя.

Полученные численные решения выписанного уравнения в графическом виде представлены на рис. 7 для отмеченных выбранных численных параметров (в у. е. указаны на рисунках).

Из рис. 7 видно, что поле деформаций является осциллирующим и уменьшается при удалении от линии дислокации. Поле напряжений не имеет решений в данном приближении вблизи ядра дислокации (ср. с: [43, 44]).

Численный эксперимент для движения дислокаций и их взаимодействия в некотором интервале исследуемых скоростей провели для относительно малых скоростей (на практике  $\sim 10^{-3}$  см/с) (рис. 8). Мы считаем, что при взаимодействии дислокаций одна из них заменяется ее упругим полем, и рассматривается воздействие этого поля на соседнюю дислокацию. Дислокация, которая заменяется созданным ею полем, находится в начальный момент в начале координат ( $x = 0$ ), а изучается воздействие этой дислокации на единицу длины второй дислокации, имеющей координаты  $x, y$ . В данной модели предполагается, что дислокации совместно двигаются в одной плоскости в среде с одинаковыми скоростями (дислокации считаются одного знака, между которыми действуют силы отталкивания).

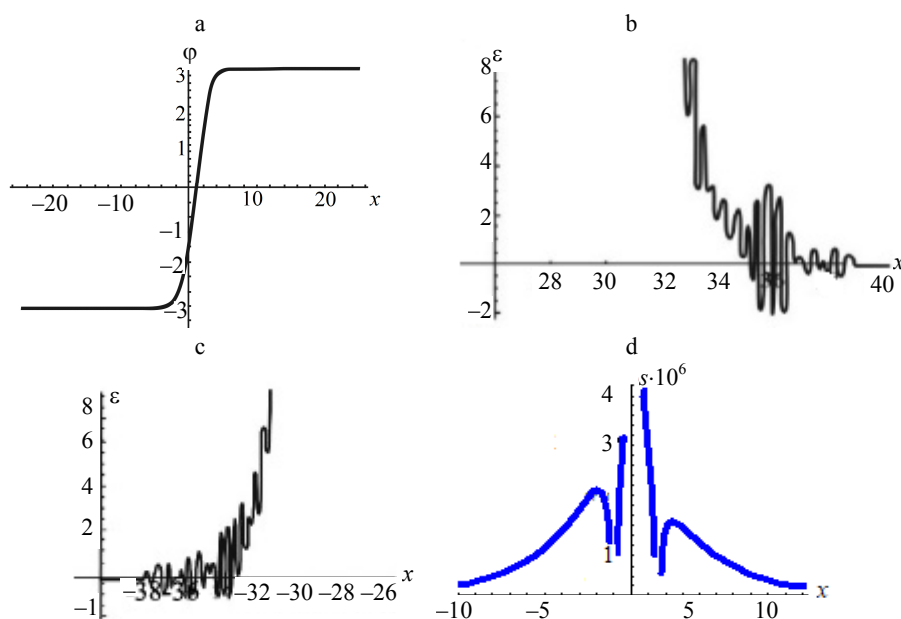


Рис. 7. Зависимости деформаций  $\varepsilon$  (b, c) и напряжения  $s$  (d) от координаты  $x$  в окрестности дислокации  $\phi$  (a)

Fig. 7. Dependences of strain  $\varepsilon$  (b, c) and stress  $s$  (d) on the  $x$  coordinate in the vicinity of dislocation  $\phi$  (a)

Анализ показывает, что при увеличении скорости движения взаимодействия между дислокациями ослабевает. Это видно при сравнении рис. 8, 9.

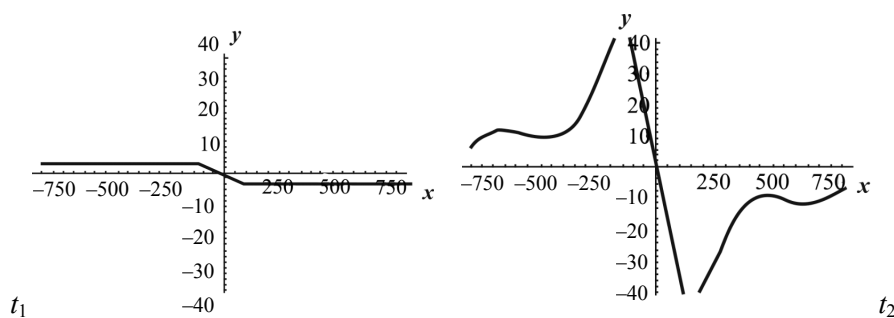


Рис. 8. Поле смещений дислокации по оси  $y$  (малые скорости  $\sim 10^{-3}$  см/с), находящейся под воздействием соседней дислокации, для последовательных двух моментов времени  $t_2 > t_1$

Fig. 8. Field of displacements of a dislocation along the  $y$ -axis (low velocities  $\sim 10^{-3}$  cm/s), under the impact of a neighboring dislocation, for two successive moments of time  $t_2 > t_1$

Действительно, как видно из рис. 8, под действием поля соседней дислокации поле данной дислокации искажается уже в течение небольшого интервала времени (в о. е.), то есть взаимодействие между дислокациями существенное.

Однако из дальнейшего численного эксперимента следует, что при увеличении скорости (на практике  $\sim 10^5$  см/с) взаимодействие между дислокациями ослабляется (рис. 9).

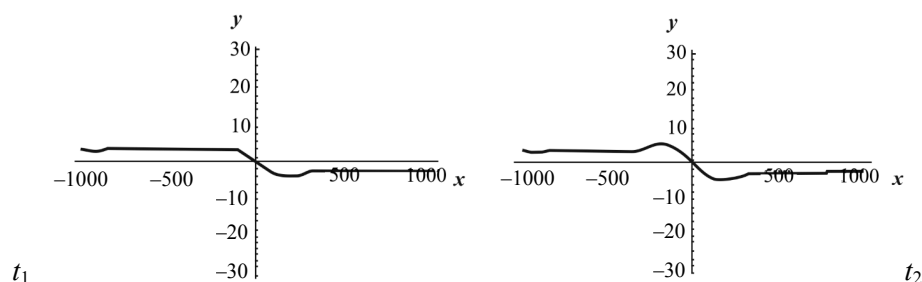


Рис. 9. Поле смещений дислокации, находящейся под воздействием соседней дислокации (что и на рис. 8), для тех же моментов времени, но для больших скоростей  $\sim 10^5$  см/с

Fig. 9. The displacement field of a dislocation under the impact of a neighboring dislocation (as is as in Fig. 8), for the same moments of time, but for high velocities  $\sim 10^5$  cm/s

Тем не менее, как видно из рис. 9, через тот же интервал времени, что и представленный на рис. 8, поле смещений данной дислокации почти не искажается.

Далее, с учетом воздействия внешнего упругого поля  $E$  (в нашем случае – вибрации) существует некоторое его критическое значение разрыва материала  $E_c$ . Но для разных значений  $E$  при  $E \leq E_c$  в системе происходит самоорганизация: вместо одной быстрой дислокации образуется ряд следующих друг за другом медленных дислокаций, т. е. их размножение (рис. 10а, б). Подобные центры генерации дислокаций под действием внешних упругих сил могут кардинально менять стабильно существующую 3D-трещиноватость твердотельного материала, а значит, ее проницаемость для рабочего вещества.

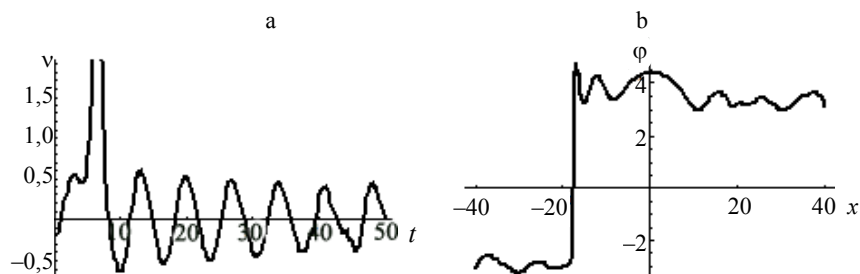


Рис. 10. Зависимость скорости дислокаций  $v$  от времени  $t$  (а); рождение медленных дислокаций (б), где  $\phi$  – возникающие дислокации (все – в о. е.)

Fig. 10. (a) Dependence of dislocation velocity  $v$  on time  $t$ ; (b); the nucleation of slow dislocations, where  $\phi$  are the emerging dislocations. (Everything is given in relative units)

Как видно из рис. 10а, скорость первой дислокации намного превышает скорости вновь родившихся (последующие цуги); рис. 10б – колебательный режим для состояния дислокации  $\phi$  (ср. с рис. 7а).

Отметим также, что при наличии исходных неоднородностей в массиве рабочей камеры число рождающихся дислокаций и их плотности растут, а скорости движения уменьшаются. Также могут возникать эффекты накопления деформации; меняется и специфика скольжения дислокации.



Рассмотренные режимы генезиса дислокаций для такого типа разгрузки (мы их привели без деталей расчета) могут приводить к сдвигу по отдельной дислокации вещества камеры и, вероятно, к образованию крупномасштабных дефектов. При этом скорости движения газожидкостного рабочего вещества по таким контактам с малопроницаемыми слоями в объеме устройства во много раз превышают скорости движения рабочего вещества в обычных условиях эксплуатации. Это в итоге и приводит к особенностям надежности работы энергетической установки.

Кроме того, аккумуляционные возможности газожидкостных масс внутри таких устройств с образовавшимися из-за дислокаций коллекторами резко изменяются, и их прорыв наружу уже становится не связанным с общими зависимостями, характерными для рабочих режимов в стабильных состояниях; здесь происходит отсечение нормального процесса функционирования. Установление и анализ прогнозируемых и традиционных корреляций между разными факторами становятся затруднительными, поскольку может возникать быстрый пневмо- и гидродинамический ударный процесс. Это определяет продолжительность надежной работы устройства. Однако для практических целей требуются натурные испытания и измерения на тестовых экспериментальных прототипах изделий, которые в рамках предсказательного моделирования могут быть обобщены на реальные условия рассматриваемых режимов работы тепловых энергоустановок.

Проведенный анализ позволяет выявить базовые тенденции и тренды развития трещиноватости разного типа и других разных неоднородностей в технических изделиях теплоэнергетики.

## **ВЫВОДЫ**

1. Проанализирована фрактальная модель трещиноватости камеры с рабочим веществом – возникновение определенной топологии внутри материала с выходом ее на поверхность камеры.

2. В рамках модели клеточного автомата для распространения протяженных неоднородностей от локализованного источника напряжений приведены результаты по распространению в 2D-приближении картины неоднородностей при разных режимах.

3. Проанализированы модификации и развитие 3D-трещиновой структуры в материале с использованием соответствующих аналитических соотношений, включая развитие деформационных дислокаций.

4. Это позволяет оценивать тенденции в развитии неустойчивостей и дефектов, которые могут приводить к разрушению твердотельной рабочей камеры энергетических установок разного класса. Наличие достоверной базы данных по их характеристикам и режимам работы рабочего вещества в реальных условиях с численными параметрами должно позволить в рамках рассмотренных представлений осуществлять предсказательное моделирование и прогноз долговечности безопасной и устойчивой работы подобных устройств и управлять их режимами с учетом соответствующего метрологического обеспечения и мониторинга развивающихся динамических процессов.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. 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.
2. Рыжова, Т. В. Идентификация математической модели процессов тепло- и массопереноса в псевдооживленном слое по результатам эксперимента / Т. В. Рыжова // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 1999. № 6. С. 75–78.
  3. Гидродинамическое сопротивление унифицированного модульного рекуператора нагревательных и термических печей заготовительного и механосборочного комплексов машиностроительных и автотракторных заводов / А. П. Несенчук [и др.] // Вестник Белорусского национального технического университета. 2007. № 4. С. 20–23.
  4. 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.
  5. Анализ эффективности использования различных типов рекуператоров в нагревательных печах металлургического производства / А. П. Несенчук [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2008. № 5. С. 46–53.
  6. Абляция тонких пленок молибдена с поверхности прозрачных подложек лазерными импульсами фемтосекундной длительности / А. Е. Гулевич [и др.]. Минск: Бел. наука, 2012. С. 339–340.
  7. Введение в фемтонанопотонику: фундаментальные основы и лазерные методы управляемого получения и диагностики наноструктурированных материалов: учебное пособие / С. М. Аракелян [и др.]; под общ. ред. С. М. Аракеяна. М.: Логос, 2015. 744 с.
  8. Несенчук, А. П. Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки: в 2 ч. / А. П. Несенчук, В. И. Тимошпольский; под общ. ред. А. П. Несенчука. Минск: БНТУ, 2008. Ч. 1. 525 с.
  9. Несенчук, А. П. Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки: в 2 ч. / А. П. Несенчук, В. И. Тимошпольский / под общ. ред. А. П. Несенчука. Минск: БНТУ, 2008. Ч. 2. 530 с.
  10. Autonomous healing of fatigue cracks via cold welding / C. Barr [et al.] // Nature. 2023. Vol. 620. P. 552–556. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06223-0>.
  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>; van Dijk, N. Self-Healing Phenomena in Metals / N. van Dijk, S. van der Zwaag // Adv. Mater. Interfaces. 2018. Vol. 5, No 17. P. 1800226. <https://doi.org/10.1002/admi.201800226>.
  12. 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 // Metall Trans A. 1981. Vol. 12. P. 1435–1443. <https://doi.org/10.1007/BF02643688>.
  13. К выбору способа оценки коэффициента теплоотдачи к вертикальному ребру рассольного теплообменника / Ю. А. Малевич [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 1998. № 6. С. 69–71.
  14. Измерение скорости хладоносителя в межтрубном пространстве шахматных пучков рассольных теплообменников / А. П. Несенчук [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 1999. № 1. С. 58–61.
  15. Рыжова, Т. В. Моделирование процессов возникновения и роста фрактальных структур и дефектов камер теплоэнергетических установок. Ч. 1 / Т. В. Рыжова, Д. Н. Бухаров, С. М. Аракелян // Наука и техника. 2023. Т. 22, № 3. С. 231–242. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-231-243>.
  16. Рыжова, Т. В. Моделирование процессов возникновения и роста фрактальных структур и дефектов камер теплоэнергетических установок. Ч. 2 / Т. В. Рыжова, Д. Н. Бухаров, С. М. Аракелян // Наука и техника. 2023. Т. 22, № 4. С. 333–341. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-333-341>.
  17. Определение неравномерности прогрева контрольного сечения массивной штанги при нагреве в камерной печи кузнечного отделения заготовительного производства машиностроительного завода / А. П. Несенчук [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2003. № 2. С. 52–55.
  18. 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. № 1. С. 52–66. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-52-66>.
  19. Экспериментальная оценка теплоотдачи в ограниченном пространстве при работе вихревого теплогенератора в системе теплоснабжения / А. П. Несенчук [и др.] // Наука –

- образованию, производству, экономике: материалы Десятой междунар. науч.-техн. конф.: в 4 т. / Белорусский национальный технический университет; редкол.: Б. М. Хрусталев, Ф. А. Романюк, А. С. Калинин. Минск: БНТУ, 2012. Т. 1. С. 109–110.
20. Экспериментальное изучение скорости десорбции при импульсном нагреве микросферической частицы цеолита / А. П. Несенчук [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2000. № 4. С. 85–89.
21. Griffith, A. A. 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. P. 163–198. <https://doi.org/10.1098/rsta.1921.0006>.
22. Температурные графики нагрева эвтектических сталей / А. П. Несенчук [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2011. № 6. С. 62–65.
23. О целесообразности использования вихревого теплогенератора при реализации теплоснабжения объектов, работающих в условиях чрезвычайных ситуаций / А. П. Несенчук [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2012. № 1. С. 45–51.
24. Уточненная численная модель тепло- и массопереноса в термодиссоциированном гравитационном потоке системы очистки искусственных горючих газов от диоксида углерода / А. П. Несенчук [и др.] // Литье и металлургия. 2001. № 3. С. 83–85.
25. Энергоэкологический анализ сжигания горючих газов в нагревательных печах металлургических и машиностроительных заводов / Б. С. Сорока [и др.] // ИФЖ. 2001. Т. 74, № 4. С. 84–88.
26. Расчет и конструирование современных газопламенных установок для нагрева и термообработки металла / В. И. Тимошпольский [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2008. № 4. С. 34–43.
27. Эффективность использования топлива в идеальном цикле ГТУ с изобарным подводом теплоты / А. П. Несенчук [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2013. № 2. С. 43–48.
28. Нанооптика тонкопленочных лазерно-индуцированных топологических структур на поверхности твердого тела: фундаментальные явления и их приложения / С. Н. Багаев [и др.] // Известия РАН. Сер. физическая. 2020. Т. 84, № 12. С. 1682–1695. <https://doi.org/10.31857/s0367676520120066>.
29. Formation of Fractal Dendrites by Laser-Induced Melting of Aluminum Alloys / A. Kucherik [et al.] // Nanomaterials. 2021. Vol. 11, № 4. P. 1043. <https://doi.org/10.3390/nano11041043>.
30. Динамические и квантовые эффекты в кластерных низкоразмерных многослойных твердотельных наноструктурах для элементной базы микро- и наноэлектроники / С. М. Аракелян [и др.] // Известия РАН. Сер. физическая. 2022. Т. 86, № 4. С. 834–840. <https://doi.org/10.31857/S0367676522060047>.
31. Самарский, А. А. Вычислительная теплопередача / А. А. Самарский, П. Н. Вабищевич. М.: URSS, 2020. 784 с.
32. Гликман, Б. Ф. Математические модели пневмогидравлических систем / Б. Ф. Гликман. М.: Наука, 1986. 368 с.
33. 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.
34. К выбору источника теплоснабжения мобильного строительного сооружения / А. П. Несенчук [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2014. № 2. С. 67–73.
35. Энерготехнологическая установка на базе нагревательной печи прокатного стана с опцией производства / В. А. Седнин [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. № 2. С. 127–142. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-2-127-142>.
36. 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>.
37. Goldenberga, J. Using Cellular Automata Modeling of the Emergence of Innovations / J. Goldenberga, S. Efronib // Technological Forecasting & Social Change. 2001. № 68. P. 293–308.
38. Богданова, Е. А. Имитационное моделирование как инструмент принятия решений [Электронный ресурс] / Е. А. Богданова, А. А. Шерстянкина // Novaum. 2017. № 6. Режим доступа: <http://novaum.ru/public/p181>.
39. Козлов, Г. В. Кластерная модель аморфного состояния полимеров / Г. В. Козлов, В. У. Новиков // УФН. 2001. Т. 171, № 7. С. 717–764. <https://doi.org/10.3367/ufnr.0171.200107b.0717>.
40. 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>.

41. Mandelbrot, B. B. *Fractals and Chaos: The Mandelbrot Set and Beyond* / B. B. Mandelbrot. New York: Springer-Verlag, 2004. 308 p.
42. 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. 10.1134/S0044451019070137.
43. Арнольд, В. И. Теория катастроф / В. И. Арнольд. 3-е изд., доп. М.: Наука, 1990. 128 с.
44. Чернышев, С. Н. Трещины горных пород / С. Н. Чернышев. М.: Наука, 1983. 293 с.
45. Мартинсон, Л. К. Дифференциальные уравнения математической физики / Л. К. Мартинсон, Ю. И. Малов; под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. 4-е изд., стер. М.: МГТУ имени Баумана, 2011. 369 с. (Сер. Математика в техническом университете; Вып. XII).

Поступила 21.10.2023 Подписана в печать 26.12.2023 Опубликовано онлайн 29.03.2024

# REFERENCES

1. 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).
2. 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).
3. Nesenchouk A. P., Mandel N. L., Shishkov V. N., Novgorodova G. S., Ryzhova T. V., Pshonik M. G., Kachar A. R. (2007) Hydrodynamic Resistance of Unified Module Recuperator of Heating and Thermal Furnaces at Blanking and Machine-Assembling Shops of Engineering and Automobile-Tractor Plants. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, (4), 20–23. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2007-0-4-20-23> (in Russian).
4. 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).
5. Nesenchuk A. P., Kabishov S. M., Mandel N. L., Ryzhova T. V., Shklovchik D. I., Shidlovsky V. V. (2008) Analysis of Efficiency Pertaining to Usage of Various Types of Recuperators in Heating Furnaces of Metallurgical Industry. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (5), 46–53 (in Russian).
6. Gulevich A. E., Kisel' V. E., Kuleshov N. V., Rudenkov A. S. (2012) *Ablation of Thin Films of Molybdenum from the Surface of Transparent substrates by femtosecond laser pulses*. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 339–340 (in Russian).
7. Arakelyan S. M., Kucherik A. O., Prokoshev V. G., Rau V. G., Sergeev A. G. (2015) *Introduction to Femtonanophotonics: Fundamental Principles and Laser Methods for Controlled Production and Diagnostics of Nanostructured Materials*. Moscow, Logos Publ. 744 (in Russian).
8. Nesenchuk A. P., Timoshpol'skii V. I. (2008) *High-Temperature Thermal Technological Processes and Installations. Part 1*. Minsk, BNTU. 525 (in Russian).
9. Nesenchuk A. P., Timoshpol'skii V. I. (2008) *High-Temperature Thermal Technological Processes and Installations. Part 2*. Minsk, BNTU. 530 (in Russian).
10. Barr C. M., Duong T., Bufford D. C., Milne Z., Molkeri A., Heckman N. M., 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>.
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>; 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>.
12. 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 Transactions A*, 12, 1435–1443. <https://doi.org/10.1007/BF02643688>.

13. Malevich Yu. A., Nesenchuk A. P., Ryzhova T. V., Mal'kevich N. G., Aidarova Z. B. (1998) Towards the Choice of a Method for Estimating the Heat Transfer Coefficient to the Vertical Fin of a Brine Heat Exchanger. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (6), 69–71 (in Russian).
14. Nesenchuk A. P., Malevich Yu. A., Ryzhova T. V., Mal'kevich N. G., Pshonik M. G., Aidarova Z. B. (1999) Measuring the Coolant Velocity in the Inter-Tube Space of Staggered Bundles of Brine Heat Exchangers. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (1), 58–61 (in Russian).
15. Ryzhova T. V., Bukharov D. N., Arakelyan S. M. (2023) Modeling Processes of Emergence and Growth of Fractal Structures and Chamber Defects of Thermal Power Units. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 22 (3), 231–242. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-3-231-243> (in Russian).
16. Ryzhova T. V., Bukharov D. N., Arakelyan S. M. (2023) Modeling Processes of Emergence and Growth of Fractal Structures and Chamber Defects of Thermal Power Units. Part 2. *Nauka i Tehnika = Science & Technique*, 22 (4), 333–341. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-4-333-341> (in Russian).
17. Nesenchuk A. P., Kopko V. M., Aidarova Z. B., Fomenko O. G., Ryzhova T. V. (2003) Determination of Uneven Heating of the Control Section of a Massive Rod when Heated in a Chamber Furnace of the Forging Department of the Procurement Production of a Mechanical Engineering Plant. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (2), 52–55. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2003-0-2-52-55> (in Russian).
18. 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).
19. Nesenchuk A. P., Kachar I. L., Beglyak V. V., Matrunich A. Yu. (2012) Experimental Assessment of Heat Transfer in a Confined Space during Operation of a Vortex Heat Generator in a Heat Supply System. *Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike: Materialy Desyatoi Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. T. 1* [Science for Education, Production, Economics: Proceedings of the Tenth International Scientific and Technical Conference. Vol. 1]. Minsk, BNTU, 109–110 (in Russian).
20. Nesenchuk A. P., Kopko V. M., Shklovchik D. M., Ryzhova T. V., Aidarova Z. B. (2000) Experimental Study of the Desorption Rate during Pulsed Heating of a Microspherical Zeolite Particle. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (4), 85–89 (in Russian).
21. Griffith A. A. (1921) The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, 221, 163–198. <https://doi.org/10.1098/rsta.1921.0006>.
22. Nesenchuk A. P., Kovalev S. S., Ryzhova T. V., Matusevich A. V., Begliak V. V. (2011) Temperature Diagrams of Eutectoid Steel Heating. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (6), 62–65 (in Russian).
23. Nesenchuk A. P., Ryzhova T. V., Kachar I. L., Shklovchik D. I., Prokopenko S. I., Begliak V. V. (2012) On Expediency of Vortex Heat Generator Usage While Realizing Heat Supply for Objects Operating in Emergency Situations. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (1), 45–51 (in Russian).
24. Nesenchuk A. P., Kopko V. M., Ryzhova T. V., Pshonik M. G. (2001) A Specified Numerical Model of Heat and Mass Transfer in Quasi-Liquid Gravitation Flow of the System of Fuel Gases Purifying From Carbon Dioxide. *Litiyo i Metallurgiya = Foundry Production and Metallurgy*, (3), 83–85. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2001-3-83-85> (in Russian).
25. Soroka B. S., Timoshpol'skii V. I., Nesenchuk A. P., Trusova I. A., Ryzhova T. V., Pshonik M. G. (2001) Energy-Environmental Analysis of Combustion of Fuel Gases in Heating Furnaces of Metallurgical and Engineering Plants. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 74 (4), 956–961. <https://doi.org/10.1023/A:1012311507655>.

26. Timoshpolsky V. I., Nesenchuk A. P., Trusova I. A., Mendelev D. V., German M. L. (2008) Calculation and Designing of Up-to-Date Gas-Flame Plants for Metal Heating and Heat Treatment. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (4), 34–43 (in Russian).
27. Nesenchuk A. P., Begliak A. V., Ryzhova T. V., Shklovchik D. I., Begliak V. V., Abrazovsky A. A. (2013) Fuel Application Efficiency in Ideal Cycle of Gas Turbine Plant with Isobaric Heat Supply. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (2), 43–48 (in Russian).
28. Bagayev S. N., Arakelian S. M., Kucherik A. O., Bukharov D. N., Butkovsky O. Ya. (2020) Nano-Optics of Thin-Film Laser-Induced Topological Structures on a Solid Surface: Fundamental Phenomena and Their Applications. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 84 (12), 1427–1438. <https://doi.org/10.3103/S1062873820120060>.
29. Kucherik A., Samyshkin V., Prusov E., Osipov A., Panfilov A., Arakelian S., Buharov D., Skryabin I., Kavokin A. V., Kutrovskaya S. (2021) Formation of Fractal Dendrites by Laser-Induced Melting of Aluminum Alloys. *Nanomaterials*, 11 (4), 1043. <https://doi.org/10.3390/nano11041043>.
30. Arakelian S. M., Bukharov D. N., Kucherik A. O., Khudayberganov T. A. (2022) Dynamic and Quantum Effects in Cluster Low-Dimensional Multilayer Solid-State Nanostructures for Element Bases of Micro- and Nanoelectronics. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 86 (6), 701–706. <https://doi.org/10.3103/S1062873822060041>.
31. Samarsky A. A., Vabishchevich P. N. (2020) *Computational Heat Transfer*. Moscow, URSS Publ. 784 (in Russian).
32. Glikman B. F. (1986) *Mathematical Models of Pneumohydraulic Systems*. Moscow, Nauka Publ. 368 (in Russian).
33. Belankov A. B., Stolbov V. Yu. (2005) Application of Cellular Automata for Modeling the Microstructure of a Material during Crystallization. *Journal of Applied and Industrial Mathematics*, 8 (2), 12–19 (in Russian).
34. Nesenchuk A. P., Beglyak A. V., Ryzhova T. V., Iokova I. L., Beglyak V. V. (2014) Selection of Heat Supply Source for Mobile Building Structure. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (2), 67–73 (in Russian).
35. Sednin V. A., Ivanchikov E. O., Kaliy V. A., Martinchuk A. Y. (2022) Energy-and-Technology Installation Based on a Rolling Mill Heating Furnace with the Option of Hydrogen Production. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (2), 127–142. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-2-127-142> (in Russian).
36. 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>.
37. Goldenberg J., Efroni S. (2001) Using Cellular Automata Modeling of the Emergence of Innovations. *Technological Forecasting & Social Change*, 68 (3), 293–308.
38. Bogdanova E. A., Sherstyankina A. A. (2017) Simulation Modeling as a Decision-Making Tool. *NovaUm.ru*, (6). <http://novaum.ru/public/p181> (in Russian).
39. Kozlov G. V., Novikov V. U. (2001) Cluster Model for the Polymer Amorphous State. *Physics–Uspekhi*, 171 (7), 681–724. <https://doi.org/10.3367/ufnr.0171.200107b.0717>.
40. Scott A. (2003) *Nonlinear Science: Emergence and Dynamics of Coherent Structures*. New York, Oxford University Press. 480. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198528524.001.0001>.
41. Mandelbrot B. B. (2004) *Fractals and Chaos: The Mandelbrot Set and Beyond*. New York, Springer-Verlag. 308 (in Russian).
42. 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>.
43. Arnold V. I. (1990) *Catastrophe Theory. 3rd Ed.* Moscow, Nauka Publ. 128 (in Russian).
44. Chernyshev S. N. (1983) *Rock Cracks*. Moscow, Nauka Publ. 293 (in Russian).
45. Martinson L. K., Malov Yu. I. (2011) *Differential Equations of Mathematical Physics. Ser. Mathematics at a Technical University. Vol. 12.* Moscow, Bauman MSTU. 369 (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-173-188>  
УДК 620.98: 658.264

**Проблемы развития  
гибридных систем теплоснабжения**

**А. В. Седнин<sup>1)</sup>, К. М. Дюсенов<sup>2)</sup>**

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),  
<sup>2)</sup>Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева  
(Астана, Республика Казахстан)

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

**Реферат.** В статье обсуждаются актуальные для стран СНГ проблемы трансформации существующих систем централизованного теплоснабжения в рамках развития тенденций интеграции отраслей энергетики, увеличения объемов потребления вторичных энергоресурсов, «обезуглероживания» промышленности и цифровизации экономики. Рассмотрен опыт западноевропейских стран в части перехода к системам теплоснабжения 4-го и 5-го поколений с приданием им свойств гибкости и гибридности, а также свойств «умных энергетических систем». Проанализированы технические аспекты создания гибридных систем управления, приведены обобщенные структурные технологические схемы гибридных систем теплоснабжения и основные мероприятия, реализация которых необходима при их переходе в состояние систем теплоснабжения нового поколения. Отмечается, что гибридность системы теплоснабжения предполагает наличие регенеративных свойств в части производства энергоносителей для использования в смежных системах, в частности это касается водорода. В свою очередь, гибкость системы теплоснабжения во многом реализуется путем развития аккумулятивных свойств, что приводит к инвариантности применения доступных технологий хранения энергии. Утверждается, что, несмотря на постоянно снижающиеся затраты по созданию и эксплуатации системы аккумулирования электроэнергии, системы хранения тепловой энергии остаются приоритетными в теплоснабжении, особенно при использовании возобновляемых источников энергии. Рассмотрен также вопрос применения в системах теплоснабжения электроэнергии как избыточного ресурса объединенных энергетических систем в рамках выравнивания суточного и сезонного графиков потребления энергии. Представлена схема, отражающая технические решения в части применяемого оборудования для осуществления технологии «электроэнергия – теплота». Обсуждается проблема управления системами теплоснабжения нового поколения. Указывается, что для обеспечения требуемых маневренных свойств необходимы разработка и применение новых методов планирования и управления системами теплоснабжения, исключение одноцелевого подхода в организации гибридных систем, благодаря чему проявляется синергетический эффект с новыми возможностями поиска оптимальных решений, направленных на снижение потребления топлива. Показана необходимость создания межсистемного информационного пространства, которое бы включало в себя создание интеллектуальных систем управления технологическими процессами на основе анализа больших объемов данных. Отмечается, что основная цель оперативного управления гибридными тепловыми сетями – достижение динамического баланса между требуемым значением тепловой нагрузки потребителей,

| Адрес для переписки                                                                                                                                                                               | Address for correspondence                                                                                                                                                    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Седнин Алексей Владимирович<br>Белорусский национальный технический университет<br>пр. Независимости, 65/2,<br>220113, г. Минск, Республика Беларусь<br>Тел.: +375 17 397-36-20<br>Sednin@bntu.by | Sednin Alexei V.<br>Belarusian National Technical University<br>65/2, Nezavistimosti Ave.,<br>220113, Minsk, Republic of Belarus<br>Tel.: +375 17 397-36-20<br>Sednin@bntu.by |

производством тепловой энергии и объемом аккумулирования. Применение гибридных систем в теплоснабжении позволяет решать multifunctional задачу повышения надежности энергоснабжения и устойчивости функционирования энергосистемы, что в первую очередь достигается решением проблемы балансировки мощностей производства и потребления энергии с позиции выравнивания графиков генерации и потребления энергии. Отдельно выделено рассмотрение перспектив применения гибридных систем теплоснабжения в условиях Республики Беларусь. Показана необходимость проведения дополнительных исследований для адаптации известных и разработки новых технических решений в рамках перехода систем теплоснабжения в новое качество.

**Ключевые слова:** гибкость, гибридность, интеграция, информационное пространство, надежность, модернизация, объект, система, тепловая нагрузка, теплота, теплоснабжение, объединенная электроэнергетическая система, управление, электроэнергия, эффективность

**Для цитирования:** Седнин, А. В. Проблемы развития гибридных систем теплоснабжения / А. В. Седнин, К. М. Дюсенов // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 2. С. 173–188. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-173-188>

## Development of Hybrid District Heating Systems

A. V. Sednin<sup>1)</sup>, K. M. Dyussenov<sup>2)</sup>

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

<sup>2)</sup>Eurasian National University named after. L.N. Gumileva (Astana, Republic of Kazakhstan)

**Abstract.** The article discusses the current problems of transformation of existing district heating systems for the CIS countries within the framework of the development of trends in the integration of energy sectors, increasing the consumption of renewable energy resources, “decarbonizing” industry and digitalization of the economy. The experience of Western European countries in terms of the transition to “4th and 5th generation” district heating systems is considered. The technical aspects of the creation of hybrid control systems are analyzed, generalized structural technological schemes of hybrid district heating systems and the main measures, the implementation of which is necessary during their transition to the state of a new generation of district heating systems, are introduced. It is noted that the hybridity of the district heating system implies the presence of regenerative properties in terms of the production of energy carriers for use in adjacent systems, in particular hydrogen. In turn, the flexibility of the district heating system is largely realized via the development of accumulative properties, which leads to the invariance of the use of available energy storage technologies. It is argued that, despite the constantly decreasing costs of creating and operating an electric power storage system, thermal energy storage systems remain a priority in heat supply, especially when using renewable energy sources. The issue of using electricity in district heating systems as an excess resource of integrated energy systems within the framework of equalizing the daily and seasonal schedule of energy consumption is also considered. Also, a diagram is presented reflecting the technical solutions in terms of the equipment used to implement the “electricity – heat” technology. The problem of management of heat supply systems of a new generation is discussed. It is indicated that in order to ensure the required maneuverable properties of heat supply systems, it is necessary to develop and apply new methods of planning and managing heat supply systems, excluding a single-purpose approach in the organization of hybrid systems, which manifests a synergistic effect with new possibilities for finding optimal solutions aimed at reducing fuel consumption. The need to create an intersystem information space, which would include the creation of intelligent process control systems based on the analysis of large amounts of data, is demonstrated. It is noted that the main goal of operational management of hybrid thermal networks is to achieve a dynamic balance between the required value of the thermal load of consumers, the production of thermal energy and the volume of accumulation. The use of hybrid systems in heat supply makes it possible to solve the multifunctional task of increasing the reliability of energy supply and the stability of the functioning of the energy system, which is primarily achieved by solving the problem of balancing production and energy consumption capacities from the point of alignment of generation and energy consumption schedules. A separate consideration of the prospects for the use of hybrid district



heating systems in the conditions of the Republic of Belarus is highlighted. The need for additional research to adapt known and develop new technical solutions within the framework of the transition of district heating systems to a new quality is shown.

**Key words:** flexibility, hybridity, integration, information space, reliability, modernization, object, system, heat load, heat, district heating, integrated electric power system, control, electricity, efficiency

**For citation:** Sednin A. V., Dyussenov K. M. (2024) Development of Hybrid District Heating Systems. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (2), 173–188. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-2-173-188> (in Russian)

## Введение

В большинстве стран СНГ и ряде государств Северной и Центральной Европы теплоснабжение городов и населенных пунктов обеспечивается системами теплофикации и системами централизованного теплоснабжения (СЦТ), первые из которых были созданы более ста лет тому назад. Сегодня в странах Западной Европы происходит их очередная трансформация в системы 4-го и 5-го поколений с качественно новыми условиями функционирования [1]. Их основные особенности – низкотемпературное теплоснабжение, широкое использование возобновляемых источников энергии (гибридные системы), доступность тепловых сетей для широкого круга производителей тепловой энергии, использование сбросной теплоты промышленных предприятий и интеграция системы теплоснабжения в общегородские информационные структуры [2–4].

Главным мотивом реализации проектов нового поколения выступает стремление к декорбанизации энергетических систем [5]. При этом критически важным является поиск технических решений для перехода на низкотемпературные режимы работы тепловых сетей. На рис. 1 представлена схема концепции перехода от действующих в странах СНГ СЦТ к перспективным, с полным отказом от использования органического топлива [6].

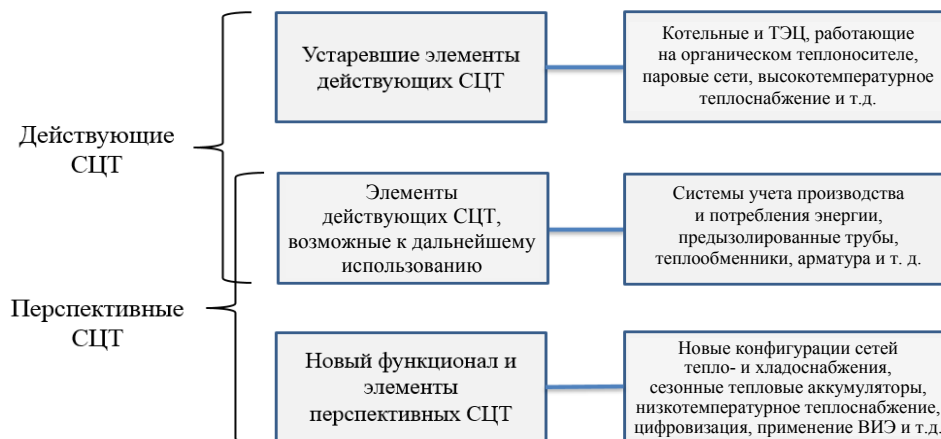


Рис. 1. Концепция перехода к системам теплоснабжения 4-го и 5-го поколений [6]

Fig. 1. The transition concept to the 4<sup>th</sup> and 5<sup>th</sup> generations of district heating systems [6]

Перспективные системы теплоснабжения представляют собой гибридные системы теплоснабжения, которые предполагают использование двух или более источников тепловой энергии [7], каждый из которых может дополнять друг друга при покрытии как суточных, так и сезонных нагрузок.

В открытом информационном пространстве представлены результаты большого числа исследований, выполненных для различных сочетаний энергогенерирующего оборудования как для крупных СЦТ [8–10], так и для локальных систем теплоснабжения [11, 12]. В большинстве работ допускается распределенная генерация тепловой энергии, под которой понимают производство энергии на объектах уровня распределительной сети или на стороне потребителя, включенного в сеть. В качестве реального примера рассмотрим опыт Дании, который можно считать передовым образцом создания «гибкой» энергосистемы будущего – системы, которая комбинирует различные источники энергии в эффективной и устойчивой конфигурации с системами централизованного теплоснабжения (рис. 2).

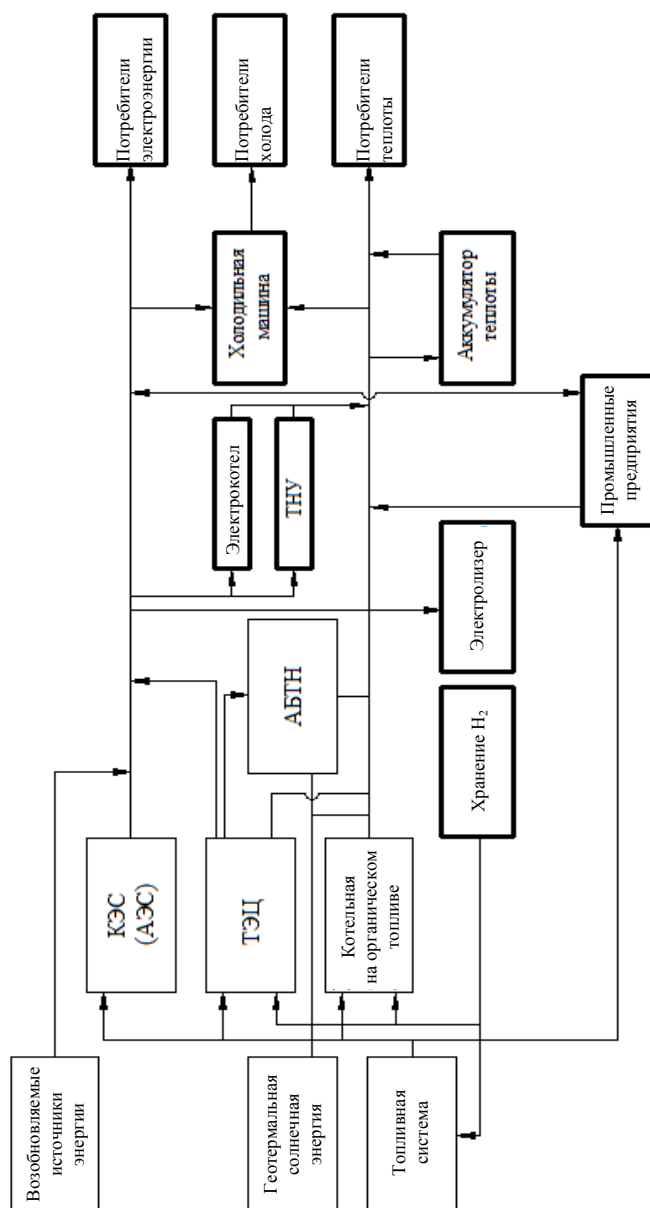


Рис. 2. Концептуальная схема построения умных энергетических систем [13]  
Fig. 2. The model of smart energy systems [13]

### Технические аспекты создания гибридных систем управления

Априори предполагается, что СЦТ будут играть существенную роль в будущих энергосистемах, особенно из-за необходимости интеграции большого количества возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Доля ВИЭ в тепловом балансе различных стран сильно колеблется и зависит от многих факторов [14, 15]. В частности, в Исландии она составляет почти 100 % за счет использования геотермальных источников энергии, в Швеции почти 85 % за счет применения биомассы. В то же время в таких странах, как Россия, Казахстан, Китай, их доля еще незначительна и основным топливом в СЦТ остается каменный уголь. Поэтому понятен интерес европейских ученых к странам, которые разрабатывают технические решения для трансформации этих регионов к широкому внедрению гибридных систем теплоснабжения 4-го и 5-го поколений [16].

Примеры технологических схем гибридных систем теплоснабжения [17] приведены на рис. 3а, б. В рассматриваемых схемах в системах теплоснабжения интегрированы различные традиционные источники тепловой энергии (когенерационные установки, водогрейные котлы) и источники, использующие возобновляемую энергию (тепловые насосные установки (ТНУ), солнечные коллекторы, электродкотлы (ЭК)).

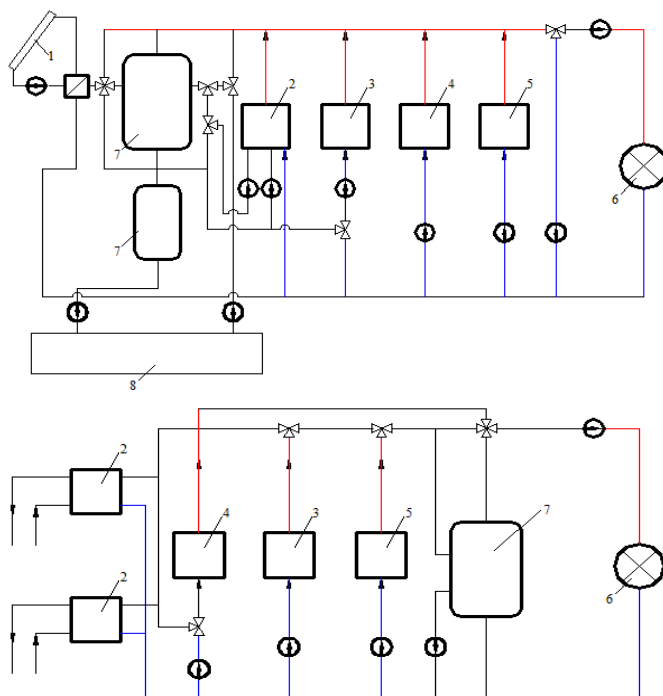


Рис. 3. Примеры технологических схем гибридных систем теплоснабжения:  
1 – солнечный коллектор, 2 – компрессионный тепловой насос (геотермальный, воздушный),  
3 – электродкотел, 4 – когенерационная установка, 5 – котел, 6 – тепловой потребитель,  
7 – аккумулятор тепловой энергии, 8 – сезонный аккумулятор тепловой энергии

Fig. 3. Examples of hybrid district heating systems:  
1 – solar collector, 2 – compression heat pump (geothermal, air),  
3 – electric boiler, 4 – cogeneration plant, 5 – boiler, 6 – heat demand,  
7 – heat storage, 8 – seasonal heat storage

К основным изменениям в технологии работы СЦТ при их переходе к гибридным системам нового поколения относят [18]:

- увеличение доли производства тепловой энергии из ВИЭ;
- масштабное применение аккумулирования тепловой энергии (как краткосрочное, так и длительное (сезонное));
- применение электроэнергии для производства тепловой энергии;
- более тесную интеграцию электрического и теплового секторов;
- использование вторичных энергоресурсов;
- разработку современных низкотемпературных систем теплоснабжения;
- внедрение интеллектуальных цифровых решений.

Очевидно, что внедрение указанных мероприятий гораздо проще для систем теплоснабжения небольшой мощности малых городов, для которых все большую популярность приобретают системы с солнечной и ветровой генерацией, оснащенные системами аккумуляции тепловой энергии [19, 20], а также с использованием биомассы, которую также относят к ВИЭ [21]. Как перспективное направление рассматриваются также системы с генерацией водорода. В соответствии с европейской стратегией «зеленый» водород рассматривается как топливо, которое может заменить природный газ и уголь, в том числе в системах теплоснабжения [22, 23].

Несмотря на постоянно снижающиеся затраты по созданию и эксплуатации системы аккумулирования электроэнергии, системы хранения тепловой энергии остаются приоритетными. Потенциал аккумулирования СЦТ выглядит многообещающим также из-за относительной доступности технологий преобразования электроэнергии в тепловую энергию (электроэнергия в теплоту); электродкотлы, компрессионные тепловые насосы совместно с системами аккумулирования тепловой энергии обеспечивают гибкость при совместной работе электрического и теплового секторов. Электроэнергия может использоваться также на всех уровнях СЦТ: централизованная схема с установкой электродных котлов и ТНУ большой мощности на теплоисточниках, децентрализованная с размещением дополнительного оборудования на объектах тепловой сети (рис. 4).

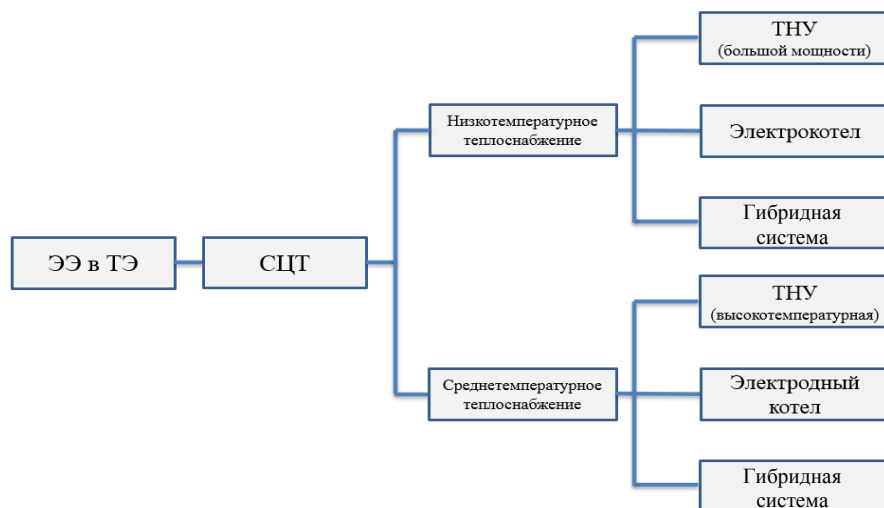


Рис. 4. Варианты применения электроэнергии в системах теплоснабжения

Fig. 4. Options for power-to-heat mode in district heating systems

В исследованиях по эффективности применения ТНУ в СЦТ рассматриваются различные сценарии. Так, в [24] рассмотрена возможность создания гибридной системы теплоснабжения, включающей централизованный источник и локально установленные тепловые насосы, в [25] – модель теплоснабжения г. Хельсинки с дополнительной установкой солнечных коллекторов и ТНУ. Прогнозные результаты исследований показывают, что доля ТЭЦ в тепловом балансе будет уменьшаться с одновременным увеличением доли нагрузки, покрываемой от ТНУ. Одновременно планируется снижение температуры сетевой воды, что в итоге приведет к повышению экономичности системы теплоснабжения на 4–5 %. В [26] рассматривается гибридная система теплоснабжения с сезонным хранением электроэнергии и установкой ТНУ. Показано, что установка ТНУ позволит повысить эффективность схемы на 6–16 % в зависимости от технологии хранения энергии.

Внедрение гибридных систем теплоснабжения с переходом на низкотемпературное теплоснабжение также требует пересмотра подходов к построению структурных схем, особенно если речь идет о модернизации действующих систем. Авторами [27] выполнено обобщение различных возможностей построения тепловых схем гибридных систем теплоснабжения. Рассмотрены шесть вариантов конфигурации тепловых сетей с учетом фактической схемы. Особенное внимание уделяется исследованию каскадных структурных схем, когда новые потребители подключаются к обратному трубопроводу сетевой воды действующих систем [28, 29].

### **Управление гибридными системами теплоснабжения**

Для обеспечения требуемых маневренных свойств энергосистем необходимы разработка и применение новых методов планирования и управления системами теплоснабжения. В последние годы получила распространение концепция «Умные энергетические системы», основная особенность которой – исключение одноцелевого подхода в организации систем энергоснабжения с созданием гибридных систем. Благодаря этому в результате интеграции энергетических систем проявляется синергетический эффект с новыми возможностями поиска оптимальных организационных и технических решений, направленных на снижение потребления топлива. Применение сторонних источников энергии (СИЭ) может осуществляться как в явном виде, за счет прямого нагрева теплоносителя, так и в косвенном, когда для получения тепловой энергии используется генерируемая на базе СИЭ электроэнергия либо другой промежуточный теплоноситель. Одним из целевых преимуществ гибридных систем теплоснабжения является использование электроэнергии в часы провала суточных графиков электрической нагрузки энергосистемы для покрытия тепловых нагрузок. Концепция создания гибридного теплоснабжения предполагает согласованное автоматическое изменение режимов работы всех источников теплоты, потребителей и элементов тепловой сети в зависимости от внешних факторов, влияющих на потребление тепловой энергии.

Создание гибридных систем теплоснабжения требует решения таких задач, как [31, 32]:

- моделирование и прогнозирование нагрузок потребления тепловой энергии на период 12–48 ч;
  - динамическое моделирование теплового и гидравлического режимов тепловых сетей по фактическим данным измерений;
  - оптимизация уровня давления и температуры в тепловых сетях с целью минимизации тепловых потерь и потерь энергии на транспорт теплоносителя;
  - создание условий для использования в системе теплоснабжения тепловых отходов промышленных предприятий;
  - определение оптимальных мест размещения систем аккумулирования теплоты и условий их эксплуатации;
  - оптимизация совместной загрузки сторонних источников тепловой энергии;
  - создание межсистемного информационного пространства, которое бы включало в себя создание интеллектуальных систем управления технологическими процессами на основе анализа больших объемов данных.
- В свою очередь, создание межсистемного информационного пространства позволит осуществить:
- накопление информации о состоянии и режимах работы объектов тепловых сетей;
  - построение математических моделей режимов работы теплогенерирующего оборудования, процессов преобразования, транспорта и потребления тепловой энергии;
  - прогнозирование возможности создания аварийных ситуаций, оценку рисков их возникновения;
  - оптимизацию режимов работы технологического оборудования;
  - полномасштабный учет производства и потребления тепловой энергии.

Операционную модель гибридной системы теплоснабжения можно представить в виде применения разнородных источников тепловой энергии при известной топологии сети. Отличительной чертой систем теплоснабжения городов и населенных пунктов являются значительные колебания нагрузки теплопотребления в зависимости от времени года (отопительный сезон и межотопительный период), метеоусловий местности (в первую очередь, от температуры воздуха), вида тепловой нагрузки. Поэтому основная цель оперативного управления гибридными тепловыми сетями заключается в достижении динамического баланса между требуемым значением тепловой нагрузки потребителей, производством тепловой энергии на СИЭ и объемом аккумулирования, при этом системы аккумулирования тепловой энергии являются ключевым элементом гибридных систем теплоснабжения [14]. В настоящее время в промышленной эксплуатации находятся как сезонные системы аккумулирования тепловой энергии различного конструктивного исполнения, так и баки-аккумуляторы для меньшего временного периода (обычно суточные или недельные) различных конструктивных типов. При несоответствии топологии тепловой сети всему спектру решаемых технологических задач для обеспечения лучшего баланса между теплоисточниками и потребителями может потребоваться внедрение дополнительных линейных, радиальных и кольцевых элементов в тепловую сеть.

В тактическом плане в периоды с минимальной тепловой нагрузкой тепловая энергия должна быть аккумулирована и потом использована для покрытия пиковых значений, в стратегическом плане эти процессы аккумулирования энергии должны быть подчинены решению системных задач оптимизации функционирования интегрированной системы энергоснабжения. В свою очередь, это требует разработки алгоритмов оптимального управления гибридными системами, которые должны уметь определять и использовать прогнозные значения потребления тепловой энергии, объемов генерации энергии за счет традиционных и «сторонних» ресурсов энергии с учетом возможных отклонений генерации последних.

Для обеспечения экономически обоснованной и успешной интеграции СИЭ в действующие или вновь проектируемые системы теплоснабжения требуется точное прогнозирование тепловой нагрузки потребителей. Как правило, для этого используются климатический прогноз и архивные данные систем учета тепловой нагрузки потребителей. Пример предоставления архивных данных применительно к действующей системе теплоснабжения приведен на рис. 5.

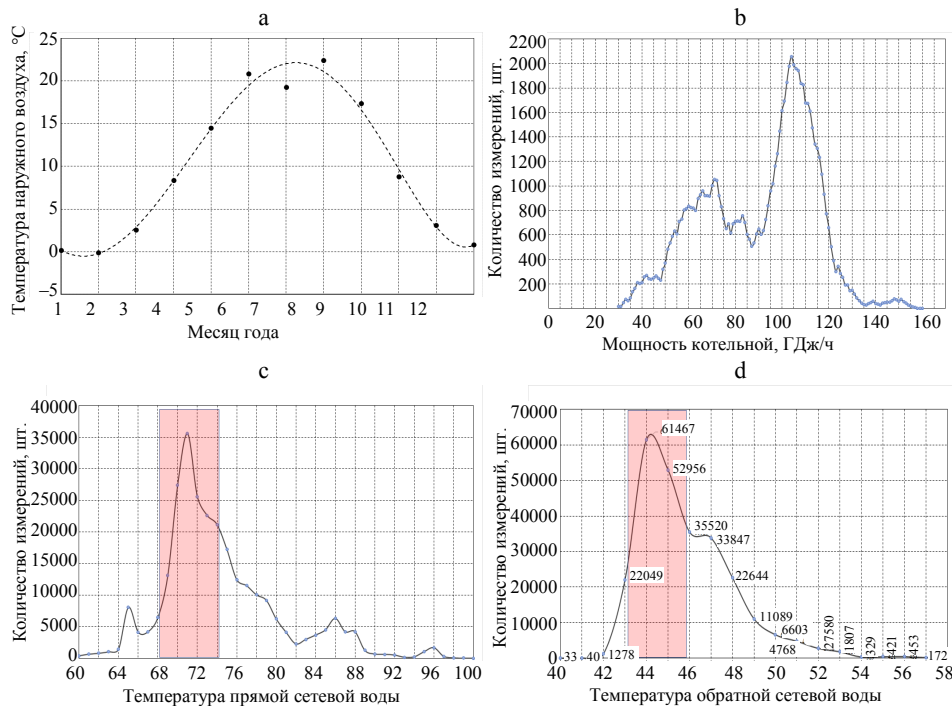


Рис. 5. Анализ фактических архивных данных по работе источника теплоснабжения (в зависимости от частоты регистрации параметров):

а – средняя температура наружного воздуха; б – мощность котельной;  
с – температура прямой сетевой воды; д – температура обратной сетевой воды

Fig. 5. Analysis of the archived data of district heating system (depending on the frequency of parameter registration):  
а – average outdoor temperature; б – boiler-house load;  
с – supply temperature; д – return temperature

Эти параметры являются исходными данными для различных конфигураций гибридных систем теплоснабжения. Тепловая нагрузка потребителей прогнозируется на основании архивных значений в разрезе суточного потребления в зависимости от дня недели и месяца. Блок-схема предполагаемого функционала обработки исходных данных [31, 33] представлена на рис. 6.

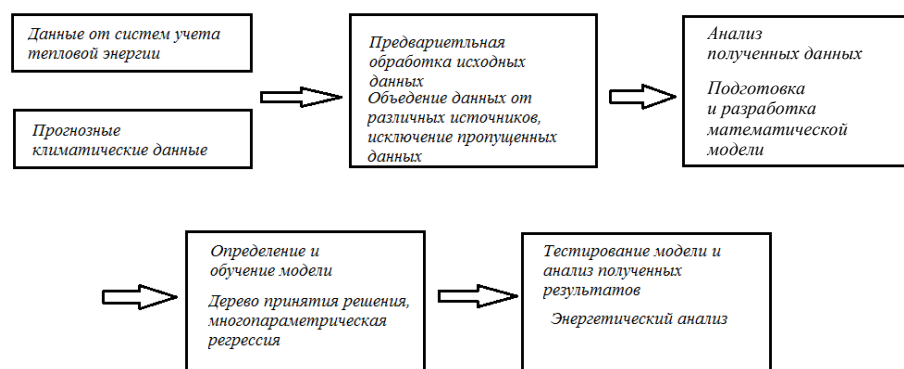


Рис. 6. Основные этапы построения модели прогнозирования тепловой энергии в СТ по архивным данным потребления энергии и климатологии

Fig. 6. The main steps of model construction for thermal load forecasting based on archived data collection on energy consumption and climatic data

Краткосрочный прогноз тепловой нагрузки можно осуществлять детерминированно или предиктивно, используя различные временные отрезки. Детерминированные модели используют сложное моделирование для предсказания физического поведения потребителей тепловой энергии с применением специального программного обеспечения. Возможно моделирование СЦТ с применением архивных данных, когда модели верифицируются за счет архивных значений существующих тепловых сетей. В последние годы находят применение методы искусственного интеллекта, в частности нейросетевой модели.

### Перспективы применения гибридных систем теплоснабжения в условиях Республики Беларусь

В областных городах и городах областного подчинения в Республике Беларусь в области теплоснабжения в целом сохранилась структура СЦТ в виде проектных решений по схеме «теплоисточник – ЦТП – теплопотребитель», разработанных еще в бывшем СССР. В последние годы для обеспечения устойчивой работы энергосистемы в связи с вводом в эксплуатацию Белорусской АЭС выполнена программа оснащения теплоисточников (ТЭЦ и районных котельных) электродкотлами совместно с баками-аккумуляторами сетевой воды, что в целом повысило гибкость СЦТ.

Технические решения, разработанные в странах Западной Европы по созданию гибридных систем теплоснабжения по согласованию электрического и теплового графика выработки и потребления энергии, оптимизации



загрузки оборудования электрических сетей, не могут, как правило, напрямую быть рекомендованы к внедрению в Республике Беларусь и требуют адаптации к нашим условиям. Одним из направлений является развитие проведенных ранее исследований по разработке технологий создания гибридных тепловых пунктов [34] в системах теплоснабжения, которые позволили бы эффективно решать задачи по выравниванию графиков электрической и тепловой нагрузки, снижению уровня температур обратной сетевой воды (рис. 7), который, на наш взгляд, сегодня имеет завышенные значения.

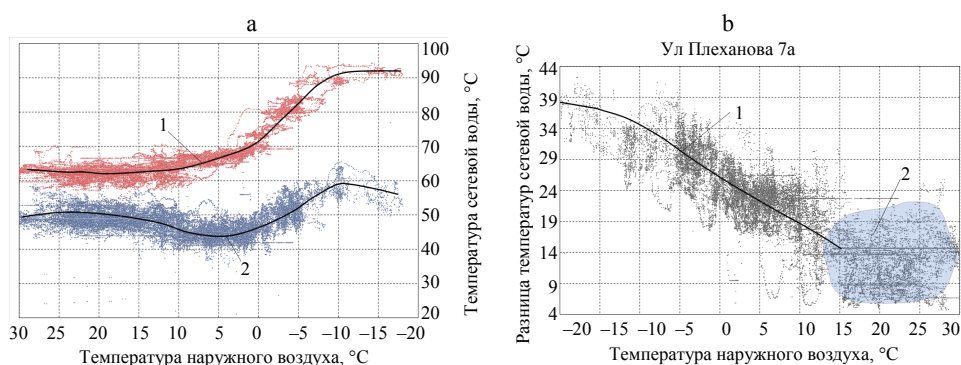


Рис. 7. Фактический температурный график (а) и разница температур прямой и обратной сетевой воды (б) за 2023 г. (на примере ЦТП СЦТ г. Минска)

Fig. 7. The actual temperature graph (a) and the temperature difference signature (b) for 2023 (based on the example of the central heating station in Minsk)

Применение гибридных схем также целесообразно рассмотреть для небольших населенных пунктов, включая объекты сельской местности, по критериям надежности и декарбонизации с использованием полного спектра доступных энергоресурсов [23].

## ВЫВОДЫ

1. Учитывая значимость отрасли теплоснабжения для большинства стран СНГ, в современных условиях является актуальным исследование проблемы трансформации существующих систем централизованного теплоснабжения в рамках развития тенденций интеграции отраслей энергетики, увеличения объемов потребления вторичных энергоресурсов, «обезуглероживания» промышленности и цифровизации экономики. Применение гибридных систем в теплоснабжении позволяет решать многофункциональную задачу повышения надежности энергоснабжения и устойчивости функционирования энергосистемы, что, в первую очередь, достигается решением проблемы балансировки мощностей производства и потребления энергии с позиции выравнивания графиков генерации и потребления энергии. Имеющийся опыт ряда западноевропейских стран в части перехода

к системам теплоснабжения 4-го и 5-го поколений не может быть использован при модернизации без адаптации и учета национальных условий.

2. Основным в концепции перехода к системам теплоснабжения нового поколения является придание им свойств гибкости и гибридности, что невозможно без развития информационности систем теплоснабжения. Для обеспечения требуемых маневренных свойств необходимы разработка и применение новых методов планирования и управления системами теплоснабжения. Главная цель оперативного управления гибридными тепловыми сетями – достижение динамического баланса между требуемым значением тепловой нагрузки потребителей, производством тепловой энергии и объемом аккумулирования, при этом системы аккумулирования тепловой энергии являются ключевым элементом гибридных систем теплоснабжения. Создание межсистемного информационного пространства предполагает разработку интеллектуальных систем управления технологическими процессами на основе анализа больших объемов данных.

Данная работа частично выполнена в рамках совместного научного проекта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и Министерства инновационного развития Республики Узбекистан «БРФФИ–МИРРУ-2022» (Договор T22УЗБ-052).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Future District Heating Systems and Technologies: On the Role of Smart Energy Systems and 4th Generation District Heating / H. Lund [et al.] // *Energy*. 2018. Vol. 165, Part A. P. 614–619. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.115>.
2. The Status of 4th Generation District Heating: Research and Results / H. Lund [et al.] // *Energy*. 2018. Vol. 164. P. 147–159. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.206>.
3. Perspectives on Fourth and Fifth Generation District Heating / H. Lund [et al.] // *Energy*. 2021. Vol. 227. P. 120520. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120520>.
4. Modelling of Waste Heat Integration Into an Existing District Heating Network Operating at Different Supply Temperatures / J. Stock [et al.] // *Smart Energy*. 2023. Vol. 10. P. 100104. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2023.100104>.
5. Latõšov, E. CO<sub>2</sub> Emission Intensity of the Estonian DH sector / E. Latõšov, S. Umbleja, A. Volkova // *Smart Energy*. 2022. Vol. 6. P. 100070. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2022.100070>.
6. Vocabulary for the Fourth Generation of District Heating and Cooling / M. Sulzer [et al.] // *Smart Energy*. 2021. Vol. 1. P. 100003. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2021.100003>.
7. Performance Analysis of a Hybrid District Heating System: a Case Study of a Small Town in Croatia / R. Mikulandric [et al.] // *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*. 2015. Vol. 3, Iss. 3. P. 282–302. <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.2015.03.0022>.
8. Rămă, M. Introduction of New Decentralised Renewable Heat Supply in an Existing District Heating System / M. Rămă, M. Wahlroos // *Energy*. 2018. Vol. 154. P. 68–79. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.105>.
9. Optimization-Based Operation of District Heating Networks: A Case Study for Two Real Sites / M. Schindler [et al.] // *Energies*. 2023. Vol. 16. P. 2120. <https://doi.org/10.3390/en16052120>.
10. Reiter, P. BIG Solar Graz: Solar District Heating in Graz – 500,000 m<sup>2</sup> for 20% Solar Fraction / P. Reiter, H. Poier, C. Holter // *Energy Procedia*. 2016. Vol. 91. P. 578–584. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.204>.

11. Теплоснабжение дома от теплонасосной системы, использующей возобновляемые источники энергии / В. Харченко [и др.] // Научные труды Литовской академии прикладных наук. 2012. № 7. С. 45–52.
12. Domestic Heating With Compact Combination Hybrids (Gas Boiler and Heat Pump): A Simple English Stock Model of Different Heating System Scenarios / G. Bennett // Building Services Engineering Research and Technology. 2021. Vol. 43, No 2. P. 143–159. <https://doi.org/10.1177/01436244211040449>.
13. EnergyPLAN – Advanced analysis of Smart Energy Systems, Smart / H. Lund [et al.] // Smart Energy. 2021. Vol. 1. P. 100007. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2021.100007>.
14. Role of Sustainable Heat Sources in Transition Towards Fourth Generation District Heating – A review / A. M. Jodeiri [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022. Vol. 158. P. 112156. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112156>.
15. Talarek, K. Challenges for District Heating in Poland / K. Talarek, A. Knitter-Piątkowska, T. Garbowski // Discover Energy. 2023. Vol. 3, No 5. <https://doi.org/10.1007/s43937-023-00019-z>.
16. 4<sup>th</sup> Generation District Heating (4GDH): Integrating Smart Thermal Grids Into Future Sustainable Energy Systems / H. Lund [et al.] // Energy. 2014. Vol. 68, P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.089>.
17. Large-Scale Solar Thermal Systems in Leading Countries: A Review and Comparative Study of Denmark, China, Germany and Austria / D. Tschopp [et al.] // Applied Energy. 2020. Vol. 270. P. 114997. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114997>.
18. Fifth Generation District Heating and Cooling: A Comprehensive Survey / L. Minh Dang [et al.] // Energy Reports. 2024. Vol. 11. P. 1723–1741. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.01.037>.
19. Overview of Solar Photovoltaic Applications for District Heating and Cooling / S. Sukumaran, J. Laht, A. Volkova // Environmental and Climate Technologies. 2023. Vol. 27, No 1. P. 964–979. <https://doi.org/10.2478/rtuct-2023-0070>.
20. Kubiński, K. Dynamic Model of Solar Heating Plant with Seasonal Thermal Energy Storage / K. Kubiński, Ł. Szablowski // Renewable Energy. 2020. Vol. 145. P. 2025–2033. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.120>.
21. Comprehensive Analysis of hot Water Tank Sizing for a Hybrid Solar-Biomass District Heating and cooling / Juan José Roncal-Casano [et al.] // Results in Engineering. 2023. Vol. 18. P. 101160. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101160>.
22. Gudmundsson, O. Source-to-sink Efficiency of Blue and Green District Heating and Hydrogen-based Heat Supply Systems / O. Gudmundsson, J. E. Thorsen // Smart Energy. 2022. Vol. 6. P. 100071. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2022.100071>.
23. Седнин, В. А. Анализ эффективности технологии производства водорода на мини-ТЭЦ на местных видах топлива термохимическим методом / В. А. Седнин, Р. С. Игнатович // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 4. P. 354–373. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-354-373>.
24. Pesola, A. Cost-Optimization Model to Design and Operate Hybrid Heating Systems – Case Study of District Heating System with Decentralized Heat Pumps in Finland / A. Pesola // Energy. 2023. Vol. 281. P. 128241. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128241>.
25. Rămă, M. Introduction of New Decentralised Renewable Heat Supply in an Existing District Heating System / M. Rămă, M. Wahlroos // Energy. 2018. Vol. 154. P. 68–79. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.105>.
26. Tosatto, A. Simulation-Based Performance Evaluation of Large-Scale Thermal Energy Storage Coupled with Heat Pump in District Heating Systems / A. Tosatto, A. Dahash, F. Ochs // Journal of Energy Storage. 2023. Vol. 61. P. 106721. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106721>.
27. Werner, S. Network Configurations for Implemented Low-Temperature District Heating / S. Werner // Energy. 2022. Vol. 254, Part B. P. 124091. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124091>.
28. Cascade Sub-Low Temperature District Heating Networks in Existing District Heating Systems / A. Volkova [et al.] // Smart Energy. 2022. Vol. 5. P. 100064. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2022.100064>.

29. A Review of Low-Temperature Sub-Networks in Existing District Heating Networks: Examples, Conditions, Replicability / S. Puschnigg [et al.] // *Energy Reports*. 2021. Vol. 7, Suppl. 4. P. 18–26. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.09.044>.
30. Современное состояние, тенденции и задачи интеллектуализации систем теплоснабжения (обзор) / Н. Н. Новицкий [и др.] // *Теплоэнергетика*. 2022. № 5. С. 65–83. <https://doi.org/10.1134/S0040363622040051>.
31. Sednin, A. V. Approach to Data Processing for the Smart District Heating System / A. V. Sednin, A. V. Zherelo // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, No 3. С. 240–249. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-240-249>.
32. Fault and Anomaly Detection in District Heating Substations: A Survey on Methodology and Data sets / M. Neumayer [et al.] // *Energy*. 2023. Vol. 276. 127569. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127569>.
33. Intelligent Approaches to Fault Detection and Diagnosis in District Heating: Current Trends, Challenges, and Opportunities / J. van Dreven [et al.] // *Electronics*. 2023. Vol. 12, No 6. P. 1448. <https://doi.org/10.3390/electronics12061448>.
34. 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>.

Поступила 26.12.2023    Подписана в печать 28.02.2023    Опубликована онлайн 29.03.2024

#### REFERENCES

1. Lund H., Duic N., Østergaard P. A., Mathiesen, B. V. (2018). Future District Heating Systems and Technologies: On the Role of Smart Energy Systems and 4<sup>th</sup> Generation District Heating. *Energy*, 165 (Part A), 614–619. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.115>.
2. Lund H., Østergaard P. A., Chang M., Werner S., Svendsen S., Sorknæs P., Thorsen J. E., Hvelplund F., Mortensen B. O. G., Mathiesen B. V., Bojesen C., Duic N., Zhang X., Möller B. (2018) The Status of 4<sup>th</sup> Generation District Heating: Research and Results. *Energy*, 164, 147–159. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.20>.
3. Lund H., Østergaard P. A., Nielsen T. B., Werner S., Thorsen J. E., Gudmundsson O., Arabkoohsar A., Mathiesen B. V. (2021) Perspectives on Fourth and Fifth Generation District Heating. *Energy*, 227, 120520. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120520>.
4. Stock J., Arjuna F., Xhonneux A., Müller D. (2023) Modelling of Waste Heat Integration Into an Existing District Heating Network Operating at Different Supply Temperatures. *Smart Energy*, 10, 100104. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2023.100104>.
5. Latõšov E., Umbleja S., Volkova A. (2022) CO2 Emission Intensity of the Estonian DH Sector. *Smart Energy*, 6, 100070. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2022.100070>.
6. Sulzer M., Werner S., Mennel S., Wetter M. (2021) Vocabulary for the Fourth Generation of District Heating and Cooling. *Smart Energy*, 1, 100003. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2021.100003>.
7. Mikulandrić R., Krajacic G., Duic N., Khavin G., Lund H., Mathiesen B. (2015). Performance Analysis of a Hybrid District Heating System: a Case Study of a Small Town in Croatia. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 3 (3), 282–302. <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.2015.03.0022>.
8. Rämä M., Wahlroos M. (2018) Introduction of New Decentralised Renewable Heat Supply in an Existing District Heating System. *Energy*, 154, 68–79. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.105>.
9. Schindler M., Gnam L., Puchegger M., Medwenitsch K., Jasek P. (2023) Optimization-Based Operation of District Heating Networks: A Case Study for Two Real Sites. *Energies*, 16, 2120. <https://doi.org/10.3390/en16052120>.

10. Reiter P., Poier H., Holter Ch. (2016) BIG Solar Graz: Solar District Heating in Graz – 500.000 m<sup>2</sup> for 20 % Solar Fraction. *Energy Procedia*, 91, 578–584. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.204>.
11. Kharchenko V., Chemekov V., Tikhonov P., Adomavicius V. (2012) Heat Supply of the House from a Heat Pump System Using Renewable Energy Sources. *Scientific Proceedings of the Lithuanian Academy of Applied Sciences*, (7), 45–52 (in Russian).
12. Bennett G., Watson S., Oreszczyn T. (2021). Domestic Heating with Compact Combination Hybrids (Gas Boiler and Heat Pump): A Simple English Stock Model of Different Heating System Scenarios. *Building Services Engineering Research and Technology*, 43 (2), 143–159. <https://doi.org/10.1177/01436244211040449>.
13. Lund H., Thellufsen J. Z., Østergaard P. A., Sorknæs P., Skov I. R., Mathiesen B. V. (2021) EnergyPLAN – Advanced Analysis of Smart Energy Systems. *Smart Energy*, 1, 100007. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2021.100007>.
14. Jodeiri A. M., Goldsworthy M. J., Buffa S., Cozzini M. (2022) Role of Sustainable Heat Sources in Transition Towards Fourth Generation District Heating – A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112156. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112156>.
15. Talarek K., Knitter-Piątkowska A., Garbowski T. (2023) Challenges for District Heating in Poland. *Discover Energy*, 3 (5). <https://doi.org/10.1007/s43937-023-00019-z>.
16. Lund H., Werner S., Wiltshire R., Svendsen S., Thorsen J. E., Hvelplund F., Mathiesen B. V. (2014) 4<sup>th</sup> Generation District Heating (4GDH): Integrating Smart Thermal Grids into Future Sustainable Energy Systems. *Energy*, 68, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.089>.
17. Tschopp D., Tian Z., Berberich M., Fan J., Perers B., Furbo S. (2020). Large-Scale Solar Thermal Systems in Leading Countries: A Review and Comparative Study of Denmark, China, Germany and Austria. *Applied Energy*, 270, 114997. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114997>.
18. Minh Dang L., Le Quan Nguyen, Junyoung Nam, Tan N. Nguyen, Sujin Lee, Hyoung-Kyu Song, Hyeonjoon Moon (2024) Fifth Generation District Heating and Cooling: A Comprehensive Survey. *Energy Reports*, 11, 1723–1741. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.01.037>.
19. Sukumaran S., Laht J., Volkova A. (2023). Overview of Solar Photovoltaic Applications for District Heating and Cooling. *Environmental and Climate Technologies*, 27 (1), 964–979. <https://doi.org/10.2478/rtuect-2023-0070>.
20. Kubiński K., Szablowski Ł. (2020) Dynamic Model of Solar Heating Plant with Seasonal Thermal Energy Storage. *Renewable Energy*, 145, 2025–2033. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.120>.
21. Roncal-Casano J. J., Rodriguez-Martín J., Abánades A., Muñoz-Antón J., Gurruchaga I., Castellví D. G. (2023) Comprehensive Analysis of Hot Water Tank Sizing for a Hybrid Solar-biomass District Heating and Cooling. *Results in Engineering*, 18, 101160. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101160>.
22. Gudmundsson O., Jan Eric Thorsen J. E. (2022) Source-to-Sink Efficiency of Blue and Green District Heating and Hydrogen-Based Heat Supply Systems. *Smart Energy*, 6, 100071. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2022.100071>.
23. 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).
24. Pesola A. (2023) Cost-Optimization Model to Design and Operate Hybrid Heating Systems – Case Study of District Heating System with Decentralized Heat Pumps in Finland. *Energy*, 281, 128241. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128241>.
25. Rămă M., Wahlroos M. (2018) Introduction of New Decentralised Renewable Heat Supply in an Existing District Heating System. *Energy*, 154, 68–79. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.105>.

26. Tosatto A., Dahash A., Ochs F. (2023) Simulation-Based Performance Evaluation of Large-scale Thermal Energy Storage Coupled with Heat Pump in District Heating Systems. *Journal of Energy Storage*, 61, 106721. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106721>.
27. Werner S. (2022) Network Configurations for Implemented Low-Temperature District Heating. *Energy*, 254 (Part B), 124091. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124091>.
28. Volkova A., Reuter S., Puschnigg S., Kauko H., Schmidt R.-R., Leitner B., Moser S. (2022) Cascade Sub-Low Temperature District Heating Networks in Existing District Heating Systems. *Smart Energy*, 5, 100064. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2022.100064>.
29. Puschnigg S., Jauschnik G., Moser S., Volkova A., Matthias L. (2021) A Review of Low-Temperature Sub-Networks in Existing District Heating Networks: Examples, Conditions, Replicability. *Energy Reports*, 7 (4), 18–26. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.09.044>.
30. Novitskii N. N., Shalaginova Z. I., Alekseev A. V., Grebneva O. A., Tokarev V. V., Lutsenko A. V., Vanteeva O. V. (2022) Intellectualization of Heat-Supply Systems: Current State, Trends and Tasks (a Review). *Thermal Engineering*, 5, 65–83. <https://doi.org/10.1134/S0040363622040051> (in Russian).
31. Sednin A. V., Zherelo A. V. (2022) An Approach to Data Processing for the Smart District Heating System. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (3), 240–249. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-240-249>.
32. Neumayer M., Stecher D., Grimm S., Maier A., Bucker D., Schmidt J. (2023) Fault and Anomaly Detection in District Heating Substations: A Survey on Methodology and Data Sets. *Energy*, 276, 127569. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127569>.
33. van Dreven J., Boeva V., Abghari S., Grahm H., Al Koussa J., Motoasca E. (2023) Intelligent Approaches to Fault Detection and Diagnosis in District Heating: Current Trends, Challenges, and Opportunities. *Electronics*, 12 (6), 1448. <https://doi.org/10.3390/electronics12061448>.
34. 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).

Received: 26 December 2023   Accepted: 28 February 2023   Published online: 29 March 2024