Ивановский государственный энергетический университет

Вестник Ивановского государственного энергетического университета (Вестник ИГЭУ)

Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta (Vestnik IGEU)

Журнал издается с 2001 года ISSN 2072-2672 Индекс 18079 2026 / Вып. 5

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Г.В. Ледуховский, д-р техн. наук (Иваново) (главный редактор)
И.К. Муравьев, канд. техн. наук (Иваново) (зам. главного редактора)
Е.Н. Бушуев, д-р техн. наук (Иваново)
А.Р. Гайдук, д-р техн. наук (Таганрог)
В.П. Жуков, д-р техн. наук (Иваново)
Ю.Б. Казаков, д-р техн. наук (Иваново)
А.Б. Капранова, д-р физ.-мат. наук (Ярославль)
С.В. Клюнина, нач. УИУНЛ (Иваново)
А.Р. Колганов, д-р техн. наук (Иваново)
С.В. Косяков, д-р техн. наук (Иваново)
В.В. Курейчик, д-р техн. наук (Таганрог)
М.Ш. Мисриханов, д-р техн. наук (Москва)
А.В. Митрофанов, д-р техн. наук (Иваново)
А.Ю. Мурзин, канд. техн. наук (Иваново)
В.Ф. Очков, д-р техн. наук (Москва)
С.В. Тарарыкин, д-р техн. наук (Иваново)
М.Ю. Таршис, д-р техн. наук (Ярославль)
А.И. Тихонов, д-р техн. наук (Иваново)
В.А. Шуин, д-р техн. наук (Иваново)

Над номером работали:

Ответственные за выпуск: Е.Н. Бушуев, А.Ю. Мурзин, А.Р. Колганов,

Начальник УИУНЛ **С.В. Клюнина**
Технический редактор **Н.В. Королева**
Редактор **С.М. Коткова**

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

М.В. Темлянцев, В.В. Бухмиров, П.В. Артамонов, Е.Н. Бушуев, О.Г. Модзелевская, К.В. Беляев. Применение пылеугольного топлива при плавке в низкошахтных печах.....**5**

О.Г. Модзелевская, А.В. Феоктистов, А.А. Куценко, В.В. Бухмиров, М.В. Темлянцев. Плавка силикатных материалов в промышленном комплексе на основе низкошахтной печи с расширенными технологическими возможностями.....**12**

В.В. Смирнов, Ю.В. Яворовский, М.В. Козлова, Н.Н. Смирнов, С.И. Шувалов. Методика анализа экономической эффективности от применения термогидравлического распределителя в тепловых пунктах.....**20**

Р.А. Анненков, Р.В. Безуглов, В.Б. Ильин, Д.А. Пономарев, Д.А. Пономарев. Сравнение воздушной газификации твердых органических отходов и пеллет с добавлением низкосортного угля.....**31**

Е.В. Котова, В.А. Кудинов, К.В. Колотилкина, Е.В. Стефанюк, И.В. Кудинов. Исследование условий теплового взрыва в пластине с переменными свойствами при зависимости источника теплоты от температуры.....**36**

О.Б. Колибаба, Р.Д. Адакин, Е.А. Шуина. Совершенствование теплогенератора ротационной хлебопекарной печи на основе математического моделирования.....**46**

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

М.А. Захаров, А.С. Страхов, Е.М. Новоселов, Д.А. Полкошников, Г.Д. Смирнов, А.А. Скоробогатов. Диагностирование обмоток роторов асинхронных двигателей в режиме выбега по внешнему магнитному полю.....**53**

И.А. Галанин, Т.Ю. Шадрикова. Схема замещения кабельной сети 6–10 кВ для локации однофазных замыканий на землю с применением искусственной нейронной сети.....**62**

Л.Т. Тухватуллин, Р.Г. Исаков. Методика оценки эффективности мероприятий для обеспечения устойчивости технологического процесса промышленных предприятий при провалах напряжения.....**72**

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Ю.Н. Кожубаев, А.А. Градецкий, К.Ю. Федоров. Комплексный метод обнаружения аномалий для прогнозирования технического обслуживания ленточных конвейеров.....**79**

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ

В.П. Жуков, И.А. Кокулин, В.Н. Виноградов, С.Д. Горшенин, Е.В. Барочкин. Постановка и решение обратной задачи диагностики состояния многоступенчатых испарительных установок мгновенного вскипания.....**89**

Журнал «Вестник Ивановского государственного энергетического университета» включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, утвержденных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук и ученой степени доктора наук по следующим научным специальностям: 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами; 2.3.7. Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования; 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы; 2.4.3. Электроэнергетика; 2.4.5. Энергетические системы и комплексы; 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника; 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий.

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

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

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Ivanovo State Power Engineering University

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

The Journal has been published since 2001 ISSN 2072-2672 2026 / Issue 5

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

EDITORIAL BOARD:

G.V. Ledukhovsky, Doctor of Engineering (Ivanovo) (Chief Editor)
I.K. Muravyev, Candidate of Engineering (Ivanovo) (Chief Editor Assistant)
E.N. Bushuyev, Doctor of Engineering (Ivanovo)
A.R. Gaiduk, Doctor of Engineering (Taganrog)
V.P. Zhukov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
Yu.B. Kazakov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
A.B. Kapranova, Doctor of Physics and Mathematics (Yaroslavl)
S.V. Klyunina (Ivanovo)
A.R. Kolganov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
S.V. Kosyakov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
V.V. Kureychik, Doctor of Engineering (Taganrog)
M.Sh. Misrikhanov, Doctor of Engineering (Moscow)
A.V. Mitrofanov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
A.Yu. Murzin, Candidate of Engineering (Ivanovo)
V.F. Ochkov, Doctor of Engineering (Moscow)
S.V. Tararykin, Doctor of Engineering (Ivanovo)
M.Yu. Tarshis, Doctor of Engineering (Yaroslavl)
A.I. Tikhonov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
V.A. Shuin, Doctor of Engineering (Ivanovo)

The issue is prepared by:

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

Chief of Educational and Scientific
Literature Publishing Office **S.V. Klyunina**
Technical Editor **N.V. Koroleva**
Editor **S.M. Kotkova**

CONTENT

HEAT AND POWER ENGINEERING

M.V. Temlyantsev, V.V. Bukhmirov, P.V. Artamonov, E.N. Bushuev, O.G. Modzelevskaya, K.V. Belyaev. Use of pulverized coal fuel in low-shaft furnace smelting.....**5**

O.G. Modzelevskaya, A.V. Feoktistov, A.A. Kutsenko, V.V. Bukhmirov, M.V. Temlyantsev. Melting of silicate materials in an industrial complex based on a low- shaft furnace with extended technological capabilities.....**12**

V.V. Smirnov, Yu.V. Yavorovsky, M.V. Kozlova, N.N. Smirnov, S.I. Shuvalov. Methodology to analyze the economic efficiency of using a thermohydraulic distributor in heat substations...**20**

R.A. Annenkov, R.V. Bezuglov, V.B. Ilyin, D.A. Ponomarev, D.A. Ponomarev. Comparison of air gasification of solid organic waste and pellets with the addition of low-grade coal.....**31**

E.V. Kotova, V.A. Kudinov, K.V. Kolotilkina, E.V. Stefanyuk, I.V. Kudinov. Study of thermal explosion conditions in a plate with variable properties and temperature-dependent heat source.....**36**

O.B. Kolibaba, R.D. Adakin, E.A. Shuina. Enhancement of heat generator of a rotary baking oven based on mathematical modeling.....**46**

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

M.A. Zakharov, A.S. Strakhov, E.M. Novoselov, D.A. Polkoshnikov, G.D. Smirnov, A.A. Skorobogatov. Diagnostic of rotor windings of induction motors in rundown mode using an external magnetic field.....**53**

I.A. Galanin, T.Yu. Shadrikova. Equivalent circuit of a 6–10 kV cable network for locating single-phase earth faults using an artificial neural network.....**62**

L.T. Tukhvatullin, R.G. Isakov. Methodology to assess the effectiveness of measures to ensure the stability of technological process of industrial enterprises during voltage dips.....**72**

AUTOMATION CONTROL SYSTEMS

Yu.N. Kozhubaev, A.A. Gradetskiy, K.Yu. Fedorov. Comprehensive anomaly detection method for predictive maintenance of belt conveyors.....**79**

MATHEMATICAL METHODS IN ENGINEERING AND TECHNOLOGY

V.P. Zhukov, I.A. Kokulin, V.N. Vinogradov, S.D. Gorshenin, E.V. Barochkin. Formulation and solution of the inverse problem of diagnostics of the state of multi-stage flash evaporative units.....**89**

The Journal «Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University» is included in the List of Leading Reviewed Scientific Journals and Publications, which are approved by the State Commission for Academic Degrees and Titles of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for publishing the main scientific results of the dissertations on the candidate and doctoral degrees for the following groups of specialties: 2.3.3. Automation and Control of Technological Processes and Production; 2.3.7. Computer Simulation and Computer-Aided Design; 2.4.2. Electrotechnical Complexes and Systems; 2.4.3. Electric Power Industry; 2.4.5. Energy Systems and Complexes; 2.4.6. Theoretical and Applied Heat Engineering; 2.6.13. Processes and Apparatuses of Chemical Technologies.

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

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

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

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 624.365

Михаил Викторович Темлянцев
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», доктор технических наук, профессор кафедры теплоэнергетики и экологии, Россия, Новокузнецк, телефон 8(3843) 74-89-16, e-mail: uchebn_otdel@sibsiu.ru

Вячеслав Викторович Бухмиров
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры теоретических основ теплотехники, Россия, Иваново, телефон 8(4932) 26-97-76, e-mail: bao6095@mail.ru

Павел Викторович Артамонов
ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова», кандидат технических наук, доцент кафедры Н3 механика твердого деформированного тела, Россия, Санкт-Петербург, e-mail: artamonov_pv@voenmeh.ru

Евгений Николаевич Бушуев
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой теоретических основ теплотехники, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-76, e-mail: zavkaf_tot@ispu.ru

Ольга Геннадьевна Модзелевская
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», преподаватель кафедры теплоэнергетики и экологии, Россия, Новокузнецк, телефон 8(3843) 74-89-86, e-mail: modzelevskaya_og@sibsiu.ru

Кирилл Вадимович Беляев
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», аспирант кафедры теплоэнергетики и экологии, Россия, Новокузнецк, телефон 8(3843) 74-89-16, e-mail: belkir1976@mail.ru

Применение пылеугольного топлива при плавке в низкошахтных печах

Авторское резюме

Состояние вопроса. Промышленные исследования по вдуванию пылевидных частиц каменного угля в низкошахтные печи в целях снижения расхода твердого топлива известны, накоплен и обобщен определенный практический опыт. Несмотря на очевидный положительный эффект, этот метод для низкошахтных печей изучен недостаточно. Вследствие отсутствия теоретической базы по расчету оптимальных параметров использования угля при его вдувании в шахту низкошахтной печи возникают сложности с получением стабильных результатов в процессе выплавки на агрегатах различной производительности. В связи с этим актуальным является разработка теоретической базы для расчета оптимальных параметров вдувания пылеугольного топлива, что позволит дать практические рекомендации по его применению.
Материалы и методы. Исследование осуществлено с использованием метода математического моделирования теплоэнергетических процессов, происходящих в низкошахтных печах при вдувании пылеугольного топлива. Расчеты выполнены на основе уравнений теплового и материального баланса, аэродинамики газопылевого потока и с использованием эмпирических зависимостей для различных марок углей.
Результаты. Проведен сравнительный анализ полученных данных выгорания частиц различных марок углей в низкошахтных печах. Установлено, что для приготовления пылеугольного топлива следует использовать тощие угли, измельченные до размера частиц 0,03–0,075 мм, с низким содержанием золы 16 % на сухую массу;

© Темлянцев М.В., Бухмиров В.В., Артамонов П.В., Бушуев Е.Н., Модзелевская О.Г., Беляев К.В., 2026
Вестник ИГЭУ, 2026, вып. 5, с. 5–11.

низкошахтная печь должна быть оборудована тремя рядами фурм с расстоянием между ними 350–400 мм; пылеугольное топливо при этом оптимально подавать в фурмы нижнего ряда с постоянным его расходом во времени для всех фурм нижнего ряда в одинаковом количестве для каждой фурмы.
Выводы. Результаты проведенного исследования позволяют дать практические рекомендации по подготовке и подаче пылеугольного топлива, конструкции низкошахтной печи, обеспечивающей стабильный ход плавки.

Ключевые слова: низкошахтная печь, пылеугольное топливо, температура расплава, горение угольной пыли, тепловой баланс, тощие угли

Mikhail Viktorovich Temlyantsev
Siberian State Industrial University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Thermal Power Engineering and Ecology Department, Russia, Novokuznetsk, telephone 8(3843) 74-89-16, e-mail: uchebn_otdel@sibsiu.ru

Vyacheslav Viktorovich Bukhmirov
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Theoretical Foundations of Heat Engineering Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-76, e-mail: bao6095@mail.ru

Pavel Viktorovich Artamonov
Baltic State Technical University “VOENMEH”, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Mechanics of Deformable Solid body, Russia, St. Petersburg, e-mail: artamonov_pv@voenmeh.ru

Evgeny Nikolaevich Bushuev
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Associate Professor, Head of Theoretical Foundations of Heat Engineering Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-76, e-mail: zavkaf@tot.ispu.ru

Olga Gennadyevna Modzelevskaya
Siberian State Industrial University, Lecturer of Thermal Power Engineering and Ecology Department, Russia, Novokuznetsk, telephone 8(3843)74-89-86, e-mail: modzelevskaya_og@sibsiu.ru

Kirill Vadimovich Belyaev
Siberian State Industrial University, Post graduate Student of Thermal Power Engineering and Ecology Department, Russia, Novokuznetsk, telephone 8(3843)74-89-16, e-mail: belkir1976@mail.ru

Use of pulverized coal fuel in low-shaft furnace smelting

Abstract

Background. Industry research on the issues of injection of pulverized coal particles into low-shaft furnaces to reduce solid fuel consumption is well known. A certain amount of practical experience has been accumulated and summarized. Despite the obvious positive effects, this method for low-shaft furnaces has not been fully explored. Due to the lack of a theoretical basis to calculate optimal parameters of coal injection when injected into the shaft of a low-shaft furnace, certain difficulties arise in achieving consistent results during smelting using units with varying productivity. Thus, development of a theoretical framework to calculate the optimal parameters of pulverized coal injection is a matter of current importance, as it will make it possible to provide practical recommendations for its application.
Materials and methods. A mathematical modeling method has been used to examine the thermal energy processes occurring in the low-shaft furnaces during pulverized coal injection. Calculations are based on heat and mass balance equations, gas-dust flow aerodynamics, and empirical relationships for various coal grades.
Results. A comparative analysis of the obtained data on the burnout of particles of various coal grades in low-shaft furnaces was carried out. It has been established that lean coals, ground to a particle size of 0,03–0,075 mm with a low ash content of 16 % on a dry basis should be used to prepare pulverized coal fuel. The low-shaft furnace must be equipped with three rows of tuyeres spaced 350–400 mm apart. Pulverized coal fuel should be optimally fed to the tuyeres of the bottom row with a constant flow rate for all tuyeres in the bottom row at the same rate for each tuyere.
Conclusions. The results of the study make it possible to provide practical recommendations for the preparation and injection of pulverized coal fuel, and design of the low-shaft furnaces that ensures stable smelting process.

Key words: low-shaft furnace, pulverized coal fuel, melt temperature, coal dust combustion, heat balance, lean coals

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.5.005-011

Введение. Обобщение длительного опыта работы низкошахтных печей (НШП) позволяет разделить все известные способы повышения эффективности шахтной плавки на две укрупненные группы [1]. В первую из них попадают технологические приемы, базирующиеся на материальных балансах ключевых термохимических реакций, которые определяют состав шихты и конечного расплава; на теплотехнических решениях, касающихся выбора рацио-

нальной конструкции агрегата, режимных параметров; на оптимизации газодинамических условий в печи. Вторая группа объединяет кинетические методы, которые ориентированы на интенсификацию внутренних процессов тепломассопереноса и направлены на преодоление диффузионных и термических сопротивлений при нагреве шихтовых материалов за счет привлечения внешних источников тепла.

Считается, что шахтные печи относятся к типичным тепловым аппаратам [2], а доменная печь по праву считается их классическим и наиболее изученным представителем [3]. Как показывает практика, одним из решающих условий получения высоких технико-экономических показателей при плавке в шахтной печи выступает строгое соблюдение очередности введения интенсификаторов плавки. При этом выбор диаметра фурм следует соотносить не с изменением кинетической энергии дутья, а с предотвращением снижения общего расхода дутья и падением полной механической энергии дутьевых потоков и горнового газа.

В ряде исследований в качестве действенного инструмента интенсификации шахтной плавки кусковых материалов рассматривается применение пылеугольного топлива (ПУТ) [4]. В [5] детально проанализированы технологические и конструктивные возможности выплавки чугуна с вдуванием ПУТ в низкошахтных печах и зафиксировано, что при использовании пылеугольного топлива и сохранении температуры жидкого расплава на исходном уровне удается снизить расход кокса на 25–28 кг в расчете на тонну чугуна. Экспериментально подтверждено отсутствие каких-либо сбоев в работе плавильного комплекса, а также стабильность состава и свойств получаемого расплава.

Для количественной оценки эффективности применения дополнительного пылеугольного топлива в низкошахтной печи в [6–8] предложен специальный критерий – тепловой эквивалент добавочного топлива, который, как и эквиваленты шихтовых материалов, рассчитывается из уравнения теплового баланса. Учитывая необходимость унификации трудоемких подготовительных операций с пылевидным топливом, предлагается использовать комплексную аппаратуру, позволяющую осуществлять вдувание мелкодисперсных частиц практически без технологических ограничений. Дополнительно обоснована возможность выплавки чугуна в НШП при импульсной подаче струи ПУТ в дутье и сделан вывод о воспроизводимости и стабильности полученных результатов.

Научная литература достаточно полно освещает различные аспекты, связанные с применением ПУТ в шахтных печах. Так, при переводе доменной печи на технологию вдувания пылеугольного топлива практически неизбежно возникает усиление периферийного газового потока. Причин для этого явления существует несколько, однако до настоящего времени отсутствует однозначное объяснение случаев возникновения экстремально сильного периферийного потока в фурменной зоне, который сопровождается резким ростом тепловой нагрузки на холодильники заплечиков. Такие случаи наблюдались в ряде доменных печей при переходе на вдувание ПУТ [9]. Выполненный в [9] анализ позволил сделать вывод, что необходимо непрерывно контролировать и регулировать энергетические характеристики дутьевых потоков и колошникового газа, причем это требование становится особенно актуальным именно при использовании ПУТ.

Методы исследования. В [10] представлена математическая модель, описывающая горение отдельной угольной частицы в фурменном очаге доменной печи. С помощью этой модели можно оценить полноту выгорания угольной частицы при варьировании дутьевых параметров (температуры, расхода и скорости дутья), характеристик самого ПУТ (гранулометрического состава и содержания летучих компонентов) и расхода природного газа. На основе теплоэнергетической модели в [10] выведена формула для расчета коэффициента замещения кокса смесью пылеугольного топлива с природным газом или без него в широком диапазоне химического состава вдуваемых углей. С помощью вычислительных экспериментов установлены количественные закономерности влияния температуры дутья, дисперсности ПУТ и совместной подачи угля с природным газом на процессы воспламенения, горения и перемещения угольной частицы в фурменном очаге. Показано, что сократить время полного выгорания частицы и уменьшить расстояние ее переноса от горелки можно тремя основными способами: повышением температуры дутья, использованием комбинированного вдувания ПУТ и природного газа, а также снижением крупности угольной пыли. Обобщение результатов моделирования однозначно указывает на то, что определяющее влияние на момент воспламенения и полноту сжигания угольной частицы оказывает температура дутья: чем она выше, тем интенсивнее протекает горение угольной пыли. Вдувание природного газа совместно с ПУТ способствует дополнительному увеличению температуры угольных частиц за счет их более раннего воспламенения и тепловыделения от сжигания газа. Пылевидное топливо вдувают в топливную насадку НШП в холодном состоянии с начальной температурой 25 °С. Вследствие этого происходит захолаживание газового потока вблизи фурм. Потерю температуры $\Delta T_{\text{Г}}$ можно определить из уравнения теплового баланса:

$$V^{o} k_{\text{Г}} c_{\text{Г}} (T_{\text{Г}} - T_{\text{Г}}^{0}) = \beta_{\text{П}} V^{o} c_{\text{П}} (T_{\text{Г}} - T_{\text{Г}}^{0}), \qquad (1)$$

где V^o – количество дутья, подаваемого в печь, без добавки в него пылевидного топлива, м³/с; $k_Г$ – коэффициент выхода газов; $c_Г$ и $c_П$ – теплоемкости газа и угольной пыли, кДж/(м³·К); $T_Г$ и $T_Г^0$ – текущее и начальное значения температуры газа, К; $\beta_П$ – масса угольной пыли в 1 м³ дутья, кг/м³.

Из (1) следует, что дополнительное охлаждение газа составит

$$\Delta T_Г = \frac{\beta_П c_П}{k_Г c_Г}\left(\frac{k_Г c_Г T_Г + \beta_П c_П T_Г^0}{k_Г c_Г + \beta_П c_П} - T_Г^0\right). \quad (2)$$

Пылевидная частица увлекается потоком газа и движется вверх относительно неподвижного слоя топлива со скоростью [10], равной

$$\upsilon_П = \upsilon_Г^В\left[\sqrt{1+\frac{f_П \rho_Г (\upsilon_Г^0)^2}{2g\rho_П d_Т \beta_П^{(V)}}} - 1\right], \quad (3)$$

где $\upsilon_Г^В = \sqrt{\frac{4\rho_П g d_П}{3\rho_Г f_П}}$ – взвешивающая скорость; $\rho_П$ и $\rho_Г$ – плотности твердой частицы пыли и газа; g – ускорение свободного падения, м/с²; $d_П$ и $f_П$ – средний размер твердой частицы и коэффициент сопротивления ее движению в газовом потоке; $f_Т$ – коэффициент сопротивления в твердом топливном слое за счет добавки пыли в газ:

$$f_Т = \frac{f_П(1-\varepsilon_Т)T_Г}{\varepsilon_Т^3 T_Г^0}\cdot 1{,}6\beta_П^{(V)}\left[\frac{10}{\upsilon_Г^В} + \left(1+2\beta_П^{(V)}\right)\right];$$

$\varepsilon_Т$ – порозность слоя топлива; $\beta_П^{(V)}$ – объемная доля твердых частиц пыли в газе; $\upsilon_Г^0$ – скорость газа в пустой шахте печи; $d_Т$ – средний размер частицы твердого топлива в насадке.

Полное сгорание частицы угольной пыли должно произойти на уровне, равном высоте L кислородной зоны, по реакции $C + O_2 \rightarrow CO_2 + \Delta H_1$. Эта реакция дает максимальное выделение теплоты ΔH_1 в области очага горения. Известно [11], что в этом случае из низкошахтной печи можно получить максимально перегретый расплав. Для времени горения твердой частицы τ должно выполняться следующее неравенство:

$$\tau \le \frac{L}{\upsilon_П}. \quad (4)$$

Результаты исследования. Исследования процесса выгорания частиц из различных марок углей позволили получить эмпирические уравнения, позволяющие рассчитать время воспламенения и сгорания угольной пыли [12]. Горение угольной частицы можно представить в виде четырехстадийного процесса: нагрев частиц до воспламенения летучих; горение летучих; нагрев топливного остатка до его воспламенения; горение топливного остатка. Четырехстадийное развитие процесса горения угольной пыли характерно для широкого диапазона размеров частиц и температуры газовой среды.

Время нагрева частиц до воспламенения летучих (τ_1) возрастает линейно с увеличением размера частиц и уменьшается пропорционально температуре газовой среды в четвертой степени:

$$\tau_1 = 2{,}5\cdot 10^5 \cdot T_Г^{-4} \cdot d_П. \quad (5)$$

Выгорание летучих не зависит от температуры газовой среды и описывается уравнением

$$\tau_2 = 0{,}45\cdot 10^{-6}\cdot d_П^2. \quad (6)$$

Прогрев топливного остатка до его воспламенения наступает после второй стадии и описывается уравнением

$$\tau_3 = 5{,}36\cdot 10^4 T_Г^{-1{,}2}\cdot d_П^2. \quad (7)$$

Длительность завершающей стадии горения топливного остатка определяется по выражению

$$\tau_4 = 3{,}09\cdot 10^6 \frac{100 - A_Т^К \rho_Т d_П^2}{100 T_Г^{0{,}9} O_2}, \quad (8)$$

где $A_Т^К = 100\cdot A^р/(100 - W^р)$ – содержание золы в топливном остатке, %; $A^р$ – содержание золы в рабочей массе, %; $\rho_Т = \rho_П\ (100 - W^р - V^р - A^р)/100$ – кажущаяся плотность топливного остатка, кг/м³; $V^р$ – содержание летучих в рабочей массе, %; O_2 – первоначальная объемная концентрация кислорода в дутье, %.

Тогда основное неравенство (4) можно записать как

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 \le \frac{L}{\upsilon_П}. \quad (9)$$

Из вышесказанного следует, что в пределах кислородной зоны должно произойти полное выгорание угольной пыли. Ее вынос в редукционную зону интенсифицирует реакцию $CO_2 + C \rightarrow 2CO - \Delta H_2$ из-за резкого увеличения поверхности реагирования. В этом случае повышается содержание монооксида углерода в отходящих газах, зона плавления опустится к кислородной зоне, вследствие чего уменьшится зона перегрева, что повлечет за собой уменьшение температуры расплава на выпуске.

Производительность P низкошахтной печи определяется скоростью выгорания топлива топливной насадки [11]:

$$P = 0{,}537\,\frac{q O_2}{M_Т}\,\frac{CO_2 + CO}{CO_2 + 0{,}5CO}, \quad (10)$$

где q – удельный расход дутья, м³/(м²·с); $M_Т$ – расход топлива, % от завалки; CO_2 и CO – содержание диоксида и монооксида углерода в отходящих газах, % (объемный).

Так как часть кислорода из дутья уходит на горение угольной пыли, то при $M_Т$ = const и q = const это повлечет за собой снижение производительности печи. Для сохранения производительности НШП на прежнем уровне следует снизить расход топлива. Для пыли постоянного фракционного состава имеются два предельных значения удельного расхода угольной пыли – $\beta_П^{(1)}$ и $\beta_П^{(2)}$, кг/(м²·с). Если принять за $\beta_П$ фактический удельный расход угольной пыли, то при $\beta_П < \beta_П^{(1)}$ в области кислородной зоны вся пыль выгорит полностью. Повышение температуры расплава в этом случае составит 20–30 °С, что не повлечет за собой практически никакого изменения производительности печи. При $\beta_П < \beta_П^{(1)} < \beta_П^{(2)}$ угольная пыль сгорит в пределах кислородной и восстановительной зон, температура расплава повысится на 15–25 °С, при этом произойдет увеличение производительности печи на 5–10 %. При $\beta_П > \beta_П^{(2)}$ часть угольной пыли будет выноситься из НШП, а часть, взаимодействуя с расплавом, будет блокировать куски топлива и шихты, процессы горения и теплообмена будут замедляться, что в свою очередь повлечет за собой уменьшение температуры получаемого расплава и производительности печи.

Наилучшие параметры по температуре расплава и производительности должны быть обеспечены при подаче угольной пыли в НШП с тройным дутьем [13]. У таких печей высота кислородной зоны составляет 1,05–1,20 м, вместо 0,35–0,40 м для однорядных НШП, и в печь можно осуществлять подачу угольной пыли в 1,5–2 раза больше, сохраняя оптимальное соотношение между параметрами температуры расплава и производительностью плавильного агрегата.

Исходные данные для расчета по формулам (1)–(9) – аэродинамические характеристики частиц пыли и газового потока: $d_П$ = 0,0005 м; $d_Т$ = 0,05 м; q = 2 м/с; $\varepsilon_Т$ = 0,4; $\rho_Г$ = 1,29 кг/м³; $\rho_П$ = 700 кг/м³; $T_Г$ = 1800 К; $f_П$ = 3,61; $\beta_П^{(V)}$ = 2,75·10⁻⁵ м²/м³; $c_Г$ = 1,47 кДж/(м³·К); $c_П$ = 1,2 кДж/(кг·К). Средний состав длиннопламенных (Д) и тощих (Т) углей представлен в таблице.

Полное время сгорания длиннопламенных и тощих углей 0,075 и 0,05 с соответственно, частица пыли со средним диаметром 0,05 мм при этом будет выноситься из кислородной зоны со скоростью 6,1 м/с. Для однорядных НШП высота кислородной зоны составляет 0,4 м, следовательно, только для тощих углей выполняется основное неравенство (9).

На горение пылевидного топлива будет расходоваться часть кислорода из дутья. Состав образующихся газов (содержание в них моно- и диоксида углерода) будет непосредственно определять расход и скорость горения топлива. Расход кислорода (ΔO_2) может быть определен из расчета, что в 1 м³ газа содержится углерода $12(CO_2+CO)/(22{,}4\cdot100)$ кг и кислорода $(CO_2+0{,}5\,CO)$%. Следовательно, расход кислорода на горение пылевидного топлива составляет

$$\Delta O_2 = 0{,}0186\cdot10^4\,\frac{\beta_П}{q}\,\frac{CO_2+0{,}5CO}{CO_2+CO}, \qquad (11)$$

где $\beta_П$ – удельное количество сгоревшей пыли, кг/(м²·с).

При $\beta_П$ = 0,034 кг/(м²·с), q = 2,0 м³/(м²·с) и составе газа 10 % CO_2 и 18,2 % CO расход кислорода на горение пылевидного топлива характеризуется величиной ΔO_2 = 2,1 %.

Известно однотипное дифференциальное уравнение первого порядка, которое описывает расход кислорода и диоксида углерода по высоте кислородной и восстановительной зон:

$$\frac{dC}{dZ} = -\frac{\varphi F_Т C T_Т^{пов}}{(1+Sm)T_Г}, \qquad (12)$$

где C – концентрация реагирующего газа; Z – протяженность восстановительной зоны в НШП; φ – функция переноса; $F_Т$ – удельная поверхность кусков топлива; $T_Т^{пов}$ – температура поверхности топлива; Sm – число Семенова.

В первом приближении длина кислородной зоны, по данным [14], составляет

$$L = 0{,}17\ln(O_2/2), \qquad (13)$$

или с учетом расхода кислорода на горение пылевидного топлива

$$L = 0{,}17[\ln(O_2 - \Delta O_2)/2]. \qquad (14)$$

Чем больше расход угольной пыли, тем значительнее сокращается кислородная зона: L = 0,17ln(18,9/2) = 0,38 м для $\beta_П$ = 0,034 кг/(м²·с) и L = 0,40 м для $\beta_П$ = 0.

Средний состав длиннопламенных (Д) и тощих (Т) углей

Марка угля	Горючая масса								Сухая масса		Рабочая масса	
	C, %	H, %	N, %	O, %	$S_{орг}$, %	$S_к$, %	V, %	Q, МДж/кг	A, %	$S_{об}$, %	W, %	Q, МДж/кг
Д	75,5	5,5	1,6	13,2	2,1	2,2	43	32,24	19,5	3,5	13	21,06
Т	89,0	4,2	1,5	2,1	1,1	2,1	12	35,59	18	2,6	4,5	26,75

Предельное содержание угольной пыли в дутье определяется с помощью выражений (9), (11), (14), из которых следует

$$\tau = \frac{0{,}17}{\upsilon_{\text{П}}} \ln\left(0{,}5\text{O}_2 - 0{,}0093 \cdot 10^4 \, \frac{\beta_{\text{П}}}{q} \, \frac{\text{CO}_2 + 0{,}5\text{CO}}{\text{CO}_2 + \text{CO}}\right)^4 .$$

Для τ = 0,05 с, $\upsilon_{\text{П}}$ = 6,1 м/с, ΔO_2 = 2,1 %, q = 2 м³/(м²·с) предельное содержание пыли угля марки Т составляет $\beta_{\text{П}}^{(1)}$ = 0,095 кг/(м²·с), при этом расход твердого топлива снижается на 27,7 %. Несгоревшие частицы в случае дальнейшего увеличения количества угольной пыли в дутье будут выноситься в восстановительную зону, где резко будет интенсифицироваться реакция $\text{CO}_2 + \text{C} \rightarrow 2\text{CO} - \Delta H_2$ за счет резкого роста удельной поверхности реагирования. В 1 кг угольной пыли поверхность реагирования определяется следующим образом:

$$F_{\text{П}} = \pi d_{\text{П}}^2 \frac{6}{\pi d_{\text{П}}^3 \rho_{\text{П}}} = \frac{6}{\rho_{\text{П}} d_{\text{П}}} .$$

Так как $\rho_{\text{П}}$ = 700 кг/м³, то $F_{\text{П}} = 0{,}855 \cdot 10^{-2}/d_{\text{П}}$ м²/кг. Для слоя твердого топлива при значении $\varepsilon_{\text{Т}}$ = 0,4 и размерах кусков 0,065 м удельная поверхность реагирования составит $F_{\text{Т}} = 6\,(1 - \varepsilon_{\text{Т}})/d_{\text{Т}}$ = 37 м².

При постоянных значениях ε, Sm и $T_{\text{Т}}/T_{\text{Г}}$ решение уравнения (12) имеет следующий вид:

$$\text{CO}_2(Z) = \text{CO}_2^{\text{кон}} \exp(-mF_{\text{Т}}Z) , \qquad (15)$$

где Z – высота топливной насадки; $\text{CO}_2^{\text{кон}}$ – конечное содержание диоксида углерода в кислородной зоне при отсутствии угольной пыли;

$m = \varphi / [(1 + \text{Sm})T_{\text{Г}}]$.

Как правило, восстановительная зона в НШП имеет протяженность 0,5–0,8 м. Из (15) следует, что при вдувании угольной пыли конечное содержание диоксида углерода в отходящих газах уменьшается и определяется выражением

$$\text{CO}_2^{\text{П}} = \text{CO}_2(Z) \exp\left[mF_{\text{п}}\left(\beta_{\text{П}}^{(2)} - \beta_{\text{П}}^{(1)}\right)Z\right] . \qquad (16)$$

Определим величину $\beta_{\text{П}}^{(2)}$ из оценочных расчетов. Исходные данные: $\text{CO}_2^{\text{кон}}$ = 19 %; $\text{CO}_2^{\text{П}}$ = 8 %; Z = 0,5 м; $\beta_{\text{П}}^{(1)}$ = 0,095 кг/(м²·с); m = 0,037 кг. При $\beta_{\text{П}}^{(2)}$ = 0,17 кг/(м²·с) расход твердого топлива уменьшается на 50 %.

Ввиду ограниченного количества данных по вдуванию угольной пыли в НШП, имеющих систематический характер, произведем сравнение результатов расчетов, выполненных по уравнениям (1)–(16), с результатами исследований, проведенных на доменных печах в промышленных условиях при использовании пылеугольного топлива [15]. Максимальный расход угольной пыли составляет 200 кг на 1 т получаемого расплава, а средний расход твердого топлива при этом достигает 500 кг на 1 т расплава, что составляет 40 % от базового показателя. Для доменного процесса коэффициент замены твердого топлива можно получить из выражения $k_{\text{З.Т}} = \Delta M_{\text{Т}}/\Delta M_{\text{П}}$, в котором $\Delta M_{\text{Т}}$ – уменьшение расхода твердого топлива за счет использования угольной пыли, кг/т расплава; $M_{\text{П}}$ – расход пыли, кг/т расплава. Из (10) и (11) следует, что $P = 0{,}1\, M_{\text{С.Т}}/M_{\text{Т}}$, где P – производительность НШП, кг/с; $M_{\text{С.Т}}$ – количество сгоревшего твердого топлива, кг/с; $M_{\text{Т}}$ – расход твердого топлива, % от завалки.

В связи с этим для процесса плавки в НШП справедливо следующее соотношение: $k_{\text{З.Т}} = \Delta M_{\text{Т}} / \beta_{\text{П}}$.

По различным данным для классического шахтного процесса плавки коэффициент замены топлива составляет 0,5–1,4, его номинальное значение равно единице. Для процесса плавки в НШП $k_{\text{З.Т}}$ = 1,0 при $\beta_{\text{П}} < \beta_{\text{П}}^{(1)}$ и $k_{\text{З.Т}}$ = 1,05 при $\beta_{\text{П}}^{(1)} < \beta_{\text{П}} < \beta_{\text{П}}^{(2)}$, что следует из расчетов по уравнениям (10) и (16).

Выводы. Исходя из приведенных расчетов и сравнительного анализа полученных данных можно сделать вывод о том, что для приготовления пылеугольного топлива следует использовать тощие угли, измельченные до размера частиц 0,03–0,075 мм, с низким содержанием золы 16 % на сухую массу. НШП должна быть оборудована тремя рядами фурм с расстоянием между ними 350–400 мм, пылеугольное топливо при этом оптимально подавать в фурмы нижнего ряда, с постоянным его расходом во времени для всех фурм нижнего ряда в одинаковом количестве для каждой фурмы, так как в этом случае ход плавки будет ровным, сход шихты в процессе плавки и условия эксплуатации стабильными. Температуру расплава на выходе при этом можно повысить путем обогащения дутья кислородом в количестве 2–3 % от общего количества дутья. В этом случае производительность печи остается неизменной, но дополнительная теплота, выделяемая за счет сгорания угольной пыли в дополнительном потоке кислорода, идет на нагрев шихты и перегрев получаемого расплава.

Список литературы

1. **Матюхин В.И., Матюхин А.В.** Расчет и проектирование ваграночного комплекса плавки чугуна / УФГАУ ВПО «Уральский Федеральный университет имени Б.Н. Ельцина». – Екатеринбург, 2015. – 364 с.

2. **Глинков М.А., Глинков Г.М.** Общая теория тепловой работы печей. – М.: Металлургия, 1990. – 232 с.

3. **Лялюк В.П.** Обогащение дутья кислородом и изменение полных механических энергий дутья и горнового // СТАЛЬ. – 2021. – № 2. – С. 8–17.

4. **Ярошенко Ю.Г., Гордон Я.М., Ходоровская И.Ю.** Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии черной металлургии. – Екатеринбург: УИПЦ, 2012. – 670 с.

5. **Мачикин В.И., Дилоян А.Г., Сидоренко Г.Н.** Плавка чугуна с вдуванием пылеугольного топлива в вагранку // Литейное производство. – 1985. – № 5. – С. 32–33.

6. **Сафронов Н.Н., Герасимов Л.А., Шакин Н.И.** Эффективность вдувания дополнительного топлива через фурмы вагранки // Литейное производство. – 1985. – № 8. – С. 28–29.

7. **Шевчук П.Т., Таран Т.Я.** Плавка чугуна в вагранке с импульсной подачей струи // Литейное производство. – 1987. – № 11. – С. 27–28.

8. **Шевчук П.Т., Таран Т.Я.** Использование чугунной стружки в ваграночной плавке // Литейное производство. – 1985. – № 9. – С. 27–28.

9. **Оценка** влияния совместного вдувания пылеугольного топлива и природного газа на полноту сжигания угольных частиц в фурменном очаге доменной печи / А.Л. Чайка, Б.В. Корнилов, А.А. Сохацкий и др. // Сталь. – 2018. – № 6. – С. 6–10. – EDN XRHXID.

10. **Горбис З.Л.** Теплообмен и гидромеханика дисперсных сквозных потоков. – М.: Энергия, 1970. – 424 с.

11. **Селянин И.Ф., Маркс Г.Л., Зоткин И.А.** Определение оптимальных параметров вдувания угольной пыли в ваграночном процессе // Известия вузов. Черная металлургия. – 1991. – № 8. – С. 46–51.

12. **Бабий И.В., Иванова И.П.** Горение твердого топлива // Материалы III Всесоюз. конф. по теории горения твердого топлива. – Новосибирск: Наука, 1969. – С. 82–92.

13. **А.с.** 1132130 СССР. Вагранка / И.Ф. Селянин, Г.Л. Маркс, Н.Г. Горбунов, А.Н. Кудрявцев // Открытия. Изобретения. – 1984. – № 48. – С. 120.

14. **Чуханов З.Ф.** Некоторые проблемы топлива и энергетики. – М.: АН СССР, 1961. – 475 с.

15. **Ярошевский С.Л.** Выплавка чугуна с применением пылеугольного топлива. – М.: Металлургия, 1988. – 176 с.

References

1. Matyukhin, V.I., Matyukhin, A.V. *Raschet i proektirovanie vagranochnogo kompleksa plavki chuguna* [Calculation and design of cupola furnace complex of cast iron melting]. Ekaterinburg, 2015. 364 p.

2. Glinkov, M.A., Glinkov, G.M. *Obshchaya teoriya teplovoy raboty pechey* [General theory of thermal operation of furnaces]. Moscow: Metallurgiya, 1990. 232 p.

3. Lyalyuk, V.P. Obogashchenie dut'ya kislorodom i izmenenie polnykh mekhanicheskikh energiy dut'ya i gornovogo [Oxygen enrichment of the blast and changes in the total mechanical energies of the blast and the hearth gas]. *Stal'*, 2021, no. 2, pp. 8–17.

4. Yaroshenko, Yu.G., Gordon, Ya.M., Khodorovskaya, I.Yu. *Energoeffektivnye i resursosberegayushchie tekhnologii chernoy metallurgii* [Energy-efficient and resource-saving technologies in ferrous metallurgy]. Ekaterinburg: UIPTs, 2012. 670 p.

5. Machikin, V.I., Diloyan, A.G., Sidorenko, G.N. Plavka chuguna s vduvaniem pyleugol'nogo topliva v vagranku [Cast iron melting with pulverized coal injection into the cupola]. *Liteynoe proizvodstvo*, 1985, no. 5, pp. 32–33.

6. Safronov, N.N., Gerasimov, L.A., Shakhin, N.I. Effektivnost' vduvaniya dopolnitel'nogo topliva cherez furmy vagranki [Efficiency of injecting additional fuel through cupola tuyeres]. *Liteynoe proizvodstvo*, 1985, no. 8, pp. 28–29.

7. Shevchuk, P.T., Taran, T.Ya. Plavka chuguna v vagranku s impul'snoy podachey strui [Cast iron melting in a cupola with pulsed jet injection]. *Liteynoe proizvodstvo*, 1987, no. 11, pp. 27–28.

8. Shevchuk, P.T., Taran, T.Ya. Ispol'zovanie chugunnoy struzhki v vagranochnoy plavke [Use of cast iron chips in cupola melting]. *Liteynoe proizvodstvo*, 1985, no. 9, pp. 27–28.

9. Chayka, A.L., Kornilov, B.V., Sokhatskiy, A.A., Shostak, V.Yu., Vasil′ev, L.E., Fomenko, A.P. Otsenka vliyaniya sovmestnogo vduvaniya pyleugol'nogo topliva i prirodnogo gaza na polnotu szhiganiya ugol'nykh chastits v furmennom ochage domennoy pechi [Assessment of the effect of co-injection of pulverized coal and natural gas on the completeness of coal particle combustion in the blast furnace tuyere zone]. *Stal'*, 2018, no. 6, pp. 6–10. EDN XRHXID.

10. Gorbis, Z.L. *Teploobmen i gidromekhanika dispersnykh skvoznykh potokov* [Heat transfer and fluid mechanics of dispersed through-flows]. Moscow: Energiya, 1970. 424 p.

11. Selyanin, I.F., Marks, G.L., Zotkin, I.A. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*, 1991, no. 8, pp. 46–51.

12. Babiy, I.V., Ivanova, I.P. Gorenie tverdogo topliva [Combustion of solid fuel]. *Materialy III Vsesoyuznoy konferentsii po teorii goreniya tverdogo topliva* [Proceedings of the 3rd All-Union Conference on the Theory of Solid Fuel Combustion]. Novosibirsk: Nauka, 1969, pp. 82–92.

13. Selyanin, I.F., Marks, G.L., Gorbunov, N.G., Kudryavtsev, A.N. Vagranka [Cupola]. *Avtorskoe svidetel'stvo 1132130 USSR opubl.: Otkrytiya. Izobreteniya*, 1984, no. 48, p. 120.

14. Chukhanov, Z.F. *Nekotorye problemy topliva i energetiki* [Some issues on fuel and energy]. Moscow: AN USSR,1961. 475 p.

15. Yaroshevskiy, S.L. *Vyplavka chuguna s primeneniem pyleugol'nogo topliva* [Iron smelting using pulverized coal injection]. Moscow: Metallurgiya, 1988. 76 p.

УДК 621.745.34.001

Ольга Геннадьевна Модзелевская
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», старший преподаватель кафедры теплоэнергетики и экологии, Россия, Новокузнецк, e-mail: ol.berg@mail.ru

Андрей Владимирович Феоктистов
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», доктор технических наук, профессор кафедры теплоэнергетики и экологии, Россия, Новокузнецк, e-mail: feoktistov_av@sibsiu.ru

Андрей Андреевич Куценко
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, Россия, Новокузнецк, e-mail: kutsenko_aa@sibsiu.ru

Вячеслав Викторович Бухмиров
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры теоретических основ теплотехники, Россия, Иваново, телефон 8(4932) 26-97-76, e-mail: bao6095@mail.ru

Михаил Викторович Темлянцев
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», доктор технических наук, профессор кафедры теплоэнергетики и экологии, Россия, Новокузнецк, 8(3843)74-89-16, e-mail: uchebn_otdel@sibsiu.ru

Плавка силикатных материалов в промышленном комплексе на основе низкошахтной печи с расширенными технологическими возможностями

Авторское резюме

Состояние вопроса. В соответствии со стратегией пространственного развития Российской Федерации на период до 2025 года, производство минеральных теплоизолирующих материалов, в том числе минеральной ваты, включено в перечень перспективных экономических специализаций субъектов Российской Федерации. Производство минеральной ваты включает два основных технологических этапа: получение расплава необходимого химического состава и волокнообразование с формированием ковра. Плавку силикатных материалов часто реализуют в низкошахтных печах, работающих на твердом топливе (коксе, антраците, различных марках углей), обеспечивая расплаву необходимые для волокнообразования свойства: текучесть, динамическую вязкость и поверхностное натяжение. Актуальность настоящего исследования заключается в разработке технологических параметров низкошахтной плавки, позволяющей полностью заменить кокс длиннопламенными углями, а также расширить технологических возможности агрегатов за счет двухуровневой подачи и подогрева дутья, использования пылеугольного топлива и новых конструкций рекуператора и питателя-дозатора.
Материалы и методы. Экспериментальные плавки проведены в низкошахтной печи, при этом в качестве топлива использованы длиннопламенные угли ОАО «Разрез Талдинский» (Кемеровская область – Кузбасс). Низкошахтная печь оборудована радиационно-конвективным рекуператором, обеспечивающим подогрев дутьевого воздуха до температуры 550 °С, и питателем-дозатором, предназначенным для подачи пылеугольного топлива. Состав и температура газов определялись посредством газоанализатора VarioPlus Industrial фирмы MRU GmbH, температуры силикатного расплава на выпуске из печи, температуры кусков топлива в шахте низкошахтной печи – пирометром спектрального отношения С-3000.4.
Результаты. Проведена серия экспериментальных плавок в низкошахтной печи ЗАО «Изолит» (г. Новокузнецк) с внутренним диаметром 1250 мм для получения оксидного расплава из отвального доменного шлака и горной породы – диабаза, используемого для производства минераловатных изделий. Проанализирован состав газовой фазы и представлено технологическое обоснование необходимости ключевых конструкционных изменений промышленного комплекса на основе низкошахтной печи с расширенными технологическими возможностями. Установлено, что при использовании в низкошахтных печах заменителей кокса, в частности длиннопламенных углей, плавку оксидных материалов возможно реализовывать при уровне загрузки материалов (2,5–2,8) $\sqrt{D}$, подачу дутья, подогретого до 450–500 °С, в кислородную зону необходимо осуществлять в равных количествах на двух горизонтах (рядах фурм) с расстоянием между ними 250 мм. Подача в дутье пылеугольного топлива приводит к необходимости повышения температуры дутья на 10–12 °С и снижения объемного расхода на 1–1,2 % на каждый процент вводимого пылеугольного топлива.
Выводы. Проведенное исследование позволило разработать рекомендации по регулированию режимов плавки силикатных материалов с применением длиннопламенных углей в качестве топлива. Рассмотрена возможность двухуровневой подачи дутья на основе расчетных данных длины кислородной зоны с одновременным обоснованием возможностей введения пылевидных материалов и режимов подогрева дутья.

Ключевые слова: низкошахтная печь, длиннопламенные угли, пылеугольное топливо, рекуператор, питатель-дозатор мелкодисперсного топлива

© Модзелевская О.Г., Феоктистов А.В., Куценко А.А., Бухмиров В.В., Темлянцев М.В., 2026
Вестник ИГЭУ, 2026, вып. 5, с. 12–19.

Olga Gennadievna Modzelevskaya
Siberian State Industrial University, Senior Lecturer of Thermal Power Engineering and Ecology Department, Russia, Novokuznetsk, e-mail: ol.berg@mail.ru

A**ndrey Vladimirovich Feoktistov**
Siberian State Industrial University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Thermal Power Engineering and Ecology Department, Russia, Novokuznetsk, e-mail: feoktistov_av@sibsiu.ru

Andrey Andreevich Kutsenko
Siberian State Industrial University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Russia, Novokuznetsk, e-mail: kutsenko_aa@sibsiu.ru

Vyacheslav Viktorovich Bukhmirov
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Theoretical Foundations of Heat Engineering Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-76, e-mail: bao6095@mail.ru

Mikhail Viktorovich Temlyantsev
Siberian State Industrial University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Thermal Power Engineering and Ecology Department, Russia, Novokuznetsk, 8(3843)74-89-16, e-mail: uchebn_otdel@sibsiu.ru

Melting of silicate materials in an industrial complex based on a low- shaft furnace with extended technological capabilities

Abstract

Background. According to the Spatial Development Strategy of the Russian Federation for the period up to 2025, the production of mineral heat-insulating materials, including mineral wool, has been included in the list of promising economic specializations of the constituent entities of the Russian Federation. The production of mineral wool includes two main technological stages; they are obtaining melt of the required chemical composition and fiber formation with the formation of a layer. Melting of silicate materials is often carried out in low- shaft furnaces operating on solid fuel (coke, anthracite, various grades of coal), providing the melt with the properties necessary for fiberization: fluidity, dynamic viscosity and surface tension. The relevance of the study is the development of process parameters for low-shaft smelting that enable the complete replacement of coke with long-flame coals. Also it is necessary to improve the operational capabilities of the units through two-level blast injection and preheating, the use of pulverized coal injection, and novel designs for the recuperator and proportioning feeder.
Materials and methods. Experimental melts have been carried out in a low-shaft furnace, while long-flame coals of OJSC Razrez Taldinsky (Kemerovo Region – Kuzbass) have been used as fuel. The low-shaft furnace is equipped with a radiation-convective recuperator, which provides heating of blast air up to 550 °C and a proportioning feeder to supply pulverized coal fuel. The composition and temperature of the gases have been determined using a VarioPlus Industrial gas analyzer of MRU GmbH. The temperatures of the silicate melt at the furnace discharge, and the temperature of fuel lumps in the shaft of the low-shaft furnace have been determined using C-3000.4 spectral ratio pyrometer.
Results. A series of experimental melts has been carried out at the low-shaft furnace of Closed Joint-Stock Company Isolit (Novokuznetsk) with an internal diameter of 1250 mm in order to obtain an oxide melt from dump blast-furnace slag and rock – diabase, used for the production of mineral wool products. The composition of the gas phase has been analyzed, and a technical justification is presented for the necessity of key design modifications for an industrial complex based on a low-shaft furnace with expanded technological capabilities. It has been established that when coke substitutes specifically long-flame coals are used in low-shaft furnaces, the smelting of oxide materials can be carried out at a material load level of (2,5–2,8) $\sqrt{D}$. The blast preheated to 450–500°C must be injected into the oxygen zone in equal amounts at two levels (rows of tuyeres) spaced 250 mm apart. Injecting pulverized coal fuel into the blast necessitates raising the blast temperature by 10–12°C and reducing the volumetric flow rate by 1–1.2% for every percent of pulverized coal fuel introduced.
Conclusions. The study conducted made it possible to develop recommendations to regulate the melting regimes of silicate materials using long-flame coals as fuel. The feasibility of a two-level blast supply has been examined based on calculated data regarding the length of the oxygen zone, alongside an assessment of the potential for injecting pulverized materials and the parameters for blast preheating.

Key words: low-shaft furnace, long-flame coals, pulverized coal fuel, recuperator, fine-grained fuel feeder

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.5.012-019

Введение. Твердотопливные низкошахтные печи получили широкое распространение в различных отраслях промышленности и применяются для тепловой обработки кусковых материалов. Конструкции, режимы тепловой работы низкошахтных печей и реализуемые теплотехнологии имеют существенные резервы для интенсификации процесса плавки и повышения тепло-технологической эффективности [1, 2]. В качестве основных направлений при этом рассматриваются: применение различных заменителей кокса (антрацит, тощие и длиннопламенные угли); вдувание пылеугольного топлива (ПУТ); подогрев и увлажнение дутья. Замените-

ли кокса представляют особый интерес, поскольку позволяют повысить технико-экономические показатели работы низкошахтных печей. Однако их применение требует глубокой теоретической проработки и практической апробации. В [3] проведен анализ существующего состояния тепловой и газодинамической работы минераловатной низкошахтной печи. Установлено, что ее тепловой КПД составляет всего 11,78 %. Такая низкая тепловая эффективность печи связана в первую очередь с недостатками применяемой системы подачи воздуха. Высокая неравномерность распределения воздушного дутья по сечению внутреннего пространства печи приводит к существенной неравномерности распределения газового потока по объему нагреваемой шихты. Следовательно, требуется поиск новых конструктивных особенностей различных узлов агрегатов данного типа

Кроме того, в современных промышленных комплексах на основе низкошахтной печи должны решаться задачи ресурсосбережения и повышения эффективности тепловой работы. Чтобы обеспечить рекуперацию тепла, в них должны быть предусмотрены вспомогательные устройства для вдувания пылевидного топлива и переработки мелкодисперсных отходов, в том числе собственного производства.

Методы исследования. Задачей настоящего исследования является разработка технологии плавки оксидных материалов в низкошахтной печи, позволяющей полностью заменить кокс длиннопламенными углями без нарушения технологического режима плавки. Важным аспектом технологии плавки в низкошахтной печи является возможность выбора конструктивных и технологических решений при проектировании новых и модернизации действующих низкошахтных печей [4]. Установлено, что температурный режим в топливной насадке и в зоне нагрева шихты не зависит от диаметра печи при условии выполнения полученных основных соотношений между геометрическими параметрами печи, размерами кусков кокса и шихты, вытекающих из главных требований теории подобия и натурного моделирования. Геометрическое подобие выполняется четким соотношением между высотными параметрами печи и ее внутренним диаметром D:

$$H_{\text{П}} = 4{,}345\sqrt{D};\ H_{\text{ТН}} = 1{,}165\sqrt{D};\ H_{\text{ПД}} = 3{,}18\sqrt{D},$$

где $H_{\text{П}}$, $H_{\text{ТН}}$, $H_{\text{ПД}}$ – высота полезная, топливной насадки и зоны подогрева печи соответственно, м.

Необходимо учитывать, что номинальная удельная производительность низкошахтных печей Pнп, кг/(м^2·с), не зависит от диаметра, а определяется расходом топлива k, %, содержанием углерода в топливе С, %, расходом воздуха q_0, м^3/(м^2·с), содержанием кислорода в дутье O_2, %, содержанием CO и CO_2, %, в отходящих газах. Продуваемость топливной насадки резко возрастает с увеличением размеров кусков топлива. При использовании холодного дутья в области фурм до центра топливной насадки происходит образование захолаживающих зон, которые нивелируют эффект повышения температуры расплава вследствие роста высоты кислородной зоны. С увеличением размеров кусков топлива возрастает скорость прохождения капель расплава через зону высоких температур.

При $H_{\text{ТН}} = 1{,}165\sqrt{D}$ прямой зависимости температуры расплава на выпуске от размеров кусков топлива, определяемых по соотношению $\bar{d}_к = 0{,}081\sqrt{D}$, не наблюдается. В рамках проводимых исследований использовались рекомендации по оптимальным значениям размеров кусков шихтовых и топливных материалов (табл. 1). При этом учитывалось, что подогрев дутья приводит к росту температуры газов в захолаживающих зонах. Соответственно, оптимальный размер кусков топлива может быть увеличен.

Таблица 1. **Значения оптимальных размеров кусков кокса для низкошахтных печей различных диаметров**

Показатель	Значение показателя при внутреннем диаметре печи, м									
	0,20	0,30	0,40	0,50	0,85	1,10	1,35	1,70	2,10	2,65
$H_{TH} = 1{,}165\sqrt{D}$, м	0,521	0,638	0,737	0,824	1,074	1,22	1,35	1,52	1,69	1,896
$\bar{d}_к = 0{,}081\sqrt{D}$, м	0,036	0,044	0,051	0,057	0,075	0,085	0,094	0,107	0,117	0,132

Для топливной насадки твердотопливных низкошахтных печей характерны последовательные реакции:

$$C + O_2 = CO_2 + q_1; \quad (1)$$

$$CO_2 + C = 2CO - q_2, \quad (2)$$

где q_1 = 408842 кДж/кмоль; q_2 = 162405 кДж/кмоль.

Первая реакция в кислородной зоне идет практически до конца, пока не прореагирует весь кислород дутья. Вторая реакция восстановительной зоны, как правило, заканчивается, когда прореагирует половина молекул CO_2, поступивших с газами из низлежащей кислородной зоны. Общее количество тепла, выделяющееся в топливной насадке, составляет $\Delta q = q_1 - q_2 = 408842 - 162405/2 = 327640$ кДж/кмоль.

Результаты исследования. В результате проведенных исследований установлено, что при высоких уровнях загрузки и температурах кусков топлива в кислородной зоне печи не удается

обеспечить стабильный ход плавки на заменителях кокса, теплотворная способность которых в 1,1–1,2 раза выше, а зольность в 1,3–1,5 раза ниже, чем у кокса. При использовании длиннопламенных углей уровень загрузки материалов в низкошахтной печи необходимо уменьшить до (2,5–2,8) $\sqrt{D}$, подогрев дутья повысить до 450–550 °С и подавать его в равных количествах на двух горизонтах с расстоянием между ними L_{12} = 250 мм (рис. 1).

С использованием расчетной методики, представленной в [4], определена оптимальная высота уровня загрузки кусковых материалов. Эксперименты на производственном плавильном агрегате подтвердили результаты расчетов. Установлено, что при высоте загрузки менее $2{,}5\sqrt{D}$ полный прогрев шихты до температуры плавления не происходит. Крупные куски шихты диаметром $D_ш$ > 0,081 м проваливаются в горн печи и вызывают снижение температуры шлакового расплава. Увеличение высоты загрузки (более $2{,}8\sqrt{D}$) приводит к росту давления столба шихты на топливную насадку из длиннопламенных углей. Это приводит к их растрескиванию и интенсивному истиранию, при этом мелкая фракция и шлаковый расплав образуют мощные козырьки над фурмами. В таких условиях сопротивление столба материалов резко возрастает, поступление дутья в рабочее пространство печи уменьшается, интенсивность тепломассообменных процессов снижается. Это приводит к уменьшению температуры расплава на выпуске из печи.

Второй уровень подачи дутья необходимо располагать в конце кислородной зоны первого уровня. Длина $L_к$ кислородной зоны рассчитывается по формуле [4]

$$L_K = AD_K \mathrm{Re}^{0,2}, \qquad (3)$$

где A – константа; D – средний размер кусков топлива; Re – число подобия Рейнольдса.

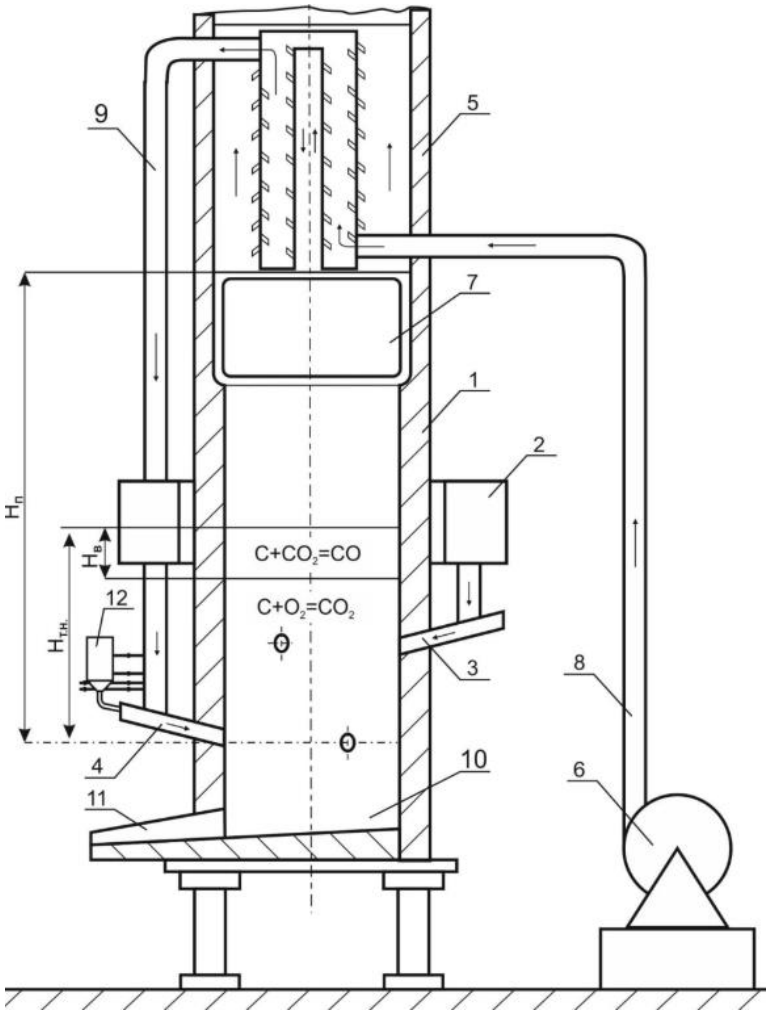


Рис. 1. Конструкция промышленного комплекса на основе твердотопливной низкошахтной печи: 1 – шахта печи; 2 – фурменный короб; 3 – нижний ряд фурм; 4 – второй ряд фурм; 5 – рекуператор «труба в трубе»; 6 – воздуходувка; 7 – загрузочное окно; 8 – воздуховод холодного дутья; 9 – воздуховод горячего дутья; 10 – горн печи; 11 – выпускная летка; 12 – питатель-дозатор мелкодисперсного топлива; $H_{к.з.}$ – высота кислородной зоны; $H_в$ – высота восстановительной (редукционной) зоны; $H_п$ – полезная высота печи

Для заменителей кокса (антрацита, тощих и длиннопламенных углей) характерна меньшая прочность кусков топлива. При движении вниз по шахте печи и опускании в кислородную зону их средний размер фактически в два раза меньше размера кусков кокса. Это связано с более интенсивным их разрушением вследствие механических и термических воздействий. Переизмельченные коксозаменители заполняют пространство между уровнями подачи дутья, которое соответствует высоте кислородной зоны $L_{12} = L_к = (0{,}175–0{,}20)D$. Для расстояния между уровнями вдувания характерны определенные оптимальные значения. В частности, при расстоянии между двумя уровнями вдувания менее 250 мм уменьшаются высоты кислородных зон, или зоны перегрева расплава, а при расстоянии более 250 мм эндотермическая реакция восстановления (2) углеродом топлива успевает развиваться в области между уровнями фурм, это сопровождается снижением эффективной температуры источника тепла и температуры перегрева шлакового расплава.

Исследование процессов горения твердого топлива в низкошахтных печах показывает, что с ростом высоты кислородной зоны и снижением высоты восстановительной зоны температура перегрева расплава при движении от зоны плавления до горна увеличивается. Если на расстоянии 250 мм от фурм первого уровня вдувания установить фурмы второго уровня с меньшей на 5–10 % площадью сечения всех отверстий, то высота зоны восстановления уменьшается до минимума или практически будет отсутствовать. Для организации такого способа подачи дутья площадь сечения отверстий первого уровня (нижнего) фурм должна составлять 52–57 %, а второго (верхнего) – 48–43 % от общей площади их сечения при одноуровневой подаче дутья. Такое соотношение обеспечивает подачу примерно одинакового количества дутья в оба горизонта зоны горения топлива, поскольку высота столба шихты над вторым уровнем вдувания (см. рис. 1) на 5–10 % меньше высоты столба от первого уровня. Полученные результаты позволяют определить технологические возможности применения пылеугольных материалов в процессе плавки.

Задача использования пылевидного топлива и переработки мелкодисперсных отходов, в том числе собственного производства, может быть решена с учетом организации двухрядной подачи дутья. В низкошахтной печи могут быть созданы условия применения пылеугольного топлива за счет расширенной кислородной зоны в топливной насадке. Однако в реальных условиях плавки существует целый ряд технологических сложностей, к числу которых может быть отнесено отсутствие промышленного оборудования, обеспечивающего стабильную подачу ПУТ в фурменные устройства.

В [5] установлено, что для получения максимального теплового эффекта дисперсные частицы должны сгореть в пределах кислородной зоны. Для этого проведено экспериментальное и аналитическое определение скорости движения дисперстных частиц по каналам слоя топлива. Угольные частицы, попадая в восстановительную зону, где отсутствует свободный кислород, механически взаимодействуют со оксидным расплавом, изменяют его физико-механические свойства и удаляются из печи вместе с ним. Продолжительность сгорания угольной частицы не должна быть больше времени τ ее нахождения в кислородной зоне:

$$\tau = \frac{H_{кз}}{\upsilon_т}, \qquad (4)$$

где $H_{кз}$ – высота кислородной зоны; $\upsilon_т$ – скорость движения твердой частицы по каналам топливной насадки.

Расчеты, представленные в [4], показывают, что увеличение диаметра твердых частиц сопровождается снижением скорости их движения и требует определенных технологических решений, обеспечивающих введение пылевидного топлива в фурменные устройства комплексов низкошахтных печей. Проведенные расчеты свидетельствуют, что введение пылевидных материалов наиболее целесообразно на первом уровне вдувания.

Плавка силикатных материалов в промышленном комплексе на основе низкошахтной печи с учетом аналитических расчетов требует их проектирования в соответствии с расширенными технологическими возможностями. Для обеспечения непрерывной подачи дисперсных углеродсодержащих материалов в низкошахтную печь с помощью сжатого воздуха разработана конструкция питателя пневмотранспорта пылевидных материалов [6] (рис. 2). Питатель-дозатор оборудован камерой, имеющей горловину для загрузки материалов, с клапаном и заслонкой в виде пластины, воздуховод для подачи основного сжатого воздуха и патрубки для дополнительного тангенциального подвода сжатого воздуха. В конструкции предусмотрена вторая камера, горловина которой представляет собой усеченный параллелепипед. Вторая камера находится внутри камеры питателя. Устройство имеет второй трубопровод для подвода основного сжатого воздуха. Трубы обоих трубопроводов основного сжатого воздуха соприкасаются с заслонками клапанов каждой горловины. Питатель-дозатор имеет датчики, фиксирующие верхние уровни насыпи материалов в камерах. Последовательная синхронная работа клапанов обеих камер на открытие и закрытие обеспечивает непрерывность работы питателя.

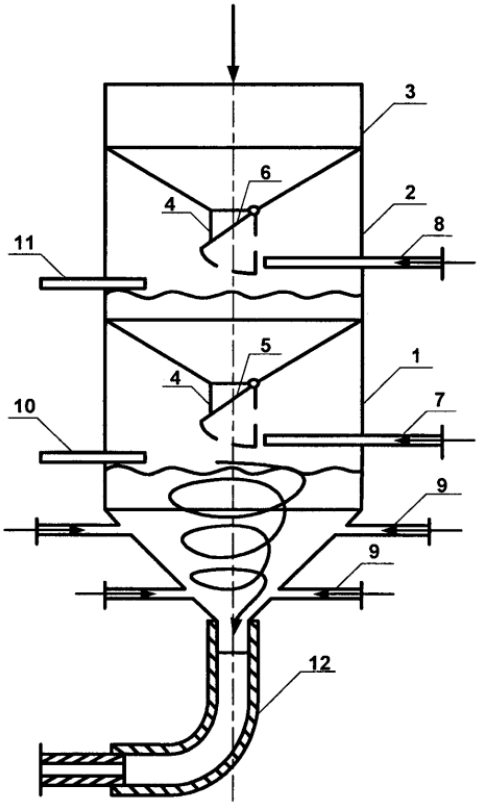


Рис. 2. Питатель-дозатор мелкодисперсного топлива: 1 – нижняя камера питателя; 2 – верхняя камера питателя; 3 – загрузочный бункер; 4 – горловины камер; 5 и 6 – заслонки клапанов; 7 и 8 – трубопроводы основного подвода сжатого воздуха; 9 – патрубки дополнительного тангенциального подвода сжатого воздуха; 10 и 11 – датчики уровня насыпи дисперсных материалов; 12 – трубопровод для выхода аэросмеси

Необходимо отметить, что внедрение ПУТ в технологию плавки в низкошахтной печи существенно изменяет условия процесса, требуя корректировки ее основных технологических параметров. При вводе ПУТ происходит частичное замещение различных видов топлива в шихтовых материалах, что приводит к изменению газодинамического и теплового баланса плавильного агрегата. Горение угольной пыли в надфурменной зоне создает дополнительный тепловой поток, распределенный по высоте шахты, улучшая тем самым теплообмен в верхних горизонтах.

Изменение газодинамических параметров связано с увеличением общего объема газового потока на 3–15 %, повышением сопротивления столба шихты, ростом скорости газов в колошниковой зоне. При этом происходит трансформация тепловых характеристик: снижается температура в окислительной зоне на 50–120 °С; повышается теплосодержание колошниковых газов; увеличиваются теплопотери с отходящими газами; изменяется распределение температур по высоте шахты за счет изменения физических параметров ваграночных газов (плотность газов снижается на 8–12 %, вязкость увеличивается на 5–8 %, теплоемкость повышается на 10–15 %).

Внедрение пылеугольного топлива в дутье низкошахтной печи кардинально меняет состав и объем колошниковых газов, что требует соответствующей корректировки режимов работы агрегата. Рекомендации по регулированию режимов плавки при различном содержании ПУТ в дутье приведены в табл. 2

Таблица 2. **Режимы плавки в низкошахтной печи при различном содержании ПУТ**

Доля ПУТ в дутье	Рекомендации по регулированию режимов работы	Изменения состава отходящих газов	Изменение теплового режима
2 %	Снизить расход дутья на 2–3 %. Повысить температуру дутья на 20–30 °С	Объем газов: +3–5 % CO: 9–11 % (– 0,5–1 %) CO_2: 13–15 % (+1–2 %) H_2: 1–2 % (появление за счет летучих ПУТ) O_2: 0,8–1,2 % (– 0,2–0,3 %)	Теплота сгорания: +3–5 %
4 %	Уменьшить расход дутья на 4–5 %. Повысить температуру дутья на 40–50 °С	Объем газов: +6–8 % CO: 8,5–10,5 % (– 1–1,5 %) CO_2: 14–16 % (+2–3 %) H_2: 2–3 % (× 2 раза) O_2: 0,6–1,0 % (– 0,3–0,5 %)	Теплота сгорания: +6–8 %. Температура отходящих газов: +15–20 °С
6 %	Снизить расход дутья на 6–7 %. Повысить температуру дутья на 60–70 °С	Объем газов: +9–11 % CO: 8–10 % (– 1,5–2 %) CO_2: 15–17 % (+3–4 %) H_2: 3–4 % (× 3–4 раза) O_2: 0,4–0,8 % (– 0,5–0,7 %) Следы CH_4 (0,1–0,2 %)	Теплота сгорания: +9–11 %. Температура отходящих газов: +25–35 °С
10 %	Снизить расход дутья на 10–12 %. Повысить температуру дутья на 100–120 °С	Объем газов: +15–18 % CO: 7–9 % (– 2,5–3 %) CO_2: 17–19 % (+ 5–6 %) H_2: 5–6 % (× 5–6 раз) O_2: 0,2–0,5 % (– 0,8–1,0 %) CH_4: 0,3–0,4 % Следы H_2S (0,01–0,02 %)	Теплота сгорания: +15–18 %. Температура отходящих газов: +45–60 °С

Введение в дутье каждого процента ПУТ приводит к необходимости повышения его температуры на 10–12 °С и снижения объемного расхода на 1–1,2 %. Параллельно наблюдается снижение концентрации оксида углерода (CO) в отходящих газах на 0,2–0,3 %.

В результате увеличения теплоты сгорания отходящих газов на 15–18 % происходит значительный рост их теплосодержания и, как следствие, их трансформация из побочного продукта в ценный энергоресурс. Это делает технологически и экономически целесообразной установку рекуператора для подогрева дутья за счет утилизации тепла этих газов.

Производственная практика применения питателя на предприятии ЗАО «Изолит» демонстрирует возможность непрерывной подачи пылевидных материалов в кислородную зону топливной насадки и стабильный ход печи, а также частично решает экологическую и ресурсосберегающую проблемы.

Чтобы повысить эффективность тепловой работы, современные комплексы на основе низкошахтной печи должны иметь возможность рекуперации тепла, так как подогрев дутья интенсифицирует теплообмен в зоне перегрева расплава. Подогрев дутья при использовании в качестве топлива длиннопламенных углей позволяет снижать термическое растрескивание кусков топлива посредством уменьшения неравномерности температур на его поверхности, вызванных протеканием реакции

$$C + 0{,}5O_2 \leftrightarrow CO + 117 \text{ МДж/моль}, \quad (5)$$

имеющей меньший экзотермический эффект, чем реакция

$$C + 5O_2 \leftrightarrow CO_2 + 400{,}428 \text{ МДж/моль}. \quad (6)$$

Одним из распространенных способов повышения тепловой эффективности низкошахтных печей является подогрев дутья (от 400 до 620 °С) в рекуператорах из жаропрочной стали [7]. Несмотря на свою эффективность, существующие конструкции рекуператоров имеют ряд недостатков: большая длина воздушного тракта; подсос воздуха через несплошности; засорения; прогар жаростойких труб. В связи с этим разработана более совершенная конструкция рекуператора (рис. 3), обеспечивающая подогрев дутья свыше 400 °С и работу в условиях длительных производственных циклов [8].

В усовершенствованной конструкции рекуператора герметичность обеспечивается за счет того, что внутренняя труба снабжена заглушкой и не доходит до перекрытия внешней трубы на 0,01 высоты рекуператора. Теплообменные поверхности (внешняя на внутренней трубе, внутренняя и внешняя корпуса) в целях увеличения площади поверхности и интенсификации теплообмена оборудованы стальными пластинами, расположенными по винтовой линии.

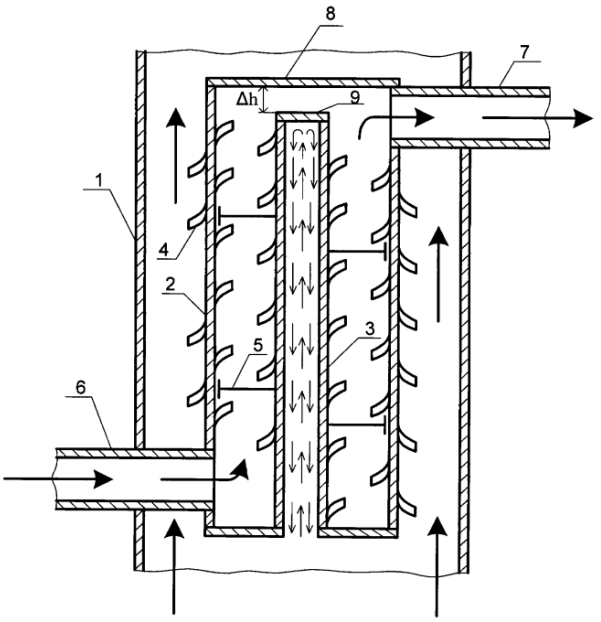


Рис. 3. Усовершенствованная конструкция рекуператора: 1 – шахта печи над завалочным окном; 2 – внешний корпус рекуператора; 3 – внутренняя труба; 4 – пластины, смонтированные по винтовой линии; 5 – распорки; 6 – воздуховод подвода холодного воздуха; 7 – воздуховод отвода горячего дутья; 8 – перекрытие; 9 – заглушка

В результате при использовании данного рекуператора прочность конструкции остается надежной, герметичность устройства не нарушается, срок службы материала теплообменника в целом увеличивается.

Выводы. В результате опытно-промышленных экспериментов на низкошахтном плавильном агрегате с внутренним диаметром 1250 мм при использовании в качестве топлива заменителей кокса, в том числе длиннопламенных углей, разработаны и промышленно опробованы новые конструкции рекуперативного устройства и питателя-дозатора мелкодисперсного топлива. Установлено, что замена топлива возможна при выполнении следующих условий:

1) уровень загрузки материалов в низкошахтную печь (2,5–2,8) $\sqrt{D}$;

2) подача в кислородную зону подогретого до 450–500 °С дутья в равных количествах на двух горизонтах с расстоянием между ними 250 мм.

Список литературы

1. **Ваграночный** комплекс с использованием в качестве топлива антрацита и тощих углей / А.В. Феоктистов, Е.В. Протопопов, С.А. Бедарев, О.Г. Модзелевская // Металлург. – 2014. – № 10. – С. 24–27.

2. **Феоктистов А.В., Скуратов А.П., Селянин И.Ф.** Особенности плавки чугуна и силикатных материалов в твердотопливной низкошахтной печи // Журнал Сибирского федерального университета. Сер. Техника и технологии. – 2016. – Т. 9, № 7. – С. 1104–1109.

3. **Матюхин В.И., Матюхин О.В., Матюхина А.В.** Особенности конструкции и тепловой работы минераловатной вагранки конструкции «гамма – мекканика» (Италия) // Базальтовые технологии. – 2014. – № 1. – С. 56–60.

4. **Селянин И.Ф., Феоктистов А.В., Бедарев С.А**. Развитие теории и практики металлургических технологий. Т. 1. – М.: Теплотехник, 2010. – 379 с.

5. **Экспериментальное** и аналитическое определение скорости движения дисперсных частиц по каналам слоя топлива / А.В. Феоктистов, О.Г. Модзелевская, И.Ф. Селянин и др. // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2015. – № 3(13). – С. 9–13.

6. **Пат.** № 150948 U1 Российская Федерация, МПК B65G 53/46. Питатель пневмотранспорта мелкодисперсных материалов: № 2014139768/11: заявл. 30.09.2014; опубл. 10.03.2015 / А.В. Феоктистов, В.В. Пашков, И.Ф. Селянин и др.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский государственный индустриальный университет».

7. **Феоктистов А.В.** Опыт эксплуатации ваграночного рекуператора конструкции «труба в трубе» // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2012. – № 12. – С. 62–63.

8. **Пат.** № 158397 U1 Российская Федерация, МПК F27B 1/00. Рекуператор вагранки: № 2015122155/02: заявл. 09.06.2015; опубл. 27.12.2015 / А.В. Феоктистов, О.Г. Модзелевская, И.Ф. Селянин и др.; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский государственный индустриальный университет».

References

1. Feoktistov, A.V., Protopopov, E.V., Bedarev, S.A., Modzelevskaya, O.G. Vagranochnyy kompleks s ispol′zovaniem v kachestve topliva antratsita i toshchikh ugley [A furnace complex using anthracite and thin coals as fuel]. *Metallurg*, 2014, no. 10, pp. 24–27.

2. Feoktistov, A.V., Skuratov, A.P., Selyanin, I.F. Osobennosti plavki chuguna i silikatnykh materialov v tverdotoplivnoy nizkoshakhtnoy pechi [Features of smelting cast iron and silicate materials in a solid-fuel low-pit furnace]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya. Tekhnika i tekhnologii*, 2016, vol. 9, no. 7, pp. 1104–1109.

3. Matyukhin, V.I., Matyukhin, O.V., Matyukhina, A.V. Osobennosti konstruktsii i teplovoy raboty mineralovatnoy vagranki konstruktsii «gamma – mekkanika» (Italiya) [Features of the design and thermal operation of the gamma-mekkanika mineral wool cupola]. *Bazal'tovye tekhnologii*, 2014, no. 1, pp. 56–60.

4. Selyanin, I.F., Feoktistov, A.V., Bedarev, S.A. *Razvitie teorii i praktiki metallurgicheskikh tekhnologiy. T. 1* [Development of theory and practice of metallurgical technologies. Vol. 1]. Moscow: Teplotekhnik, 2010. 379 p.

5. Feoktistov, A.V., Modzelevskaya, O.G., Selyanin, I.F., Kutsenko A.I., Kutsenko A.A. Eksperimental′noe i analiticheskoe opredelenie skorosti dvizheniya dispersnykh chastits po kanalam sloya topliva [Experimental and analytical determination of the velocity of dispersed particles in the fuel layer channels]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*, 2015, no. 3(13), pp. 9–13.

6. Feoktistov, A.V., Pashkov, V.V., Selyanin, I.F., Modzelevskaya, O.G., Filinberg, I.N., Kutsenko, A.A., Bedarev, S.A. *Pitatel' pnevmotransporta melkodispersnykh materialov* [Pneumatic conveying feeder for fine materials]. Patent RF, no. 150948, 2015.

7. Feoktistov, A.V. Opyt ekspluatatsii vagranochnogo rekuperatora konstruktsii «truba v trube» [Experience in operating a tube-in-tube regenerator for cupola furnaces]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya*, 2012, no. 12, pp. 62–63.

8. Feoktistov, A.V. Modzelevskaya, O.G., Selyanin, I.F., Kutsenko, A.A., Bedarev, S.A. *Rekuperator vagranki* [Wagon recuperator]. Patent RF, no.158397, 2015.

УДК 697.341

Владимир Владимирович Смирнов
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, e-mail: kbispu@mail.ru

Юрий Викторович Яворовский
ФГБОУ ВО Национальный исследовательский университет «МЭИ», кандидат технических наук, заведующий кафедрой промышленных теплоэнергетических систем, Россия, Москва, e-mail: y1000@list.ru

Мария Владимировна Козлова
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, e-mail: mariyakozlova1996@gmail.com

Николай Николаевич Смирнов
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, e-mail: nsmirnov@bk.ru

Сергей Ильич Шувалов
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры тепловых электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Методика анализа экономической эффективности от применения термогидравлического распределителя в тепловых пунктах

Авторское резюме

Состояние вопроса. Результаты анализа применения термогидравлического распределителя в тепловых пунктах позволяют говорить о недостаточности исследований эффективности предлагаемой схемы по сравнению с классическими и современными схемами присоединения абонентов в системе централизованного теплоснабжения. Необходимо теоретически обосновать и количественно оценить факторы, определяющие технико-экономическую эффективность применения термогидравлического распределителя в схемах тепловых пунктов, а также установить граничные параметры их эффективной эксплуатации. Задача эта является актуальной и имеет важное практическое значение.
Материалы и методы. Экономическая эффективность определена с использованием методов вариантных расчетов с применением разработанных программ для ЭВМ. Обработка результатов осуществлена методами математической статистики с использованием регрессионного анализа.
Результаты. Разработана методика определения экономической эффективности применения термогидравлического распределителя в тепловом пункте при различных температурных графиках. Предложены номограммы, позволяющие оценить экономический эффект от внедрения термогидравлического распределителя в тепловой пункт. Установлено, что максимальную эффективность можно получить в низкотемпературных и низконапорных системах теплоснабжения, потребители которых не оборудованы авторегуляторами теплового потока.
Выводы. Выявлено, что экономическая эффективность от применения схемы с термогидравлическим распределителем в системах теплоснабжения с количественным и качественно-количественным регулированием отсутствует.

Ключевые слова: термогидравлический распределитель, автоматизированный индивидуальный тепловой пункт, система централизованного теплоснабжения, технико-экономическая эффективность

Vladimir Vladimirovich Smirnov
Ivanovo State Power University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Industrial Heat Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: kbispu@mail.ru

Yuri Viktorovich Yavorovsky
National Research University (Moscow Power Engineering Institute), Candidate of Engineering Sciences (PhD), Head of Industrial Heat Power Systems Department, Russia, Moscow, e-mail: y1000@list.ru

Maria Vladimirovna Kozlova
Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Industrial Thermal Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: mariyakozlova1996@gmail.com

© Смирнов В.В., Яворовский Ю.В., Козлова М.В., Смирнов Н.Н., Шувалов С.И., 2026
Вестник ИГЭУ, 2026, вып. 5, с. 20–30.

Nikolay Nikolaevich Smirnov
Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Industrial Thermal Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: nsmirnov@bk.ru

Sergei Ilyich Shuvalov
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Thermal Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Methodology to analyze the economic efficiency of using a thermohydraulic distributor in heat substations

Abstract

Background. An analysis of the use of thermohydraulic distributors in heat substations has revealed a lack of research of the efficiency of the proposed configuration compared to conventional and modern consumer connection schemes in district heating systems. It is necessary to provide a theoretical basis and a quantitative assessment of the factors determining the techno-economic efficiency of using thermohydraulic distributors in heat substation layouts, as well as to establish the operational limits of their effective use. This task is timely and holds significant practical importance.
Materials and methods. Economic efficiency has been determined using comparative calculation methods and specially developed computer programs. The results have been processed using mathematical statistical methods and specifically regression analysis.
Results. A methodology has been developed to determine the economic efficiency of using a thermohydraulic distributor in a heat distribution unit under various temperature schedules. Nomograms are proposed to estimate the economic impact of implementing such a distributor. It has been established that maximum efficiency is achieved in low-temperature, low-pressure district heating systems where consumer units lack automatic heat flow controllers.
Conclusions. It has been determined that there is no economic benefit to using a scheme with a thermohydraulic distributor in heat supply systems employing quantitative or combined qualitative-quantitative regulation.

Key words: thermohydraulic distributor, automated individual heat substation, district heating system, techno-economic efficiency

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.5.020-030

Введение. Как показано в [1, 2, 3, 4], внедрение термогидравлического распределителя (ТГР) обеспечивает гидравлическую автономность контуров отопления и горячего водоснабжения (ГВС). Это позволяет осуществлять их присоединение к тепловым сетям на основе принципа несвязанного регулирования, исключающего взаимное влияние потоков.

Применение схемы с ТГР требует циркуляции максимального расчетного расхода воды в тепловой сети в течение всего отопительного периода, но при этом практически «нулевого» располагаемого напора у абонента. Классические схемы присоединения абонентов, подключенных к тепловой сети по принципу несвязанного регулирования теплоты, характеризуются переменным расходом сетевой воды, но при этом располагаемый напор у потребителя должен быть достаточен для функционирования системы отопления при максимальном открытии клапана, регулирующего температуру воды на ГВС.

В [1] представлены результаты сравнительного анализа технико-экономических показателей классических схем присоединения абонента и схем с ТГР для отопительных температурных графиков 150/70 °С, 95/70 °С при одинаковом сопротивлении сети S_c и центральном регулировании теплоты. В результате исследования было установлено, что по общим затратам (топлива и электроэнергии на перекачку теплоносителя) за счет устранения «перетопа» схема с ТГР экономичнее для обоих температурных графиков.

Следует отметить, что сравнение показателей было выполнено на частном примере: соотношение максимальных тепловых нагрузок ГВС и отопления $\rho_{max} = Q_{гвс}^{max} / Q'_{о} = 0,48$; максимальный коэффициент часовой неравномерности потребления ГВС $к_ч = 2,4$.

Согласно СП 510.1325800[1], значения $к_ч$, в зависимости от числа жителей в жилых зданиях, могут колебаться от 2,4 (20000 человек) до 5,15 (150 человек). Кроме того, указанные значения $к_ч$ различаются в разы для зданий различного вида и назначения, режимов работы, степени благоустроенности жилых сооружений, местных условий и др., например: $к_ч$ для торгового центра – около 7,5; жилых сооружений квартирного типа – около 2,0; промышленных предприятий различного рода – от 2 до 9,0. В реальной тепловой сети значения соотношения $Q_{гвс}^{max} / Q'_{о}$ у потребителей также могут различаться.

В настоящее время в целях повышения эффективности использования энергоресурсов

[1] СП 510.1325800.2022. Тепловые пункты и системы внутреннего теплоснабжения: свод правил: утв. и введен в действие Приказом Минстроя России от 03.03.2022 № 143/пр: дата введения 04.04.2022 (с изм. № 1, 2026 г.). – М.: Минстрой России, 2022. – 124 с.

при реконструкции тепловых пунктов применяют средства автоматического регулирования теплоты – автоматизированные индивидуальные тепловые пункты (АИТП) [5, 6, 7]. Эффективность применения АИТП основана на том, что контроллер регулирует необходимое потребителю количество сетевой воды. Функционирование средств регулирования теплоты в АИТП в период «излома» температурного графика способствует устранению «перетопа» и снижению расхода электроэнергии на перекачку теплоносителя. Полное оснащение всех потребителей теплоты АИТП способствует переходу на количественное регулирование тепловой нагрузки, при котором роль центрального регулирования сводится к корректировке параметров теплоносителя (давления и расхода) на коллекторах теплоисточника в зависимости от параметров теплоносителя на абонентских вводах [8, 9].

Таким образом, возникает актуальная задача определить границы возможного применения схемы с ТГР в тепловых пунктах. Критерием ограничения является относительное изменение общих затрат на производство теплоты и транспортировку теплоносителя в схемах с ТГР по сравнению с классическими и современными схемами присоединения абонента.

Ниже представлен сравнительный анализ схем с ТГР с наиболее распространенными классическими схемами присоединения: 1) зависимая с насосом смешения на перемычке и одноступенчатым (параллельная) присоединением подогревателя ГВС; 2) зависимая с насосом смешения на перемычке и двухступенчатым (смешанная) присоединением подогревателя ГВС. В качестве схемы АИТП рассмотрена зависимая с насосом смешения на перемычке и параллельным присоединением подогревателя ГВС.

Методы исследования. По разработанной программе для ЭВМ [10] методом вариантных расчетов выполнен сравнительный анализ технико-экономических показателей теплоснабжения потребителя при различных значениях $\kappa_ч$, $Q_{гвс}^{max} / Q'_о$ и ΔH_c (сумма потерь напора в подающем и обратном трубопроводе) для климатических условий Ивановской области.

Располагаемый напор на выходе из источника теплоснабжения определяли по формуле

$$\Delta H_{ист} = \Delta H_{аб}^{min} + \Delta H_c, \qquad (1)$$

где $\Delta H_{аб}^{min}$ – минимальный располагаемый напор на абонентском вводе (при максимальном расходе сетевой воды на ГВС), м вод.ст.; ΔH_c – потери напора в тепловой сети при максимальном расходе сетевой воды (в точке «излома» температурного графика при нагрузке $Q'_о + Q_{гвс}^{max}$), м вод.ст.; $Q'_о$ – расчетная тепловая нагрузка на отопление; $Q_{гвс}^{max}$ – максимальная тепловая нагрузка на ГВС (для двухступенчатой смешанной схемы определяется второй ступенью).

Располагаемый напор $\Delta H_{ист}$ остается неизменным при различных значениях $\kappa_ч$ и $Q_{гвс}^{max} / Q'_о$. Значения минимальных располагаемых напоров на абонентском вводе $\Delta H_{аб}^{min}$ принимали следующими: для классических схем – 5 м вод.ст.[2] (как минимальный располагаемый напор для преодоления сопротивления подогревателя ГВС); при непосредственном присоединении – 6 м вод.ст. (с учетом потерь напора в местной системе отопления 1 м вод.ст.); для схемы с ТГР – 0,067 м вод.ст. (потери напора в ТГР); для АИТП – 15 м вод.ст. (с учетом потерь напора в регулирующем клапане). Недогрев воды в первой ступени двухступенчатой смешанной схемы принят 5 °С.

Годовой расход электроэнергии на перекачку теплоносителя, кВт · ч, определяли по формуле

$$Э = \frac{\Delta H_{ист} \sum G_i z_i}{3{,}6 \cdot 102 \cdot \eta}, \qquad (2)$$

где G_i – расход сетевой воды, т/ч, при числе часов работы системы в году z_i [3]; η – КПД насосной установки.

Расход сетевой воды составляет

$G_i = G_о + G_{гвс,i}$,

где $G_о$ – расход воды на систему отопления, т/ч; $G_{гвс,i}$ – расход воды на систему ГВТ, т/ч (для классических схем $G_{гвс,I}$ определяли при средней нагрузке на ГВС $Q_{гвс}^{ср}$, для схемы с ТГР – при максимальной $Q_{гвс}^{max}$).

Затраты теплоты на «перетоп» для классических схем присоединения абонентов определяли с помощью уравнения характеристики системы отопления, предложенного проф. Е.Я. Соколовым.

Относительное изменение затрат на производство теплоты и транспортировку теплоносителя (экономическая эффективность) находили по формуле

$$ТС = \frac{ТС_1 - ТС_2}{ТС_2} \cdot 100\ \%, \qquad (3)$$

где $ТС_2$ – затраты на производство теплоты и транспортировку теплоносителя сравниваемой схемы, тыс. руб.; $ТС_1$ – затраты на производство теплоты и транспортировку теплоносителя схемы с ТГР, тыс. руб.

[2] СП 124.13330.2012. Тепловые сети. Актуализированная редакция СНиП 41-02-2003: национальный стандарт Российской Федерации: утв. Приказом Минрегионразвития РФ от 30.06.2012 № 280: введ. 01.01.2013. – М.: Минрегион России, 2012. – 70 с.

[3] Строительная климатология: Справочное пособие к СНиП 23-01-99* / под ред. чл.-кор. В.К. Савина. – М.: НИИ строительной физики РААСН, 2006. – 258 с.

Стоимость энергоресурсов для производства теплоты и транспортировки теплоносителя различается в зависимости от региона и времени. В связи с этим для универсальности был введен коэффициент, представляющий собой отношение стоимости электрической энергии $T_э$, руб/кВт·ч, и топлива $T_т$, руб/т (руб/м^3):

$$k_т = \frac{T_э}{T_т}. \quad (4)$$

Таким образом, при $TC > 0$ будет наблюдаться положительная экономическая эффективность от применения схемы с ТГР. При $TC < 0$ применение схемы с ТГР приведет к отрицательной экономической эффективности.

В ходе расчета задавались произвольным значением расчетных потерь напора в сети для схемы с ТГР ΔH_{c1}, а также $k_т$, Q'_o, $Q_{гвс}^{max}/Q'_o$, $\kappa_ч$, при этом определялись следующие параметры: средняя нагрузка на ГВС $Q_{гвс}^{ср} = (Q_{гвс}^{max}/Q'_o)\cdot Q'_o/\kappa_ч$; сопротивление сети $S_c = \Delta H_{c1}/(G_o + G_{гвс}^{max})^2$; потери напора в сети для классической (современной) схемы ΔH_{c2} (при параллельном присоединении подогревателя ГВС $\Delta H_{c2} = \Delta H_{c1}$, при двухступенчатой смешанной – $\Delta H_{c2} < \Delta H_{c1}$ за счет меньшего расчетного расхода воды на ГВС); располагаемый напор на выходе из источника $\Delta H_{ист}$ по формуле (1) (в предложенном алгоритме при изменении соотношения $Q_{гвс}^{max}/Q'_o$ сопротивление сети S_c изменяется, но $\Delta H_{ист}$ остается постоянным); годовой расход электроэнергии на перекачку теплоносителя по формуле (2); расход топлива B_1 и B_2; общие затраты производства теплоты TC_1 и TC_2; экономическая эффективность по формуле (3).

Алгоритм расчета выглядит следующим образом:

$$\begin{matrix} Q'_o \\ \Delta H_c \\ Q_{гвс}^{max}/Q'_o \end{matrix} \rightarrow Q_{гвс}^{ср} \rightarrow S_c \rightarrow \Delta H_{c2} \rightarrow \begin{matrix} \kappa_ч \\ k_т \end{matrix} \quad (5)$$

$$\rightarrow \begin{matrix} \Delta H_{ист1} \\ \Delta H_{ист2} \end{matrix} \rightarrow \begin{matrix} Э_1 \\ Э_2 \end{matrix} \rightarrow \begin{matrix} B_1 \\ B_2 \end{matrix} \rightarrow \begin{matrix} TC_1 \\ TC_2 \end{matrix} \rightarrow TC$$

В соответствии с этим алгоритмом, абсолютные значения TC_1 и TC_2 изменяются в зависимости от расчетной нагрузки на отопление Q'_o, но их относительное значение TC остается неизменным. Такой подход позволяет построить зависимости $TC = f(\Delta H_{c1}, Q_{гвс}^{max}/Q'_o, \kappa_ч, k_т)$.

Результаты исследования. На рис. 1 и 2 показано изменение экономической эффективности схемы с ТГР в тепловом пункте в зависимости от $Q_{гвс}^{max}/Q'_o$ при различных $\kappa_ч$ и ΔH_{c1}, но при фиксированном $k_т = 0{,}83$ в сравнении с классическими схемами присоединения абонентов.

Значения $\kappa_ч = 1$ (равномерное потребление ГВС) и $\kappa_ч = 100$ в эксплуатации практически не наблюдаются, но они наглядно показывают изменения значений TC в диапазоне $1 \le \kappa_ч \le 100$.

На графиках значения относительного изменения затрат на производство теплоты и транспортировку теплоносителя ТС при $Q_{гвс}^{max}/Q'_o = 0$ будет означать, что нагрузка ГВС отсутствует и в классической схеме присоединения «перетопа» не будет. Общие затраты на производство теплоты сравниваемых схем будут различаться только значениями затрат на перекачку теплоносителя, разница между которыми при качественном регулировании будет определяться значением $\Delta H_{аб}^{min}$.

В результате выполненных расчетов установлено, что экономическая эффективность от применения ТГР в тепловом пункте увеличивается:

– при уменьшении соотношения $Q_{гвс}^{max}/Q'_o$;

– уменьшении расчетных потерь напора в тепловой сети ΔH_{c1};

– уменьшении коэффициента $k_т$.

Для различных значений ΔH_{c1} наблюдается соотношение $\left(Q_{гвс}^{max}/Q'_o\right)_{кр}$, при котором значения TC остаются практически неизменными независимо от изменения $\kappa_ч$. В области левее $\left(Q_{гвс}^{max}/Q'_o\right)_{кр}$ значения TC увеличиваются при увеличении $\kappa_ч$, в области правее $\left(Q_{гвс}^{max}/Q'_o\right)_{кр}$ значения TC уменьшаются при увеличении $\kappa_ч$. В условиях эксплуатации тепловых сетей ($Q_{гвс}^{max}/Q'_o \le 2{,}0$, $\Delta H_{c1} \le 80$ м вод.ст.) для режима 95/70 °С характерна область значений TC левее соотношения $\left(Q_{гвс}^{max}/Q'_o\right)_{кр}$.

В результате анализа тарифов на электрическую энергию и природный газ для источников теплоснабжения по регионам России установлено, что коэффициент $k_т$ находится в диапазоне от 0,4 до 1,2. В связи с ростом цен на энергоресурсы в целом, указанный выше диапазон с течением времени будет оставаться практически одинаковым.

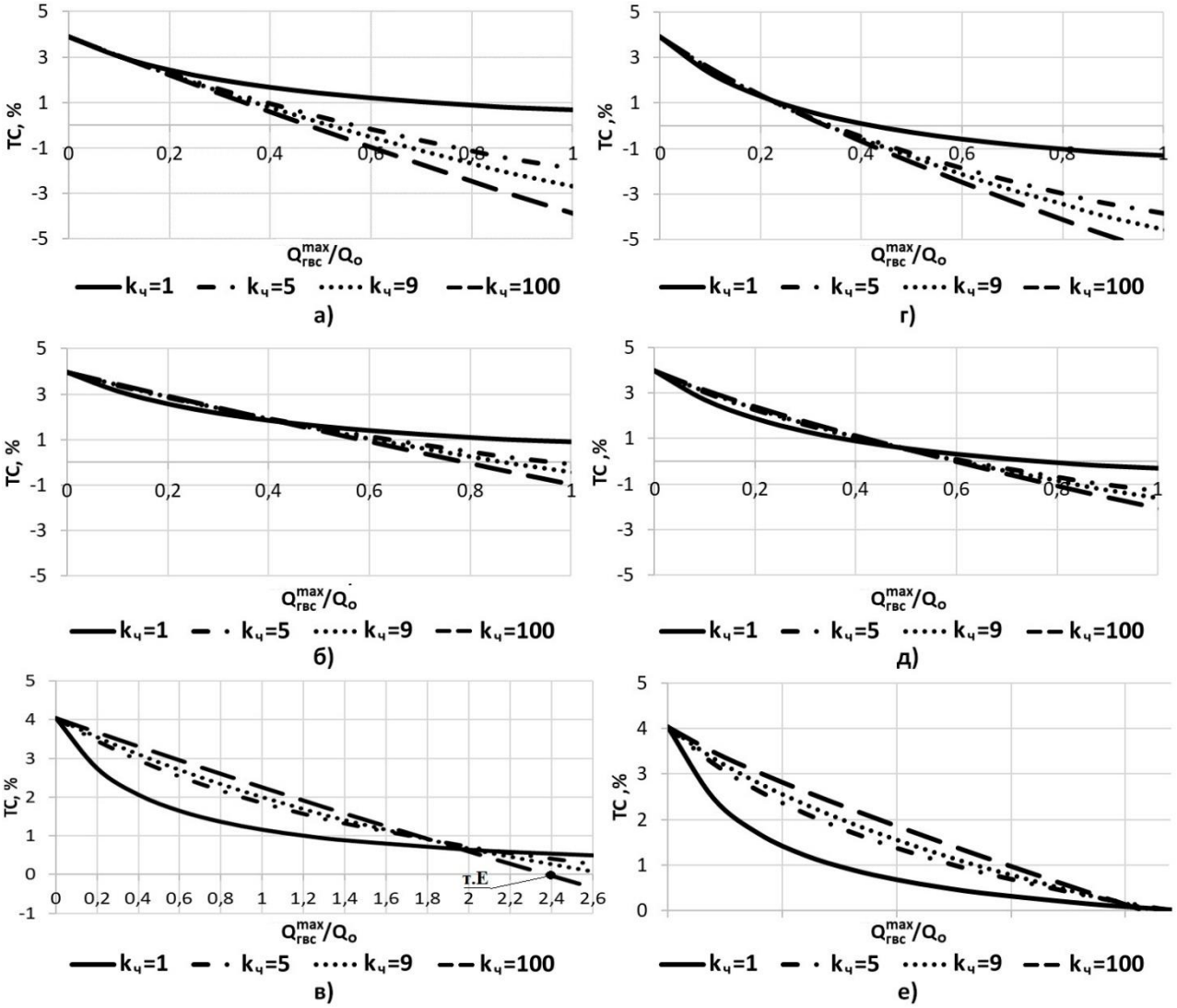


Рис. 1. Графики значений экономической эффективности при сравнении схемы с ТГР с классическими схемами с параллельным присоединением подогревателя ГВС (слева) и двухступенчатым смешанным присоединением подогревателя ГВС (справа) от изменения $Q_{гвс}^{max}/Q_o'$ и $\kappa_ч$, $k_т$ = 0,83 (температурный график 150/70 °С): а, г – $\Delta H_{c1}=50$ м вод.ст.; б, д – $\Delta H_{c1}=30$ м вод.ст.; в, е – $\Delta H_{c1}=10$ м вод.ст.

При фиксированном значении ΔH_{c1} и варьировании $k_т$ значения *ТС* будут изменяться. С уменьшением $k_т$, что говорит об использовании более дорогого топлива, эффективность от внедрения ТГР будет увеличиваться (рис. 3). При фиксированном $k_т$ и увеличении гидравлического сопротивления сети (потерь напора ΔH_{c1}) затраты на перекачку теплоносителя для схемы с ТГР из-за большего циркуляционного расхода воды будут увеличиваться быстрее, чем для сравниваемой схемы.

В результате исследования установлено, что для систем теплоснабжения с регуляторами расхода у абонентов существуют зависимости $\Delta H_{c1}=f(k_т)$, которым соответствует «семейство» функций $TC=f(Q_{гвс}^{max}/Q_o';\ \kappa_ч)$.

Результаты исследования температурного графика 150/70 °С. Моделям 1, 2, 3 на рис. 3,а соответствуют модели $TC=f(Q_{гвс}^{max}/Q_o';\ \kappa_ч)$ на рис. 3,б,в,г при сравнении схемы с ТГР со схемой с параллельным присоединением подогревателя ГВС. Средняя ошибка аппроксимации моделей $TC=f(Q_{гвс}^{max}/Q_o';\ \kappa_ч)$ составляет не более 15 %.

График *1* на рис. 3,а является граничной функцией расчетных значений ΔH_{c1} и $k_т$, при которых для всех соотношений $Q_{гвс}^{max}/Q_o'<2{,}0$ экономическая эффективность от внедрения схемы с ТГР будет положительной.

Если точка при расчетных значениях ΔH_{c1} и $k_т$ попадает выше графика *1*, то соотношение $Q_{гвс}^{max}/Q_o'$, при котором эффективность схемы с ТГР будет положительной при различных $\kappa_ч$, уменьшается. Так, графику *2* на рис. 3,а соответствуют соотношения $Q_{гвс}^{max}/Q_o'<0{,}8$, а графику *3* – $Q_{гвс}^{max}/Q_o'<0{,}4$.

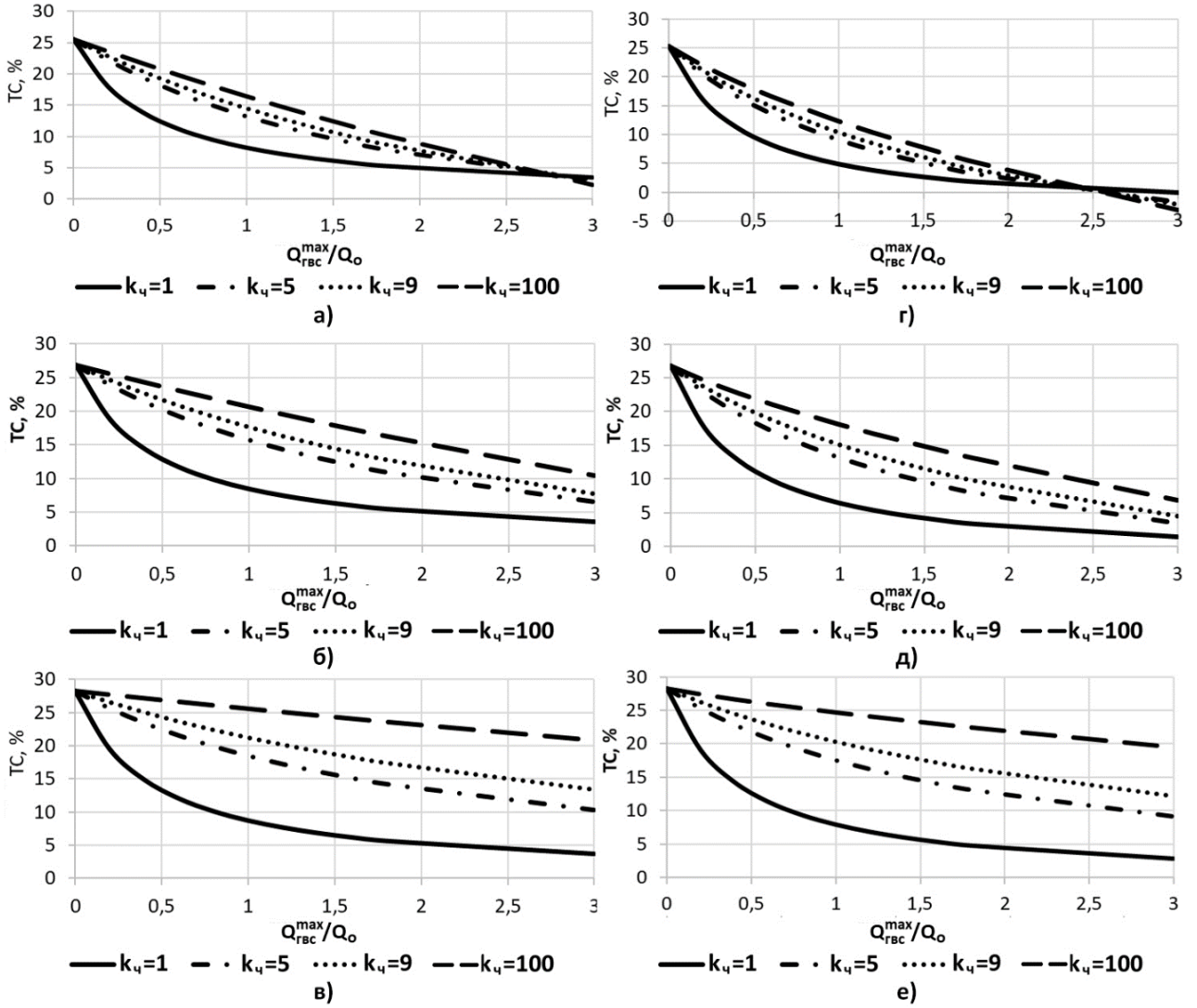


Рис. 2. Графики значений экономической эффективности при сравнении схемы с ТГР с классическими схемами с параллельным присоединением подогревателя ГВС (слева) и двухступенчатым смешанным присоединением подогревателя ГВС (справа) от изменения $Q_{гвс}^{max}/Q_o'$ и $\kappa_ч$, $k_т = 0{,}83$ (температурный график 95/70 °С): а, г – $\Delta H_{c1} = 50$ м вод.ст.; б, д – $\Delta H_{c1} = 30$ м вод.ст.; в, е – $\Delta H_{c1} = 10$ м вод.ст.

Например, значения $TC = f(Q_{гвс}^{max}/Q_o'; \kappa_ч)$ на рис. 3,б соответствуют теплосети с ΔH_{c1} = 10 м вод.ст. и $k_т$ = 0,97 (т. А), теплосети с ΔH_{c1} = 20 м вод.ст. и $k_т$ = 0,49 (т. В), а также теплосети с ΔH_{c1} = 30 м вод.ст. и $k_т$ = 0,35 (т. Г).

Проанализируем две одинаковые сети с расчетным значением ΔH_{c1} = 10 м вод.ст., но различным соотношением затрат на топливо и электроэнергию $k_т$ = 0,97 и $k_т$ = 0,83. Согласно рис. 3,б, ТС = 0 % при $Q_{гвс}^{max}/Q_o' = 2{,}0$ и $\kappa_ч$ = 100 (т. Д). Согласно рис. 1,в, ТС = 0 % уже при $Q_{гвс}^{max}/Q_o' = 2{,}4$ и $\kappa_ч$ = 100 (т. В).

Аналогично при сравнении с двухступенчатой смешанной схемой моделям 1, 2, 3 на рис. 3,д соответствуют модели $TC = f(Q_{гвс}^{max}/Q_o'; \kappa_ч)$ на рис. 3,е,ж,з. Схему с двухступенчатым смешанным присоединением подогревателя ГВС применяют при соотношениях $0{,}2 \le Q_{гвс}^{max}/Q_o' \le 1{,}0$. На рис. 3,д график *1* является граничной функцией расчетных значений ΔH_{c1} и $k_т$, при которых для всех соотношений $Q_{гвс}^{max}/Q_o' < 1{,}0$ эффективность от применения схемы с ТГР будет положительной независимо от изменения $\kappa_ч$, что показано на рис. 3,е.

На рис. 1,е показаны графики $TC = f(Q_{гвс}^{max}/Q_o'; \kappa_ч)$ при расчетных значениях $\Delta H_{c1} = 10$ м вод.ст. и $k_т = 0{,}83$, соответствующих т. Б на рис. 3,д. Так, например, для $Q_{гвс}^{max}/Q_o' = 1{,}0$ и $\kappa_ч = 5$ – *ТС* = 0 % (рис. 3,д), *ТС* = 1,4 % (рис. 1,е).

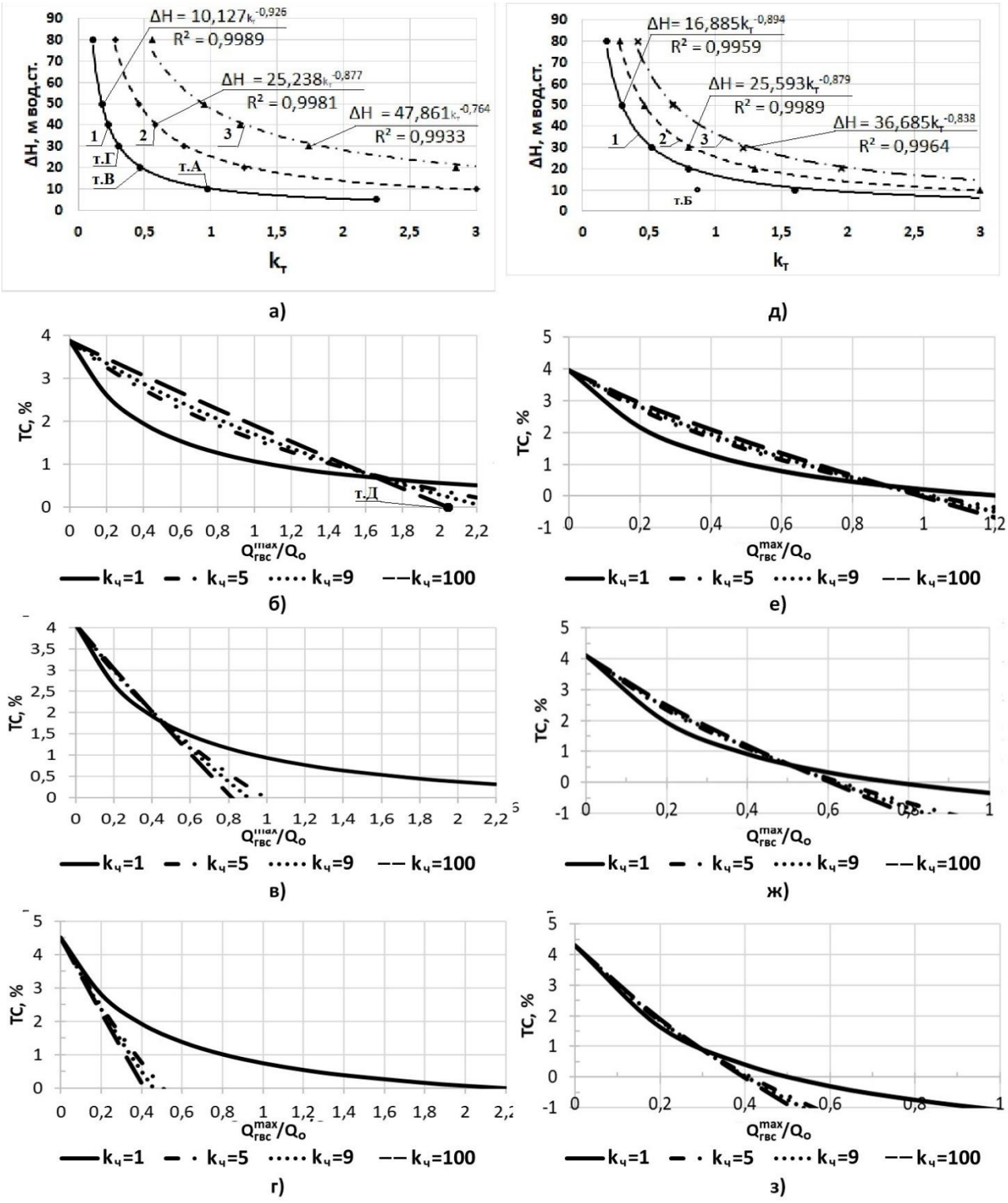


Рис. 3. Сравнение схемы с ТГР с параллельной (слева) и двухступенчатой смешанной (справа) схемами присоединения подогревателя ГВС (температурный график 150/70 °С): а – $\Delta H_{c1} = f(k_т)$ для параллельной схемы; б, в, г – $TC = f(Q_{гвс}^{max} / Q_o'; к_ч)$, соответствующие графику *1*, *2* и *3* (положительная экономическая эффективность при $Q_{гвс}^{max} / Q_o' < 2{,}0$, $Q_{гвс}^{max} / Q_o' < 0{,}8$ и $Q_{гвс}^{max} / Q_o' < 0{,}4$) соответственно; д – $\Delta H_{c1} = f(k_т)$ для двухступенчатой смешанной схемы; е, ж, з – $TC = f(Q_{гвс}^{max} / Q_o'; к_ч)$, соответствующие графику *1*, *2* и *3* (положительная экономическая эффективность при $Q_{гвс}^{max} / Q_o' < 1{,}0$, $Q_{гвс}^{max} / Q_o' < 0{,}6$ и $Q_{гвс}^{max} / Q_o' < 0{,}4$) соответственно

Результаты исследования температурного графика 95/70 °С. На рис. 4 представлены номограммы для определения экономической эффективности от внедрения ТГР в тепловом пункте при температурном графике 95/70 °С. Средняя ошибка аппроксимации моделей $TC = f(Q_{гвс}^{max} / Q_o'; \kappa_ч)$ составляет не более 15 %.

На рис. 4,а график *1* является граничной функцией расчетных значений ΔH_{c1} и $k_т$, при которых для всех соотношений $Q_{гвс}^{max} / Q_o' < 2{,}0$ экономическая эффективность схемы с ТГР будет положительный. В частности, на рис. 4,б показаны значения $TC = f(Q_{гвс}^{max} / Q_o'; \kappa_ч)$ при $\Delta H_{c1} = 80$ м вод.ст. и $k_т = 0{,}83$, а на рис. 2 представлено изменение $TC = f(Q_{гвс}^{max} / Q_o'; \kappa_ч)$ при $k_т = 0{,}83$ и уменьшении расчетных потерь в сети ΔH_{c1}.

Установлено, что с уменьшением ΔH_{c1} экономическая эффективность увеличивается с увеличением $\kappa_ч$. Максимальное значение стандартного отклонения *TC* при ΔH_{c1} = 10 м вод.ст. составляет 6,40 % (при $Q_{гвс}^{max} / Q_o' = 1{,}6$) по сравнению с двухступенчатой смешанной схемой и 4,60 % (при $Q_{гвс}^{max} / Q_o' = 1{,}6$) по сравнению со схемой с параллельным присоединением подогревателя ГВС.

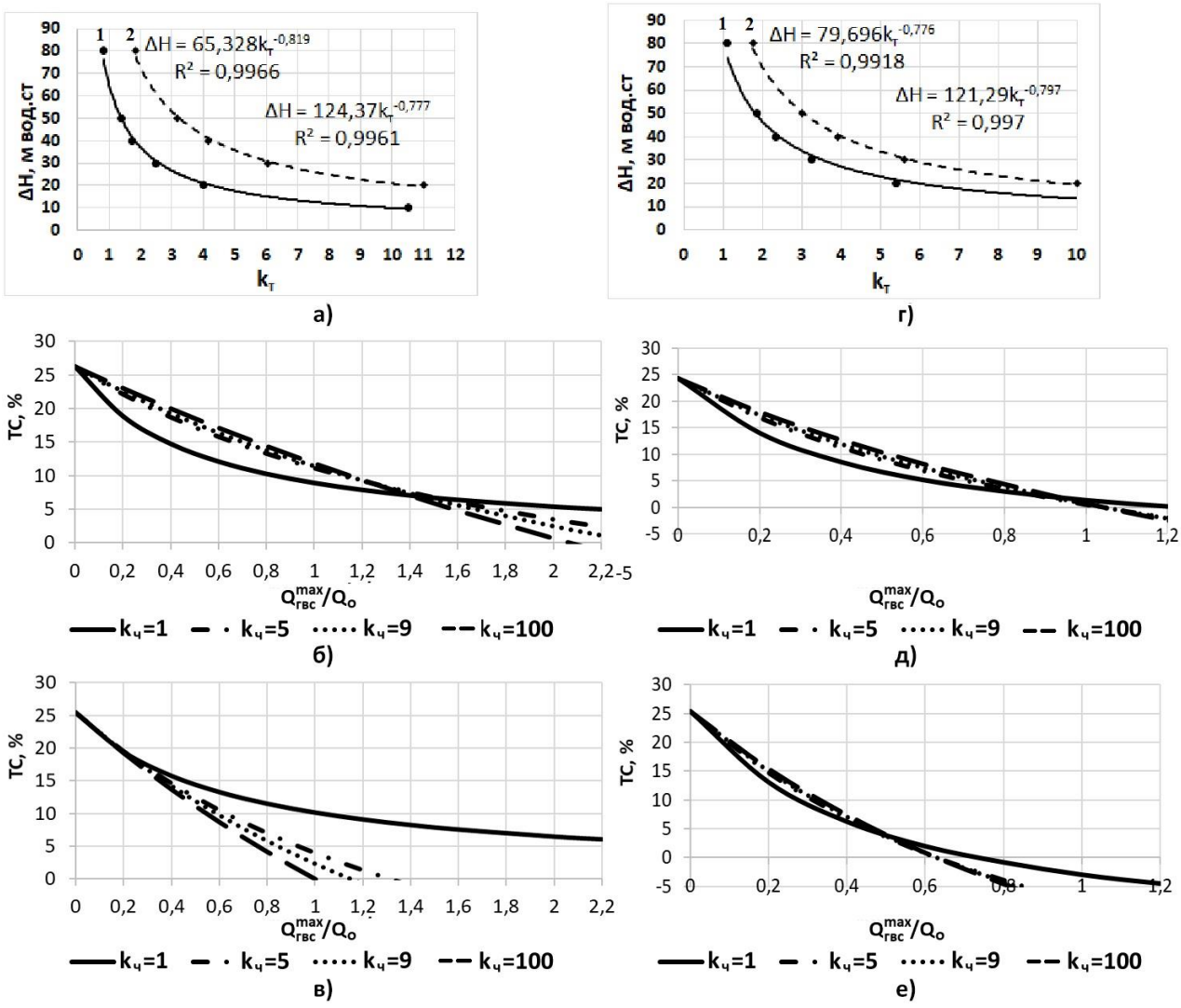


Рис. 4. Сравнение схемы с ТГР с параллельной (слева) и двухступенчатой смешанной (справа) схемами присоединения подогревателя ГВС (температурный график 95/70 °С): а – $\Delta H_{c1} = f(\kappa_т)$ для параллельной схемы; б, в – $TC = f(Q_{гвс}^{max} / Q_o'; \kappa_ч)$, соответствующие графику *1* и *2* (положительная экономическая эффективность при $Q_{гвс}^{max} / Q_o' < 2{,}0$ и $Q_{гвс}^{max} / Q_o' < 1{,}0$) соответственно; г – $\Delta H_{c1} = f(k_т)$ для двухступенчатой смешанной схемы; д, е – $TC = f(Q_{гвс}^{max} / Q_o'; \kappa_ч)$, соответствующие графику *1* и *2* (положительная экономическая эффективность при $Q_{гвс}^{max} / Q_o' < 1{,}0$ и $Q_{гвс}^{max} / Q_o' < 0{,}6$) соответственно

Анализ полученных данных (рис. 4) позволяет сделать следующий вывод: для условий эксплуатации тепловых сетей с потерями напора $\Delta H_{c1} \le 80$ м вод.ст. положительная экономическая эффективность от внедрения ТГР в тепловых пунктах будет возникать всегда. Максимальное значение *ТС* при стремлении $Q_{\text{гвс}}^{\max} / Q'_{\text{о}}$ к нулю составляет не более 25,0 % со стандартным отклонением 3,2 % по сравнению с параллельной и 4,2 % по сравнению с двухступенчатой смешанной схемой.

Результаты сравнения схемы с ТГР с АИТП (качественно-количественное регулирование). В данном случае схемы с ТГР и АИТП устраняют «перетоп». Минимальный располагаемый напор у абонента с АИТП практически на 15 м вод.ст. больше, чем с ТГР, но, с другой стороны, расход воды на отопление за счет количественного регулирования в период «излома» у абонента с АИТП меньше.

На рис. 5 и 6 представлены значения экономической эффективности от применения схемы с ТГР в тепловом пункте по сравнению с АИТП при отсутствии ГВС в тепловой сети $Q_{\text{гвс}}^{\max} / Q'_{\text{о}} = 0{,}0$ (температурный график отопительный). Анализ полученных данных показывает, что экономическая эффективность увеличивается с увеличением коэффициента $k_{\text{т}}$, т. е. с увеличением стоимости электрической энергии. При фиксированном значении коэффициента $k_{\text{т}}$ эффективность увеличивается с уменьшением расчетных потерь в сети ΔH_{c1}.

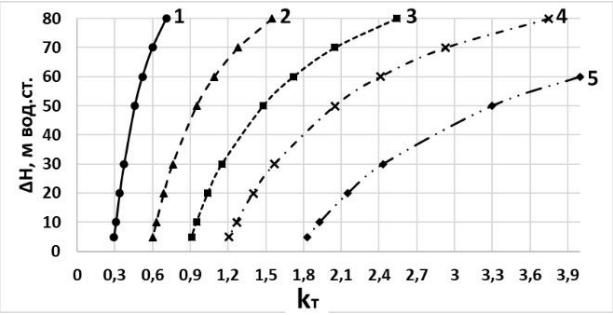


Рис. 5. Результаты расчета значений экономической эффективности от применения схемы с ТГР по сравнению с АИТП (качественно-количественное регулирование) при $Q_{\text{гвс}}^{\max} / Q'_{\text{о}} = 0{,}0$ (температурный график 150/70 °С): 1 – *ТС* = 0,5 %; 2 – *ТС* = 1,0 %; 3 – *ТС* = 1,5 %; 4 – *ТС* = 2,0 %; 5 – *ТС* = 3,0 %

Для температурного режима 150/70 °С и $k_{\text{т}} = 1{,}2$ при ΔH_{c1} = 30–80 м вод.ст. эффективность будет составлять от 1,5 до 0,8 % (рис. 5). Для температурного режима 95/70 °С и $k_{\text{т}} = 1{,}2$ при $\Delta H_{c1} = 10$ м вод.ст. эффективность составит всего лишь около 0,5 % (рис. 6).

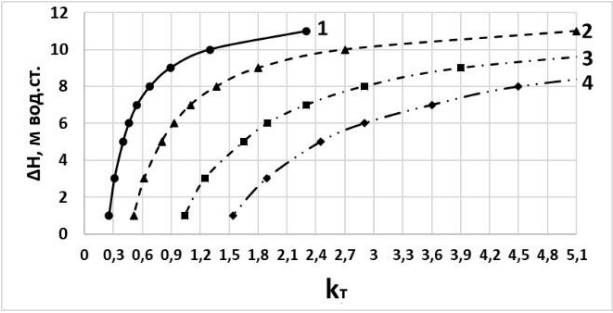


Рис. 6. Результаты расчета значений экономической эффективности от применения схемы с ТГР по сравнению с АИТП (качественно-количественное регулирование) при $Q_{\text{гвс}}^{\max} / Q'_{\text{о}} = 0{,}0$ (температурный график 95/70 °С): 1 – *ТС* = 0,5 %; 2 – *ТС* = 1,0 %; 3 – *ТС* = 2,0 %; 4 – *ТС* = 3,0 %

Исследования показали, что при наличии в сети нагрузки ГВС значения *ТС* при расчетном ΔH_{c1} с увеличением соотношения $Q_{\text{гвс}}^{\max} / Q'_{\text{о}}$ будут уменьшаться. Это объясняется тем, что для схемы с ТГР производится работа сетевого насоса с наибольшими расходами воды (из-за максимального расхода сетевой воды на ГВС). В связи с этим годовые затраты электроэнергии на перекачку теплоносителя оказываются больше, несмотря на то что $\Delta H_{\text{ист}}$ в формуле (2) практически на 15 м вод.ст. меньше, чем в схеме с АИТП.

Результаты сравнения схемы с ТГР с АИТП (количественное регулирование). При количественном регулировании в тепловой сети с АИТП на источнике теплоснабжения поддерживают постоянную температуру в подающем трубопроводе в течение всего отопительного периода, во внешней теплосети – количественное регулирование, в местной системе отопления – качественное регулирование.

На рис. 7 и 8 представлены значения экономической эффективности при $Q_{\text{гвс}}^{\max} / Q'_{\text{о}} = 0{,}0$.

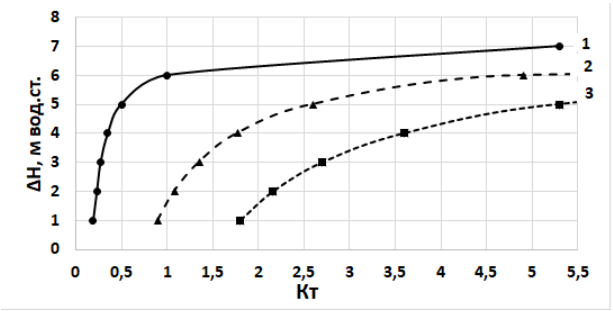


Рис. 7. Результаты расчета значений экономической эффективности от применения схемы с ТГР по сравнению с АИТП (количественное регулирование) при $Q_{\text{гвс}}^{\max} / Q'_{\text{о}} = 0{,}0$ (температура в тепловой сети 150 °С): 1 – *ТС* = 0,1 %; 2 – *ТС* = 0,5 %; 3 – *ТС* = 1,0 %

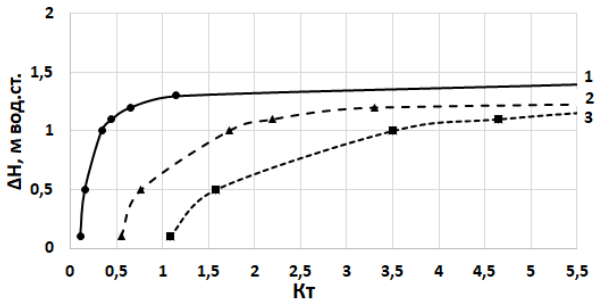


Рис. 8. Результаты расчета значений экономической эффективности от применения схемы с ТГР по сравнению с АИТП (количественное регулирование) при $Q_{\text{гвс}}^{\max} / Q_{\text{о}}' = 0{,}0$ (температура в тепловой сети 115 °С): 1 – *ТС* = 0,1 %; 2 – *ТС* = 0,5 %; 3 – *ТС* = 1,0 %

Выводы. Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы об эффективности применения ТГР в тепловых пунктах.

1. Для температурного графика 150/70 °С с расчетными потерями в сети $\Delta H_{c1} \le 50$ м вод.ст. и коэффициентом $k_{\text{т}} \le 0{,}3$ экономическая эффективность составит не более $4{,}00 \pm 0{,}23$ %.

2. Для температурного графика 95/70 °С с расчетными потерями в сети $\Delta H_{c1} \le 50$ м вод.ст. и коэффициентом $k_{\text{т}} \le 2{,}0$ экономическая эффективность составит не более $25{,}00 \pm 4{,}20$ %.

3. С уменьшением расчетной температуры наружного воздуха температура точки «излома» температурного графика» уменьшается, следовательно, и эффективность будет возрастать.

4. С уменьшением соотношения $Q_{\text{гвс}}^{\max} / Q_{\text{о}}'$ эффективность увеличивается. При фиксированном соотношении $Q_{\text{гвс}}^{\max} / Q_{\text{о}}'$ эффективность будет увеличиваться при увеличении $\kappa_{ч}$ абонента. С уменьшением коэффициента $k_{\text{т}}$ экономическая эффективность будет увеличиваться.

Полученные данные [10] позволяют построить номограммы для определения экономической эффективности от применения ТГР в тепловом пункте для различных климатических условий и температурных графиков тепловой сети.

В целом тепловой пункт с ТГР эффективен в низконапорных и низкотемпературных системах централизованного теплоснабжения с потребителями, местные системы отопления которых не оборудованы регуляторами теплового потока.

По эффективности использования электрической энергии схема с ТГР уступает современным АИТП как в низко- и высоконапорных, так и в низко- и высокотемпературных системах теплоснабжения с качественно-количественным и количественным регулированием тепловой нагрузки. Экономическая эффективность от теплового пункта с ТГР с практической точки зрения незначителен или отсутствует.

Список литературы

1. **Сравнительный** анализ эффективности применения термогидравлического распределителя с классическими схемами присоединения абонентов / В.В. Смирнов, Ю.В. Яворовский, В.В. Сенников, Д.О. Романов // Вестник ИГЭУ. – 2019. – Вып. 3. – С. 5 –13.

2. **Романов Д.О., Яворовский Ю.В., Смирнов В.В.** Экспериментальные исследования режимов работы термогидравлического распределителя // Надежность и безопасность энергетики. – 2019. – № 2. – С. 106–112.

3. **Экспериментальные** исследования и численное моделирование режимов работы термогидравлического распределителя / Д.О. Романов, Ю.В. Яворовский, В.В. Сенников, В.В. Смирнов // Энергосбережение – теория и практика. – 2018. – С. 233–237.

4. **Смирнов В.В., Яворовский Ю.В., Сенников В.В.** Экспериментальное подтверждение локализации переменных гидравлических режимов в тепловых пунктах с термогидравлическим распределителем // Вестник ИГЭУ. – 2018. – Вып. 6. – С. 5–14.

5. **Семенов В.Г., Барон В.Г., Разговоров А.С.** Индивидуальные тепловые пункты нового поколения // ЭНЕРГОСОВЕТ. – 2017. – № 48. – С. 15–18.

6. **Ильин Р.А., Столяров Д.В.** Комплексная модернизация тепловых пунктов в системах централизованного теплоснабжения // Символ науки. – 2015. – № 12-1. – С. 42–45.

7. **Савина Н.В., Артюшевская Е.Ю.** Управление теплоснабжением: современные индивидуальные тепловые пункты // Вестник АмГУ. – 2017. – № 79. – С. 55–59.

8. **Игнатек В.В., Боровков В.М.** Анализ методов регулирования отпусков тепловой энергии // Материаловедение. Энергетика. – 2010. – №2-2(100). – С. 65–71.

9. **Расчет** графиков регулирования тепловой нагрузки в независимых автоматизированных системах теплоснабжения / В.П. Черненков, И.Д. Лихачев, М.С. Барышев, М.Б. Рахматулина // Вестник инженерной школы ДВФУ. – 2017. – № 3(32). – С. 27–31.

10. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019619037. Расчет технико-экономических показателей теплоснабжения при использовании ТГР в ТП: № 2019617713: заявл. 25.06.2019: опубл. 09.07.2019. / В.В. Смирнов, Ю.В. Яворовский, Д.Р. Залаев, Д.О. Романов; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».

References

1. Smirnov, V.V., Yavorovsky, Yu.V., Sennikov, V.V., Romanov, D.O. Sravnitel′nyy analiz effektivnosti primeneniya termogidravlicheskogo raspredelitelya s klassicheskimi skhemami prisoedineniya abonentov [Comparative analysis of the efficiency of using a thermohydraulic distributor versus classical consumer connection schemes]. *Vestnik IGEU*, 2019, issue 3, pp. 5–13.

2. Romanov, D.O., Yavorovskiy, Yu.V., Smirnov, V.V. Eksperimental′nye issledovaniya rezhimov raboty termogidravlicheskogo raspredelitelya [Experimental studies of

the operating modes of a thermohydraulic distributor]. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki*, 2019, no. 2, pp. 106–112.

3. Romanov, D.O., Yavorovskiy, Yu.V., Sennikov, V.V., Smirnov, V.V. Eksperimental′nye issledovaniya i chislennoe modelirovanie rezhimov raboty termogidravlicheskogo raspredelitelya [Experimental studies and numerical modeling of the operating modes of a thermohydraulic distributor]. *Energosberezhenie: teoriya i praktika*, 2018, pp. 233–237.

4. Smirnov, V.V., Yavorovskiy, Yu.V., Sennikov, V.V. Eksperimental′noe podtverzhdenie lokalizatsii peremennykh gidravlicheskikh rezhimov v teplovykh punktakh s termogidravlicheskim raspredelitelem [Experimental confirmation of the localization of variable hydraulic regimes in heat substations equipped with a thermohydraulic distributor]. *Vestnik IGEU*, 2018, issue 6, pp. 5–14.

5. Semenov, V.G., Baron, V.G., Razgovorov, A.S. Individual′nye teplovye punkty novogo pokoleniya [New-generation individual heat substations]. *ENERGOSOVET*, 2017, no. 48, pp. 15–18.

6. Il′in, R.A., Stolyarov, D.V. Kompleksnaya modernizatsiya teplovykh punktov v sistemakh tsentralizovannogo teplosnabzheniya [Comprehensive modernization of heat substations in district heating systems]. *Simvol nauki*, 2015, no. 12-1, pp. 42–45.

7. Savina, N.V., Artyushevskaya, E.Yu. Upravlenie teplosnabzheniem: sovremennye individual′nye teplovye punkty [Heat supply management: modern individual heat substations]. *Vestnik AmGU*, 2017, no. 79, pp. 55–59.

8. Ignatek, V.V., Borovkov, V.M. Analiz metodov regulirovaniya otpuskov teplovoy energii [Analysis of methods for regulating thermal energy supply]. *Materialovedenie. Energetika*, 2010, no. 2-2(100), pp. 65–71.

9. Chernenkov, V.P., Likhachev, I.D., Baryshev, M.S., Rakhmatulina, M.B. Raschet grafikov regulirovaniya teplovoy nagruzki v nezavisimykh avtomatizirovannykh sistemakh teplosnabzheniya [Calculation of thermal load regulation schedules in independent automated heat supply systems]. *Vestnik inzhenernoy shkoly DVFU*, 2017, no. 3(32), pp. 27–31.

10. Smirnov, V.V., Yavorovskiy, Yu.V., Zalaev, D.R, Romanov, D.O. *Raschet tekhniko-ekonomicheskikh pokazateley teplosnabzheniya pri ispol'zovanii TGR v TP* [Calculation of technical and economic indicators of heat supply using TGR in heat substations]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM v Rossii [Certificate of state registration of computer program in Russian Federation]. No. 2019619037, 2019.

УДК 620.92

Роман Александрович Анненков
ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова», аспирант кафедры тепловых электрических станций и теплотехники, Россия, Новочеркасск, e-mail: annenkov-1999-161@mail.ru

Роман Владимирович Безуглов
ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова», кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций и теплотехники, Россия, Новочеркасск, e-mail: bezuglov@npi-tu.ru

Владимир Борисович Ильин
ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова», старший научный сотрудник НИИ «Нанотехнологии и новые материалы», Россия, Новочеркасск, e-mail: ilyin07@gmail.com

Данила Алексеевич Пономарев
ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова», студент, лаборант НИИ «Нанотехнологии и новые материалы», Россия, Новочеркасск, e-mail: danila_ponomarev1@mail.ru

Денис Алексеевич Пономарев
ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова», студент, лаборант НИИ «Нанотехнологии и новые материалы», Россия, Новочеркасск, e-mail: denis.ponomarev.04@list.ru

Сравнение воздушной газификации твердых органических отходов и пеллет с добавлением низкосортного угля[1]

Авторское резюме

Состояние вопроса. Рост объемов органических и древесных отходов требует эффективных методов их переработки с получением вторичных энергетических ресурсов. Термическая газификация биомассы и комбинированных топлив с использованием воздуха как окислителя является перспективным подходом, позволяющим получать генераторный газ для производства тепла, электричества и химической продукции. Однако увеличение доли азота снижает теплоту сгорания газа, что делает актуальным использование комбинированных пеллет с добавлением угля для повышения энергетической эффективности и стабильности процесса. Цель исследования – изучение процессов газификации пеллет из биомассы с добавлением низкосортного угля, определение влияния коэффициента избытка воздуха на состав и теплоту сгорания генераторного газа, а также оценка эффективности комбинированных пеллет для получения вторичных энергетических ресурсов.
Материалы и методы. В качестве материала для исследования использована смесь шрота подсолнечника и отходов тары деревянной с добавлением угля Донецкого АШ. Формование пеллет выполнено на механическом таблеточном прессе при давлении 5–8 т, диаметре пеллет 25 мм и длине пеллет 15–30 мм. Газификация пеллет проведена на экспериментальной установке с подачей воздуха при коэффициентах избытка α = 0,2–0,4. Состав газов определен с использованием газового хроматографа.
Результаты. Проведен эксперимент по термической переработке пеллет из твердых органических сельскохозяйственных отходов в газификаторе обращенного типа. На основе проведенного эксперимента выполнена оценка влияния добавления угля в твердых органических сельскохозяйственных отходах. Получен генераторный газ теплотой сгорания, приемлемой для сжигания в энергетических котлах. Установлено, что увеличение подачи воздуха повышает выход газообразных продуктов за счет глубокой окислительной переработки сырья, при α = 0,2 преобладают горючие компоненты (CO, H_2, CH_4), а при α = 0,4 увеличивается доля инертных газов и снижается теплота сгорания. Оптимальный диапазон α = 0,2–0,3 обеспечивает максимальный выход горючего генераторного газа при контролируемом окислении.
Выводы. Газификация пеллет из биомассы с добавлением угля позволяет эффективно получать генераторный газ с высокой теплотой сгорания, превышающей показатели при газификации чистой биомассы, что делает предложенную технологию перспективной для переработки органических отходов и производства вторичных энергетических ресурсов.

Ключевые слова: воздушная газификация, пеллеты, генераторный газ, твердые органические отходы, вторичные энергетические ресурсы

[1] Работа выполнена в рамках стратегического проекта «Разработка технологий малотоннажной химической продукции и материалов для энергетики» Программы развития ЮРГПУ (НПИ) при реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».
The study is carried out within the framework of the strategic project “Development of Technologies for Small-Scale Chemical Products and Materials for the Energy Sector” under the Development Program of Platov South Russian State Polytechnic University, as part of the “Priority-2030” Strategic Academic Leadership Program.

© Анненков Р.А., Безуглов Р.В., Ильин В.Б., Пономарев Д.А., Пономарев Д.А., 2026
Вестник ИГЭУ, 2026, вып. 5, с. 31–35.

Roman Aleksandrovich Annenkov
Platov South Russian State Polytechnic University, Post graduate Student of Thermal Power Plants and Thermal Engineering Department, Russia, Novocherkassk, e-mail: annenkov-1999-161@mail.ru

Roman Vladimirovich Bezuglov
Platov South Russian State Polytechnic University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Thermal Power Plants and Thermal Engineering Department, Russian, Novocherkassk, e-mail: bezuglov@npi-tu.ru

Vladimir Borisovich Ilyin
Platov South Russian State Polytechnic University, Senior Researcher of the Research Institute “Nanotechnology and New Materials”, Russia, Novocherkassk, e-mail: ilyin07@gmail.com

Danila Alekseevich Ponomarev
Platov South Russian State Polytechnic University, Student, Laboratory Assistant of the Research Institute “Nanotechnology and New Materials”, Russia, Novocherkassk, e-mail: danila_ponomarev1@mail.ru

Denis Alekseevich Ponomarev
Platov South Russian State Polytechnic University, Student, Laboratory Assistant of the Research Institute “Nanotechnology and New Materials”, Russia, Novocherkassk, e-mail: denis.ponomarev.04@list.ru

Comparison of air gasification of solid organic waste and pellets with the addition of low-grade coal

Abstract

Background. The growing volume of organic and wood waste requires effective processing methods to recover secondary energy resources. Thermal gasification of biomass and combined fuels using air as an oxidant is a promising approach to generate gas for heat, electricity, and chemical production. However, an increase in nitrogen content reduces its calorific value, making it important to use combined pellets with added coal to enhance energy efficiency and process stability. The purpose of this study is to investigate the gasification processes of biomass pellets blended with low-grade coal, to determine the effect of the air excess ratio on the composition and calorific value of the generator gas, and to evaluate the efficiency of combined pellets to recover secondary energy resources.
Materials and methods. A mixture of sunflower meal and wooden packaging waste with the addition of Donetsk ASh-grade coal has been used as the research material. The pellets have been formed using a mechanical pellet press at a pressure of 5–8 tons, a diameter of pellet is 25 mm, and a length of pellet is 15–30 mm. Pellet gasification has been carried out on an experimental installation with air supply at excess factors α = 0,2–0,4. The composition of gases has been determined by gas chromatograph.
Results. An experiment has been conducted on the thermal processing of pellets from solid organic agricultural waste in a reverse-flow gasifier. Based on the results of the experiment, the effect of adding coal to the solid organic agricultural waste has been assessed. The resulting generator gas with a calorific value suitable for combustion in power boilers has been obtained. It has been found that increasing the air supply enhances the yield of gaseous products due to the deep oxidative processing of raw materials. At α = 0,2 combustible components (CO, H_2, CH_4) predominate, while at α = 0,4, the proportion of inert gases increases and the heat of combustion decreases. The optimal range of α = 0,2–0,3 ensures maximum yield of combustible generator gas during controlled oxidation.
Conclusions. Biomass pellet gasification with coal addition enables the efficient production of generator gas with a high calorific value that is twice as high as that of pure biomass, making it a promising technology for the processing of organic waste and the production of secondary energy resources.

Key words: air gasification, pellets, generator gas, solid organic waste, secondary energy resources

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.5.031-035

Введение. Рост объемов твердых органических отходов, включая сельскохозяйственные и древесные, требует внедрения технологий их эффективной переработки с получением вторичных энергетических ресурсов [1, 2]. Одним из перспективных методов является термохимическая газификация, которая позволяет преобразовать биомассу и уголь в генераторный газ, пригодный для производства тепловой и электрической энергии, а также химической продукции.

Использование воздуха в качестве окислителя делает процесс более экономичным и технологически доступным для промышленных установок. Однако увеличение доли азота в газовой смеси снижает теплоту сгорания генераторного газа. Для повышения энергетической эффективности предлагается использование комбинированных пеллет, где биомасса (шрот подсолнечника и древесные отходы) смешивается с углем (уголь Донецкого АШ).

Газификация твердых топлив. Основы газификации твердых топлив изложены в [3], где рассматриваются механизмы термохимических реакций, энергетический баланс, влияние состава топлива на выход синтез-газа и отмечается, что применение воздуха как окислителя ограничивает максимальную температуру реакционной зоны из-за присутствия азота, что снижает долю CO и H_2 в газе.

Газификация биомассы и комбинированных топлив. Зарубежные исследования [4, 5] показывают, что предварительная механическая обработка биомассы – пеллетирование – стабилизирует процесс газификации в воздушной среде. Добавление углеродистых компонентов, таких как уголь, позволяет повысить теплоту сгорания генераторного газа и уменьшить влияние низкотемпературного горения.

Газификация в воздушной среде. Использование воздуха как окислителя обеспечивает технологическое удобство и низкую стоимость самого процесса газификации (нет необходимости подключения линии кислорода либо сооружения на объекте установки разделения воздуха). Однако использование воздуха приводит к разбавлению генераторного газа азотом, что снижает его теплоту сгорания [6, 7]. Комбинированное топливо, содержащее уголь, позволяет компенсировать эти недостатки, увеличивая долю CO и H_2 в газе и стабилизируя тепловой режим.

Совместная газификация биомассы и угля. Современные исследования [8] показывают, что совместная газификация биомассы и угля повышает энергетическую эффективность и стабильность процесса газификации. Донецкий уголь марки АШ отличается высокой долей углерода и низкой влажностью, что улучшает теплотворные характеристики комбинированных пеллет [9, 10]. Тем не менее Донецкий АШ является низкосортным топливом и требует постоянной подсветки газом[2]. Таким подсветочным газом может стать генераторный газ, получаемый от двух предлагаемых составов.

Материалы и методы исследования. *Исходное сырье*. Для изготовления пеллет использовались следующие смеси:

1) отходы тары деревянной + уголь Донецкий АШ (состав 1);

2) шрот подсолнечника + уголь Донецкий АШ (состав 2).

Все компоненты предварительно были высушены до влажности 6,2–6,4 % и измельчены до фракции 1–2 мм.

Смесь компонентов готовилась в пропорции 72 % биомассы, 25 % угля (по массе) и в качестве связующего компонента добавлялось 3 % картофельного крахмала. Доли каждого компонента обоих составов пеллет выбраны исходя из имеющегося мирового опыта и количества биомассы определенного вида, встречающейся на полигонах регионов России.

Формирование пеллет проводилось на механическом прессе таблеточного типа. Основные параметры процесса следующие:

- масса загрузки в форму для пресса – от 10 до 20 грамм;
- давление прессования – от 5 до 8 тонн;
- температура прессования – температура окружающей среды;
- диаметр пеллет – 25 мм;
- длина – 15–30 мм.

При вышеуказанных параметрах обеспечивается оптимальное спекание лигнина, выступающего в роли природного связующего, что исключает необходимость использования добавления воды.

На рис. 1 представлено фото пеллет двух видов, полученных методом прессования.



Рис. 1. Композитные пеллеты для газификации, полученные методом прессования (вверху – состав 1, внизу – состав 2)

Описание экспериментальной установки. Эксперимент проводился в лаборатории НИИ «Нанотехнологии и новые материалы» ЮРГПУ (НПИ) на экспериментальной установке газификации твердых отходов, состоящей из реактора, системы подачи воздуха и системы сбора синтетического газа. Реактор был оснащен температурными датчиками и манометром для контроля условий процесса. Состав газа определялся при помощи газового хроматографа «Кристаллюкс-4000М». На рис. 2 представлено фото экспериментальной установки для газификации твердых органических отходов.



Рис. 2. Лабораторная установка для газификации твердых отходов

[2] РД 34.10.501-90. Нормы расхода газомазутного топлива при сжигании каменных углей с выходом летучих веществ менее 20 % на тепловых электростанциях Минэнерго СССР. – М., 1991.

Режим термической газификации. Пеллеты загружались в реактор, который впоследствии герметизировался. Для обеспечения ограниченного окисления в реактор подавался расчетный объем воздуха, соответствующий коэффициентам избытка α = 0,2; 0,3; 0,4. Был взят именно такой диапазон α ввиду того, что при α = 0,1 не обеспечивается условий экзотермичности реакции – требуется подвод теплоты извне. При α = 0,5 наблюдается слишком высокая доля балластных негорючих газов (азота и двуокиси углерода), ввиду чего нецелесообразно проводить газификацию при значениях α, больших, чем α = 0,4 [11]. Объем воздуха для газификации топлива вычисляется по формуле

$$V_{\text{в}} = V_{\text{о}}^{\text{н}} \alpha,$$

где $V_{\text{о}}^{\text{н}}$ – теоретическое количество сухого воздуха, необходимое для полного сгорания топлива (при α = 1); α – коэффициент избытка воздуха.

Отбор и анализ продуктов. Генераторный газ из реактора выходит через выходной патрубок, далее проходит сепаратор, адсорбер и поступает на линию анализа газовым хроматографом «Кристаллюкс-4000М». При этом определяются концентрации CO, CO_2, H_2, N_2, CH_4.

Жидкая фракция (надсмольная вода) собиралась в приемной емкости для дальнейшего анализа смол, масел и воды (рис. 3).



Рис. 3. Приемная емкость для жидкой фракции

Твердый остаток извлекался после охлаждения реактора до 25 °C, взвешивался и визуально оценивался (рис. 4).



Рис. 4. Твердый коксовый остаток

Для обеспечения должной степени статистической обработки данных эксперименты проводились трижды для каждого типа пеллет и при разных коэффициентах избытка воздуха.

Результаты исследования влияния коэффициента избытка воздуха на выход продуктов газификации представлены в таблице.

Выход продуктов газификации

Сырье	α	Массовая доля компонента в газе, %					$Q_{\text{н}}$, МДж/м^3
		H_2	N_2	CO_2	CH_4	CO	
Пеллеты состав 1	0,2	16,10	48,90	13,26	6,71	15,03	6,04
	0,3	8,72	56,04	12,15	3,75	19,34	4,73
	0,4	9,42	47,86	13,16	4,81	24,74	4,18
Тара	0,3	7,75	65,13	5,84	5,45	15,84	4,78
Пеллеты состав 2	0,2	12,15	46,73	11,09	4,89	25,14	6,24
	0,3	14,72	52,95	12,22	7,14	12,97	5,78
	0,4	14,37	54,57	10,14	6,45	14,47	5,67
Шрот	0,3	9,81	53,46	11,08	4,19	21,46	5,27

Результаты. В ходе эксперимента четырех видов сырья установлено, что генераторный газ от чистой древесной биомассы (отходы тары деревянной) имеет большую теплоту сгорания, чем древесные пеллеты с добавлением 25 % угля (Донецкого АШ). Однако генераторный газ от чистой подсолнечной биомассы имеет меньшую теплоту сгорания, чем пеллеты подсолнечника с добавлением 25 % угля (Донецкого АШ). Данный факт обусловлен тем, что древесина имеет большую теплоту сгорания, чем шрот подсолнечный. Таким образом, в пеллетах состава 1 низкосортный уголь Донецкий АШ снижает теплоту сгорания генераторного газа при его газификации, а в пеллетах состава 2 – повышает.

Коэффициент избытка воздуха α оказывает определяющее влияние на направление протекающих процессов. Установлено, что при α = 0,2 процесс ближе к пиролизу, образуется газ с более высоким энергетическим потенциалом (повышенное содержание CO, H_2, CH_4).

При α = 0,4 процесс переходит в область глубокого окисления, что приводит к увеличению доли балластных компонентов (N_2, CO_2) и уменьшению теплоты сгорания газа.

Выход твердого остатка (золы вместе с несгоревшим углеродом) зависит от количества подаваемого воздуха и тепловых условий в реакторе. Полученные данные подтверждают, что оптимальным диапазоном для получения газообразного топлива является область коэффициента избытка воздуха α = 0,2–0,3. В этом диапазоне обеспечивается наилучшее сочетание выхода горючих компонентов (CO, H_2, CH_4) и допустимого уровня окисления.

При низком α процесс характеризуется повышенным выходом летучих веществ и горючих газов, при высоком α – усиливается образование CO_2 и N_2 и газ становится низкокалорийным. Таким образом, регулирование подачи воздуха является ключевым инструментом управления

кинетикой термического разложения и качеством получаемого газа.

Выводы. Газификация пеллет из шрота подсолнечника и древесных отходов с добавлением донецкого угля в воздушной среде является перспективной технологией получения генераторного газа.

Теплота сгорания генераторного газа комбинированного типа пеллет выше, чем чистой биомассы, в случае со шротом подсолнечным и ниже в случае древесной биомассы. Теплота сгорания пеллет с отходами древесной тары составляет 4,18–6,94 МДж/м^3, пеллет с отходами шрота подсолнечного – 5,67–6,24 МДж/м^3.

Технология подходит для переработки органических отходов с получением вторичных энергетических ресурсов – генераторного газа и впоследствии тепловой и электрической энергии. Кроме того, предлагаемая технология позволяет эффективно использовать низкосортное твердое топливо – Донецкий АШ.

Список литературы

1. **Боркова Е.А., Горельчаник П.И., Горельчаник Л.И.** Проблема утилизации отходов в системе устойчивого развития РФ // Экономические отношения. – 2019. – Т. 9, № 2. – С. 1167–1178.
2. **Васильева Е.А.** Технология обращения с твердыми коммунальными отходами. Ч. 2: учеб. пособие. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2021. – 80 с.
3. **Белов В.Г.** Газификация твердых топлив. – М.: Недра, 2019.
4. **Bridgwater A.V.** Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory. – Elsevier, 2012.
5. **Basu P.** Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction. – Elsevier: Academic Press, 2023.
6. **Соловьев А.Н., Михайлов П.П.** Газификация отходов с применением воздуха // Химическая технология. – 2021. – № 4. – С. 45–53.
7. **Черняев Д.В.** Термодинамический анализ газификации биомассы в воздушной среде // Энергетика и экология. – 2022. – № 2. – С. 12–18.
8. **Zhou H., Wu S., Zhang Y.** Co-gasification of coal and biomass in air/steam atmospheres // Energy Conversion and Management. – 2020. – Vol. 223. – P. 113285.
9. **Миронов В.Г., Блинов С.Н.** Газификация биотопливных пеллет из сельскохозяйственных отходов // Вестник МЭИ. – 2020. – № 6. – С. 55–63.
10. **Каган Г.М.** (ред.). Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб.: ВТИ, 1998. 260 с.
11. **Безуглов Р.В.** Установка газификации твердых отходов // Вестник ИГЭУ. – 2025. – Вып. 2. – С. 12–17.

References

1. Borkova, E.A., Gorel′chanik, P.I., Gorel′chanik, L.I. Problema utilizatsii otkhodov v sisteme ustoychivogo razvitiya RF [The problem of waste disposal in the system of sustainable development of the Russian Federation]. *Ekonomicheskie otnosheniya*, 2019, vol. 9, no. 2, pp. 1167–1178.
2. Vasil′eva, E.A. *Tekhnologiya obrashcheniya s tverdymi kommunal'nymi otkhodami. Ch. 2* [Technology of solid municipal waste management. Part 2]. Saint-Petersburg: VSHTE SPbGUPTD, 2021. 80 p.
3. Belov, V.G. *Gazifikatsiya tverdykh topliv* [Gasification of solid fuels]. Moscow: Nedra, 2019.
4. Bridgwater, A.V. Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory. Elsevier, 2012.
5. Basu, P. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction. Elsevier: Academic Press, 2023.
6. Solov′ev, A.N., Mikhaylov, P.P. Gazifikatsiya otkhodov s primeneniem vozdukha [Waste gasification using air]. *Khimicheskaya tekhnologiya*, 2021, no. 4, pp. 45–53.
7. Chernyaev, D.V. Termodinamicheskiy analiz gazifikatsii biomassy v vozdushnoy srede [Thermodynamic analysis of biomass gasification in air]. *Energetika i ekologiya*, 2022, no. 2, pp. 12–18.
8. Zhou, H., Wu, S., Zhang, Y. Co-gasification of coal and biomass in air/steam atmospheres. *Energy Conversion and Management*, 2020, vol. 223, p. 113285.
9. Mironov, V.G., Blinov, S.N. Gazifikatsiya biotoplivnykh pellet iz sel′skokhozyaystvennykh otkhodov [Gasification of Biofuel Pellets from Agricultural Waste]. *Vestnik MEI*, 2020, no. 6, pp. 55–63.
10. Kagan, G.M. (ed.). *Teplovoy raschet kotlov (Normativnyy metod)* [Thermal calculation of boilers (Normative method). Saint-Petersburg: VTI, 1998. 260 p.
11. Bezuglov, R.V. Ustanovka gazifikatsii tverdykh otkhodov [Installation of solid waste gasification]. *Vestnik IGEU*, 2025, issue 2, pp. 12–17.

УДК 536.2 (075) 46

Евгения Валериевна Котова
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», кандидат технических наук, доцент кафедры теоретических основ теплотехники и гидромеханики, Россия, Самара, e-mail: larginaevgenya@mail.ru

Василий Александрович Кудинов
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретических основ теплотехники и гидромеханики, Россия, Самара, телефон +7 (846) 332-42-35, e-mail: totig@yandex.ru

Ксения Владимировна Колотилкина
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», аспирант кафедры теоретических основ теплотехники и гидромеханики, Россия, Самара, телефон +7 (846) 332-42-35

Екатерина Васильевна Стефанюк
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», доктор технических. наук, профессор кафедры теоретических основ теплотехники и гидромеханики, заведующий кафедрой трубопроводного транспорта, Россия, Самара, телефон +7 (846) 332-42-35, e-mail: stef-kate@yandex.ru

Игорь Васильевич Кудинов
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой физики, руководитель опытно-промышленной лаборатории «Нефтегазовые технологии производства водорода и графита», Россия, Самара, e-mail: igor-kudinov@bk.ru

Исследование условий теплового взрыва в пластине с переменными свойствами при зависимости источника теплоты от температуры[1]

Авторское резюме

Состояние вопроса. Интерес к получению аналитических решений задач теплопроводности с переменными физическими свойствами среды при зависимости внутреннего источника теплоты от температуры объясняется необходимостью исследования высокотемпературных процессов теплового воспламенения и взрыва, протекающих в режимах с обострением, при которых теплота, локализуясь в ограниченной области пространства, в течение короткого диапазона времени приводит к неограниченному возрастанию температуры (тепловому взрыву). Исследование подобных задач в основном выполняется численными методами, так как их решение с помощью известных аналитических методов не предоставляется возможным. В связи с этим актуальным является разработка аналитических методов, позволяющих получать решения таких задач
Материалы и методы. Применительно к решению указанных задач теплопроводности вводятся в рассмотрение дополнительная функция и дополнительные граничные условия, состоящие из координатных соотношений, приводящих к выполнению уравнения теплопроводности на границах. Дополнительная функция представляет временно̀е изменение температуры в некоторой точке пространственной переменной, ее применение позволяет снизить порядок исходного уравнения – из уравнения в частных производных оно приводится к обыкновенному уравнению. Применение дополнительных граничных условий позволяет исключить процесс интегрирования исходного дифференциального уравнения по пространственной переменной вследствие его граничного выполнения.
Результаты. Приводится доказательство теоремы, согласно которой граничное выполнение уравнения приводит к его выполнению во всей области определения пространственной переменной. Найдено решение задачи теплопроводности с переменными физическими свойствами и температурозависящим внутренним источником теплоты. Полученное решение позволяет отделить стационарные режимы от режимов неограниченного возрастания температуры, протекающих при положительном первом собственном числе. Установлено, что возрастание температуры происходит в узкой области пространственной переменной в коротком диапазоне времени, то есть в режиме с обострением. Применен метод, позволяющий при большом числе используемых дополнительных граничных условий исключить интегрирование уравнения по координате, что подтверждено доказательством теоремы. Полученное решение использовано для нахождения мощности источника теплоты, при которой градиент температуры стенки реактора пиролиза метана не превышает допустимой (заданной) величины.
Выводы. С использованием дополнительных граничных условий и дополнительной искомой функции получено аналитическое решение сложнейшей нелинейной задачи теплопроводности с нелинейным источником теплоты. Рас-

[1] Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSSE-2026-0003) в рамках государственного задания Самарского государственного технического университета.
This study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the state assignment of Samara State Technical University (project no. FSSE-2026-0014)

© Котова Е.В., Кудинов В.А., Колотилкина К.В., Стефанюк Е.В., Кудинов И.В., 2026
Вестник ИГЭУ, 2026, вып. 5, с. 36–45.

смотренный метод позволяет выполнять исследование процессов горения и взрыва, сопровождающихся неограниченным возрастанием температуры, а также любые другие тепловые процессы в конструкциях с внутренними источниками теплоты, например индукционный прогрев металлов.

Ключевые слова: теплопроводность, пластина, переменные свойства, температурозависящий источник, дополнительные граничные условия, дополнительная функция, интеграл теплового баланса

Evgenia Valerievna Kotova
Samara State Technical University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Theoretical Foundations of Heat Engineering and Hydromechanics Department, Russia, Samara, e-mail: larginaevgenya@mail.ru

Vasily Alexandrovich Kudinov
Samara State Technical University, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, (Post-doctoral degree), Professor, Head of Theoretical Foundations of Heat Engineering and Hydromechanics Department, Russia, Samara,
telephone +7 (846) 332-42-35, e-mail: totig@yandex.ru

Ksenia Vladimirovna Kolotilkina
Samara State Technical University, Postgraduate Student of Theoretical Foundations of Heat Engineering and Hydromechanics Department, Russia, Samara, telephone +7 (846) 332-42-35

Ekaterina Vasilievna Stefanyuk
Samara State Technical University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Theoretical Foundations of Heat Engineering and Hydromechanics Department, Head of Pipeline Transportation Department, Russia, Samara, telephone +7 (846) 332-42-35, e-mail: stef-kate@yandex.ru

Igor Vasilievich Kudinov
Samara State Technical University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor, Head of Physics Department, Head of Experimental Industrial Laboratory “Oil and Gas Technologies for Hydrogen and Graphite Production”, Russia, Samara, e-mail: igor-kudinov@bk.ru

Study of thermal explosion conditions in a plate with variable properties and temperature-dependent heat source

Abstract

Background. The interest to obtain analytical solutions to heat conduction problems with variable physical properties and a temperature-dependent internal heat source, is relevant due to the need to study high-temperature processes of thermal ignition and explosion that occur in blow-up regimes. In these regimes heat becomes localized in a bounded region of space and leads to an unbounded increase in temperature (thermal explosion) within a short time interval. The study of such problems is mainly carried out by numerical methods, since their solution using known analytical methods is not feasible. In this regard, the development of analytical methods to get solutions to such problems is of current importance.
Materials and methods. To solve the specified heat conduction problems, an additional function (AF) and additional boundary conditions (ABCs) are introduced. These conditions consist of coordinate relations that ensure the heat conduction equation is satisfied at the boundaries. The AF represents the temporal variation of temperature at a certain point of the spatial variable. Its application makes it possible to reduce the order of the original equation, transforming it from a partial differential equation into an ordinary differential equation. The application of ABCs allows one to eliminate the process of integrating the original differential equation with respect to the spatial variable, as the equation is satisfied at the boundaries.
Results. A proof is presented for a theorem stating that if the equation holds on the boundary, it holds throughout the entire domain of the spatial variable. A solution has been found for the heat conduction problem involving variable physical properties and a temperature-dependent internal heat source. The obtained solution makes it possible to separate stationary regimes from regimes of unbounded temperature growth, which occur when the first eigenvalue is positive. It has been found that the temperature rise occurs within a narrow spatial region over a short time interval, that is, in a blow-up regime. A method is employed that makes it possible to eliminate integration of the equation with respect to the coordinate when a large number of additional boundary conditions are used. This is confirmed by the proof of the theorem. The obtained solution has been used to determine the heat source power at which the temperature gradient of the methane pyrolysis reactor wall does not exceed the permissible (specified) value.
Conclusions. By employing additional boundary conditions and an auxiliary unknown function, an analytical solution has been obtained for a highly complex nonlinear heat conduction problem involving a nonlinear heat source. The method described enables the analysis of combustion and explosion processes characterized by unbounded temperature rise, as well as other thermal processes in structures with internal heat sources, such as the induction heating of metals.

Key words: thermal conductivity, plate, variable properties, temperature-dependent source, additional boundary conditions, additional function, heat balance integral

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.5.036-045

Введение. Интерес к получению аналитических решений краевых задач связан с внедрением в технике композиционных материалов, а также с необходимостью исследования процессов, сопровождающихся тепловым воспламенением и взрывом. Исследование подобных задач с помощью известных точных аналитических методов не представляется возможным [1, 2].

В [3–5] применительно к решению нестационарных задач теплопроводности вводятся дополнительная функция (ДФ) и дополнительные условия на границах (ДГУ), позволяющие обеспечить граничное выполнение уравнения теплопроводности. В [5, 6] доказаны теоремы, согласно которым граничное выполнение уравнения адекватно его выполнению и внутри области.

В [7, 8] рассматриваются модификации методов, предложенных в [3–5]. И, в частности, дополнительная функция впервые задается в точках задания граничного условия первого рода, в связи с чем она принимается в виде производной от температуры в этой точке. В [9] источник теплоты в неоднородном двумерном уравнении, инициируемый электромагнитным импульсом, зависит от координат и времени. Решение задачи получено численным методом с использованием локально-одномерной схемы. В [10, 11] рассматривается численное решение нелинейной математической модели двухфазной задачи Стефана для слоистой системы диэлектриков при зависимости параметров тела от температуры и теплового источника от координаты. В [12] получено аналитическое решение задачи теплопроводности для температурного поля, возникающего при сварке под флюсом. При этом применена теорема Дюамеля и конечные интегральные преобразования.

В [13] приведены результаты исследований математической модели, описываемой нелинейным уравнением теплопроводности (коэффициент теплопроводности и внутренний источник теплоты – степенные функции температуры). Подобные модели описывают процессы горения, в которых интенсивность горения пропорциональна температуре. Рассматривается бесконечное пространство $(-\infty < x < \infty)$, в котором в начальный момент времени нагрет лишь маленький участок в окрестностях точки $x = 0$. Результаты численных исследований показали, что профили температуры локализуются в некоторой области $(-1 \le x \le +1)$, вне которой температура равна нулю ($t = 0$). В данном случае происходит локализация теплоты в ограниченной области, причем решение существует лишь в течение ограниченного времени, называемого временем обострения, в течение которого температура в точке $x = 0$ обращается в бесконечность.

Одним из направлений получения аналитических решений указанных задач является применение дополнительных граничных условий в интегральном методе теплового баланса. Основная проблема этого метода – низкая точность, которая связана с недостаточным количеством граничной информации, ограничивающей получение решения для большого числа приближений [3–5]. Для ее решения используются ДГУ, позволяющие обеспечить граничное выполнение уравнения. Отметим, что ДГУ выполняются при любом методе получения аналитических решений (включая классические точные методы), в чем можно убедиться непосредственной подстановкой точных решений в использованные в настоящем исследовании ДГУ.

Дополнительная функция, представляющая временно̀е изменение температуры в одной из точек пространственной переменной, также является искомой величиной в любом методе получения аналитического решения, не являясь предметом специального рассмотрения. Ее отдельное рассмотрение позволяет снизить порядок исходного уравнения в частных производных, приводя его к обыкновенному уравнению. Использование ДФ совместно с ДГУ позволяет находить аналитические решения сложнейших нелинейных краевых задач, в том числе и с зависящими от температуры физическими свойствами среды и источниками теплоты, что оказывается возможным вследствие использования специфических свойств ДГУ в интегральном методе теплового баланса, благодаря которым процесс интегрирования исходного уравнения по координате заменяется на более простую операцию определения интеграла теплового баланса – осредненного аналога исходного уравнения.

Методы исследования. Рассмотрим применение метода к решению следующей задачи теплопроводности:

$$c\rho\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda(x)\frac{\partial T(x,t)}{\partial x}\right] + \omega(T), \quad (1)$$

$(t > 0;\ 0 < x < \delta)$;

$$T(x,0) = T_0; \quad (2)$$

$$\partial T(0,t)/\partial x = 0; \quad (3)$$

$$T(\delta,t) = T_{\text{ст}}, \quad (4)$$

где T, x, t – температура, координата, время; T_0 – начальная температура; $T_{\text{ст}}$ – температура при $x = \delta$; $\lambda(x)$ – коэффициент теплопроводности; $\omega(T)$ – внутренний источник теплоты; c, ρ – теплоемкость, плотность; δ – толщина пластины.

Рассмотрим следующие зависимости $\lambda(x)$ и $\omega(T)$:

$$\lambda(x) = \lambda_0 \exp(\pm mx); \quad (5)$$

$$\omega(T) = \omega_0(1 + \gamma(T - T_0)), \quad (6)$$

где λ_0 – коэффициент теплопроводности при $x = 0$; $m > 0$ – постоянная, 1/м; ω_0 – мощность

источника при $T = T_0$; $\gamma > 0$ – постоянная, 1/К; знак «плюс» в показателе экспоненты означает возрастание λ с увеличением x, знак «минус» – убывание.

Уравнение (1) с учетом (5), (6) при положительном показателе экспоненты принимает вид

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = a_0 \frac{\partial}{\partial x}\left[\exp(mx)\frac{\partial T(x,t)}{\partial x}\right] + \\ + \frac{\omega_0}{c\rho}(1+\gamma(T(x,t)-T_0)). \quad (7)$$

Введем обозначения:

$$\Theta = \frac{T-T_0}{\Delta T};\ \mathrm{Fo} = \frac{a_0 t}{\delta^2};\ \xi = \frac{x}{\delta};\ \mathrm{Po}_1 = \frac{\omega_0 \delta^2}{\lambda_0 \Delta T}; \\ \mathrm{Po} = \frac{\omega_0 \gamma \delta^2}{\lambda_0};\ \nu = m\delta, \quad (8)$$

где Θ, ξ, Fo – безразмерные переменные (температура, координата, время); Po, Po_1 – безразмерные комплексы; $a_0 = \lambda_0/(c\rho)$ – коэффициент температуропроводности при $x = 0$; $\Delta T = T_{ст} - T_0$.

С учетом (8) математическая постановка будет иметь следующий вид:

$$\frac{\partial \Theta(\xi,\mathrm{Fo})}{\partial \mathrm{Fo}} = \frac{\partial}{\partial \xi}\left(e^{\nu\xi}\frac{\partial \Theta(\xi,\mathrm{Fo})}{\partial \xi}\right) + \\ + \mathrm{Po}\Theta(\xi,\mathrm{Fo}) + \mathrm{Po}_1 \quad (9)$$

$$(\mathrm{Fo} > 0;\ 0 < \xi < 1);$$

$$\Theta(\xi,0) = 0; \quad (10)$$

$$\left.\frac{\partial \Theta(\xi,\mathrm{Fo})}{\partial \xi}\right|_{\xi=0} = 0; \quad (11)$$

$$\Theta(1,\mathrm{Fo}) = 1. \quad (12)$$

Введем ДФ $q(\mathrm{Fo})$ последовательно в точках: $\xi = 0$; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9. Например, в точке $\xi = 0$ $q(\mathrm{Fo})$ имеет вид

$$q(\mathrm{Fo}) = \Theta(0,\mathrm{Fo}). \quad (13)$$

Температура в точке ξ = 0 заранее не определена – она изменяется лишь от времени и является определяемой величиной задачи (9)–(12), поэтому ее специальное рассмотрение эту задачу не изменяет, но существенно упрощает получение решения.

Рассмотрим получение решения задачи в виде ряда

$$\Theta(\xi,\mathrm{Fo}) = 1 - \sum_{k=1}^{n} b_k(q(\mathrm{Fo}))\varphi_k(\xi) \quad (14)$$

$$(k = \overline{1,n}),$$

где $b_k(q(\mathrm{Fo}))$ – функции, зависящие от времени; $\varphi_k(\xi) = \cos(r\pi\xi/2)$ – функции, зависящие от координаты $(r = 2k-1)$.

Формула (14) удовлетворяет граничным условиям (11), (12). В первом приближении, подставляя (14) (при n = 1) в (13), для $b_1(q(\mathrm{Fo}))$ получаем алгебраическое уравнение, имеющее решение: $b_1(q(\mathrm{Fo})) = 1 - q(\mathrm{Fo})$. Из этого следует

$$\Theta(\xi,\mathrm{Fo}) = 1 - (1-q(\mathrm{Fo}))\cos\left(\frac{\pi}{2}\xi\right). \quad (15)$$

Интеграл теплового баланса (9) имеет вид

$$\int_0^1 \frac{\partial \Theta(\xi,\mathrm{Fo})}{\partial \mathrm{Fo}} d\xi = \int_0^1 \left\{\frac{\partial}{\partial \xi}\left[e^{\nu\xi}\frac{\partial \Theta(\xi,\mathrm{Fo})}{\partial \xi}\right] + \right. \\ \left. + \mathrm{Po}\Theta(\xi,\mathrm{Fo}) + \mathrm{Po}_1\right\} d\xi. \quad (16)$$

Подставим (15) в (16):

$$\eta_1 \frac{dq(\mathrm{Fo})}{d\mathrm{Fo}} + \eta_2 q(\mathrm{Fo}) + \eta_3 = 0, \quad (17)$$

где $\eta_1 = -4/(2\pi)$; $\eta_2 = (4\mathrm{Po} - \pi^2 e^{\nu})/(2\pi)$; $\eta_3 = \mathrm{Po}(1-(2/\pi)) + \mathrm{Po}_1$.

Очевидно, что применение ДФ в интегральном методе теплового баланса приводит уравнение (9) к обыкновенному уравнению (17) относительно $q(\mathrm{Fo})$, при этом выполняется достаточно простая операция определения интегралов в соотношении (16).

Интегрируя уравнение (17), имеем

$$q(\mathrm{Fo}) = C\exp\left[\left(\mathrm{Po} - \frac{\pi^2 e^{\nu}}{4}\right)\mathrm{Fo}\right] - \\ - \frac{2\pi(\mathrm{Po}+\mathrm{Po}_1) - 4\mathrm{Po} + \pi^2 e^{\nu}}{4\mathrm{Po} - \pi^2 e^{\nu}}, \quad (18)$$

где C – постоянная интегрирования.

Подставим (18) в (15):

$$\Theta(\xi,\mathrm{Fo}) = 1 - \left\{1 - C\exp\left[\left(\mathrm{Po} - \frac{\pi^2 e^{\nu}}{4}\right)\mathrm{Fo}\right] + \right. \\ \left. + \frac{2\pi(\mathrm{Po}+\mathrm{Po}_1) - 4\mathrm{Po} + \pi^2 e^{\nu}}{4\mathrm{Po} - \pi^2 e^{\nu}}\right\}\cos\left(\frac{\pi}{2}\xi\right). \quad (19)$$

Потребуем выполнения ортогональности невязки начального условия (10) к координатной функции первого приближения $\varphi_1(\xi)$:

$$\int_0^1 \Theta(\xi,0)\cos\left(\frac{\pi}{2}\xi\right) d\xi = 0. \quad (20)$$

Подставляя (19) в (20), для постоянной C получаем алгебраическое уравнение, имеющее следующее решение:

$$C = \frac{4\pi(\mathrm{Po}+\mathrm{Po}_1)}{2(4\mathrm{Po}-\pi^2 e^{\nu})} - \frac{4}{\pi}. \qquad (21)$$

Формула (19) с учетом (21) принимает вид

$$\Theta(\xi,\mathrm{Fo}) = 1 - \left\{1 - \left[-\frac{4}{\pi} + \frac{4\pi(\mathrm{Po}+\mathrm{Po}_1)}{2(4\mathrm{Po}-\pi^2 e^{\nu})}\right]\exp(\mu_1 \mathrm{Fo}) + \right.$$
$$\left. + \frac{2\pi\,(\mathrm{Po}+\mathrm{Po}_1) - 4\mathrm{Po} + \pi^2 e^{\nu}}{4\mathrm{Po}-\pi^2 e^{\nu}}\right\}\cos\left(\frac{\pi}{2}\xi\right), \qquad (22)$$

где $\mu_1 = \mathrm{Po} - \pi^2 e^{\nu}/4$ – первое собственное число задачи (9)–(12).

Формула (22) представляет первое приближение задачи (9)–(12). При $\mathrm{Po} = 0$; $\mathrm{Po}_1 = 0$; $\nu = 0$ (однородная пластина без источника теплоты) формула (22) будет иметь вид

$$\Theta(\xi,\mathrm{Fo}) = 1 - \frac{4}{\pi}\exp\left(-\frac{\pi^2}{4}\mathrm{Fo}\right)\cos\left(\frac{\pi}{2}\xi\right), \qquad (23)$$

где $\pi^2/4$ – первое собственное число линейной краевой задачи (это число совпадает с точным его значением).

Расчеты по (23) для $0{,}1 \le \mathrm{Fo} < \infty$ отличаются от точных значений температур в пределах 3 % [1].

В классических аналитических методах собственные числа находятся путем интегрирования задачи Штурма–Лиувилля, которая рассматривается в пространственных переменных. Следовательно, используется иной метод их определения, связанный с интегрированием временно́го обыкновенного уравнения.

Формула (22) позволяет отделить стационарные режимы от режимов неограниченного возрастания температуры – теплового взрыва. В случае, если коэффициент показателя экспоненты $(\mathrm{Po} - \pi^2 e^{\nu}/4) > 0$, с увеличением числа Fo будет происходить неограниченное возрастание температуры. При $(\mathrm{Po} - \pi^2 e^{\nu}/4) < 0$ экспонента в (23) с увеличением числа Fo убывает и при $\mathrm{Fo} \to \infty$ имеем стационарный режим теплообмена. Знак показателя экспоненты зависит от величин Po, Po_1, ν, задаваемых в исходных данных.

При задании ДФ в точках ξ = 0,3; 0,5; 0,7; 0,9 формулы для решений имеют различный вид. Их исследования показали, что определяемые по этим формулам температуры при любых конкретных исходных данных полностью совпадают. Следовательно, решение не зависит от точки задания ДФ (исключая точку ξ = 1, где задано граничное условие первого рода), что имеет важное значение при решении задач, в которых граничные условия первого рода заданы на обеих границах, а также для задач с переменным начальным условием, когда граничные значения температур также известны. Во всех этих случаях ДФ может быть задана в любой внутренней точке области, исключая граничные точки.

Повышение точности обусловлено увеличением числа членов решения (14). Неизвестные функции $b_k(q(\mathrm{Fo}))$ определяются из (13) и дополнительных граничных условий (ДГУ) такого вида, выполнение которых адекватно выполнению уравнения (9) в точке ξ = 0. Они определяются следующим образом. Продифференцируем (13) по Fo:

$$\frac{\partial q(\mathrm{Fo})}{\partial \mathrm{Fo}} = \left.\frac{\partial \Theta(0,\mathrm{Fo})}{\partial \mathrm{Fo}}\right|_{\xi=0}. \qquad (24)$$

Подставляя (24) в (9), находим первое ДГУ в точке ξ = 0:

$$\frac{\partial q(\mathrm{Fo})}{\partial \mathrm{Fo}} = \frac{\partial^2 \Theta(0,\mathrm{Fo})}{\partial \xi^2} + q(\mathrm{Fo})\mathrm{Po} + \mathrm{Po}_1. \qquad (25)$$

Для получения следующего ДГУ продифференцируем (25) по переменной Fo, а уравнение (9) – дважды по переменной ξ:

$$\frac{\partial^2 q(\mathrm{Fo})}{\partial \mathrm{Fo}^2} = \frac{\partial^3 \Theta(0,\mathrm{Fo})}{\partial \xi^2 \partial \mathrm{Fo}} + \mathrm{Po}\frac{\partial q(\mathrm{Fo})}{\partial \mathrm{Fo}}; \qquad (26)$$

$$\frac{\partial^3 \Theta(\xi,\mathrm{Fo})}{\partial \xi^2 \partial \mathrm{Fo}} = \nu^3 e^{\nu\xi}\frac{\partial \Theta(\xi,\mathrm{Fo})}{\partial \xi} +$$
$$+ 3\nu^2 e^{\nu\xi}\frac{\partial^2 \Theta(\xi,\mathrm{Fo})}{\partial \xi^2} + \mathrm{Po}\frac{\partial^2 \Theta(\xi,\mathrm{Fo})}{\partial \xi^2}. \qquad (27)$$

Соотношение (27) применительно к точке ξ = 0 с учетом (11) принимает вид

$$\frac{\partial^3 \Theta(0,\mathrm{Fo})}{\partial \xi^2 \partial \mathrm{Fo}} = (3\nu^2 + \mathrm{Po})\frac{\partial^2 \Theta(0,\mathrm{Fo})}{\partial \xi^2}. \qquad (28)$$

Подставляя (28) в (26), находим второе ДГУ для точки ξ = 0:

$$\frac{\partial^2 q(\mathrm{Fo})}{\partial \mathrm{Fo}^2} = (3\nu^2 + \mathrm{Po})\frac{\partial^2 \Theta(0,\mathrm{Fo})}{\partial \xi^2} + \mathrm{Po}\frac{\partial q(\mathrm{Fo})}{\partial \mathrm{Fo}}. \qquad (29)$$

Аналогично можно получить и последующие ДГУ в точке ξ = 0.

Для получения второго приближения подставим (14) (n = 2) в (13), (25). Для $b_k(q(\mathrm{Fo}))$ имеем систему, включающую два алгебраических уравнения и имеющую решение:

$$b_1(q) = (-4q' - I_1 q + I_2)/I_3;$$
$$b_2(q) = (-4q' - I_4 q + I_5)/I_3, \qquad (30)$$

где $q' = \dfrac{dq}{d\mathrm{Fo}}$; $\quad I_1 = 9\pi^2 - 4\mathrm{Po}$; $\quad I_2 = 9\pi^2 + 4\mathrm{Po}_1$;

$I_3 = 8\pi^2$; $I_4 = \pi^2 - 4\mathrm{Po}$; $I_5 = \pi^2 + 4\mathrm{Po}_1$.

Соотношение (14) будет иметь вид

$$\Theta(\xi,\mathrm{Fo}) = 1 - b_1(q(\mathrm{Fo}))\cos(\pi\xi/2) -$$
$$- b_2(q(\mathrm{Fo}))\cos(3\pi\xi/2). \qquad (31)$$

Подставим (31) в (16):

$$R_1 q'' + R_2 q' + R_3 q + R_4 = 0,$$

где $q'' = \dfrac{d^2 q}{d\mathrm{Fo}^2}$; $R_1 = \dfrac{4}{3\pi^3}$; $R_2 = \dfrac{7}{3\pi} + \dfrac{e^{\nu}}{\pi} - \dfrac{8\mathrm{Po}}{3\pi^3}$;

$$R_3 = \frac{4\mathrm{Po}^2}{3\pi^3} - \frac{7\mathrm{Po}}{3\pi} + \frac{3\pi e^{\nu}}{4} - \frac{\mathrm{Po} e^{\nu}}{\pi};$$

$$R_4 = \mathrm{Po}\left(\frac{4\mathrm{Po}_1}{3\pi^3} + \frac{7}{3\pi} - 1\right) - \mathrm{Po}_1\left(1 + \frac{e^{\nu}}{\pi}\right) - \frac{3\pi e^{\nu}}{4}.$$

Интегрируя последнее уравнение, получим

$$q(\mathrm{Fo}) = C_1 e^{\mu_1 \mathrm{Fo}} + C_2 e^{\mu_2 \mathrm{Fo}} - R_4 / R_3, \qquad (32)$$

где C_1, C_2 – константы интегрирования; μ_1, μ_2 – первое и второе собственные числа, определяемые по формуле

$$\mu_{1,2} = \exp(0{,}5 R_1 (\pm\sqrt{R_2^2 - 4R_1 R_3} - R_2)). \qquad (33)$$

Результаты исследования. Согласно расчетам по (31), неограниченное возрастание температуры во времени (тепловой взрыв) происходит при положительном первом собственном числе.

Если принять $\nu = 0$, $\mathrm{Po} = 0$, $\mathrm{Po}_1 = 0$, то первое и второе собственные числа совпадают с точными значениями: $\mu_1 = \pi^2 / 4$; $\mu_2 = 9\pi^2 / 4$ [1].

Соотношение (31) с учетом (30)–(33) представляет решение задачи (9)–(12) во втором приближении. Константы интегрирования C_1 и C_2 находятся путем выполнения требования ортогональности невязки начального условия (10) к координатным функциям $\varphi_1(\xi)$ и $\varphi_2(\xi)$:

$$\int_0^1 \Theta(\xi, 0)\varphi_j(\xi)\, d\xi = 0, \quad (j = k = 1,2). \qquad (34)$$

Подставив (31) в (34), для определения C_1 и C_2 имеем систему двух алгебраических уравнений. Нахождением констант интегрирования завершается процесс получения второго приближения задачи (9)–(12), определяемого по (31).

Результаты расчетов по (31) приведены на рис. 1–4. Расчеты выполнены для двух вариантов значения ν – положительного и отрицательного. При положительном ν теплопроводность с увеличением координаты ξ возрастает, а при отрицательном – уменьшается. Для каждого из вариантов находились значения числа Po, приводящие к стационарному режиму и к тепловому взрыву. Величина $\mathrm{Po}_1 = 8{,}3 \cdot 10^{-5}$ использована во всех вариантах расчетов. Для каждого варианта расчета приводятся собственные числа, определяемые по (33). Знаком первого собственного числа определяется наличие или отсутствие теплового взрыва – тепловой взрыв имеет место при положительном первом собственном числе. Например, при $\nu = 1$; $\mathrm{Po} = 0{,}05$ получены следующие собственные числа: $\mu_1 = -4{,}883$; $\mu_2 = -32{,}811$. В данном случае при $\mathrm{Fo} > 3$ имеем стационарное состояние (рис. 1). При $\nu = -1$; $\mathrm{Po} = 0{,}05$; $\mu_1 = -1{,}015$; $\mu_2 = -18{,}88$ стационарное состояние имеем для всех $\mathrm{Fo} > 8$ (рис. 2). Отметим, что в данном случае время перехода к стационарному состоянию значительно больше, по сравнению с предыдущим вариантом. При $\nu = 2$; $\mathrm{Po} = 8$; $\mu_1 = 1{,}848$; $\mu_2 = -57{,}816$ положительное первое собственное число приводит к неограниченному возрастанию температуры во времени (рис. 3). При $\nu = -2$; $\mathrm{Po} = 0{,}05$; $\mu_1 = -0{,}365$; $\mu_2 = -17{,}808$ первое собственное число отрицательное – стационарное состояние устанавливается при $\mathrm{Fo} \approx 60$, т. е. в этом случае происходит существенное увеличение времени установления стационарного состояния, по сравнению со всеми предыдущими вариантами с отрицательным первым собственным числом (рис. 4). Результаты согласуются с результатами работы [13] в том смысле, что теплота локализуется в ограниченной области $-1 \le x \le 1$ (задача (13)–(16) представляет задачу с симметричными граничными условиями первого рода) при неограниченном возрастании температуры в точке $x = 0$ и при постоянном ее значении в точке $x = \pm 1$ ($x = -1$ и $x = 1$). Следует также отметить ограниченность времени выхода температуры на бесконечно большие значения, т. е. наблюдается режим с обострением, несмотря на то что внутренний источник теплоты описывается линейной функцией температуры, а не степенной (как в [13]).

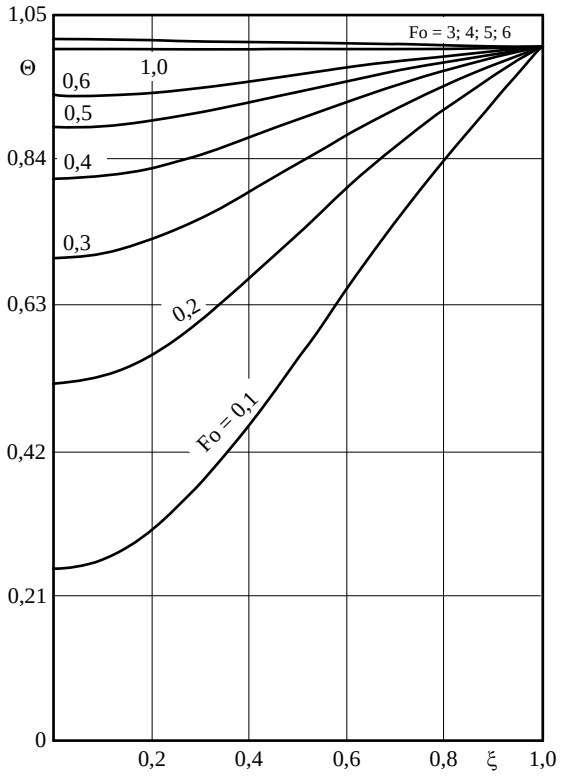


Рис. 1. Изменение температуры (расчет по формуле (31)): $\mathrm{Po} = 0{,}05$; $\nu = 1$; $\mu_1 = -4{,}883$; $\mu_2 = -32{,}811$

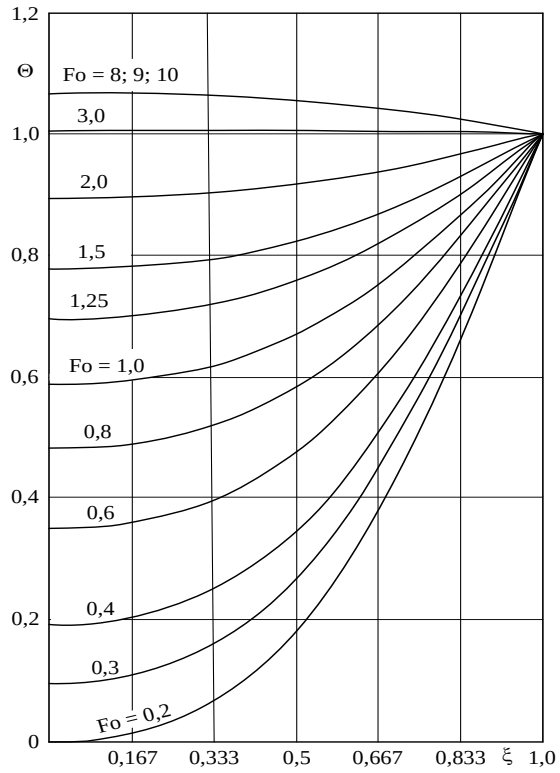


Рис. 2. Изменение температуры (расчет по формуле (31)): $\mathrm{Po} = 0{,}05$; $\nu = -1$; $\mu_1 = -1{,}015$; $\mu_2 = -18{,}88$

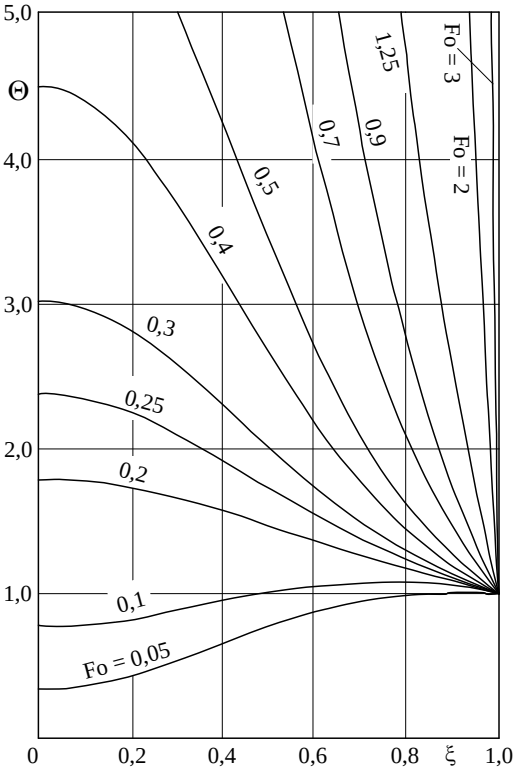


Рис. 3. Изменение температуры (расчет по формуле (31)): $\mathrm{Po} = 8$; $\nu = 2$; $\mu_1 = 1{,}848$; $\mu_2 = -57{,}816$

При постоянных физических свойствах и источнике теплоты (m = 0; γ = 0) метод с применением ДФ и ДГУ приводит к точным аналитическим решениям. Постановка задачи в данном случае имеет вид:

$$\partial\Theta(\xi,\mathrm{Fo}) / \partial\mathrm{Fo} = \partial^2\Theta(\xi,\mathrm{Fo}) / \partial\xi^2 + \mathrm{Po} \qquad (35)$$

$$(\mathrm{Fo} > 0;\ 0 < \xi < 1);$$

$$\Theta(\xi,0) = 0; \qquad (36)$$

$$\partial\Theta(0,\mathrm{Fo}) / \partial\xi = 0; \qquad (37)$$

$$\Theta(1,\mathrm{Fo}) = 1. \qquad (38)$$

Решение задачи при ДФ вида (13) принимается следующим:

$$\Theta(\xi,\mathrm{Fo}) = 1 + \frac{\mathrm{Po}}{2}(1-\xi^2) + \sum_{k=1}^{n} b_k(q)\varphi_k(\xi). \qquad (39)$$

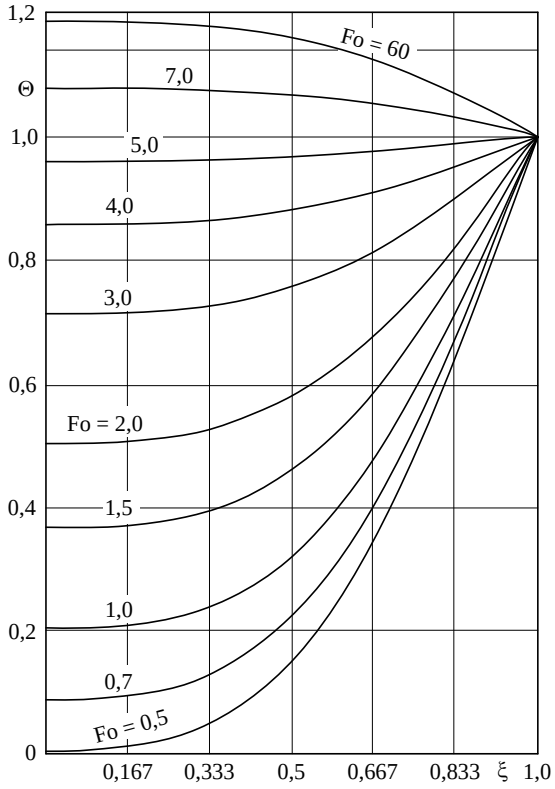


Рис. 4. Изменение температуры (расчет по формуле (31)): $\mathrm{Po} = 0{,}05$; $\nu = -2$; $\mu_1 = -0{,}365$; $\mu_2 = -17{,}808$

Формула (39) удовлетворяет условиям (37), (38). Неизвестные $b_k(q(\mathrm{Fo}))$, ($k = \overline{1,n}$) находятся из (13) и следующих ДГУ:

$$\frac{\partial q(\mathrm{Fo})}{\partial \mathrm{Fo}} = \frac{\partial^2\Theta(0,\mathrm{Fo})}{\partial\xi^2} + \mathrm{Po}; \qquad (40)$$

$$\partial^i\Theta(0,\mathrm{Fo}) / \partial\xi^i = 0;\ (i = 3,5,7,\ldots); \qquad (41)$$

$$\partial^i\Theta(1,\mathrm{Fo}) / \partial\xi^i = 0,\ (i = 4,6,8,\ldots); \qquad (42)$$

$$\frac{\partial^{2i}\Theta(0,\mathrm{Fo})}{\partial\xi^{2i}} = \frac{\partial^i q(\mathrm{Fo})}{\partial \mathrm{Fo}^i},\ (i = 2,3,4,\ldots). \qquad (43)$$

Очевидно, что, благодаря координатным функциям, ДГУ (41), (42) выполняются решением

(39). В первом приближении ($n=1$) после подстановки (39) в (13) для $b_1(q(\mathrm{Fo}))$ имеем алгебраическое уравнение, имеющее решение: $b_1(q(\mathrm{Fo}))=q(\mathrm{Fo})-1-\mathrm{Po}/2$. Соотношение (39) принимает вид

$$\Theta(\xi,\mathrm{Fo})=1+\frac{\mathrm{Po}}{2}(1-\xi^2)+\left(q-1-\frac{\mathrm{Po}}{2}\right)\cos\left(\frac{\pi}{2}\xi\right). \quad (44)$$

Подставляя (44) в (35) и применяя полученное соотношение к любой точке пространственной переменной, находим

$$8\frac{\partial q(\mathrm{Fo})}{\partial Fo}+2\pi^2 q(\mathrm{Fo})-\pi^2(2+\mathrm{Po})=0. \quad (45)$$

Отметим, что уравнение (45) получено без привязки к конкретному значению пространственной переменной и, следовательно, оно справедливо для любого ξ. Этот факт объясняется тем, что, благодаря выполнению решением (39) ДГУ (41), (42), уравнение (35) оказывается выполненным во всей области переменной ξ.

Интегрируя уравнение (45) и подставляя полученное решение в (44), получим

$$\Theta(\xi,\mathrm{Fo})=1+\frac{\mathrm{Po}}{2}(1-\xi^2)+ +C_1\exp\left(-\frac{\pi^2}{4}\mathrm{Fo}\right)\cos\left(\frac{\pi}{2}\xi\right). \quad (46)$$

Постоянная интегрирования C_1 находится из интеграла взвешенной невязки начального условия (36):

$$\int_0^1\left[1+\frac{\mathrm{Po}}{2}(1-\xi^2)+C_1\cos\left(\frac{\pi}{2}\xi\right)\right]\times \times\cos\left(\frac{\pi}{2}\xi\right)d\xi=0. \quad (47)$$

Определяя интегралы, находим

$$C_1=-4(\pi^2-4\mathrm{Po})/\pi^3. \quad (48)$$

Решение (46) точно выполняет уравнение (35), граничные условия (37), (38) и приближенно – начальное условие (36). Повышение точности определяется числом членов ряда (39).

Для нахождения решения во втором приближении подставим (39) (n = 2) в (13), (40). Для $b_1(q(\mathrm{Fo}))$ и $b_2(q(\mathrm{Fo}))$ имеем два алгебраических уравнения. После их решения (39) получим

$$\Theta(\xi,\mathrm{Fo})=1+\frac{\mathrm{Po}}{2}(1-\xi^2)+\left[\frac{q'}{2\pi^2}+\frac{9}{8}\left(q-1-\frac{\mathrm{Po}}{2}\right)\right]\times \times\cos\left(\frac{\pi}{2}\xi\right)+\left[\frac{1}{8}\left(1+\frac{\mathrm{Po}}{2}-q\right)-\frac{q'}{2\pi^2}\right]\cos\left(\frac{3\pi}{2}\xi\right). \quad (49)$$

Подставляя (49) в уравнение (35), находим

$$\frac{16q''}{\pi^4}+\frac{40q'}{\pi^2}+9\left(q-1-\frac{\mathrm{Po}}{2}\right)=0. \quad (50)$$

Интегрируя уравнение (50) и подставляя полученное решение в (49), получим

$$\Theta(\xi,\mathrm{Fo})=1+\frac{\mathrm{Po}}{2}(1-\xi^2)+C_1e^{-\nu_1\mathrm{Fo}}\cos\left(\frac{\pi}{2}\xi\right)+ +C_2e^{-\nu_2\mathrm{Fo}}\cos\left(\frac{3\pi}{2}\xi\right), \quad (51)$$

где $\nu_1=\pi^2/4$, $\nu_2=9\pi^2/4$ – собственные числа, совпадающие с точными их величинами [1]; C_1, C_2 – постоянные.

Постоянные C_1 и C_2 находятся из (36) путем выполнения условия ортогональности невязки (36) к функциям $\varphi_j(\xi)=\cos(j\pi\xi/2)$, ($j=r=2k-1$; k = 1,2):

$$\int_0^1\left[1+\frac{\mathrm{Po}}{2}(1-\xi^2)+C_1\cos\left(\frac{\pi\xi}{2}\right)+C_2\cos\left(\frac{3\pi}{2}\xi\right)\right], \cos\left(\frac{j\pi\xi}{2}\right)d\xi=0 \quad (j=1,3). \quad (52)$$

Ортогональность косинусов приводит к разделению неизвестных в системе (52) (каждое уравнение содержит одно неизвестное). Из решения этих уравнений получены следующие значения C_1 и C_2:

$$C_1=-4(\pi^2+4\mathrm{Po})/\pi^3;\ C_2=4(9\pi^2+4\mathrm{Po})/(27\pi^3).$$

Подставляя найденные из решения системы уравнений (52) постоянные интегрирования C_1 и C_2 в соотношение (51), получаем

$$\Theta(\xi,\mathrm{Fo})=1+\frac{\mathrm{Po}}{2}(1-\xi^2)-\frac{4}{\pi^3}(\pi^2+4\mathrm{Po})\,e^{-\nu_1\mathrm{Fo}}\times \times\cos\left(\frac{\pi}{2}\xi\right)+\frac{4}{27\pi^3}(9\pi^2+4\mathrm{Po})\,e^{-\nu_2\mathrm{Fo}}\times \times\cos\left(\frac{3\pi}{2}\xi\right). \quad (53)$$

В третьем приближении $b_k(q(\mathrm{Fo}))$ (k = 1,2,3) находятся из (13), (40), (43) (при i = 2). Для $q(\mathrm{Fo})$ имеем обыкновенное уравнение третьего порядка. Константы его интегрирования определяются из (36). Решение в третьем приближении будет иметь вид

$$\Theta(\xi,\mathrm{Fo})=1+\frac{\mathrm{Po}}{2}(1-\xi^2)+ +\sum_{k=1}^{n}A_k(1+\mathrm{Po}/\nu_k^2)e^{-\nu_k^2\mathrm{Fo}}\cdot\cos(\nu_k\xi), \quad (54)$$

где $A_k=4(-1)^{k+1}/(r\pi)$; $\nu_k=r\pi/2$; $r=2k-1$; $n=3$.

Из (54) следует, что формулы для A_k и ν_k совпадают с точными формулами для них. Тогда при $n\to\infty$ решение (54) совпадает с точным аналитическим решением задачи (35)–(38) [1].

Для подтверждения полученных результатов докажем следующую теорему.

Теорема. *Если неизвестные функции* $b_k(q)$ $(k=\overline{0,n})$ *находить путем выполнения уравнения (35) и ДГУ, полученных в результате определения производных от него k-го порядка, то при большом числе приближений* $(n\to\infty)$ *уравнение (35) будет выполняться и во всей области изменения* $0\le\xi\le1$*, не прибегая к его непосредственному интегрированию по переменной* ξ.

Для доказательства представим решение уравнения (35) в виде

$$\Theta(\xi,\mathrm{Fo})=\sum_{k=0}^{n}b_k(q(\mathrm{Fo}))\xi^k. \qquad (55)$$

Потребуем, чтобы решение (55) удовлетворяло уравнению (35) и ДГУ, полученным путем определения производных от него *k*-го порядка, в точке ξ = 0:

$$\frac{\partial^k}{\partial\xi^k}\left(\frac{\partial\Theta(\xi,\mathrm{Fo})}{\partial\mathrm{Fo}}-\frac{\partial^2\Theta(\xi,\mathrm{Fo})}{\partial\xi^2}-\mathrm{Po}\right)_{\xi=0}=0 \qquad (56)$$

$(k=\overline{0,n})$.

При $k=0$ соотношение (56) не дифференцируется и представляет уравнение (35), которое должно быть выполнено в точке ξ = 0. При $k=1,2,3,\ldots n$ оно приводится к следующим ДГУ:

$$\left(\frac{\partial^2\Theta(\xi,\mathrm{Fo})}{\partial\xi\partial\mathrm{Fo}}-\frac{\partial^3\Theta(\xi,\mathrm{Fo})}{\partial\xi^3}\right)_{\xi=0}=0;$$

$$\left(\frac{\partial^3\Theta(\xi,\mathrm{Fo})}{\partial\xi^2\partial\mathrm{Fo}}-\frac{\partial^4\Theta(\xi,\mathrm{Fo})}{\partial\xi^4}\right)_{\xi=0}=0;$$

$$\left(\frac{\partial^4\Theta(\xi,\mathrm{Fo})}{\partial\xi^3\partial\mathrm{Fo}}-\frac{\partial^5\Theta(\xi,\mathrm{Fo})}{\partial\xi^5}\right)_{\xi=0}=0;$$

… .

Общая формула для ДГУ, которые должны быть выполнены в точке ξ = 0, включая уравнение (35), имеет вид

$$\left(\frac{\partial^{k+1}\Theta(\xi,\mathrm{Fo})}{\partial\xi^k\partial\mathrm{Fo}}-\frac{\partial^{k+2}\Theta(\xi,\mathrm{Fo})}{\partial\xi^{k+2}}\right)_{\xi=0}=0 \qquad (57)$$

$(k=\overline{0,n})$.

Подставляя (55) в (57), для каждого $k=\overline{0,n}$ относительно $b_k(q(\mathrm{Fo}))$ получаем следующую систему обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\frac{db_0}{d\mathrm{Fo}}-2b_2-\mathrm{Po}=0;\ \frac{db_1}{d\mathrm{Fo}}-6b_3=0;$$
$$\frac{db_2}{d\mathrm{Fo}}-24b_4=0;\ \frac{db_3}{d\mathrm{Fo}}-120b_5=0; \qquad (58)$$

… .

Умножая уравнения (58) соответственно на ξ^k $(k=\overline{0,n})$ и суммируя полученные соотношения, имеем

$$\frac{db_0}{d\mathrm{Fo}}+\frac{db_1}{d\mathrm{Fo}}\xi+\frac{db_2}{d\mathrm{Fo}}\xi^2+\frac{db_3}{d\mathrm{Fo}}\xi^3+\ldots=$$
$$=2b_2+6b_3\xi+24b_4\xi^2+120b_5\xi^3+\mathrm{Po}+\ldots. \qquad (59)$$

Подставляя (55) в уравнение (35) без привязки к конкретному ξ, получаем соотношение, аналогичное (59). Следовательно, выполняя (35) и ДГУ вида (57) в точке ξ = 0, при большом числе приближений $(n\to\infty)$ приходим к выполнению уравнения (35) и во всей области изменения $0\le\xi\le1$, минуя его непосредственное интегрирование по пространственной переменной, – что и требовалось доказать, согласно сформулированной выше теореме.

Используя решение (22), найдем такую мощность постоянного источника теплоты (γ = 0) при постоянных физических свойствах (ν = 0), при которой температура стенки в точке ξ = 0 в стационарном состоянии будет равна $1000\,°C$. Положив в формуле (22) $\Theta(0,\mathrm{Fo})=1$, при γ = 0 и ν = 0 находим соответствующее число Померанцева и, следовательно, мощность внутреннего источника теплоты, при которой температура $\Theta(0,\mathrm{Fo})=1$ в точке ξ = 0 достигается в стационарном режиме работы. Исходные данные для решения задачи следующие: $T_{ст}$ = 1000 °С; T_0 = 20 °С; λ_0 = 20 Вт/(м·К); δ = 0,005 м. Полученное таким путем число Померанцева: $\mathrm{Po}_1 = 3{,}230\cdot10^{-5}$. Из этого следует ω_0 = 25111,51 Вт/м^3 = 25 кВт/м^3.

Решение подобной задачи может быть использовано при электромагнитном способе прогрева реактора пиролиза метана (термического разложения на водород и углерод) в целях недопущения его перегрева и плавления.

Выводы. С использованием дополнительной функции и дополнительных граничных условий найдено решение задачи теплопроводности применительно к пластине с переменными свойствами, а также с зависящим от температуры источником теплоты.

ДФ вводится в целях сведения исходного уравнения к обыкновенному уравнению, интегрирование которого позволяет найти собственные числа.

ДГУ используются для граничного выполнения уравнения, что позволяет выполнить его и внутри области, исключая непосредственное интегрирование по координате.

ДФ не изменяет постановку задачи, так как она является определяемой при любом методе получения решения. Ее использование позволяет упростить как процесс получения решения, так и его окончательную формулу.

Полученное решение уже в первом приближении позволяет отделить стационарные режимы теплообмена от режимов теплового взрыва – неограниченного возрастания температуры, которое происходит при положительном первом собственном числе. С использованием полученного решения найдена такая мощность источника, при которой температура стенки реактора пиролиза метана не превышает некоторой, наперед заданной величины.

Список литературы

1. **Лыков А.В.** Теория теплопроводности. – М.: Высш. шк., 1967. – 601 с.
2. **Григорьев Л.Я., Маньковский О.Н.** Инженерные задачи нестационарного теплообмена. – Л.: Энергия, 1968. – 84 с.
3. **Кудинов В.А., Аверин Б.В., Стефанюк Е.В.** Теплопроводность и термоупругость в многослойных конструкциях: учеб. пособие. – М.: Высш. шк., 2008. – 391 с.
4. **Метод** дополнительных искомых функций в задачах теплопроводности с переменными физическими свойствами среды / Е.В. Котова, А.В. Еремин, В.А. Кудинов и др. // Вестник ИГЭУ. – 2019. – Вып. 2. – С. 59–70.
5. **Кудинов И.В., Котова Е.В., Кудинов В.А.** Метод получения аналитических решений краевых задач на основе определения дополнительных граничных условий и дополнительных искомых функций // Сибирский журнал вычислительной математики. – 2019. – Т. 22, № 2. – С. 153–165.
6. **Федоров Ф.М.** Граничный метод решения прикладных задач математической физики. – Новосибирск: Наука, 2000. – 220 с.
7. **Eremin A., Krasnova N.** One method of heat transfer process mathematical modeling in solids // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and modern Technologies (FarEastCon). – IEEE, 2019. – P. 1–5.
8. **Pashchenko D., Eremin A.** Heat flow inside a catalyst particle for steam methane reforming: CFD-modeling and analytical solution // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2021. – Vol. 165. – P. 120617.
9. **Васютин М.А., Данилова Е.В., Кузьмичев Н.Д.** Оценка максимального нагрева пленки NbN токовым импульсом при низких температурах на основе уравнения теплопроводности // Теплофизика и аэромеханика. – 2022. – Т. 29, № 3. – С. 473–480.
10. **Карелин В.А., Саломатов В.В.** Математическая модель переноса тепла в слое диэлектрика при СВЧ-облучении // Теплофизика и аэромеханика. – 2023. – Т. 30, № 2. – С. 375–380.
11. **Карелин В.А., Саломатов В.В.** Построение приближенных аналитических решений для модели переноса тепла в слое льда при СВЧ-облучении // Теплофизика и аэромеханика. – 2023. – Т. 30, № 6. – С. 1189–1196.
12. **Дутта Д.** Математическая модель температурного поля, возникающего при дуговой сварке под флюсом // Прикладная механика и техническая физика. – 2024. – Т. 65, № 3(385). – С. 74–82.
13. **Структуры** в нелинейных средах / С.П. Курдюмов, Г.Г. Малинецкий, А.Б. Потапов, А.А. Самарский // Компьютеры и нелинейные явления: Информатика и современное естествознание. – М.: Наука, 1988. – 192 с.

References

1. Lykov, A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of Heat Conductivity]. Moscow: Vysshaya shkola, 1967. 601 p.
2. Grigor′ev, L.Ya., Man′kovskiy, O.N. *Inzhenernye zadachi nestatsionarnogo teploobmena* [Engineering Problems of Non-Stationary Heat Transfer]. Leningrad: Energiya, 1968. 84 p.
3. Kudinov, V.A., Averin, B.V., Stefanyuk, E.V. *Teploprovodnost′ i termouprugost′ v mnogosloynykh konstruktsiyakh* [Thermal Conductivity and Thermoelasticity in Multilayer Structures]. Moscow: Vysshaya shkola, 2008. 391 p.
4. Kotova, E.V., Eremin, A.V., Kudinov, V.A., Tkachev, V.K., Kuznetsova, A.E. Metod dopolnitel′nykh iskomykh funktsiy v zadachakh teploprovodnosti s peremennymi fizicheskimi svoystvami sredy [Method of additional unknown functions in heat onductivity problems with variable physical properties of the medium]. *Vestnik IGEU*, 2019, issue 2, pp. 59–70.
5. Kudinov, I.V., Kotova, E.V., Kudinov, V.A. Metod polucheniya analiticheskikh resheniy kraevykh zadach na osnove opredeleniya dopolnitel′nykh granichnykh usloviy i dopolnitel′nykh iskomykh funktsiy [A method for obtaining analytical solutions to boundary value problems based on determining additional boundary conditions and additional sought-for functions]. *Sibirskiy zhurnal vychislitel'noy matematiki*, 2019, vol. 22, no. 2, pp. 153–165.
6. Fedorov, F.M. *Granichnyy metod resheniya prikladnykh zadach matematicheskoy fiziki* [Boundary value method for solving applied problems of mathematical physics]. Novosibirsk: Nauka, 2000. 220 p.
7. Eremin, A., Krasnova, N. One method of heat transfer process mathematical modeling in solids. 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and modern Technologies (FarEastCon). IEEE, 2019, pp. 1–5.
8. Pashchenko, D., Eremin, A. Heat flow inside a catalyst particle for steam methane reforming: CFD modeling and analytical solution. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, vol. 165, p. 120617.
9. Vasyutin, M.A., Danilova, E.V., Kuz′michev, N.D. Otsenka maksimal′nogo nagreva plenki NbN tokovym impul′som pri nizkikh temperaturakh na osnove uravneniya teploprovodnosti [Estimation of the maximum heating of an NbN film by a current pulse at low temperatures based on the heat conduction equation]. *Teplofizika i aeromekhanika*, 2022, vol. 29, no. 3, pp. 473–480.
10. Karelin, V.A., Salomatov, V.V. Matematicheskaya model′ perenosa tepla v sloe dielektrika pri SVCH-obluchenii [Mathematical model of heat transfer in a dielectric layer under microwave irradiation]. *Teplofizika i aeromekhanika*, 2023, vol. 30, no. 2, pp. 375–380.
11. Karelin, V.A., Salomatov, V.V. Postroenie priblizhennykh analiticheskikh resheniy dlya modeli perenosa tepla v sloe l′da pri SVCH-obluchenii [Construction of approximate analytical solutions for the model of heat transfer in an ice layer under microwave irradiation]. *Teplofizika i aeromekhanika*, 2023, vol. 30, no. 6, pp. 1189–1196.
12. Dutta, D. Matematicheskaya model′ temperaturnogo polya, voznikayushchego pri dugovoy svarke pod flyusom [Mathematical model of the temperature field arising during submerged arc welding]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*, 2024, vol. 65, no. 3(385), pp. 74–82.
13. Kurdyumov, S.P., Malinetskiy, G.G., Potapov, A.B., Samarskiy, A.A. Struktury v nelineynykh sredakh [Structures in nonlinear media]. *Komp'yutery i nelineynye yavleniya: Informatika i sovremennoe estestvoznanie* [Computers and nonlinear phenomena: Information technology and modern natural science]. Moscow: Nauka, 1988. 192 p.

УДК 66.045.12

Ольга Борисовна Колибаба
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой энергетики теплотехнологий и газоснабжения, Россия, Иваново, e-mail: koli-baba@mail.ru

Роман Дмитриевич Адакин
ФГБОУ ВО «Ярославский государственный аграрный университет», доцент кафедры технического сервиса, Россия, Ярославль, e-mail: adakin@mail.ru

Елена Александровна Шуина
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой высшей математики, Россия, Иваново, e-mail: HM_ISPU.ispu.ru

Совершенствование теплогенератора ротационной хлебопекарной печи на основе математического моделирования

Авторское резюме

Состояние вопроса. В настоящее время в пищевой промышленности только 20–30 % предприятий, занимающихся выпечкой хлеба, оснащены по последнему слову техники, остальные используют изношенные основные фонды. На предприятиях широкое применение находят ротационные хлебопекарные печи, преимуществами которых являются: высокая производительность, равномерное пропекание изделий, приготовление нескольких видов выпечки за один цикл, возможность выпечки из замороженного теста. Тепловая работа ротационных печей на газообразном и жидком топливе организована при помощи теплогенератора, представляющего собой комбинацию двухходового трубчатого теплообменника и цилиндрической камеры сгорания (жаровой трубы). Затраты энергии на процесс в значительной степени зависят от эффективности его работы, поэтому возрастают требования к основным показателям работы теплогенератора: надежности, производительности, энергетической эффективности. В связи с этим стоит задача по совершенствованию и замене устаревших конструкций печей и их элементов новыми, обеспечивающими высокое качество продукции при снижении потребления топлива, пара и электроэнергии.
Материалы и методы. В качестве объекта исследования и усовершенствования конструктивного оформления теплогенератора использован теплогенератор ротационной хлебопекарной печи. Исследование проведено посредством численного эксперимента с использованием методов математического моделирования.
Результаты. В результате моделирования установлено, что наличие кожуха теплогенератора способствует повышению теплоотдачи, наибольшая теплоотдача имеет место при обдуве теплогенератора вдоль трубного пучка, начиная с жаровой трубы и заканчивая вторым ходом трубного пучка. Результаты проведенных численных исследований свидетельствует о том, что установка дефлекторов позволяет повысить температуру холодного теплоносителя на выходе из теплообменной части теплогенератора, при этом дефлекторы должны быть короткими и занимать 50–55 % площади в периферийной зоне и располагаться на расстоянии от 5 до 7 см от трубок теплогенератора, что способствует сокращению времени выхода печи на рабочий режим, снижению расхода топлива и повышению КПД хлебопекарной печи. На основе результатов численного моделирования была разработана и запатентована конструкция теплогенератора хлебопекарной ротационной печи.
Выводы. Результаты исследования имеют теоретическую и практическую значимость и могут послужить основой разработки инженерной методики теплового и конструктивного расчетов теплогенераторов при проектировании нового и модернизации существующего печного оборудования отечественного хлебопекарного производства. Разработанная конструкция теплогенератора может быть внедрена в производство.

Ключевые слова: теплогенератор, ротационная хлебопекарная печь, камера выпечки, жаровая труба, дефлектор, трубный пучок

Olga Borisovna Kolibaba
Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Head of Thermal Technologies and Gas Supply Department, Russia, Ivanovo, e-mail: koli-baba@mail.ru

Roman Dmitrievich Adakin
Yaroslavl State Agrarian University, Associate Professor of Technical Service Department, Russia, Yaroslavl, e-mail: adakin@mail.ru

Elena Aleksandrovna Shuina
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor, Head of Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, e-mail: HM_ISPU.ispu.ru

© Колибаба О.Б., Адакин Р.Д., Шуина Е.А., 2026
Вестник ИГЭУ, 2026, вып. 5, с. 46–52.

Enhancement of heat generator of a rotary baking oven based on mathematical modeling

Abstract

Background. Currently, only 20–30 % of bread-baking enterprises in the food industry are equipped with the latest technology, while the rest use worn-out fixed assets. Rotary baking ovens are widely used in industrial facilities. They have certain advantages: high productivity, uniform baking, the ability to bake multiple types of products in a single cycle and to bake using frozen dough. The thermal operation of rotary furnaces fired by gaseous and liquid fuels is carried out using a heat generator, consisting of a combination of a two-way tubular heat exchanger and a cylindrical combustion chamber (flame tube). The energy cost of a process largely depends on the efficiency of its operation. Therefore, the requirements for the main performance indicators of the heat generator, such as reliability, productivity, and energy efficiency are increasing. In this regard, there is a need to improve and replace outdated furnace designs and their elements with new ones that ensure high-quality products while reducing fuel, steam and electricity consumption.
Materials and methods. The heat generator of a rotary baking oven has been used as the object of study and for the improvement of the heat generator's design configuration. The study is based on a numerical experiment using mathematical modeling methods.
Results. As a result of the simulation, it has been found that the presence of a heat generator casing enhances heat transfer. The greatest heat transfer occurs when the heat generator is subjected to airflow along the tube bundle, starting from the flame pipe and extending to the second stroke of the tube bundle. The results of numerical studies indicate that the installation of deflectors makes it possible to increase the temperature of the cold coolant at the outlet of the heat exchange part of the heat generator. At the same time the deflectors should be short and occupy 50–55 % of the area in the peripheral zone and be located at a distance of 5 to 7 cm from the heat generator tubes. It helps to reduce the time required for the oven to reach operating mode, to reduce fuel consumption and increase the efficiency of the baking oven. Based on the results of numerical modeling, a heat generator design for a rotary baking oven has been developed and patented.
Conclusions. The research findings are of both theoretical and practical significance and can serve as a basis to develop an engineering methodology for the thermal and structural design of heat generators applicable to both the design of new equipment and the modernization of existing oven systems in the domestic baking industry. The developed heat generator design is suitable for industrial implementation.

Key words: heat generator, rotary baking oven, baking oven, flame tube, deflector, tube bundle

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.5.046-052

Введение. По количеству предприятий, объему и значимости продукции, стоимости основных производственных фондов хлебопекарная промышленность является одной из ведущих отраслей пищевой промышленности России. Однако в настоящее время только 20–30 % хлебопекарных предприятий соответствуют современному техническому уровню [1], который предопределяет экономические показатели работы предприятия.

В поточной выработке хлеба печь занимает ведущее место, поскольку в печных агрегатах завершается весь комплекс процессов, связанных с производством хлеба. Следовательно, от режима работы хлебопекарной печи зависят не только ее технико-экономические показатели (удельный расход топлива, пара, электроэнергии), но и качество и объемный выход продукта. Современные хлебопекарные печи являются крупными потребителями тепловой и электрической энергии, поэтому исследование и улучшение тепловых характеристик этих печей представляет собой актуальную задачу промышленной теплоэнергетики.

В настоящее время в пекарнях и на предприятиях общественного питания широкое применение находят ротационные хлебопекарные печи, преимуществами которых являются: высокая производительность; равномерное пропекание изделий; приготовление нескольких видов выпечки за один цикл; возможность выпечки из замороженного теста; надежность конструкции; простота и удобство эксплуатации. В качестве источника энергии печи используют электричество, газ и дизельное топливо. Этот вид оборудования используется как для оснащения открывающихся, так и модернизации действующих предприятий [2].

Тепловая работа ротационных печей на газообразном и жидком топливе организована при помощи теплогенератора (ТГ), представляющего собой комбинацию двухходового трубчатого теплообменника (ТО) и цилиндрической камеры сгорания (жаровой трубы). Затраты энергии на процесс в значительной степени зависят от эффективности его работы. На практике с лучшей стороны себя зарекомендовали теплогенераторы, в которых камера сгорания представляет собой один из ходов теплообменного устройства (рис. 1).

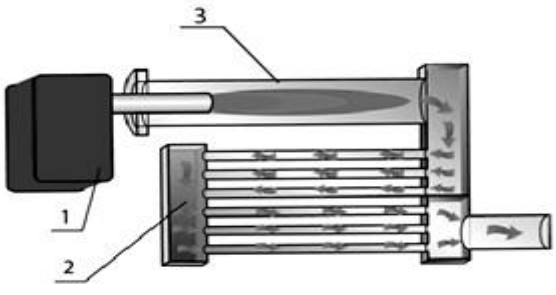


Рис. 1. Теплогенератор ротационной печи: 1 – горелка; 2 – двухходовой теплообменник

Поскольку в настоящее время в хлебопекарной отрасли происходит процесс непрерывного совершенствования, а именно разрабатываются прогрессивные технологические схемы, основанные на снижении потерь и затрат сырья, интенсифицируются производственные процессы, создаются новые виды продукции, то, соответственно, возрастают и требования к основным показателям работы технологического оборудования, его надежности, производительности, энергетической эффективности. В связи с этим стоит задача по совершенствованию и замене устаревших конструкций печей и их элементов новыми, обеспечивающими высокое качество продукции при снижении потребления топлива, пара и электроэнергии.

Анализ литературных данных [3, 4, 5] показывает, что ведутся исследования, направленные на улучшение теплотехнических показателей работы ротационных печей и повышение качества выпускаемой продукции, при этом вопросу совершенствования металлических теплогенераторов уделяется недостаточно внимания. Так, например, нет научных обоснований и рекомендаций по конструктивному оформлению теплогенератора с максимально эффективными характеристиками и высоким КПД, а именно: по распределению поверхности теплоотдачи между жаровой трубой и ТА; геометрическим параметрам камеры сгорания и ТА с учетом их гидравлических сопротивлений; использованию кожуха, в который помещают ТГ; компоновке и материалам трубок ТА; наличию и геометрии интенсификаторов теплообмена и др. Технические решения принимаются конструктором завода-изготовителя печей на основе предварительных расчетов и опыта использования различных вариантов компоновок печей с ТГ в работе при выпечке продукции.

В нашем предыдущем исследовании тепловой работы ротационной печи ПКХ–1 [6] была отмечена невысокая тепловая эффективность работы ТГ, приводящая к недогреву камеры выпечки до значений, соответствующих техническим условиям, что обусловливает необходимость разработки новых технических решений, направленных на совершенствование конструктивного оформления данного устройства.

Целью настоящего исследования является усовершенствование конструктивного оформления ТГ ротационной хлебопекарной печи на основе математического моделирования его тепловой работы.

Методы исследования. Численное исследование было проведено с помощью разработанной нами и реализованной в программном комплексе SolidWorks (приложение Flow Simulation) математической модели действующего ТГ ротационной печи [6, 7, 8].

Математическое описание представлено системой дифференциальных уравнений движения и сплошности вязкого несжимаемого потока:

$$\frac{\partial \vec{\upsilon}}{\partial \tau} + \vec{\upsilon} \cdot \mathrm{grad}\vec{\upsilon} = \vec{g} - \frac{1}{\rho}\mathrm{grad}P + \nu\nabla^2\vec{\upsilon}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \mathrm{div}\rho\vec{\upsilon} = 0, \quad (2)$$

а также уравнения, описывающего температурное поле в потоке теплоносителя:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + \vec{\upsilon} \cdot \mathrm{grad}t = a\nabla^2 t, \quad (3)$$

где υ – скорость теплоносителя, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с^2; ρ – плотность теплоносителя, кг/м^3; P – давление, Па; ν – кинематический коэффициент вязкости, м^2/с; τ – время, с; t – температура, °С; a – коэффициент температуропроводности теплоносителя, м/с^2; $\nabla^2\upsilon$ – Лапласиан вектора скорости, т. е. вектор, каждая компонента которого является Лапласианом соответствующей компоненты вектора скорости, мерой того, как «искривлена» соответствующая компонента скорости в данной точке пространства; grad$P$ – градиент скалярного поля давления (результатом является вектор, указывающий направление наискорейшего возрастания давления, а модуль вектора равен скорости этого возрастания); $\nu\nabla^2\upsilon$ – вязкая сила, которая действует на газ и влияет на его движение (чем больше деформация газа, тем больше вязкие напряжения и тем больше сопротивление движению, т.е. данное слагаемое описывает деформацию газа и определяет вязкие напряжения); div($\rho\upsilon$) – дивергенция потока массы (конвективный член уравнения, описывающий вынос массы из точки за счет движения среды); $\nabla^2 t$ – Лапласиан скалярного поля температуры t (мера того, насколько температура в данной точке отличается от среднего значения температуры в окрестности этой точки).

При решении задачи в качестве граничных условий были заданы:

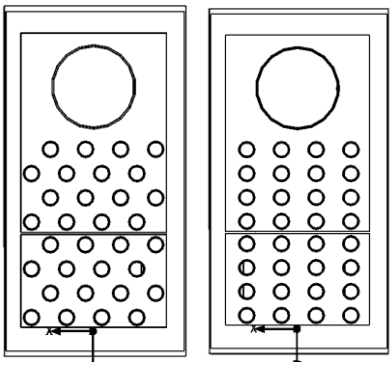
– для нагреваемого теплоносителя: влажность 0,1–0,6 кг/кг; скорость движения 1–5 м/с;

– для греющего теплоносителя: влажность 0,04 кг/кг; тепловой поток Q = 50 кВт.

Адекватность разработанной математической модели подтверждена сопоставлением результатов расчета и промышленного эксперимента [6].

В целях устранения существующих недостатков теплогенератора и повышения эффективности его работы проведены расчетные исследования на математической модели, направленные на совершенствование его конструкции (выбор геометрии интенсификаторов теплообмена, изменение компоновки трубного пучка, использование кожуха и т.п.).

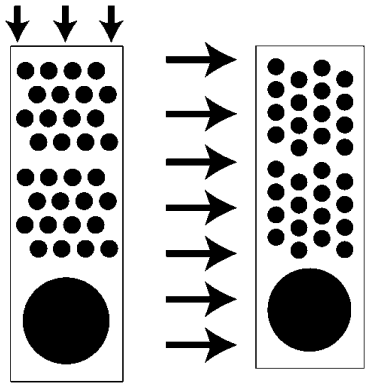
На первом этапе исследования была проведена серия численных экспериментов по оценке влияния компоновки трубного пучка на эффективность тепловой работы ТО. Были рассмотрены варианты с коридорным и шахматным расположением трубок (рис. 2). ТГ с шахматным расположением трубок оказался предпочтительным, поскольку температура воздуха на выходе из ТГ шахматной компоновки выше и составляет 217 °С, в то время как ТГ коридорной компоновки имеет на выходе температуру 210 °С.



а) б)

Рис. 2. Теплогенераторы: а – шахматный; б – коридорный

Другим фактором, влияющим на эффективность работы ТГ, является способ обдува трубного пучка холодным теплоносителем (воздухом): вертикальный (рис. 3,а) или горизонтальный (боковой) (рис. 3,б).



а) б)

Рис. 3. Схемы обдува теплогенератора без кожуха холодным теплоносителем: а – вертикальный обдув трубок сверху вниз; б – боковой обдув трубок

В ходе моделирования установлено, что при боковом обдуве ТГ температура воздуха составила 213 °С, при вертикальном обдуве сверху вниз – 222 °С, а при вертикальном обдуве снизу вверх – 221 °С. Следовательно, эффективными являются оба варианта вертикального обдува.

На следующем этапе были проведены численные исследования теплообмена и газодинамики в теплогенераторе базовой компоновки, дополненном кожухом и интенсификаторами теплообмена – дефлекторами. Кожух обеспечивает направление движения холодного теплоносителя на трубный пучок ТГ, а дефлекторы создают локальные завихрения и турбулизацию потока, обеспечивая таким образом интенсификацию теплообмена в пограничном слое. Геометрия самих дефлекторов при этом играет немаловажную роль.

Стоит отметить, что в качестве базовой модели принята конструкция теплогенератора без кожуха. В таком варианте температура холодного теплоносителя составила 215 °С. Данную температуру холодного теплоносителя на выходе из ТГ примем за контрольную, с которой будем сравнивать последующие температуры холодного теплоносителя, полученные при изменении геометрии и местоположения дефлекторов.

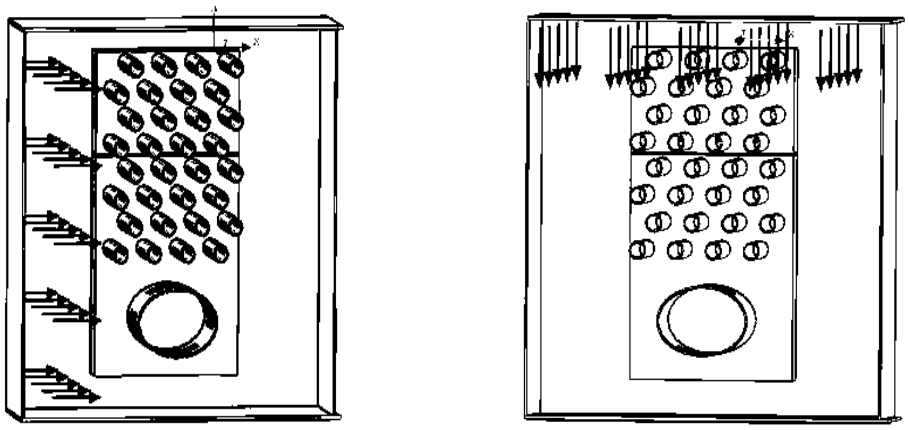
Результаты исследования. Результаты моделирования при различных вариантах модификации ТГ представлены на рис. 4–6.

После установки направляющего кожуха на ТГ расчетная температура холодного теплоносителя составила 216–217 °С, при этом становится возможным закрепить на внутренних стенках кожуха дефлекторы, создающие пристеночную турбулизацию потока, не оказывая сопротивления основному потоку теплоносителя, проходящему через теплообменную часть теплогенератора.

В процессе моделирования сравнивали прямые дефлекторы различной длины, размещая их под различными углами к потоку воздуха. В ходе исследований было установлено, что предпочтительными являются короткие дефлекторы. Данный вид дефлекторов позволил повысить температуру теплоносителя до 220 °С. Их количество должно быть таким, чтобы заполнить примерно 50–60 % пристеночной площади кожуха. В случае использования длинных дефлекторов наблюдается снижение теплоотдачи.

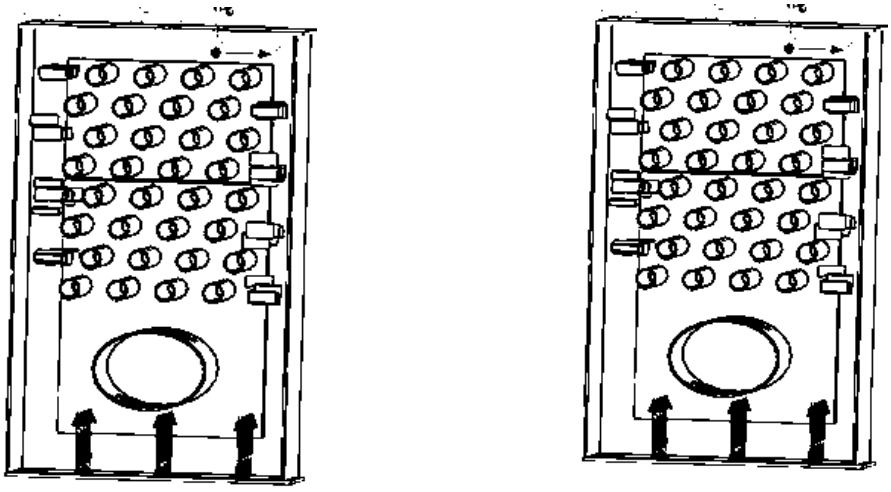
Результаты сравнения базового варианта ТГ и ТГ в кожухе с дефлекторами приведены в таблице.

В ходе исследования влияния расположения дефлекторов на теплоотдачу было замечено, что чем ближе размещены дефлекторы к теплообменной поверхности ТГ, тем теплоотдача ниже, и наоборот, если их отодвинуть на 50–70 мм от поверхности теплообмена, то теплоотдача возрастает. Размещение дефлекторов на расстоянии более 70 мм от поверхности привело к обратному эффекту – снижению теплоотдачи. Направление потока холодного теплоносителя (обдув) показано на рис. 4–6 стрелками.



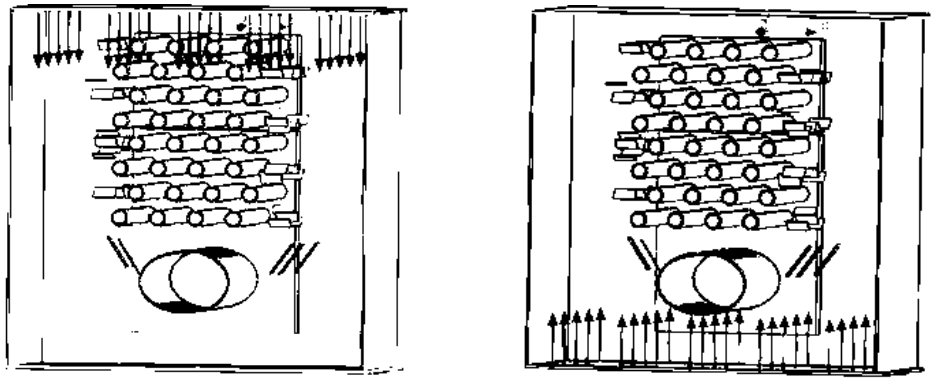
а) б)

Рис. 4. Базовый вариант ТГ – 3D модель без кожуха и дефлекторов (коробкой показана зона расчета, не имеющая физических стенок): а – обдув холодным теплоносителем горизонтальный, температура воздуха на выходе 212 ºС; б – обдув холодным теплоносителем вертикальный сверху, температура воздуха на выходе 215 ºС



а) б)

Рис. 5. Модель ТГ с направляющим кожухом, внутри которого размещены под разным углом прямые дефлекторы: а – обдув холодным теплоносителем вертикальный снизу вверх, расстояние между кожухом и корпусом ТГ 50 мм, температура воздуха на выходе 220 ºС; б – обдув холодным теплоносителем вертикальный снизу вверх, расстояние между кожухом и корпусом ТГ 70 мм, температура воздуха на выходе 221 ºС



а) б)

Рис. 6. Модель ТГ с направляющим кожухом с широкими стенками, внутри которого размещены под разным углом прямые дефлекторы, рядом с жаровой трубой установлены направляющие, расстояние между кожухом и корпусом ТГ 220 мм: а – обдув холодным теплоносителем вертикальный сверху, температура воздуха на выходе 217 ºС; б – обдув холодным теплоносителем вертикальный снизу, температура воздуха на выходе 220ºС

Результаты сравнения вариантов компоновки ТГ

Варианты компоновки теплогенератора	Средняя температура воздуха на выходе из ТГ, °С	Энтальпия, воздуха на выходе из ТГ, кДж/кг
Базовый ТГ без дефлекторов и кожуха	212	562,866
Базовый ТГ без дефлекторов с кожухом	217,5	568,177
ТГ с дефлекторами	220	571,38

На основе результатов численного моделирования была разработана конструкция ТГ хлебопекарной ротационной печи, обеспечивающая повышение интенсивности теплообмена [9]. Схема предлагаемого теплогенератора представлена на рис. 7.

Теплотехнологический процесс в хлебопекарной ротационной печи осуществляется следующим образом. Горячий воздух для выпечки получают за счет сжигания газа в газовой горелке *2* теплогенератора и передачи тепла с помощью теплообменника через воздуховод в пекарную камеру. От газовой горелки *2* продукты горения поступают в жаровую трубу *3*. Уходящие дымовые газы движутся внутри пучка теплообменных трубок *4* и удаляются через патрубок отвода дымовых газов *7*. Для транспортировки горячих дымовых газов от горелки *2* к дымоходу используют, например, s-образные трубки, также возможно использовать прямые трубки *4* в сочетании с поворотными коллекторами *8*, расположенные внутри кожуха *1*.

Нагреваемый воздух, циркулирующий в пекарной камере, поступает в кожух *1* снизу, где теплообменные трубки *4* имеют самую низкую температуру. Нагреваемый воздух движется в межтрубном пространстве, омывая теплообменные трубки *4*, направляясь вверх, где температура трубок высокая. У боковых стенок кожуха *1* дефлекторы *5* обеспечивают локальные завихрения, приводящие к турбулизации потока и его направлению внутрь трубного пучка, что приводит к интенсификации теплообмена и увеличению теплоотдачи. Направляющие *6* в виде наклонных полок на боковых стенках кожуха *1* над пучком трубок *4* обеспечивают направленное движение подогретого теплоносителя на обтекание жаровой трубы *3*, повышая таким образом теплоотдачу. Численным моделированием были получены: расстояние от центра трубки до дефлектора, равное 0,7 от расстояния между центрами трубок по фронту потока; величина угла наклона α = 30° направляющих *6*, выполненных в виде наклонных полок.

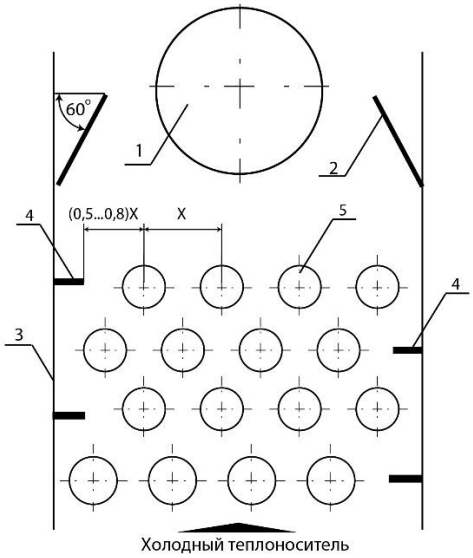


Рис. 7. Схема теплогенератора: 1 – жаровая туба; 2 – направляющие; 3 – кожух; 4 – дефлекторы; 5 – трубный пучок

Выводы. В результате численного моделирования установлено, что наличие кожуха теплогенератора способствует повышению теплоотдачи.

Наибольшая теплоотдача имеет место при обдуве теплогенератора вдоль трубного пучка, начиная с жаровой трубы и заканчивая вторым ходом трубного пучка.

Установка дефлекторов позволяет повысить температуру холодного теплоносителя на выходе из теплообменной части ТГ, причем дефлекторы должны быть короткими и занимать 50–55 % площади в периферийной зоне и располагаться на расстоянии 50–70 мм от трубок ТГ, что способствует сокращению времени выхода печи на рабочий режим и снижению расхода топлива.

Результаты исследования имеют теоретическую и практическую значимость и могут послужить основой разработки инженерной методики теплового и конструктивного расчетов теплогенераторов при проектировании нового и модернизации существующего печного оборудования отечественной хлебопекарного производства. Разработанная конструкция теплогенератора может быть внедрена в производство.

Список литературы

1. **Васюк А.А.** Состояние и перспективы хлебопекарной отрасли [Электронный ресурс] // URL: https://tstu.ru/book/elib/pdf/mg/2005/vlasuk.pdf (дата обращения: 14.01.2026).

2. **Ротационные** печи: виды и особенности выбора [Электронный ресурс] // URL: https://memak.ru/press-center/articles/rotatsionnye-pechi-vidy-i-osobennosti-vybora/ (дата обращения: 14.01.2026).

3. **Пат.** № 2477049 Российская Федерация, МПК A21B 3/04. Хлебопекарная печь: № 2011107302/13; заявл. 2009.07.24; опубл.

2013.03.10 / Михаэль КОС (DE); патентообладатель Миве Михаэль Венц ГМБХ (DE); Бюл. № 7. – 12 с.

4. **Пат.** № 19995 Российская Федерация, МПК A21B 1/44. Ротационная хлебопекарная печь: № 2001112916/20; заявл. 2001.05.16; опубл. 2001.10.20 / С.Г. Ульянин, В.С. Бакурский, С.П. Комиссаров, Т.Л. Кальянова. – 11 с.

5. **Пат.** № 183136 Российская Федерация, МПК A21B 1/00. Печь хлебопекарная ротационная: № 2016141500: заявл. 2016.10.21; опубл. 2018.09.12 / В.А. Минькин, В.В. Власенко; патентообладатель Непубличное акционерное общество «Шебекинский машиностроительный завод»; Бюл. № 22. – 4 с.

6. **Колибаба О.Б., Адакин Р.Д., Шуина Е.А.** Исследование тепловой работы теплогенератора ротационной хлебопекарной печи // Вестник ИГЭУ. – 2023. – Вып. 6. – С. 23–28.

7. **CADArtifex.** Solidworks 2015 / A Power Guide for Beginner and Intermediate Users. – CADArtifex, 2015.

8. **UCF** Engineering. SolidWorks lessons / University of Central Florida, College of Engineering and Computer Science, USA, 2015. – 253 pages.

9. **Пат.** на полезную модель RU 222074 U1. Теплогенератор хлебопекарной ротационной печи: № 2023126512: заявл. 16.10.2023; опубл. 11.12.2023 / О.Б. Колибаба, Р.Д. Адакин. – 5 с.

References

1. Vasyuk, A.A. *Sostoyanie i perspektivy khlebopekarnoy otrasli* [The state and prospects of the bakery industry]. Available at: https://tstu.ru/book/elib/pdf/mg/2005/vlasuk.pdf (date of request: 14.01.2026).

2. *Rotatsionnye pechi: vidy i osobennosti vybora* [Rotary kilns: types and peculiarities of choice]. Available at: https://memak.ru/press-center/articles/rotatsionnye-pechi-vidy-i-osobennosti-vybora/ (date of access: 14.01.2026).

3. Kos, M. *Khlebopekarnaya pech'* [Baking oven]. Patent RF, no. 2477049, 2013.

4. Ul'yanin, S.G., Bakurskiy, V.S., Komissarov, S.P., Kal'yanova, T.L. *Rotatsionnaya khlebopekarnaya pech'* [Rotary baking oven]. Patent RF, no. 19995, 2001.

5. Minkin, V.A., Vlasenko, V.V. *Pech' khlebopekarnaya rotatsionnaya* [Rotary bread-baking oven]. Patent RF, no. 183136, 2018.

6. Kolibaba, O.B., Adakin, R.D., Shuina, E.A. Issledovanie teplovoy raboty teplogeneratora rotatsionnoy khlebopekarnoy pechi [Investigation of the thermal operation of the rotary bakery oven heat generator]. *Vestnik IGEU*, 2023, issue 6, pp. 23–28.

7. CADArtifex. Solidworks 2015. A Power Guide for Beginner and Intermediate Users. CADArtifex, 2015.

8. UCF Engineering. SolidWorks lessons. University of Central Florida, College of Engineering and Computer Science, USA, 2015. 253 p.

9. Kolibaba, O.B., Adakin, R.D. *Teplogenerator khlebopekarnoy rotatsionnoy pechi* [Rotary kiln heat generator]. Patent RU, no. 222074, 2023.

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.313.333

Михаил Алексеевич Захаров
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», старший преподаватель кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Россия, Иваново,
e-mail: mazoid@gmail.com

Александр Станиславович Страхов
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования, Россия, Иваново,
e-mail: astrakhov90@yandex.ru

Евгений Михайлович Новоселов
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования, Россия, Иваново,
e-mail: captain.udgin@gmail.com

Денис Андреевич Полкошников
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», старший преподаватель кафедры электрических систем, Россия, Иваново, e-mail: pda37@yandex.ru

Георгий Дмитриевич Смирнов
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант, Россия, Иваново, e-mail: gerg_smir_1988@mail.ru

Андрей Александрович Скоробогатов
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры электрических станций, подстанций и диагностики электрооборудования, Россия, Иваново,
e-mail: aaskor.andrey@yandex.ru

Диагностирование обмоток роторов асинхронных двигателей в режиме выбега по внешнему магнитному полю

Авторское резюме

Состояние вопроса. Обрывы стержней обмоток роторов двигателей системы собственных нужд являются распространенной причиной отказов, которые приводят к значительному экономическому ущербу на электростанциях. Одним из наиболее перспективных методов их своевременного обнаружения является спектральный анализ внешнего магнитного поля. Однако не уделяется необходимого внимания использованию данного метода в режиме выбега, который имеет ряд неоспоримых преимуществ. В связи с этим целью настоящего исследования является обнаружение характерных признаков наличия обрывов стержней обмотки ротора асинхронных двигателей в спектрах сигналов внешнего магнитного поля в режиме выбега с учетом остаточной намагниченности.

© Захаров М.А., Страхов А.С., Новоселов Е.М., Полкошников Д.А., Смирнов Г.Д., Скоробогатов А.А., 2026
Вестник ИГЭУ, 2026, вып. 5, с. 53–61.

Материалы и методы. Исследования проведены на имитационных моделях двух асинхронных двигателей, разработанных в программном комплексе Ansys. Для проведения контроля использован метод спектрального анализа индукции внешнего магнитного поля на основе определения амплитуд гармоник от фиктивной обмотки ротора. Для обработки результатов применен метод оконного преобразования Фурье с использованием оконной функции Флэттоп для более точного определения амплитуд гармоник.
Результаты. Произведен анализ частотно-временных спектров на моделях двух асинхронных двигателей при различной нагрузке. Показано, что как при наличии токов в обмотке ротора, так и после их затухания вследствие явления остаточной намагниченности в спектрах асинхронных двигателей при наличии обрывов стержней обмотки ротора значительно возрастают амплитуды гармоник от фиктивной обмотки ротора. При этом установлено, что чем выше будет нагрузка двигателя в режиме, предшествующем выбегу, тем больше будут амплитуды гармоник от фиктивной обмотки ротора.
Выводы. Исследования подтвердили возможность обнаружения повреждений обмоток роторов на основе роста амплитуд гармоник от фиктивной обмотки ротора, существующих во внешнем магнитном поле как высоковольтных, так и низковольтных двигателей.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, спектральный анализ, режим выбега, оконное преобразование Фурье, внешнее магнитное поле, обрыв стержней обмотки ротора, остаточная намагниченность

Mikhail Alekseevich Zakharov
Ivanovo State Power Engineering University, Senior Lecturer of Electric Drives and Automation of Industrial Installations Department, Russia, Ivanovo, e-mail: mazoid@gmail.com

Alexander Stanislavovich Strakhov
Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Electrical Stations, Substations and Diagnostics of Electrical Equipment Department, Russia, Ivanovo, e-mail: astrakhov90@yandex.ru

Evgeny Mikhailovich Novoselov
Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Electrical Stations, Substations and Diagnostics of Electrical Equipment Department, Russia, Ivanovo, e-mail: captain.udgin@gmail.com

Denis Andreevich Polkoshnikov
Ivanovo State Power Engineering University, Senior Lecturer of Electrical Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: pda37@yandex.ru

Georgy Dmitrievich Smirnov
Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student, Russia, Ivanovo, e-mail: gerg_smir_1988@mail.ru

Andrey Alexandrovich Skorobogatov
Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Electrical Stations, Substations and Diagnostics of Electrical Equipment Department, Russia, Ivanovo, e-mail: aaskor.andrey@yandex.ru

Diagnostic of rotor windings of induction motors in rundown mode using an external magnetic field

Abstract

Background: Broken rotor bars in auxiliary motor rotors are a common cause of failures, leading to significant economic losses at power plants. One of the most promising methods for their timely detection is spectral analysis of the external magnetic field. However, the use of this method in rundown mode, which has several undeniable advantages, has received little attention. Thus, the purpose of this study is to detect special signs of broken rotor bars in the external magnetic field signal spectra of asynchronous motors in rundown mode, taking into account residual magnetization.
Materials and methods. The study has been conducted using simulation models of two induction motors developed in the Ansys software package. Spectral analysis of the external magnetic field induction has been used for monitoring, based on determining the harmonic amplitudes of a fictitious rotor winding. For processing, a short-time Fourier transform method is used applying the Flattop window function for more accurate determination of harmonic amplitudes.
Results. Frequency-time spectra have been analyzed for both motor models under varying loads. It has been shown that both in the presence of rotor winding currents and after their attenuation due to residual magnetization, the amplitudes of harmonics associated with the fictitious rotor winding significantly increase in the spectra of induction motors with broken rotor bars. Moreover, the higher the motor load in the pre-rundown mode, the greater the amplitudes of harmonics associated with the fictitious rotor winding.
Conclusions. The results of the research have confirmed the feasibility to detect rotor winding damage based on the increase in harmonic amplitudes associated with the fictitious rotor winding, existing in the external magnetic field of both high-voltage and low-voltage motors.

Key words: induction motor, spectral analysis, rundown mode, short-time Fourier transform, external magnetic field, broken rotor bars, residual magnetization

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.5.053-061

Состояние вопроса. Одним из актуальных вопросов современной электроэнергетики является повышение надежности функционирования асинхронных двигателей (АД), являющихся приводами большинства механизмов системы собственных нужд электрических станций. Необходимость проработки данного вопроса обусловлена тем, что их отказы могут привести не только к необходимости дорогого ремонта, сопоставимого со стоимостью двигателя, но и к полному или частичному нарушению процесса выработки электрической энергии и мощности блоком электрической станции. В связи с этим как в отечественной, так и в зарубежной литературе уделяется значительное внимание вопросам разработки методов диагностирования состояния АД в процессе эксплуатации как инструмента для повышения надежности функционирования системы собственных нужд.

Одной из частых причин отказов АД являются повреждения короткозамкнутых обмоток роторов. Хорошо известно, что доля подобных отказов в среднем составляет около 5–10 % от общего числа отказов АД [1]. Однако в ряде работ показано, что доля отказов высоковольтных АД, являющихся приводами ответственных механизмов собственных нужд с тяжелыми условиями пуска, значительно выше и составляет до 30 % от общего числа отказов [2, 3]. По этой причине разработка эффективных методов обнаружения обрывов стержней в перспективе приведет к значительному снижению годового ущерба электрических станций из-за внеплановых отказов АД.

Одним из наиболее перспективных методов обнаружения обрывов стержней в настоящее время является спектральный анализ внешнего магнитного поля (ВМП). При наличии повреждения обмотки ротора из-за возникающей несимметрии в спектре магнитного поля проявляются характерные гармонические составляющие, которые обычно называют гармониками от фиктивной обмотки ротора (далее – гармоники ФОР) [4]. По этой причине рост амплитуд этих гармоник является диагностическим признаком наличия повреждения. Существует ряд отечественных и зарубежных публикаций, посвященных диагностированию обмоток роторов АД по ВМП в установившихся режимах работы [5–9] и при пуске АД [10]. Однако в существующих работах практически не уделяется внимания такому направлению, как обнаружение обрывов стержней АД в режиме выбега, что обусловлено сложностью регистрации и обработки сигнала. Однако при этом данный режим обладает неоспоримым преимуществом – АД отключен от сети, поэтому изменение параметров питающей сети не может оказать никакого влияния на результаты диагностирования.

Авторы существующих на данный момент исследований, посвященных диагностированию АД в режиме выбега, рассматривают преимущественно обнаружение не повреждений обмотки ротора, а иных дефектов, таких как межвитковые замыкания [11, 12] и повреждения подшипников [12, 13]. В этих работах предлагается выявлять дефекты как на основе изменения времени выбега, так и с помощью методов спектрального анализа сигналов вибрации и напряжения. Что касается повреждений обмотки ротора, можно выделить следующие подходы. В [14, 15] предлагается определять наличие обрывов стержней на основе спектрального анализа напряжения на обмотке статора в режиме выбега. В качестве характерной гармоники выбрана гармоническая составляющая, частота которой может быть определена по выражению

$$f_{p-1} = f_c\,(1-s)\left(1-\frac{1}{p}\right), \qquad (1)$$

где f_c – частота сети, Гц; p – число пар полюсов; s – скольжение ротора.

Хотя и не совсем корректно говорить о частоте сети и скольжении в режиме выбега, но очевидно, что в [14, 15] рассматривалась разница между синхронной частотой вращения двигателя и фактической скоростью вращения ротора в любой момент времени в процессе выбега.

В [16] предлагается оценивать наличие обрывов стержней короткозамкнутой обмотки ротора в режиме выбега в области гармоник более высоких порядков (в диапазоне от 5 до 37 гармонических составляющих сигнала). Для более надежного выявления повреждения в качестве метода обработки сигнала предлагается вейвлет-преобразование, а в качестве регистрируемого сигнала – напряжение обмотки статора.

Следует отметить, что никто из авторов не рассматривает в качестве диагностического сигнал в режиме выбега ВМП, которое достаточно удобно для регистрации и позволяет успешно оценивать техническое состояние обмоток роторов электродвигателей. В предшествующей работе нами были проведены исследования на математических моделях высоковольтных АД, где было показано, что при наличии обрыва даже одного стержня в сигнале ВМП отчетливо проявляются характерные гармонические составляющие [17]. Однако в предыдущих исследованиях при моделировании не было учтено явление остаточной намагниченности стали статора и ротора. В [18] на примере определения повышенного эксцентриситета ротора показано, что вследствие остаточной намагниченности даже после затухания токов в роторе магнитное поле все еще суще-

ствует, поэтому без его учета невозможно получить корректные результаты.

Исходя из вышесказанного, целью настоящего исследования является обнаружение характерных признаков наличия обрывов стержней короткозамкнутой обмотки ротора АД в спектрах сигналов ВМП в режиме выбега с учетом остаточной намагниченности.

В ходе исследования были поставлены следующие задачи:

1) проанализировать спектры сигналов ВМП в режиме выбега на имитационных моделях низковольтных и высоковольтных АД с учетом остаточной намагниченности;

2) оценить влияние нагрузки АД в режиме, предшествующем режиму выбега, на результаты диагностирования.

Материалы и методы. Рассмотрим, как изменяются частоты характерных гармоник в режиме выбега, опишем имитационные модели, используемые для проведения контроля, и метод обработки получаемых сигналов.

Как было отмечено выше, характерной особенностью спектров сигналов ВМП является появление гармоник ФОР, частоты которых в установившемся и пусковом режимах могут быть определены по выражению [10]

$$f_{\text{ФОР}}^{\nu\pm}(t)=\left|f_c\left(\frac{1-s(t)}{p}\cdot\nu\pm s(t)\right)\right|, \qquad (2)$$

где $f_{\text{ФОР}}^{\nu\pm}(t)$ – верхняя и нижняя боковая частота гармоники ФОР ν-го порядка в момент времени t, Гц.

Поскольку в режиме выбега двигатель отключен от сети, применение формулы (2) невозможно. В данном режиме частота основной гармоники сигнала, а также частоты характерных гармоник ФОР будут определяться фактической скоростью вращения двигателя, а вместо двух частот каждого порядка останется только одна гармоническая составляющая. Исходя из (2) можно оценить значения частот гармоник ФОР в режиме выбега по выражению

$$f_{\Phi OP}^{\nu}(t)=\frac{n(t)}{60}\,\frac{\nu}{p}, \qquad (3)$$

где $f_{\text{ФОР}}^{\nu}(t)$ – частота гармоники ФОР ν-го порядка в момент времени t, Гц; $n(t)$ – скорость вращения АД в момент времени t, об/мин.

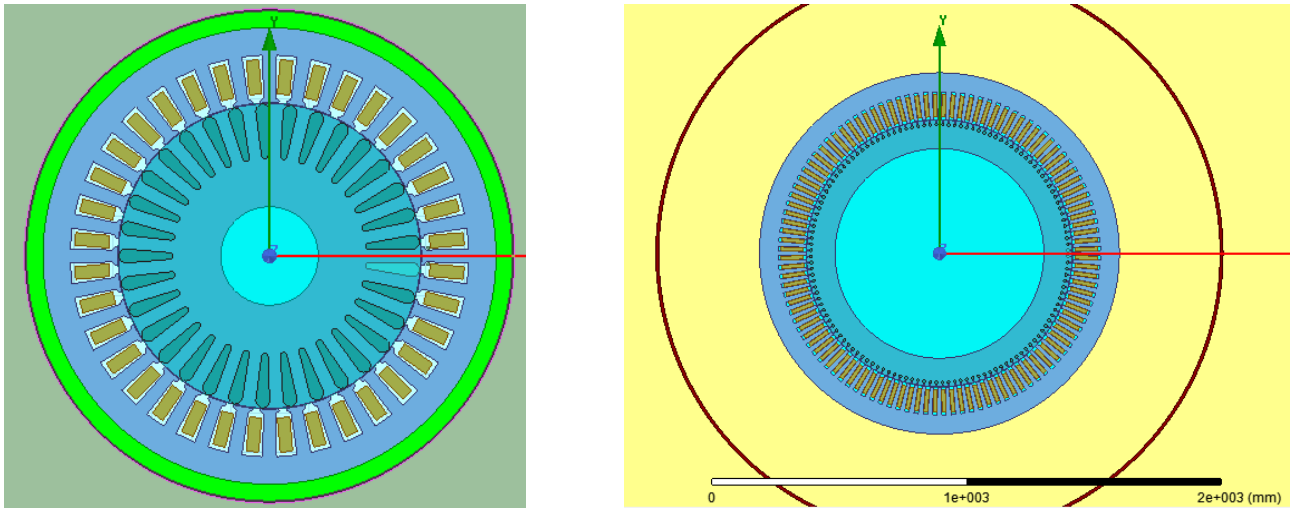
При этом хорошо известно, что в сигнале ВМП в спектрах отчетливо проявляются гармоники ФОР более низких порядков. Также из выражения (3) очевидно, что значение частоты гармоники порядка, совпадающего с числом пар полюсов, соответствует основной гармонике сигнала, по этой причине использование ее амплитуды непригодно для проведения контроля. Таким образом, необходимо сделать акцент на оценку амплитуд гармоник ФОР первых порядков за исключением гармоники порядка $\nu = p$.

Для проведения исследования использовались имитационные модели АД, разработанные в программном комплексе Ansys. Смоделированы два двигателя с подключенными к ним механизмами: низковольтный АД типа АИР 71А6 мощностью 370 Вт с 3 парами полюсов, обмотка ротора которого имеет 33 стержня (рис. 1,а), и высоковольтный двухскоростной АД типа ДАЗО2-17-44-8/10 (выбег осуществлялся на первой скорости, число пар полюсов 5, мощность 320 кВт, число стержней в обмотке ротора 132) (рис. 1,б). Расчет ВМП производился на основе метода конечных элементов в одной точке на корпусе АД при различной нагрузке. Каждая из моделей рассчитана для двух состояний обмотки ротора – исправного и неисправного, в котором обмотка имеет оборванные стержни.

Моделирование остаточной намагниченности осуществлялось путем задания петли гистерезиса для электротехнической стали. Для ее создания были использованы основная кривая намагничивания B(H) электротехнической стали в соответствии с [19] и коэрцитивная сила, которая для электротехнической стали составляет от 12 до 80 А/м [20]. В рамках проводимых исследований ее величина была принята равной 50 А/м.

В качестве инструмента для обработки сигналов выбрано оконное преобразование Фурье, которое является достаточно простым и эффективным инструментом для анализа сигналов, амплитуды и частоты гармоник в которых изменяются с течением времени (что характерно для режима выбега). Для снижения влияния эффекта растекания спектра, который может привести к существенному искажению амплитуд гармонических составляющих, использовано окно Флэттоп. Требования к продолжительности интервалов, на которые должен быть разбит сигнал, и к необходимой продолжительности выбега агрегата, приведены в [18]. Проведенный анализ показал, что длительность выбега обоих агрегатов является достаточной для проведения успешной обработки сигнала.

Результаты. Первоначально для обнаружения признаков наличия повреждения обмотки ротора АД в режиме выбега были проанализированы спектры сигналов ВМП низковольтного двигателя типа АИР 71А6 при его номинальной нагрузке, ток в обмотке ротора которого затухает очень быстро. На рис. 2 представлено изменение тока I в обмотке ротора (в стержне) в процессе выбега, где отключение двигателя от сети происходит в момент времени, равный 5 с. Видно, что спустя всего лишь 0,3 с значение тока в обмотке ротора снижается почти до 0.



а) б)

Рис. 1. Имитационные модели АД: а – АИР 71А6; б – ДАЗО2-17-44-8/10

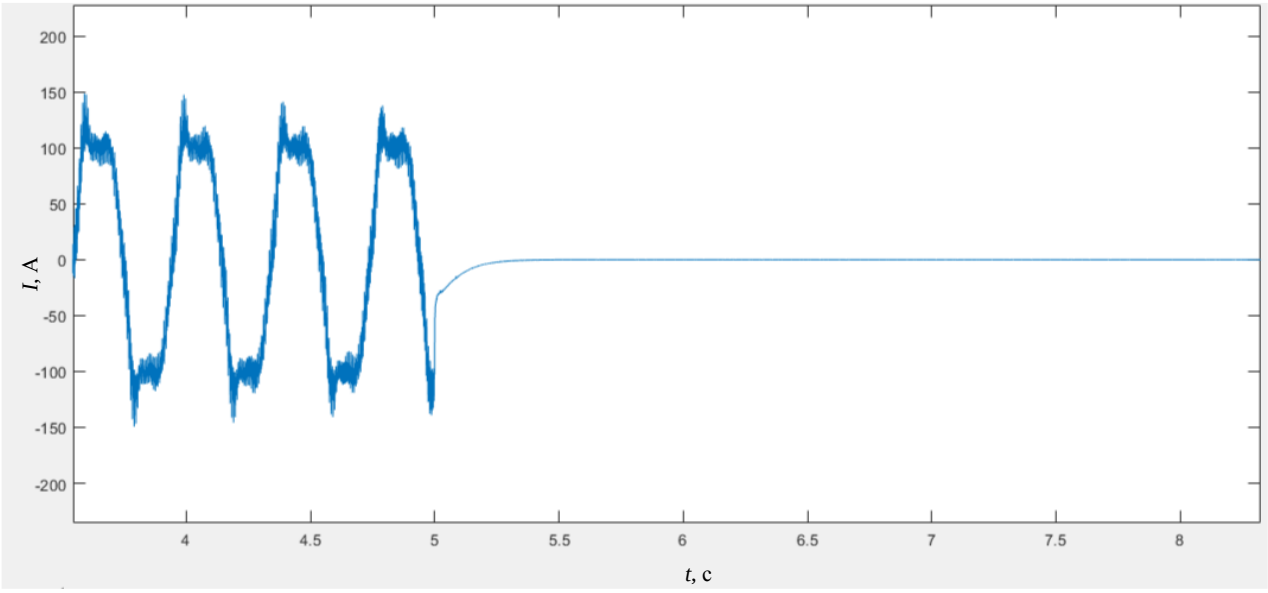


Рис. 2. Изменение тока в обмотке ротора (в стержнях) в режиме с номинальной нагрузкой АД типа АИР 71А6

Полученный частотно-временной спектр (ЧВС) сигнала индукции ВМП при номинальной нагрузке исправного двигателя представлен на рис. 3, а при наличии одного оборванного стержня – на рис. 4. Для большей наглядности значения амплитуд гармоник ФОР в моменты времени 1 и 9 с от начала процесса выбега (указанные моменты времени отмечены на рисунках пунктиром) сведены в табл. 1 (прочерком обозначены ячейки, где амплитуда гармоники составляет менее 10^{-5} мкТл).

Анализ полученных результатов показал, что при наличии обрыва стержня амплитуды гармоник ФОР (рис. 4) значительно возрастают по сравнению с исправным двигателем (рис. 3), поэтому их рост может выступать диагностическим признаком повреждения обмоток роторов АД. Также очевидно, что в данном случае появление этих гармоник обусловлено исключительно явлением остаточной намагниченности сердечника ротора, поскольку ток в обмотке ротора уже спустя 0,3 с снижается практически до 0. По этой причине амплитуды гармоник с течением времени практически не отличаются (небольшой рост амплитуд гармоник ФОР с течением времени обусловлен снижением их частоты) (табл. 1).

Аналогичные опыты были проведены на математических моделях высоковольтного АД типа ДАЗО2-17-44-8/10. Полученные ЧВС представлены на рис. 5 и 6, а значения амплитуд гармоник ФОР – в табл. 1.

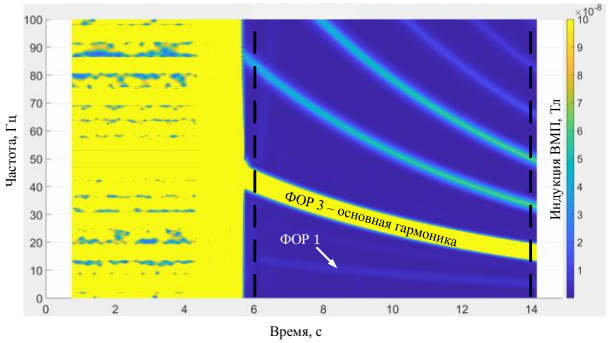


Рис. 3. ЧВС АД типа АИР 71А6 с исправной обмоткой ротора в режиме с номинальной нагрузкой

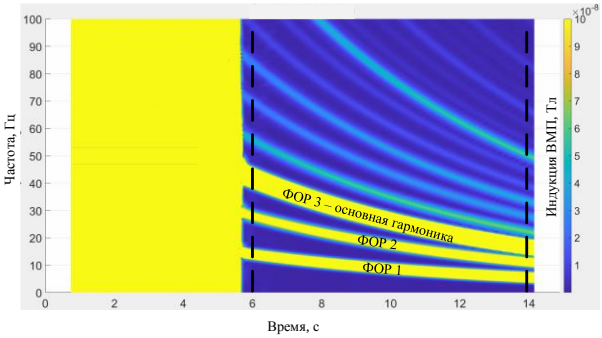


Рис. 4. ЧВС АД типа АИР 71А6 с одним оборванным стержнем обмотки ротора в режиме с номинальной нагрузкой

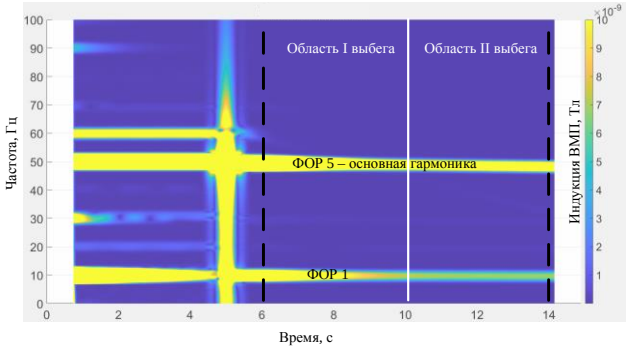


Рис. 5. ЧВС АД типа ДАЗО2-17-44-8/10 с исправной обмоткой ротора в режиме с номинальной нагрузкой

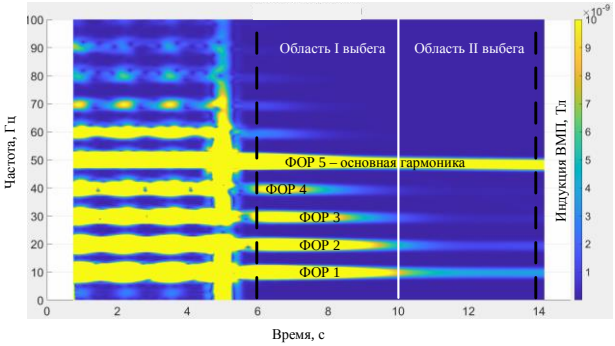


Рис. 6. ЧВС АД типа ДАЗО2-17-44-8/10 с одним оборванным стержнем обмотки ротора в режиме с номинальной нагрузкой

Таблица 1. **Значения амплитуд гармоник ФОР в сигнале индукции ВМП при номинальной нагрузке при наличии и отсутствии повреждения обмотки ротора**

Момент времени, с	Тип двигателя	Состояние обмотки ротора АД	Амплитуда гармоники ФОР, мкТл			
			1-го порядка	2-го порядка	3-го порядка	4-го порядка
t = 6 с (1 с от начала выбега)	АИР 71А6	Исправная	0,0027	0,001		
		С одним оборванным стержнем	0,263	0,166		
	ДАЗО2-17-44-8/10	Исправная	0,042	0,00014	0,00025	0,00002
		С одним оборванным стержнем	0,107	0,028	0,016	0,009
t = 14 с (9 с от начала выбега)	АИР 71А6	Исправная	0,0042	0,0012		
		С одним оборванным стержнем	0,29	0,188		
	ДАЗО2-17-44-8/10	Исправная	0,0069	0,00013	0,00009	–
		С одним оборванным стержнем	0,0037	0,0012	0,00029	0,00012

Анализ полученных результатов показал, что значения амплитуд гармоник ФОР, как и для низковольтного АД, значительно возрастают даже при наличии только одного оборванного стержня из 132. Однако для ДАЗО2-17-44-8/10 время затухания тока в обмотке ротора уже значительно выше и составляет около 5 секунд [18]. По этой причине в спектрах можно выделить две области – I и II, которые на рис. 5, 6 разделены белой линией. В области I рост амплитуд гармоник ФОР обусловлен не только явлением остаточной намагниченности, но и протеканием токов в обмотке ротора. Следовательно, в этой области амплитуды гармоник ФОР постепенно снижаются из-за уменьшения тока ротора. В области II ток в обмотке ротора уже практически равен нулю, поэтому амплитуды гармоник ФОР практически не изменяются и обусловлены только явлением остаточной намагниченности.

Далее был произведен анализ влияния нагрузки в режиме, предшествующем выбегу, на амплитуды гармоник ФОР. Особенно актуально проведение данного опыта в связи с доказательством влияния явления остаточной намагниченности, так как хорошо известно, что при более высокой нагрузке амплитуды гармоник ФОР в установившемся режиме работы значительно выше. По этой причине были проанализированы спектры сигналов ВМП при различной нагрузке. Расчеты произведены при наличии одного оборванного стержня для АД типа АИР 71А6 при трех различных нагрузках в установившемся режиме, предшествующем выбегу: при номиналь-

ной нагрузке, при нагрузке, составляющей 50 % от номинальной и в режиме холостого хода. Для АД типа ДАЗО2-17-44-8/10У1 произведены расчеты при нагрузках, составляющих 25, 50, 75 и 100 % от номинальной нагрузки, при наличии 6 оборванных стержней обмотки ротора (что составляет 5 % от общего количества стержней обмотки ротора).

Полученные ЧВС АД типа АИР 71А6 при указанных нагрузках приведены на рис. 3, 4, 7, 8, а спектры АД типа ДАЗО2-17-44-8/10У1 – на рис. 9–12. Результаты сопоставления амплитуд гармоник сведены в табл. 2.

Сравнивая результаты при различной нагрузке (в том числе, и с номинальной нагрузкой), можно сделать вывод о том, что как для низковольтных, так и для высоковольтных АД увеличение нагрузки приводит к существенному увеличению амплитуд гармонических составляющих ФОР при наличии повреждения обмотки ротора, поэтому при более высокой нагрузке двигателя выявлять повреждение обмотки ротора значительно проще. При этом данная закономерность характерна как для области I (спустя 1 с от начала выбега), так и для области II (спустя 9 с от начала выбега).

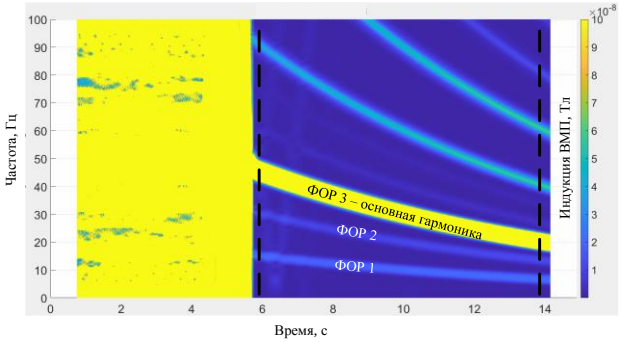


Рис. 7. ЧВС АД типа АИР 71А6 с одним оборванным стержнем обмотки ротора в режиме холостого хода

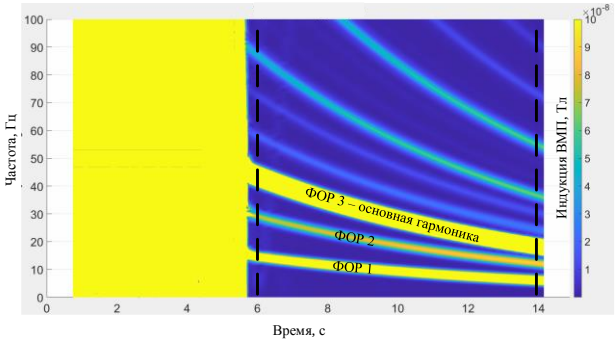


Рис. 8. ЧВС АД типа АИР 71А6 с одним оборванным стержнем обмотки ротора в режиме с нагрузкой, составляющей 50 % от номинальной

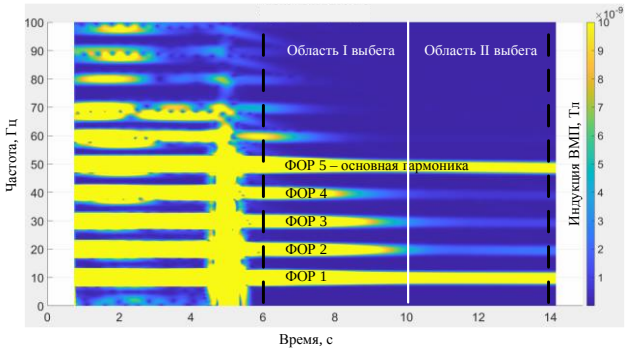


Рис. 9. ЧВС АД типа ДАЗО2-17-44-8/10 с шестью оборванными стержнями обмотки ротора в режиме с нагрузкой, составляющей 25 % от номинальной

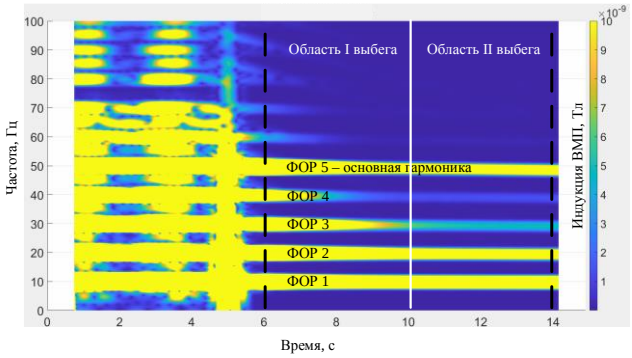


Рис. 10. ЧВС АД типа ДАЗО2-17-44-8/10 с одним оборванным стержнем обмотки ротора в режиме с нагрузкой, составляющей 50 % от номинальной

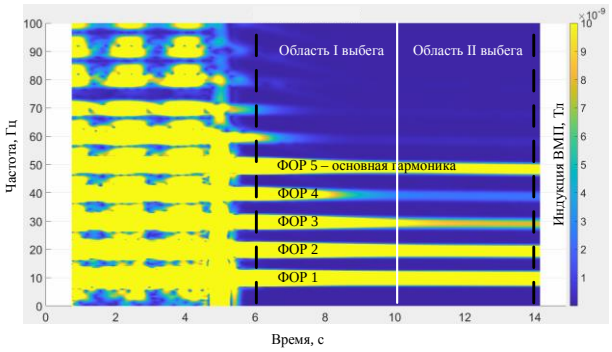


Рис. 11. ЧВС АД типа ДАЗО2-17-44-8/10 с шестью оборванными стержнями обмотки ротора в режиме с нагрузкой, составляющей 75 % от номинальной

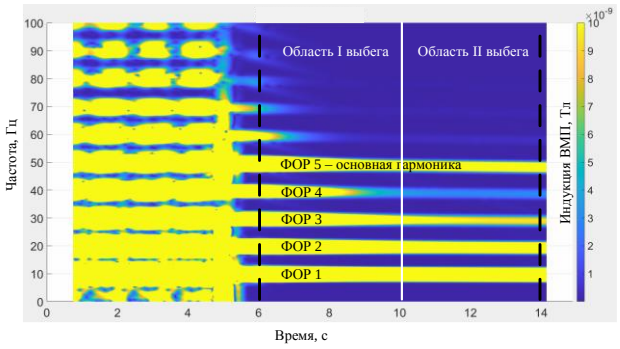


Рис. 12. ЧВС АД типа ДАЗО2-17-44-8/10 с одним оборванным стержнем обмотки ротора в режиме с номинальной нагрузкой

Таблица 2. **Значения амплитуд гармоник ФОР в сигнале индукции ВМП в различных режимах работы при наличии оборванных стержней обмотки ротора**

Момент времени, с	Тип двигателя	Число оборванных стержней	Нагрузка АД в % от номинальной	Амплитуда гармоники ФОР, мкТл			
				1-го порядка	2-го порядка	3-го порядка	4-го порядка
t = 6 с (1 с после начала выбега)	АИР 71А6	1	0	0,0203	0,0112		
			50	0,154	0,0802		
			100	0,263	0,166		
	ДАЗО2-17-44-8/10	6	25	0,31	0,029	0,043	0,036
			50	0,45	0,29	0,12	0,038
			75	0,77	0,42	0,18	0,076
			100	0,99	0,46	0,21	0,092
t = 14 с (9 с от начала выбега)	АИР 71А6	1	0	0,0219	0,0119		
			50	0,171	0,0906		
			100	0,29	0,188		
	ДАЗО2-17-44-8/10	6	25	0,027	0,002	0,0011	0,0006
			50	0,073	0,021	0,0049	0,0013
			75	0,12	0,03	0,0079	0,0025
			100	0,16	0,035	0,0094	0,0029

Следует отметить, что при отсутствии обрывов стержней разница амплитуд гармоник ФОР в режиме выбега незначительна

Выводы. В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1) при наличии обрыва даже одного стержня короткозамкнутой обмотки ротора АД в спектре сигнала ВМП значительно возрастают амплитуды гармоник ФОР первых порядков, что может служить диагностическим признаком дефекта;

2) указанные гармоники существуют не только при протекании в обмотке ротора токов, но и после их затухания в процессе выбега, что обусловлено явлением остаточной намагниченности сердечника ротора;

3) загрузка двигателя в режиме, предшествующем выбегу, оказывает значительное влияние на амплитуды гармоник ФОР и, следовательно, на результаты диагностирования.

Таким образом, важнейшим результатом настоящего исследования является доказанная возможность обнаружения в спектрах ВМП характерных признаков наличия обрывов стержней не только при наличии протекающих токов в обмотке ротора, но и после их затухания вследствие явления остаточной намагниченности сердечника ротора.

Полученные результаты позволяют оценивать наличие обрывов стержней обмотки ротора не только для мощных высоковольтных двигателей, токи в обмотках ротора которых затухают в течение нескольких секунд, но и для маломощных низковольтных АД, если продолжительность их выбега достаточна для проведения обработки сигналов.

Список литературы

1. **Siddiqui K.M., Sahay K., Giri V.K.** Health Monitoring and Fault Diagnosis in Induction Motor – A Review // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. – 2014. – Vol. 3, Issue 1. – P. 6549–6565.

2. **Stefani A., Bellini A., Filippetti F.** Diagnosis of Induction Machines Rotor Faults in Time-Varying Conditions // IEEE Transaction on Industrial Electronics. – 2009. – Vol. 56, No. 11. – P. 4548–4556.

3. **Jahić A., Hederić Z., Atić M.** Detection of Failures on the High-Voltage Cage Induction Motor Rotor // International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems. – 2015. – Vol. 6, No. 1. – P. 15–21.

4. **Скоробогатов А.А.** Анализ спектра магнитного поля в зазоре асинхронного двигателя при повреждении обмотки ротора // Вестник ИГЭУ. – 2006. – Вып. 2. – С. 75–78.

5. **Jarzyna W.** Diagnostic Characteretics of Axial Flux in an Induction Machine // Electrical Machines and Drives, Conference Publication. – 1995. – No. 4. – P. 141–146.

6. **Ceban A., Pusca R., Romary R.** Study of Rotor Faults in Induction Motors Using External Magnetic Field Analysis // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2012, May. – Vol. 59, No. 5. – P. 2082–2093.

7. **Диагностика** и прогнозирование состояния асинхронных двигателей на основе использования параметров их внешнего электромагнитного поля / А.Ю. Алексеенко, О.В. Бродский, В.Н. Веденеев и др. // Вестник АлтГТУ. – 2006. – № 2. – С. 9–13.

8. **Бельский И.О., Куприянов И.С, Лукьянов А.В.** Исследование угловой скорости и магнитного поля при дефектах асинхронных электродвигателей // Системы. Методы. Технологии. – 2018. – № 4. – С. 62–69.

9. **Finite** Element Diagnosis of Rotor Faults in Induction Motors Based on Low Frequency Harmonics of the Near-Magnetic Field / A. Ceban, V. Fireteanu, R. Romary, et al. // IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics & Drives, Fault Modeling in Electrical Machines, Power Electronics and Drives. – 2011. – P. 192–198.

10. **Экспериментальное** определение диагностических признаков повреждения обмоток роторов высоковольтных двигателей электростанций в режиме пуска / А.Н. Назарычев, Е.М. Новоселов, Д.А. Полкошников и др. // Дефектоскопия. – 2020. – № 5. – С. 3–11.

11. **Сафиуллин Р.А., Янгиров И.Ф.** Исследование вибрации асинхронного электродвигателя // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2021. – Т. 17, № 2. – С. 62–70.

12. **Соколова О.В., Соколов И.С.** Устройство для диагностики межвитковых замыканий и дефектов

подшипников асинхронных электродвигателей // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2019. – Т. 11, № 3. – С. 592–599.

13. **Диагностика** состояния подшипников асинхронного двигателя 0,38 кВ на основе спектрального состава напряжения выбега / А.А. Корф, И.Ф. Суворов, А.С. Дедов и др. // Наука и образование: актуальные исследования и разработки: сб. ст. III Всерос. науч.-практ. конф. – Чита, 2020. – С. 124–130.

14. **Потапенко А.О., Юсупова А.О., Латыпов С.И.** Способ диагностики повреждения короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного двигателя в режиме выбега // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. – 2022. – Т. 22, № 1. – С. 62–70.

15. **Novozhilov A., Potapenko A., Novozhilov T.** Process simulation in induction motor where short-circuit rotor bar is failed during run-down regime // Przegląd elektrotechniczny. – 2018. – Vol. 94, No. 6. – P. 33–37.

16. **Detection** of Broken Rotor Bar Faults and Effects of Loading in Induction Motors during Rundown / R. Supangat, J. Grieger, N. Ertugrul, et al. // IEEE International Electric Machines & Drives Conference, Antalya, Turkey. – 2007. – Vol. 1. – P. 196–201.

17. **Исследование** влияния нагрузки и несимметрии питающего напряжения на внешнее магнитное поле в режиме выбега электродвигателя при повреждении обмотки ротора / Д.А. Полкошников, А.С. Страхов, Д.А. Гаврилов и др. // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. (XXII Бенардосовские чтения). Т. 1. – Иваново, 2023. – С. 103–105.

18. **Метод** определения динамического эксцентриситета асинхронных электродвигателей электростанций в режиме выбега / А.Н. Назарычев, Д.А. Полкошников, А.С. Страхов и др. // Электрические станции. – 2025. – № 3(1124). – С. 29–38.

19. **Проектирование** электрических машин / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев: учебник для вузов. – 4 изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во Юрайт, 2011. – 767 с.

20. **Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М.** Электротехнические материалы: учебник для вузов. – 7 изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1985. – 304 с.

References

1. Siddiqui, K.M., Sahay, K., Giri, V.K. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 2014, vol. 3, issue 1, pp. 6549–6565.

2. Stefani, A., Bellini, A., Filippetti, F. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 2009, vol. 56, no. 11, pp. 4548–4556.

3. Jahić, A., Hederić, Z., Atić, M. *International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems*, 2015, vol. 6, no. 1, pp. 15–21.

4. Skorobogatov, A.A. *Vestnik IGEU*, 2006, issue 2, pp. 75–78.

5. Jarzyna, W. Diagnostic Characteretics of Axial Flux in an Induction Machine. *Conference Publication "Electrical Machines and Drives",* 1995, no. 4, pp. 141–146.

6. Ceban, A., Pusca, R., Romary, R. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, May 2012, vol. 59, no. 5, pp. 2082–2093.

7. Alekseenko, A.Yu., Brodskiy, O.V., Vedeneev, V.N., Tonkikh, V.G., Khomutov, S.O. *Vestnik AltGTU*, 2006, no. 2, pp. 9–13.

8. Bel'skiy, I.O., Kupriyanov, I.S, Luk'yanov, A.V. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*, 2018, no. 4, pp. 62–69.

9. Ceban, A., Fireteanu, V., Romary, R., Pusca, R., Taras, P. Finite Element Diagnosis of Rotor Faults in Induction Motors Based on Low Frequency Harmonics of the Near-Magnetic Field. IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics & Drives, Fault Modeling in Electrical Machines, Power Electronics and Drives. Bologna, Italy, 2011, pp. 192–198.

10. Nazarychev, A.N., Novoselov, E.M., Polkoshnikov, D.A., Strakhov, A.S., Skorobogatov, A.A., Pugachev, A.A. *Defektoskopiya*, 2020, no. 5, pp. 3–11.

11. Safiullin, R.A., Yangirov, I.F. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye kompleksy i sistemy*, 2021, vol. 17, no. 2, pp. 62–70.

12. Sokolova, O.V., Sokolov, I.S. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova*, 2019, vol. 11, no. 3, pp. 592–599.

13. Korf, A.A., Suvorov, I.F., Dedov, A.S., Ivanov, A.A., Shoyvanov, Yu.R. Diagnostika sostoyaniya podshipnikov asinkhronnogo dvigatelya 0,38 kV na osnove spektral'nogo sostava napryazheniya vybega [Diagnostic of condition of 0,38 kV induction motor bearings based on the spectral composition of the coast-down voltage]. *Sbornik statey III Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Nauka i obrazovanie: aktual'nye issledovaniya i razrabotki"* [Proceedings of the 3rd All-Russian Scientific and Practical Conference "Science and Education: Current Research and Developments"]. Chita, 2020, pp. 124–130.

14. Potapenko, A.O., Yusupova, A.O., Latypov, S.I. *Vestnik YuUrGU. Seriya Energetika*, 2022, vol. 22, no. 1, pp. 62–70.

15. Novozhilov, A., Potapenko, A., Novozhilov, T. *Przegląd elektrotechniczny*, 2018, vol. 94, no. 6, pp. 33–37.

16. Supangat, R., Grieger, J., Ertugrul, N., Soong, W.L., Gray, D.A., Hansen, C.H. Detection of Broken Rotor Bar Faults and Effects of Loading in Induction Motors during Rundown. *IEEE International Electric Machines & Drives Conference.* Antalya, Turkey, 2007, vol. 1, pp. 196–201.

17. Polkoshnikov, D.A., Strakhov, A.S., Gavrilov, D.A., Novoselov, E.M., Skorobogatov, A.A. Issledovanie vliyaniya nagruzki i nesimmetrii pitayushchego napryazheniya na vneshnee magnitnoe pole v rezhime vybega elektrodvigatelya pri povrezhdenii obmotki rotora [Study of the effect of load and supply voltage asymmetry on the external magnetic field during electric motor coast-down under rotor winding fault conditions]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii". T. 1 (XXII Benardosovskie chteniya)* [Proceedings of international scientific and technical conference "Current state and trends of the development of electrical and thermal technologies" (XXII Benardos Readings)]. Ivanovo, 2023, pp. 103–105.

18. Nazarychev, A.N., Polkoshnikov, D.A., Strakhov, A.S., Novoselov, E.M., Zakharov, M.A., Skorobogatov, A.A. *Elektricheskie stantsii*, 2025, no. 3(1124), pp. 29–38.

19. Kopylov, I.P., Klokov, B.K., Morozkin, V.P., Tokarev, B.F. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [Design of Electrical Machines]. Moscow: Izdatel'stvo Yurayt, 2011. 767 p.

20. Bogoroditskiy, N.P., Pasynkov, V.V., Tareev, B.M. *Elektrotekhnicheskie materialy* [Electrical engineering materials]. Leningrad: Energoatomizdat, Leningradskoe otdelenie, 1985. 304 p.

УДК 621.311

Иван Александрович Галанин
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: galanin@rza.ru

Татьяна Юрьевна Шадрикова
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: tanya-vinokurova@mail.ru

Схема замещения кабельной сети 6–10 кВ для локации однофазных замыканий на землю с применением искусственной нейронной сети

Авторское резюме

Состояние вопроса. Локация однофазных замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ является актуальной задачей, особенно в условиях сложных переходных процессов и различных режимов заземления нейтрали. Традиционные методы, основанные на анализе токов и напряжений нулевой последовательности, часто требуют сложных и длительных вычислений и не всегда обеспечивают высокую точность определения места замыкания. Применение искусственных нейронных сетей позволяет повысить эффективность локации однофазных замыканий на землю за счет автоматического анализа переходных процессов и адаптации к изменяющимся условиям и параметрам сети. Однако для обучения и тестирования нейронной сети необходима точная схема замещения кабельной сети 6–10 кВ.
Материалы и методы. Для исследования переходных процессов при однофазных замыканиях на землю использованы Т-образная и Г-образная схемы замещения кабельной линии 6–10 кВ. Моделирование выполнено в MATLAB/Simulink, а также с использованием разработанной нейронной сети для определения места повреждения на основе параметров переходных процессов.
Результаты. Предложена Т-образная схема замещения кабельной сети 6–10 кВ, учитывающая часть сети за местом замыкания на землю. Обученная нейронная сеть продемонстрировала высокую точность локации повреждения при различных режимах заземления нейтрали и переходных сопротивлениях.
Выводы. Использование Т-образной схемы замещения кабельной сети 6–10 кВ при обучении и проверке искусственной нейронной сети в основе способа локации однофазных замыканий на землю позволяет повысить его селективность и адаптивность, что особенно важно для сетей с напряжением 6–10 кВ, работающих с различными режимами заземления нейтрали, при различных видах замыканий на землю.

Ключевые слова: однофазные замыкания на землю, переходный процесс при замыкании на землю, искусственная нейронная сеть, защита на основе нейронной сети, кабельные сети 6–10 кВ

Ivan Aleksandrovich Galanin
Ivanovo State Power Engineering University, Graduate Student of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: galanin@rza.ru

Tatyana Yurievna Shadrikova
Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: tanya-vinokurova@mail.ru

Equivalent circuit of a 6–10 kV cable network for locating single-phase earth faults using an artificial neural network

Abstract

Background. Location of single-phase earth faults in 6–10 kV cable networks is a challenging task, especially in the presence of complex transient processes and various neutral grounding regimes. Traditional methods based on the analysis of zero-sequence currents and voltages often require complex and time-consuming calculations and do not always provide high fault location accuracy. The use of artificial neural networks improves the efficiency of single-phase earth fault location through automatic transient analysis and adaptation to changing network conditions and parameters. However, training and testing the neural network requires an accurate equivalent circuit for the 6–10 kV cable network.

© Галанин И.А., Шадрикова Т.Ю., 2026
Вестник ИГЭУ, 2026, вып. 5, с. 62–71.

Materials and methods. To study transient processes during earth faults, T-shaped and L-shaped equivalent circuits of a 6–10 kV cable line have been used. Modeling of ground faults has been performed in MATLAB/Simulink. Also, an artificial neural network has been developed to determine the location of damage based on transient parameters.
Results. A T-shaped equivalent circuit for a 6–10 kV cable network is proposed, taking into account the portion of the network beyond the earth fault location. The trained neural network has demonstrated high fault location accuracy under various neutral grounding conditions and transient resistances.
Conclusions. The use of a T-shaped equivalent circuit for a 6–10 kV cable network in training and testing an artificial neural network as the basis of the method of locating single-phase earth faults allows increasing its selectivity and adaptability. It is especially important for networks with a voltage of 6–10 kV operating with different neutral grounding modes for different types of earth faults.

Key words: single-phase earth faults, earth-fault transient process, artificial neural network, neural network-based protection, 6–10 kV cable networks

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.5.062-071

Введение. В системах городского и промышленного электроснабжения значительная часть электрической энергии распределяется потребителям через кабельные сети среднего напряжения 6–10 кВ. В таких сетях однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) представляют серьезную проблему для эксплуатации электроэнергетических систем, снижая надежность электроснабжения потребителей. Несмотря на развитие способов выполнения защиты от данного вида повреждения [1–3], локация повреждений остается сложной задачей из-за различия режимов заземления нейтрали (изолированная нейтраль, резонансное заземление нейтрали через дугогасящий реактор, различные варианты резистивного заземления нейтрали и др.) и видов замыканий – устойчивые (металлические или через переходное сопротивление), дуговые неустойчивые (дуговые перемежающиеся, дуговые прерывистые, кратковременные самоустраняющиеся ОЗЗ) [4, 5]. Традиционные параметрические способы локации ОЗЗ, основанные на контроле токов и напряжений нулевой последовательности, часто требуют сложных расчетов и не всегда обеспечивают достаточную точность.

Методы машинного обучения, а именно аппарат искусственных нейронных сетей (ИНС), все более широко используются для решения задач электроэнергетики. Применение искусственных нейронных сетей (ИНС) открывает новые возможности для автоматизации процесса локации ОЗЗ [6, 7]. ИНС способны анализировать переходные процессы, учитывать нелинейные эффекты и адаптироваться к изменяющимся параметрам сети – электрическим величинам контура нулевой последовательности, используемым для выявления ОЗЗ, которые зависят от режима заземления нейтрали сети, а также от разновидности ОЗЗ и величины переходного сопротивления в месте повреждения. Однако для эффективного обучения ИНС необходимо, чтобы схема замещения кабельной сети 6–10 кВ учитывала часть сети за местом ОЗЗ.

В связи с этим актуальной является задача выбора расчетной схемы замещения для обучения и тестирования алгоритма локации ОЗЗ на основе ИНС с учетом технических возможностей микропроцессорного терминала РЗА.

Материалы и методы. Для расчета переходных процессов при ОЗЗ рассматривалась модель кабельной сети 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали (рис. 1), состоящая из питающей системы С с активно-индуктивным сопротивлением $Z_{сис}$, защищаемой кабельной линии (КЛ) с трансформатором тока нулевой последовательности ТТ1 и внешней сети.

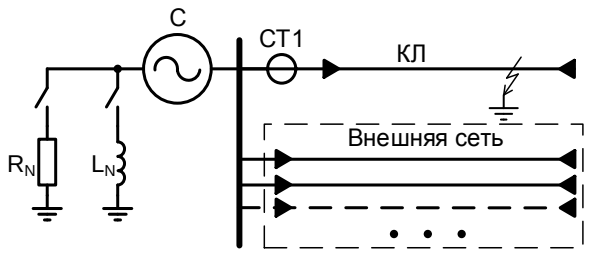


Рис. 1. Схема кабельной сети 6–10 кВ для расчета переходных процессов при ОЗЗ

Моделирование переходных процессов при ОЗЗ в кабельных сетях 6–10 кВ с различными режимами заземления нейтрали (рис. 1) выполнено в одной из наиболее эффективных и универсальных систем имитационного моделирования MATLAB с пакетом расширения Simulink. Создание имитационной модели требует упрощений для снижения длительности расчета и вычислительной мощности, поэтому на рис. 1 внешняя сеть, состоящая в общем случае из многих линий, представлена в виде схемы замещения (СЗ) одной эквивалентной КЛ, а защищаемая линия – схемой замещения с сосредоточенными параметрами. Линия 6–10 кВ может быть задана различными схемами замещения:

1) Г-образная СЗ без учета емкости за местом ОЗЗ [8, 9];

2) Г-образная СЗ с учетом емкости за местом однофазного замыкания [10];

3) Т-образная СЗ с учетом емкости за местом однофазного замыкания.

Г-образная схема замещения в [8, 9] применялась для получения упрощенного анали-

тического решения, ее достоверность подтверждена сравнением с экспериментальными данными. Переходный процесс в СЗ [10] описывается дифференциальным уравнением 6-го порядка, и аналитическое решение в общем виде невозможно, как и для Т-образной СЗ, учитывающей емкость за местом ОЗЗ. Однако неучет в схеме замещения участка КЛ за местом ОЗЗ искажает результат расчета электрических величин переходного процесса, особенно при «близких» ОЗЗ (к шинам центра питания), так как за местом ОЗЗ остается существенная часть линии. Составляющие переходного процесса, обусловленные этим участком, будут в значительной мере влиять на измерения тока и напряжения нулевой последовательности. При этом современные системы имитационного моделирования, такие как MATLAB/Simulink, позволяют выполнить расчет на более точной СЗ. В связи с этим для обучения и проверки ИНС в основе предлагаемого способа локации ОЗЗ принята наиболее точная и наиболее полная из рассматриваемых СЗ схема кабельной сети 6–10 кВ, в которой КЛ представлены Т-образной схемой замещения, а также учтены емкости за местом замыкания на землю (рис. 2).

В СЗ линии (рис. 2) учитываются: полное сопротивление прямой последовательности участка до места ОЗЗ $Z_{1н}$ и за местом повреждения $Z_{1к}$; полное сопротивление земли участка до и после места ОЗЗ $Z_{3н}$ и $Z_{3к}$ соответственно; междуфазная емкость участка КЛ до места замыкания $C_{мн}$ и после места ОЗЗ $C_{мк}$; емкость фазы на землю участка защищаемой линии до места повреждения $C_{0н}$ и после $C_{0к}$. Внешняя сеть (рис. 1, 2) смоделирована Т-образной СЗ эквивалентной кабельной линии с параметрами такой величины, чтобы суммарный емкостный ток сети $I_{C\Sigma}$ соответствовал заданному. На рис. 2 для наглядности не отображены сопротивления, соответствующие активным потерям в изоляции кабеля, не превышающим 5–7 % от емкостных [4], но указанные сопротивления учтены в расчетах. Режим заземления нейтрали задается сопротивлением Z_N. Сопротивления нагрузки $Z_н$ на рис. 2 показаны пунктиром и могут не учитываются, так как они много больше продольного сопротивления КЛ (в рабочем диапазоне частот устройств защиты от ОЗЗ до 2–3 кГц), из-за чего составляющие переходного процесса при ОЗЗ, обусловленные нагрузочными сопротивлениями, в токе и напряжении нулевой последовательности малы.

При моделировании кабельной сети 6–10 кВ (рис. 1) в целях получения большого числа возможных данных для обучения и проверки ИНС в основе способа локации ОЗЗ варьировались параметры, приведенные в таблице.

Для обучения нейронной сети на модели (рис. 2) рассчитывались следующие параметры электрических величин переходных процессов при ОЗЗ:

- ток нулевой последовательности защищаемого присоединения $3i_0$;
- напряжение нулевой последовательности на шинах ЦП $3u_0$;
- амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики составляющих переходных токов $3i_0$ и напряжений $3u_0$.

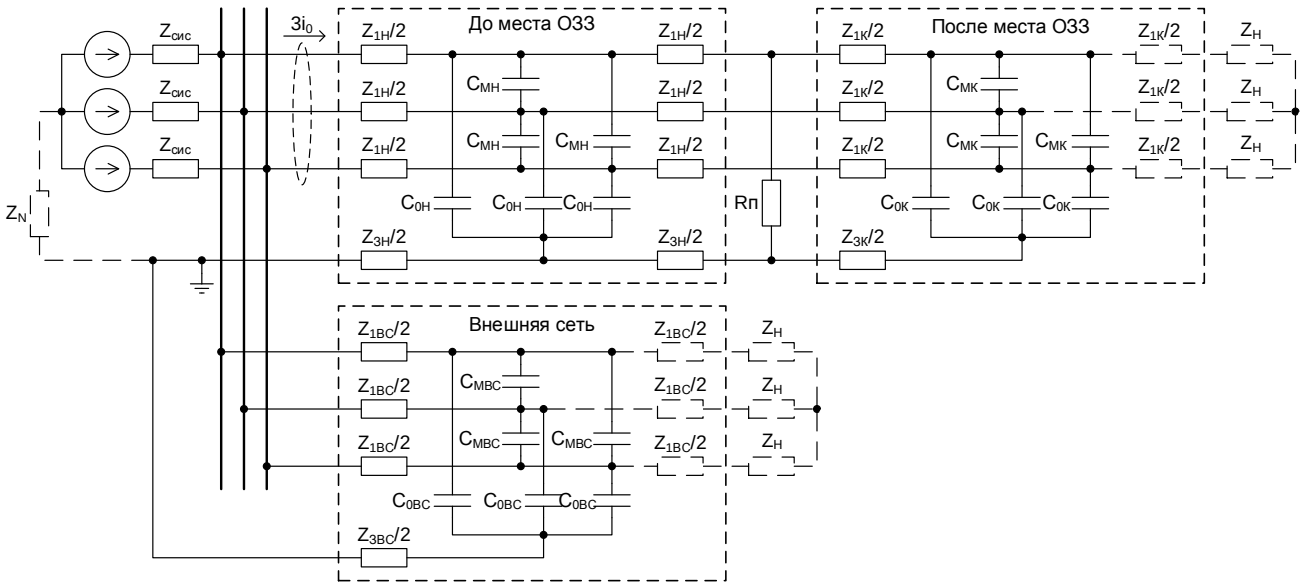


Рис. 2. Трехфазная схема замещения кабельной сети 6–10 кВ (рис. 1) на основе Т-образной схемы КЛ

Варьируемые параметры модели кабельной сети 6–10 кВ и диапазоны их изменения

Параметр	Диапазон изменения
Ток трехфазного КЗ на шинах центра питания (ЦП), кА	5–50
Сечение защищаемой КЛ, мм^2	70, 95, 120, 150, 240
Длина защищаемой линии, м	200–4000
Суммарный емкостный ток сети $I_{C\Sigma}$, А	3–20
Переходное сопротивление в месте ОЗЗ $R_{\text{п}}$ [11, 12], Ом	0,01–5000
Удаленность места замыкания от шин ЦП, %	5–95

Сравнение аналитического решения переходного процесса при ОЗЗ на основе предложенной схемы и упрощенного аналитического решения. Для верификации модели кабельной сети 6–10 кВ (рис. 2) выполнено сравнение аналитического расчета электрических величин переходного процесса при ОЗЗ на основе предложенной СЗ и с использованием известного упрощенного аналитического решения [9, 10], подтвержденного экспериментальными данными.

Для аналитического расчета переходного процесса при ОЗЗ по Т-образной СЗ (рис. 2) составлена операторная схема замещения на основе метода симметричных составляющих, по которой вычислены операторный ток нулевой последовательности поврежденного присоединения $i_0(p)$ и операторное напряжение нулевой последовательности на шинах системы $u_0(p)$*:*

$$Z_k(p)\, I_k(p) = E_k(p), \qquad (1)$$

где Z_k – матрица контурных сопротивлений в операторной форме; E_k – вектор-матрица контурных ЭДС в операторной форме; I_k – вектор-матрица контурных токов в операторной форме.

Полученные операторные токи и напряжения раскладываются на сумму простейших дробей:

$$X(p) = \sum \frac{A}{p - B}, \qquad (2)$$

где A и B – комплексные коэффициенты; $X(p)$ – операторный ток или напряжение.

С помощью обратного преобразования Лапласа из полученного операторного выражения (2) находится аналитическое решение переходного процесса вида

$$X(t) = \sum A\, e^{Bt}, \qquad (3)$$

где A и B – комплексные коэффициенты; $X(t)$ – зависимость тока или напряжения от времени.

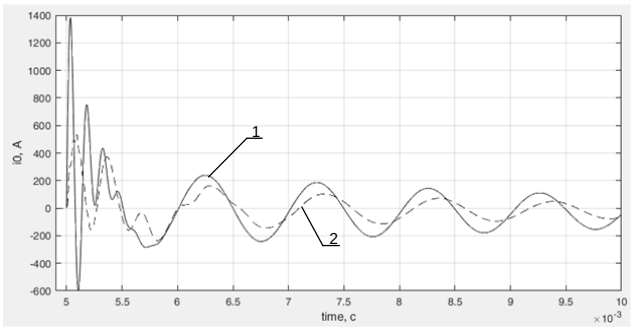
В сумме $X(t)$ разделяется на пары слагаемых с комплексно-сопряженными коэффициентами A и B, поэтому аналитическое решение может быть преобразовано к виду

$$X(t) = \sum \alpha e^{\beta t} \sin(\omega t + \varphi), \qquad (4)$$

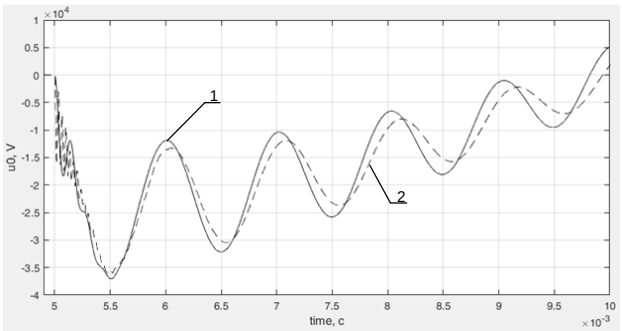
где α, β, ω и φ – действительные коэффициенты.

Сравнение токов $3i_0$ и напряжений $3u_0$, полученных на основе аналитических решений переходного процесса при ОЗЗ по выражениям (1)–(4) и на основе выражений, предложенных в [9, 10], приведено на рис. 3. Кривые построены в программном комплексе MATLAB.

Анализ полученных осциллограмм (рис. 3) показывает, что результаты расчетов на основе Т-образной СЗ и на основе упрощенного решения [9, 10] имеют расхождения, достигающие по амплитуде ~60 % по току $3i_0$ и ~40 % по напряжению $3u_0$ (относительно Г-образной СЗ) и до ~80 % по частоте разрядной и ~2,5 % зарядной составляющих тока $3i_0$ и напряжения $3u_0$. Такие погрешности могут оказать существенное влияние на обучение ИНС в основе способа локации ОЗЗ в части расчета высокочастотных и среднечастотных составляющих электрических величин переходного процесса, поэтому в качестве расчетной модели сети 6–10 кВ принята модель с использованием Т-образной СЗ, учитывающей часть линии за местом ОЗЗ.



а)



б)

Рис. 3. Осциллограммы токов и напряжений: пунктирная линия – на основе трехфазной схемы замещения кабельной сети 6–10 кВ (рис. 2); сплошная линия – по упрощенному решению [9, 10] для кабельной сети с $I_{C\Sigma}$ = 20 А: а – тока $3i_0$ поврежденного присоединения; б – напряжения $3u_0$ на шинах ЦП

Исследование влияния переходного сопротивления и удаленности ОЗЗ на параметры тока $3i_0$ и напряжения $3u_0$. Для электрических схем, содержащих одиночный колебательный контур, активное сопротивление оказывает влияние на скорость затухания колебаний и определяет сам колебательный характер переходного процесса, но не влияет на собственную частоту колебаний. В случае сложных схем, включающих множество реактивных элементов и колебательных контуров, активное переходное сопротивление может влиять на конфигурацию контуров, что косвенно изменяет собственную частоту колебаний составляющих переходного процесса.

В схеме замещения распределительной электрической сети переходное сопротивление, выступающее в качестве активного элемента, разделяет схему на две части: до и после точки однофазного замыкания на землю (ОЗЗ). Таким образом, переходное сопротивление определяет структуру колебательных контуров и взаимосвязь между частями схемы, расположенными до и после точки ОЗЗ.

Из-за большого количества колебательных контуров (большого количества реактивных элементов) в электрических величинах переходного процесса при замыкании на землю содержится множество составляющих с различными параметрами (амплитудами, частотами и временами затухания).

Анализ полученных осциллограмм переходных токов $3i_0$ и напряжений $3u_0$ при замыканиях на землю показал, что составляющие с временем затухания менее 0,08 мс, несмотря на возможную высокую начальную амплитуду, не оказывают существенного влияния на параметры переходного процесса ввиду их очень быстрого затухания, поэтому эти короткоживущие составляющие исключались из дальнейшего анализа. Также были исключены составляющие с очень малой амплитудой, не отличимые от естественных шумов в реальных устройствах РЗА.

В электрических величинах переходного процесса при ОЗЗ принято выделять зарядную и разрядную составляющие, а также составляющую промышленной частоты 50 Гц [9, 10]. В настоящем исследовании для наглядности выделяется только одна составляющая – доминирующая, имеющая наибольшую амплитуду среди всех остальных составляющих. На рис. 4–7 приведены зависимости частоты доминирующей составляющей от переходного сопротивления $R_п$.

На рис. 8, 9 приведены зависимости амплитудно-частотных характеристик электрических величин переходного процесса от переходного сопротивления $R_п$. Составляющие разделены на частотные полосы:

- составляющие частотой 50 Гц (круглые маркеры точек);
- зарядная составляющая (маркеры точек треугольники вверх);
- разрядная составляющая (ромбовидные маркеры точек);
- высокочастотные составляющие переходного процесса, частота которых выше 20 кГц (маркеры точек треугольники вниз).

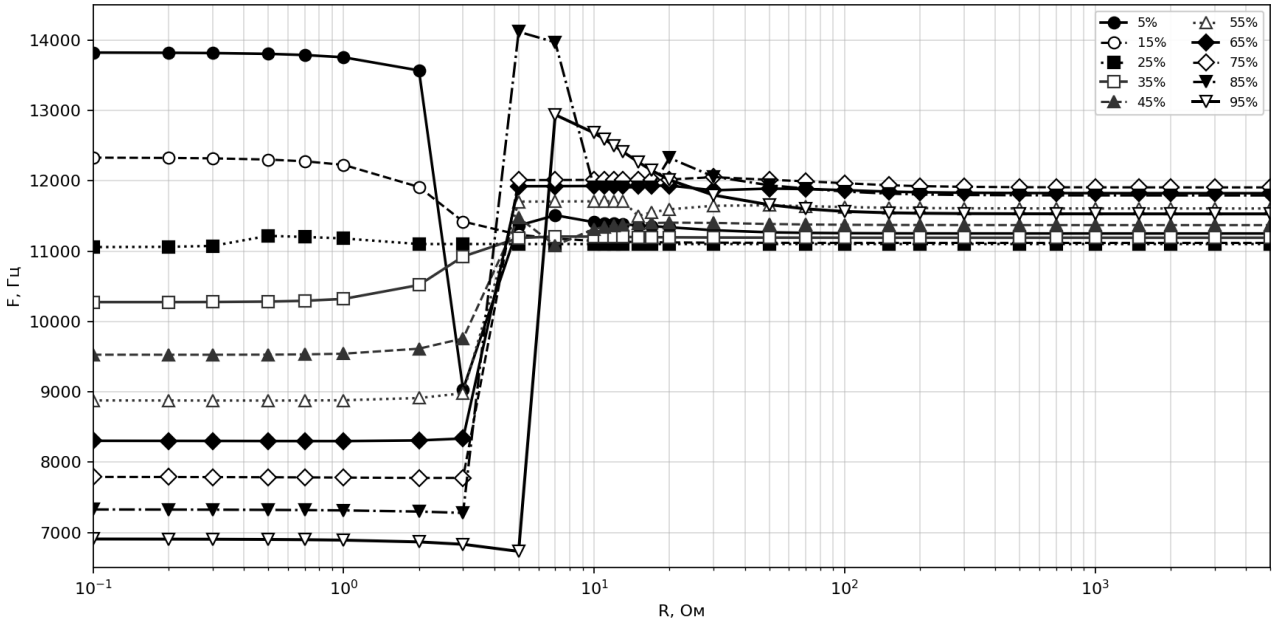


Рис. 4. Зависимость частоты доминирующей составляющей тока $3i_0$ поврежденного присоединения от переходного сопротивления $R_п$ и удаленности ОЗЗ от шин ПС (от 5 до 95 % длины линии) для кабельной сети 10 кВ с изолированной нейтралью и $I_{C\Sigma}$ = 20 А (без учета составляющих частотой свыше 20 кГц)

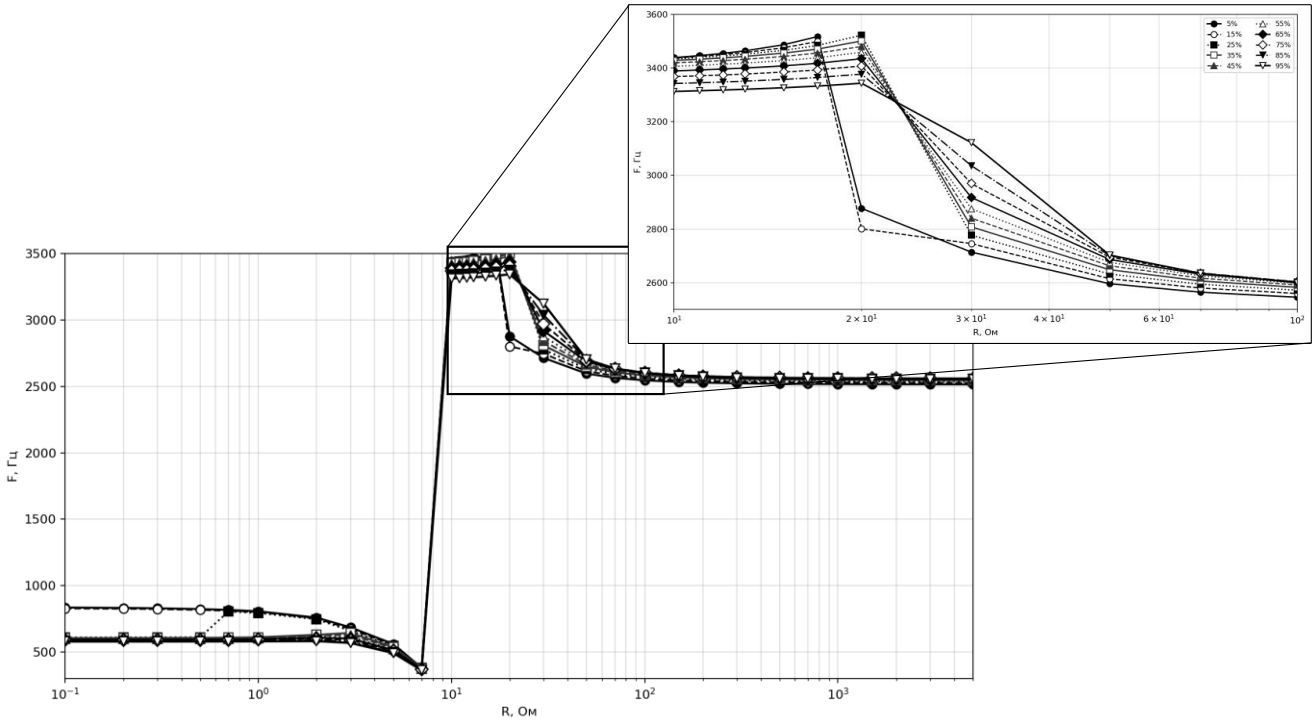


Рис. 5. Зависимость частоты доминирующей составляющей тока $3i_0$ поврежденного присоединения от переходного сопротивления $R_п$ и удаленности ОЗЗ от шин ПС (от 5 до 95 % длинны линии) для компенсированной кабельной сети 10 кВ с $I_{C\Sigma}$ = 60 А (без учета составляющих частотой свыше 20 кГц)

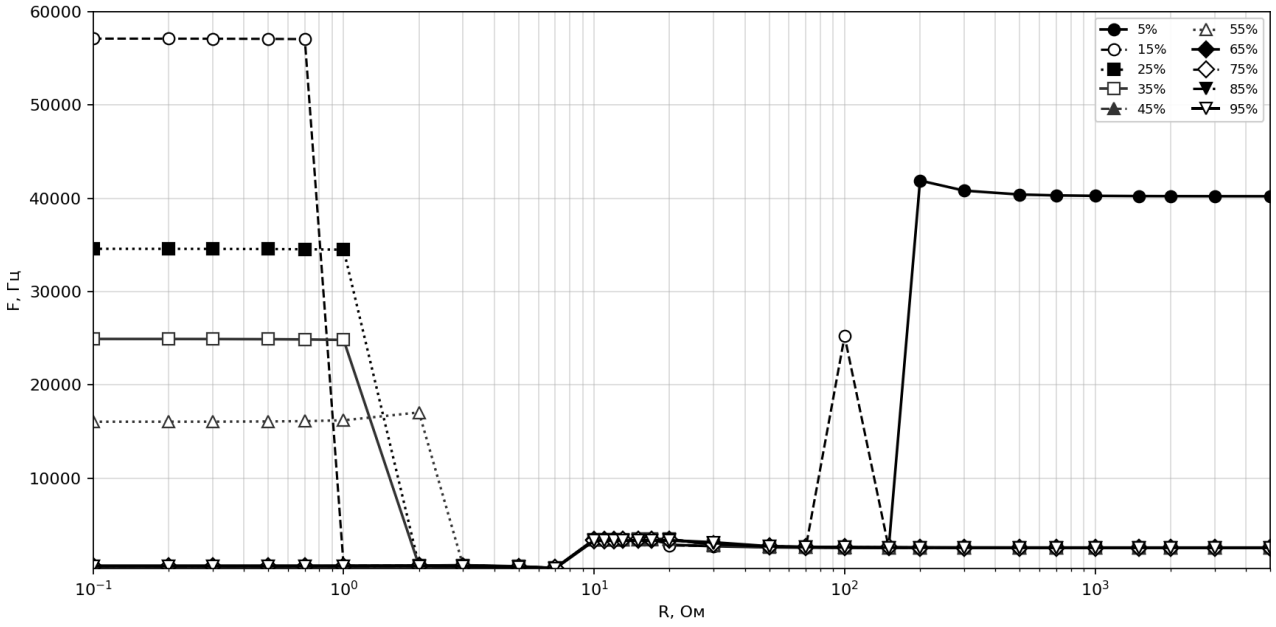


Рис. 6. Зависимость частоты доминирующей составляющей напряжения $3u_0$ на шинах ПС от переходного сопротивления $R_п$ и удаленности ОЗЗ от шин ЦП (от 5 до 95 % длины линии) для компенсированной кабельной сети 10 кВ с $I_{C\Sigma}$ = 60 А (с учетом составляющих частотой свыше 20 кГц)

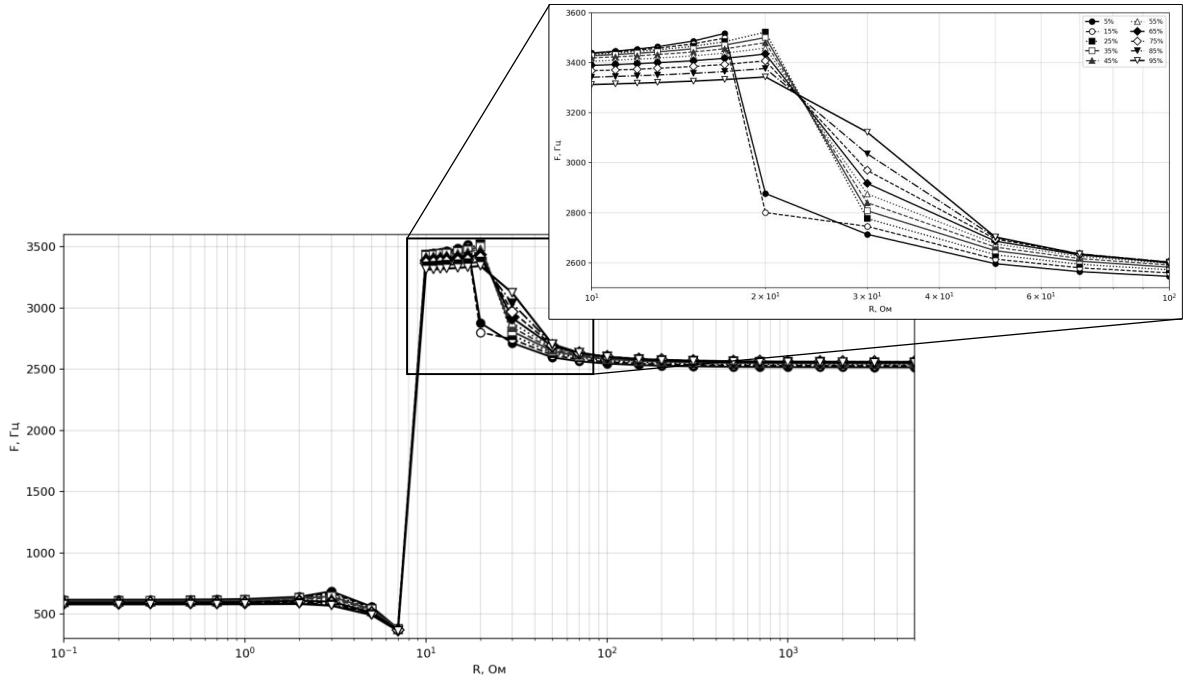


Рис. 7. Зависимость частоты доминирующей составляющей напряжения $3u_0$ на шинах ПС от переходного сопротивления $R_п$ и удаленности ОЗЗ от шин ЦП (от 5 до 95 % длины линии) для компенсированной кабельной сети 10 кВ с $I_{C\Sigma}$ = 60 А (без учета составляющих частотой свыше 20 кГц)

Анализ полученных зависимостей (рис. 4–9) позволяет сделать следующие выводы:

1. Частоты составляющих переходного процесса $3i_0$ и $3u_0$ при ОЗЗ могут значительно изменятся. Из рис. 8,а частота зарядной составляющей тока $3i_0$ при удаленности в 5 % от ЦП изменяется с 2077 Гц при переходном сопротивлении $R_п$ 0,01 Ом до 3077 Гц при $R_п$ = 5000 Ом. Наиболее быстрое изменение происходит при переходном сопротивлении $R_п$ от 7 до 50 Ом.

2. Для всех режимов заземления нейтрали при переходном сопротивлении $R_п$ до 10 Ом зарядная составляющая $3i_0$ переходного процесса по амплитуде в десятки раз превосходит составляющую 50 Гц. При превышении значения $R_п$ свыше 10 Ом амплитуда зарядной составляющей резко снижается и при $R_п$ около 30 Ом амплитуды этих составляющих становятся соизмеримы.

3. При величине переходного сопротивления $R_п$ свыше 100 Ом зарядная составляющая тока $3i_0$ переходного процесса в разы и десятки раз меньше составляющей промышленной частоты 50 Гц.

4. Зарядная составляющая в напряжении $3u_0$ при малом переходном сопротивлении соизмерима с составляющей основной гармоники. При $R_п$ свыше 10 Ом амплитуда зарядной составляющей также резко снижается, как и в токе нулевой последовательности.

5. При переходном сопротивлении $R_п$ около 500 Ом зарядная составляющая $3i_0$ и $3u_0$ переходного процесса становится неотличима от шума.

6. Амплитуда разрядной составляющей при увеличении переходного сопротивления изменяется более плавно, чем зарядная составляющая, и может быть зафиксирована при больших переходных сопротивлениях (около 5 кОм).

7. Зависимость частоты доминирующей составляющей при малых переходных сопротивлениях (до 10 Ом) обратна удаленности от шин ЦП, т. е. чем ближе замыкание, тем выше частота доминирующей составляющей как в переходном токе, так и в переходном напряжении. При больших переходных сопротивлениях R зависимость становится прямой, т. е. чем ближе замыкание, тем ниже частота доминирующей составляющей переходного процесса. Но следует отметить, что удаленные замыкания (свыше 75 % длины линии от шин ЦП) часто не подчиняются такому правилу.

Для наглядности на рис. 8, 9 также приведены проекции переходного сопротивления $R_п$ на плоскость.

Результаты расчетов для компенсированного и комбинированного режимов работы нейтрали идентичны, поэтому данные для комбинированной нейтрали не приведены.

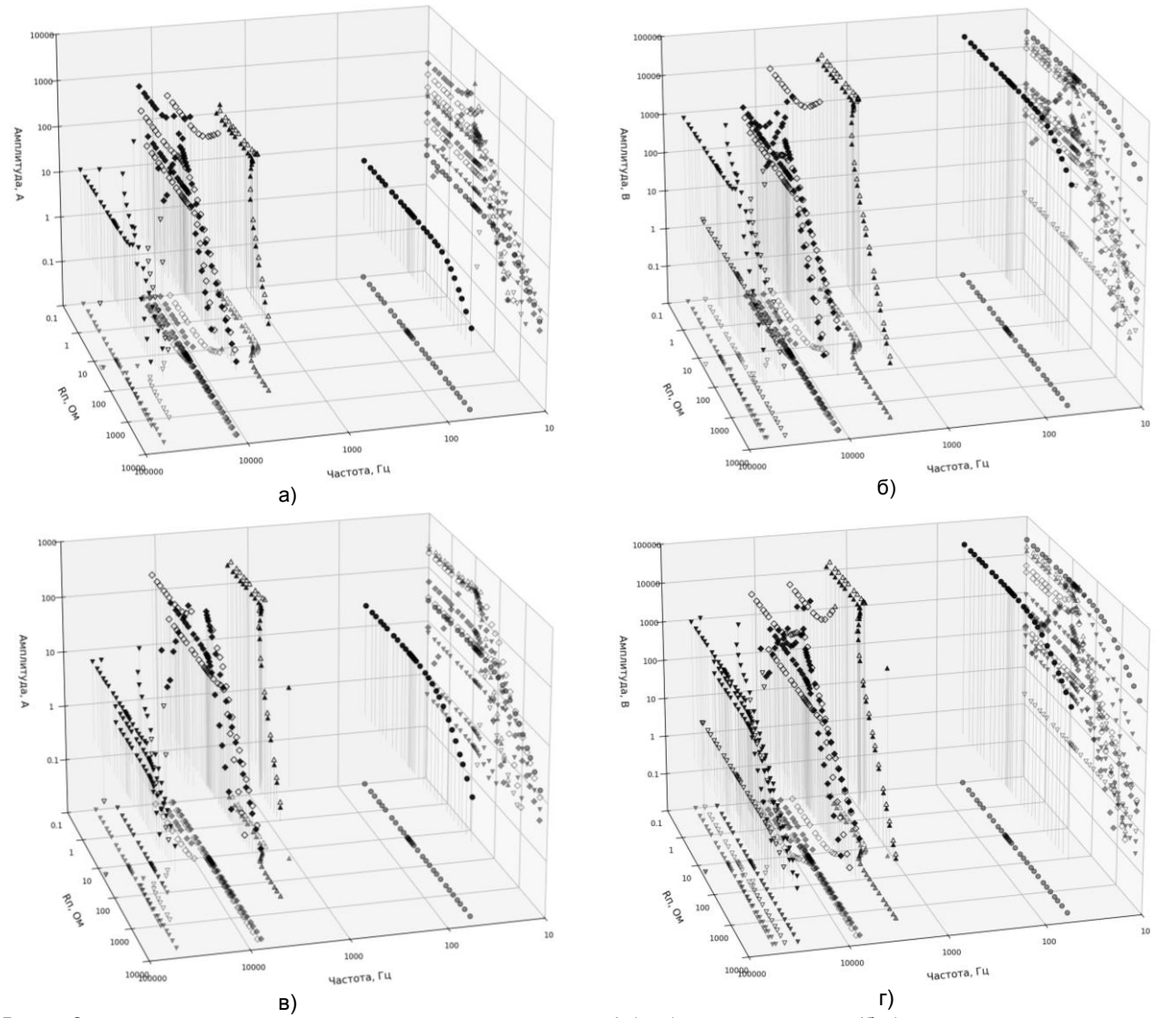


Рис. 8. Зависимости амплитуды и частоты составляющих тока $3i_0$ (а, в) и напряжения $3u_0$ (б, г) от переходного сопротивления $R_п$ в месте однофазного замыкания и удаленности 5 и 95 % (закрашенный маркер – 5 %; полый маркер – 95 %): а, б – для изолированного режима заземления нейтрали ($I_{C\Sigma}$ = 20 А); в, г – для высокоомного режима заземления нейтрали ($I_{C\Sigma}$ = 15 А)

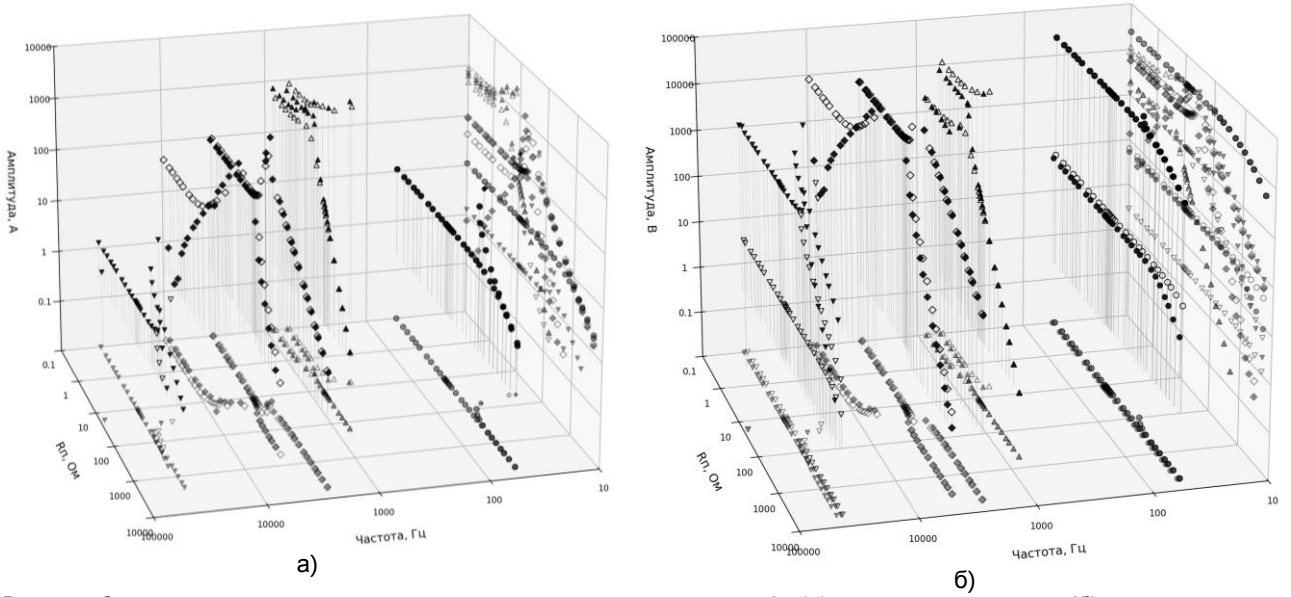


Рис. 9. Зависимости амплитуды и частоты составляющих тока $3i_0$ (а) и напряжения $3u_0$ (б) от переходного сопротивления $R_п$ в месте однофазного замыкания и удаленности 5 и 95 % (закрашенный маркер – 5 %; полый маркер – 95 %) для компенсированного режима работы нейтрали ($I_{C\Sigma}$ = 60 А)

Нейронная сеть для локации ОЗЗ. Для решения задачи локации ОЗЗ разработана полносвязная ИНС на фреймворка Keras [13, 14]. Предложенная сеть состоит из шести скрытых слоев с убывающим числом нейронов. На каждом слое принята функция активации LeakyReLU с коэффициентом 0,3 для отрицательных значений. В качестве входной величины используется только ток $3i_0$ защищаемого присоединения и его производная. Выходной слой имеет 1 нейрон со значением, соответствующим удаленности места замыкания от шин ЦП.

Результаты расчетов на модели сети 6–10 кВ по рис. 2 в MATLAB подтверждают правильность функционирования разработанного способа локации ОЗЗ при различных видах замыканий на землю и удаленности повреждения от шин центра питания [15].

Выводы. Для моделирования переходных процессов при ОЗЗ в целях обучения ИНС в основе способа локации замыкания на землю выбрана Т-образная схема замещения кабельной сети 6–10 кВ, учитывающая часть сети за местом ОЗЗ, с возможностью задания различных режимов заземления нейтрали.

Анализ зависимостей амплитуды и частоты составляющих тока $3i_0$ и напряжения $3u_0$ от переходного сопротивления $R_п$ в месте однофазного замыкания и удаленности ОЗЗ от шин ЦП для различных режимов заземления нейтрали, полученных на основе выбранной схемы замещения, показал:

1) переходное сопротивление $R_п$ в значительной степени определяет характер переходного процесса:

– при малых значениях $R_п$ (до 10 Ом) доминирует высокочастотная зарядная составляющая (в десятки раз выше промышленной частоты);

– при значениях $R_п$ выше 10 Ом ее амплитуда резко падает;

– начиная с 30–100 Ом преобладает составляющая 50 Гц;

2) поведение зарядной и разрядной составляющих различно:

– зарядная составляющая чувствительна к $R_п$: при $R_п \geq 500$ Ом она соизмерима с шумами;

– разрядная составляющая в меньшей степени зависит от $R_п$: ее можно регистрировать даже при высоких $R_п$ (до 5 кОм);

3) зависимость частоты составляющих переходного процесса от удаленности места замыкания меняется с ростом $R_п$:

– при малых $R_п$ (до 10 Ом) частота тем выше, чем ближе замыкание к шинам центра питания (обратная зависимость);

– при больших $R_п$ зависимость становится прямой: близкие замыкания дают более низкую частоту (исключение – удаленные замыкания свыше 75 % длины линии);

4) напряжение $3u_0$ изменяется качественно так же, как ток $3i_0$, но при малых $R_п$ зарядная составляющая в напряжении $3u_0$ соизмерима с составляющей основной частоты, а не превосходит ее в десятки раз, как в токе $3i_0$.

3. Исследования в MATLAB на предложенной полной модели сети 6–10 кВ разработанного способа локации ОЗЗ, определяющего расстояние до места повреждения, на основе обученной ИНС подтверждают правильность его функционирования при различных видах замыканий на землю и удаленности повреждения от шин центра питания и переходных сопротивлениях $R_п$ в месте замыкания.

Список литературы

1. **Федосеев А.М.** Релейная защита электрических систем. – М.: Энергия, 1976.

2. **Шуин В.А., Гусенков А.В.** Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6–10 кВ. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2001.

3. **Шалин А.И.** Замыкания на землю в сетях 6–35 кВ. Достоинства и недостатки различных защит // Новости ЭлектроТехники. – 2005. – № 3(33). – Режим доступа: http://www.news.elteh.ru/arh/2005/33/13.php.

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

5. **Дударев Л.Е., Запорожченко С.И., Лукьянцев Н.М.** Дуговые замыкания на землю в кабельных сетях // Электрические станции. – 1971. – № 8. – С. 64–66.

6. **Argyropoulos P.E**., **Lev-Ari H**. Wavelet customization for improved fault-location quality in power networks // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2015. – Vol. 30, issue 5. – P. 2215–2223. DOI: 10.1109/tpwrd.2015.2429590.

7. **Guo M.-F., Yang N.-C., You L.-X.** Wavelet-transform based early detection method for short-circuit faults in power distribution networks // International journal of electric power and energy systems. – 2018. – Vol. 99, July. – P. 706–721. DOI: 10.1016/j.ijepes.2018.01.013.

8. **Шуин В.А.** Начальные фазовые соотношения электрических величин переходного процесса при замыканиях на землю в кабельных сетях 6–10 кВ // Электричество. – 1991. – № 10. – С. 58–61.

9. **Особенности** использования электрических величин переходного процесса в защитах от замыканий на землю электрических сетей 6–10 кВ / В.А. Шуин, Д.И. Ганджаев, О.А. Сарбеева, Е.С. Шагурина // Вестник ИГЭУ. – 2011. – Вып. 1. – С. 32–41.

10. **Воробьева Е.А.** Совершенствование принципов выполнения адаптивных токовых и адмитансных защит от замыканий на землю в кабельных сетях 6–10 кВ: дис. … канд. техн. наук: 05.14.02. – Иваново, 2018. – 206 с.

11. **Кучумов Л., Кузнецов А., Червочков Д.** Переходное сопротивление в месте ОЗЗ // Новости Электротехники. – 2017. – № 4. – С. 24–27.

12. **Шабанов В.А., Степанова В.Д.** Графоаналитическое исследование режимов однофазного замыкания // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2023. – Т. 19, № 2. – С. 123–134.

13. **Круглов В.В., Борисов В.В.** Нейронные сети. Теория и практика. – М.: Горячая линия. – Телеком, 2002. – 382 с.

14. **Keras**. Keras API documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://keras.io/

15. **Галанин И.А., Шадрикова Т.Ю.** Обучение нейронной сети для дистанционного определения места замыкания на землю в кабельных сетях среднего напряжения // Энергоинновации: материалы науч.-практ. конф. Молодежной секции РНК СИГРЭ. – Иваново, 2025. – С. 83–86.

References

1. Fedoseev, A.M. *Releynaya zashchita elektricheskikh sistem* [Relay protection of electrical systems]. Moscow: Energiya, 1976.

2. Shuin, V.A., Gusenkov, A.V. *Zashchity ot zamykaniy na zemlyu v elektricheskikh setyakh 6–10 kV* [Protection against earth faults in 6–10 kV electrical networks]. Moscow: Energoprogress, 2001. 104 p.

3. Shalin, A.I. Zamykaniya na zemlyu v setyakh 6–35 kV. Dostoinstva i nedostatki razlichnykh zashchit [Earth faults in networks 6–35 kV. Advantages and disadvantages of various protections]. *Novosti ElektroTekhniki*, 2005, no. 3(33). Available at: http://www.news.elteh.ru/arh/2005/33/13.php.

4. Likhachev, F.A. *Zamykaniya na zemlyu v setyakh s izolirovannoy neytral'yu i s kompensatsiey emkostnykh tokov* [Earth faults in networks with isolated neutral and with capacitive currents compensation]. Moscow: Energiya, 1971. 152 p.

5. Dudarev, L.E., Zaporozhchenko, S.I., Luk′yantsev, N.M. Dugovye zamykaniya na zemlyu v kabel′nykh setyakh [Arc groundfault in cable networks]. *Elektricheskie stantsii*, 1971, no. 8, pp. 64–66.

6. Argyropoulos, P.E., Lev-Ari, H. Wavelet customization for improved fault-location quality in power networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2015, vol. 30, issue 5, pp. 2215–2223. DOI: 10.1109/tpwrd.2015.2429590.

7. Guo, M.-F., Yang, N.-C., You, L.-X. Wavelet-transform based early detection method for short-circuit faults in power distribution networks. *International journal of electric power and energy systems,* 2018, vol. 99, July, pp. 706–721. DOI: 10.1016/j.ijepes.2018.01.013.

8. Shuin, V.A. Nachal′nye fazovye sootnosheniya elektricheskikh velichin perekhodnogo protsessa pri zamykaniyakh na zemlyu v kabel′nykh setyakh 6–10 kV [Initial phase ratios of electrical quantities during transient processes in 6–10 kV cable networks]. *Elektrichestvo,* 1991, no. 10, pp. 58–61.

9. Shuin, V.A., Gandzhaev, D.I., Sarbeeva, O.A., Shagurina, E.S. Osobennosti ispol′zovaniya elektricheskikh velichin perekhodnogo protsessa v zashchitakh ot zamykaniy na zemlyu elektricheskikh setey 6–10 kV [Features of using electrical quantities of the transient process in ground fault protection of 6–10 kV electrical networks]. *Vestnik IGEU*, 2011, issue 1, pp. 32–41.

10. Vorob'eva, E.A. *Sovershenstvovanie printsipov vypolneniya adaptivnykh tokovykh i admitansnykh zashchit ot zamykaniy na zemlyu v kabel'nykh setyakh 6–10 kV*. Diss. … kand. tekhn. nauk [Improving the principles of adaptive current and admittance protection against ground faults in 6-10 kV cable networks. Cand. tech. sci. diss.]. Ivanovo, 2018. 206 p.

11. Kuchumov, L., Kuznetsov, A., Chervochkov, D. Perekhodnoe soprotivlenie v meste OZZ [Transient resistance at the point of the earth fault]. *Novosti Elektrotekhniki*, 2017, no. 4, pp. 24–27.

12. Shabanov, V.A., Stepanova, V.D. Grafoanaliticheskoe issledovanie rezhimov odnofaznogo zamykaniya [Graph-analytical study of single-phase short circuit modes]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye kompleksy i sistemy*, 2023, vol. 19, no. 2, pp. 123–134.

13. Kruglov, V.V., Borisov, V.V. *Neyronnye seti. Teoriya i praktika* [Neural networks. Theory and practice]. Moscow: Goryachaya liniya. Telekom, 2002. 382 p.

14. Keras. Keras API documentation. Available at: https://keras.io/

15. Galanin, I.A., Shadrikova, T.Yu. Obuchenie neyronnoy seti dlya distantsionnogo opredeleniya mesta zamykaniya na zemlyu v kabel′nykh setyakh srednego napryazheniya [Training a neural network to remotely detect ground faults in medium-voltage cable networks]. *Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Energoinnovatsii» Molodezhnoy sektsii RNK SIGRE* [Proceedings of scientific and practical conference. The Youth Section of the Russian National Committee of CIGRE “Energy Power Innovations”]. Ivanovo, 2025, pp. 83–86.

УДК 621.313

Леонид Тимурович Тухватуллин
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева–КАИ», аспирант кафедры электрооборудования, Россия, Казань, телефон (843) 231-03-63, e-mail: TukhvatullinLT@stud.kai.ru

Руслан Геннадьевич Исаков
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева–КАИ», кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования, Россия, Казань, телефон (843) 231-03-63, e-mail: ruslanisakov@yandex.ru

Методика оценки эффективности мероприятий для обеспечения устойчивости технологического процесса промышленных предприятий при провалах напряжения

Авторское резюме

Состояние вопроса. На сегодняшний день нарушения работы промышленных предприятий зачастую связаны с возникновением в сетях электроснабжения кратковременных провалов напряжения. Существует множество различных технических решений, позволяющих устранять провалы в течение короткого периода времени. Однако выбор того или иного противоаварийного мероприятия в большинстве случаев не согласуется с устойчивостью технологического процесса предприятия. Вследствие этого возникает ситуация, когда, несмотря на быстрое устранение провала напряжения, производственный процесс все равно нарушается, приводя к браку продукции и убыткам. В связи с этим основной целью данного исследования является обеспечение устойчивой работы электротехнического комплекса со сложным технологическим циклом при провалах напряжения.
Материалы и методы. Представленная методика базируется на концепции времени устойчивости технологического процесса, разработанной международной исследовательской группой CIGRE, CIRED и UIE. Она позволяет произвести выбор наиболее эффективного мероприятия по устранению провалов напряжения на заданном промышленном предприятии, основываясь на определении критического времени устойчивости технологического процесса. Для апробации методики применено имитационное моделирование работы электротехнического комплекса нефтеперерабатывающего предприятия в программе PSCAD.
Результаты. В результате моделирования получены значения критических времен устойчивости технологических агрегатов, определено критическое время устойчивости технологического процесса. Рассмотрены временные сценарии устранения короткого замыкания средствами релейной защиты и автоматизации с помощью диаграмм Ганта. Разработанная методика апробирована на практическом примере. Продемонстрирована ее эффективность при повышении устойчивости технологического процесса при провалах напряжения.
Выводы. Разработанная методика позволяет повысить устойчивость работы промышленного предприятия со сложным технологическим циклом. С ее помощью можно выбрать наиболее эффективные противоаварийные мероприятия, направленные на обеспечение стабильности напряжения в электротехническом комплексе производства. Полученные результаты могут быть использованы инженерными организациями, проектирующими системы электроснабжения промышленных предприятий.

Ключевые слова: провалы напряжения, технологическая устойчивость, асинхронный двигатель, электротехнический комплекс, технологический процесс

Leonid Timurovich Tukhvatullin
Kazan National Research Technical University, Postgraduate Student of Electrical Equipment Department, Russia, Kazan, telephone (843) 231-03-63, e-mail: TukhvatullinLT@stud.kai.ru

Ruslan Gennadevich Isakov
Kazan National Research Technical University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Electrical Equipment Department, Russia, Kazan, telephone (843) 231-03-63, e-mail: ruslanisakov@yandex.ru

Methodology to assess the effectiveness of measures to ensure the stability of technological process of industrial enterprises during voltage dips

Abstract

Background. Today, industrial plant disruptions are often associated with short-term voltage dips in power grids. Numerous technical solutions exist to resolve these dips within a short period of time. However, the choice of a particular emergency response in most cases is not consistent with the stability of the enterprise technological process. Conse-

© Тухватуллин Л.Т., Исаков Р.Г., 2026
Вестник ИГЭУ, 2026, вып. 5, с. 72–78.

quently, despite the rapid clearing of the voltage dip, the production process is still disrupted, leading to product defects and losses. Therefore, the primary goal of this study is to ensure the stable operation of electrical equipment with complex technological processes during voltage dips.
Materials and methods. The presented methodology is based on the process stability time concept developed by the international research group CIGRE, CIRED, and UIE. It enables to selection of the most effective measure to mitigate voltage dips at a given industrial facility, based on determining the critical process stability time. Simulation of the electrical system of an oil refinery using PSCAD has been used to test the methodology.
Results. As a result of the modeling, values of the critical stability times of process units have been obtained, and the critical stability time of the technological process has been determined. Short-circuit clearance time scenarios using relay protection and automation systems have been examined using Gantt charts. The developed methodology has been validated through a practical example. Its effectiveness to enhance the resilience of the technological process against voltage dips has been demonstrated.
Conclusions. The developed methodology enhances the operational stability of an industrial enterprise with a complex technological cycle. It enables the selection of the most effective emergency response measures aimed at ensuring voltage stability of electrical power system. The results obtained can be used by engineering companies that design power supply systems for industrial enterprises.

Key words: voltage dips, process stability, asynchronous motor, electrical complex, technological process

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.5.072-078

Введение. Одной из наиболее актуальных проблем современной промышленности является нарушение устойчивой работы технологических процессов, вызванное кратковременными провалами напряжения в сети. В частности, даже кратковременное нарушение электроснабжения на объектах нефтепромышленности Крайнего Севера вызывает замораживание водопроводов, быстрый ремонт которых затруднителен в виду географической удаленности [1]. На сегодняшней день существует множество различных технических решений, позволяющих обеспечивать стабильность напряжения при аварийных ситуациях на энергообъектах [2]. Тем не менее зачастую данные мероприятия остаются неэффективными по причине того, что на стадии их проектирования в должной мере не учитывается технологическая устойчивость критически важных объектов промышленного предприятия. Вследствие чего распространенной становится ситуация несогласованности работы электрических и технологических защит. Например, при возникновении провала напряжения на предприятии автоматика, защищающая технологическую часть производства, отключает электродвигатель раньше, чем успевают сработать устройства РЗА по устранению КЗ, вызвавшего провал [3]. Это вызывает нарушение всего технологического процесса, приводя к убыткам, браку продукции и даже гибели людей [4]. Для решения данной проблемы необходимо проводить совместную оценку технологической и динамической устойчивости электротехнического комплекса при провалах напряжения.

Методы исследования. Для решения поставленной задачи была разработана методика, позволяющая выбирать наиболее эффективное техническое решение с точки зрения обеспечения устойчивости технологического процесса при провалах напряжения.

В ее основе лежит концепция времени устойчивости технологического процесса, которую разработала международная совместная рабочая группа CIGRE, CIRED и UIE [5, 6]. На ее основе можно определить критическое время устойчивости технологического агрегата (рис. 1). Под технологическим агрегатом понимается связка «электродвигатель–приводной механизм».

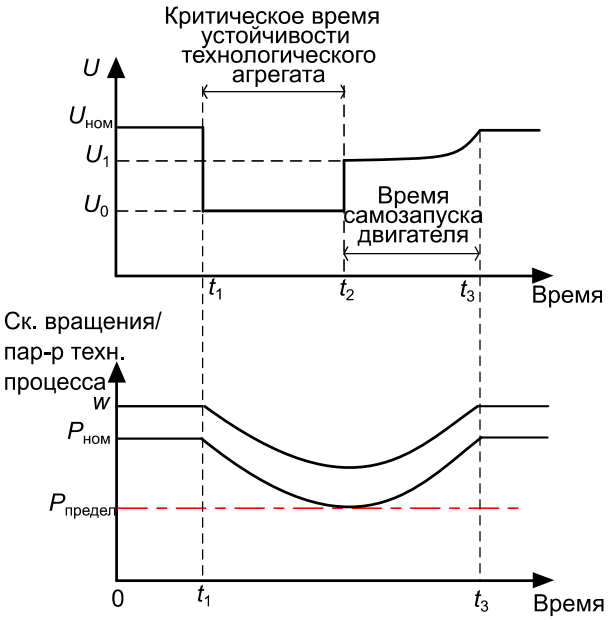


Рис. 1. Определение критического времени устойчивости технологического агрегата

Параметр технологического процесса (давление центробежного насоса) p в о.е. зависит от скорости вращения двигателя w в о.е. согласно формуле

$$p = w^2. \quad (1)$$

Провал напряжения начинается в момент времени t_1, вызывая замедление двигателя и снижение параметра процесса. В момент t_2 провал устраняется. Критическое время устойчивости технологического агрегата определяет-

ся как максимальная длительность провала напряжения, когда одновременно обеспечивается самозапуск электродвигателя и параметр процесса не пересекает предельную границу значения $p_{предел}$, ниже которой технологический процесс нарушается [7].

Упрощенная блок-схема разработанной методики представлена на рис. 2.

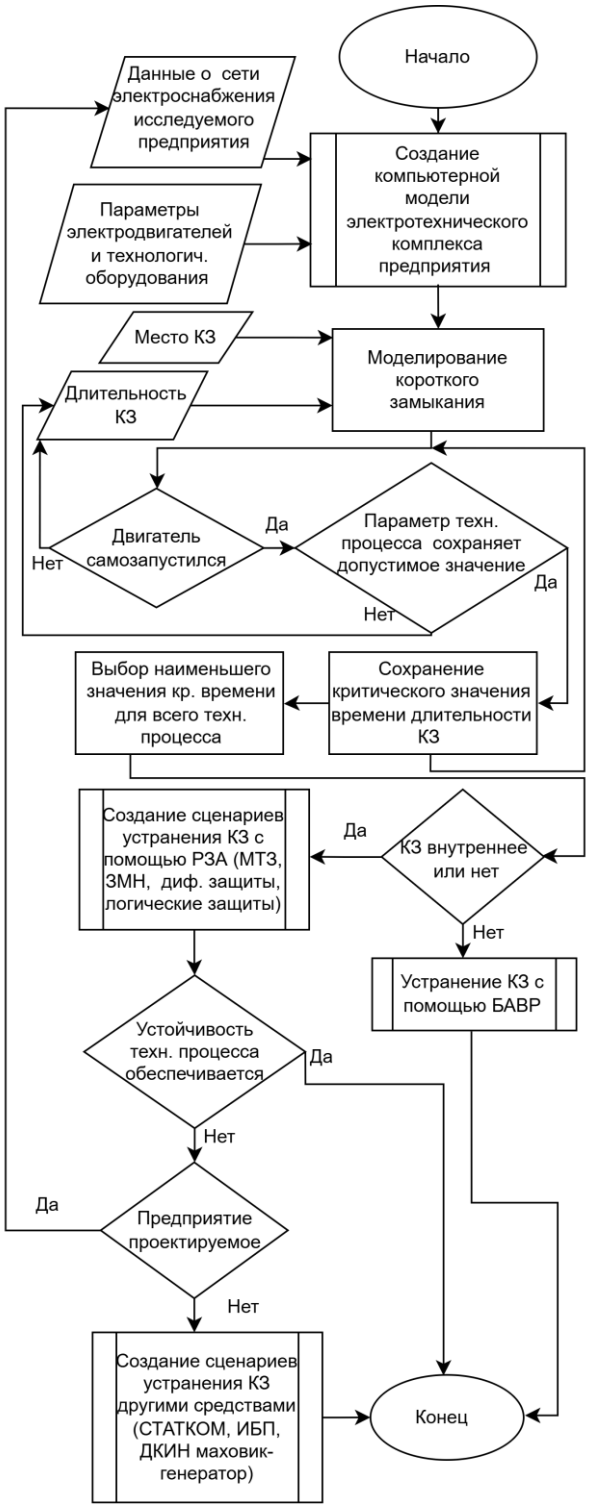


Рис. 2. Блок-схема методики оценки эффективности мероприятий по обеспечению устойчивости технологического процесса промышленных предприятий при провалах напряжения

На первоначальном этапе необходимо создать математическую модель исследуемого электротехнического комплекса предприятия с помощью компьютерной программы (PSCAD, MATLAB и др.). Исходными данными для нее являются данные о сети электроснабжения, ее топология, параметры электродвигателей (мощность, тип двигателя, коэффициент загрузки), информация о приводных механизмах (тип механизма, электромеханическая постоянная времени).

На втором этапе производится моделирование короткого замыкания, вызывающего провал напряжения в сети. Для этого в модели задается место возникновения КЗ и его длительность. Для каждого технологического агрегата, участвующего в технологическом процессе, определяется критическое время устойчивости (рис. 1). Найденные значения сохраняются, и из них выбирается наименьшее, которое будет определять устойчивость рассматриваемого технологического процесса.

Следующий этап включает в себя выбор противоаварийных мероприятий на основе найденного критического времени. Если КЗ произошло во внешней сети, то единственным возможным способом будет использование быстродействующего автоматического ввода резерва (БАВР). В случае внутреннего КЗ сначала создаются сценарии его устранения с помощью традиционных средств РЗА (максимальная токовая защита, защита минимального напряжения, дифференциальные защиты, логические защиты). Для удобства визуализации данных временные сценарии формируются в виде диаграмм Ганта. Если выбранное противоаварийное мероприятие обеспечивает восстановление напряжения за время, меньшее или равное критическому времени устойчивости технологического процесса, то процесс выбора считается завершенным. Если нет, то для вновь проектируемого предприятия есть возможность изменить структуру самой сети и провести моделирование заново. Для уже существующего предприятия разрабатываются противоаварийные мероприятия более дорогостоящими средствами (СТАТКОМ, ИБП, ДКИН, маховик-генератор и др.).

Для апробации разработанной методики выбрана часть электротехнического комплекса нефтеперерабатывающего предприятия (рис. 3).

Асинхронные двигатели Д1-Д10 с одинаковой мощностью 650 кВт являются частью исследуемого технологического процесса. Двигатели Д6-Д10 выполняют резервную функцию, поэтому их работа не рассматривается в контексте используемой методики. Двигатели Д1-Д5 являются критически важными для процесса, и каждый из них приводит в движение центробежный насос. Для демонстрации эффективности представленной методики смоделирован сценарий возникновения трехфазного КЗ на землю в конце отходящей от ГПП1 кабельной линии $L_1 = 1{,}5$ км.

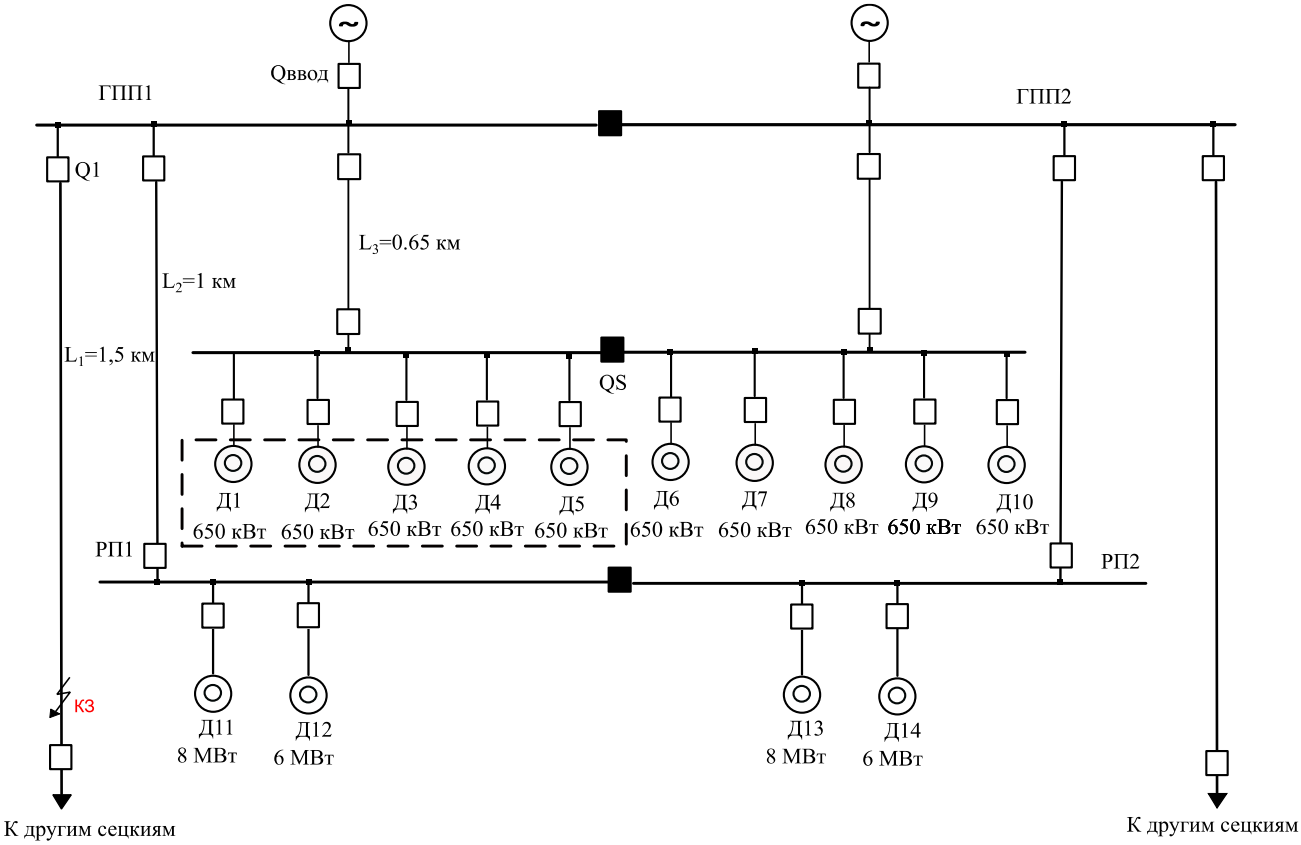


Рис. 3. Упрощенная часть схемы электроснабжения электротехнического комплекса нефтеперерабатывающего предприятия

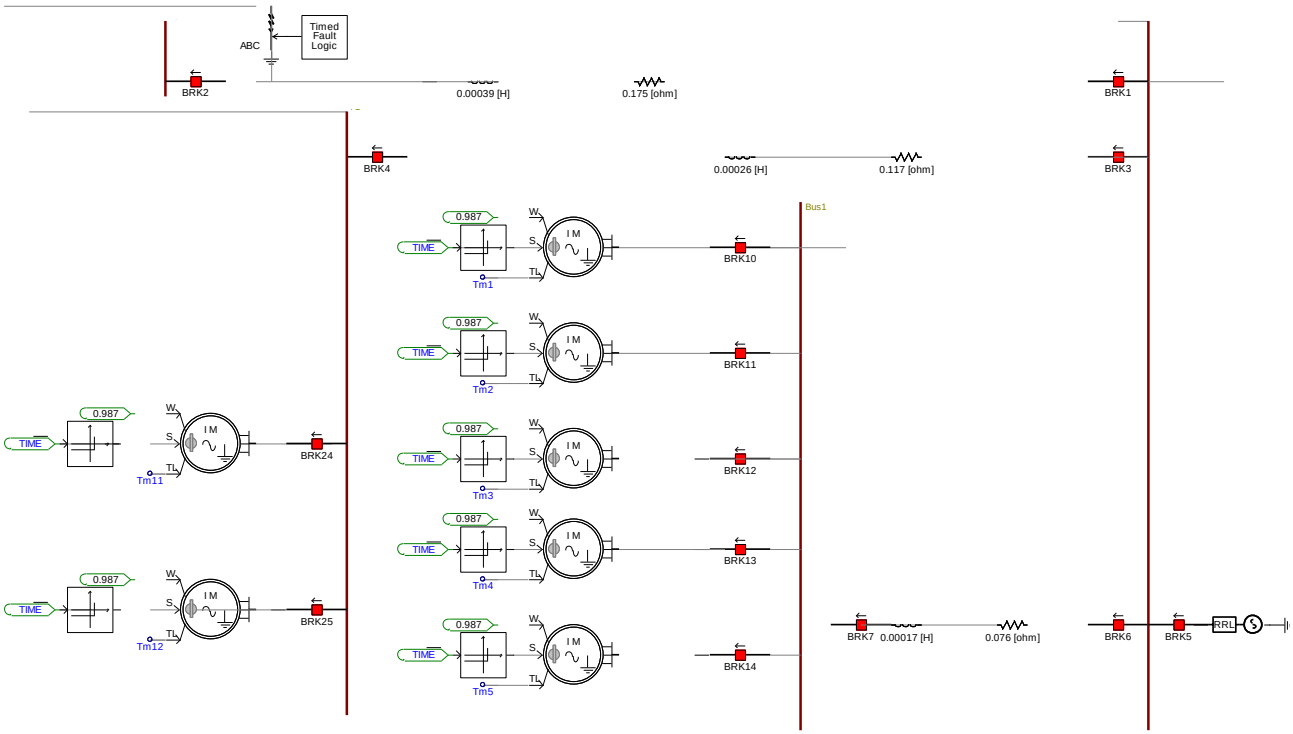


Рис. 4. Имитационная модель исследуемого электротехнического комплекса в программе PSCAD

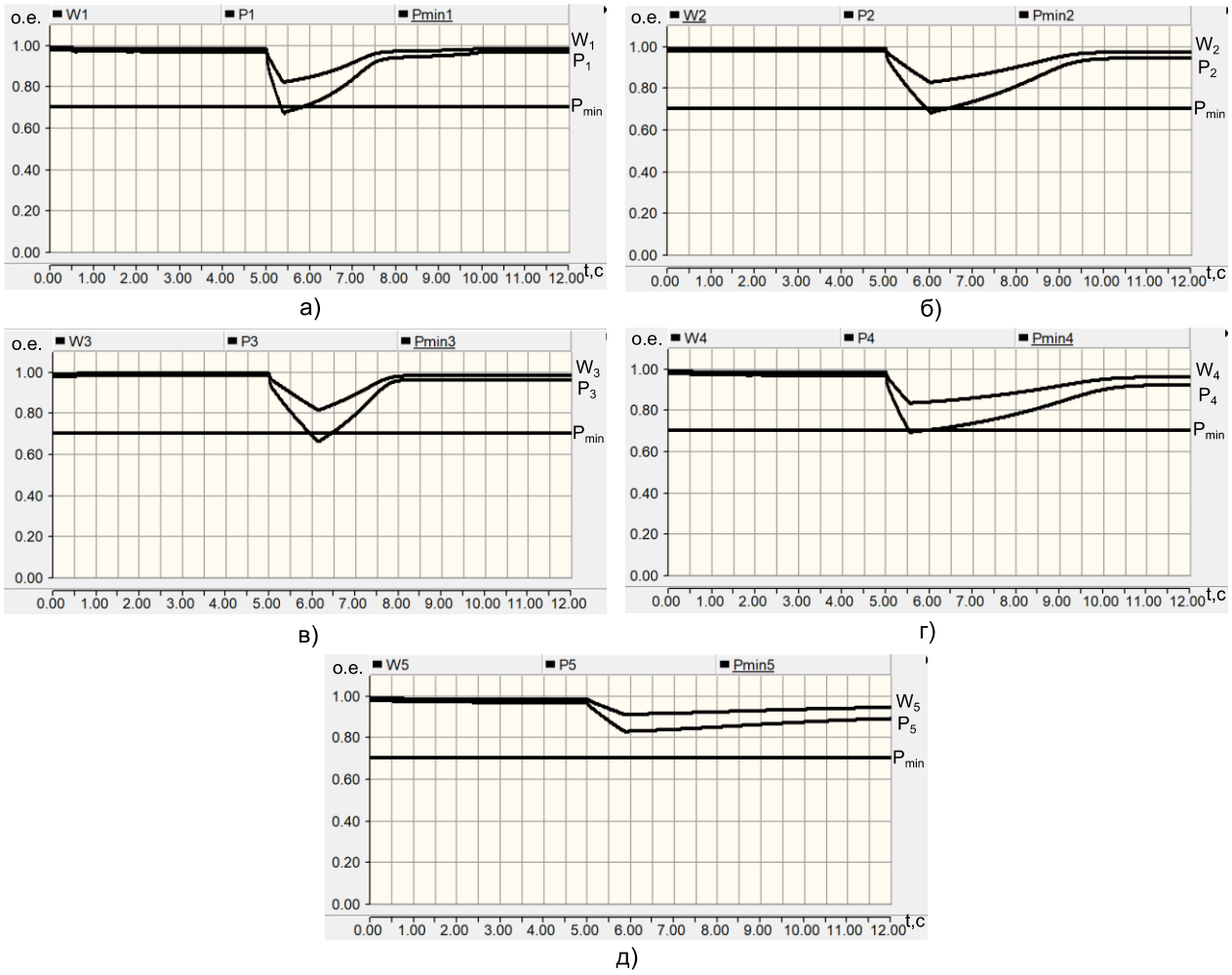


Рис. 5. Результаты моделирования для каждого технологического агрегата: а – ТА1 при $t_{провала}$ = 0,37 с; б – ТА2 при $t_{провала}$ = 1 с; в – ТА3 при $t_{провала}$ = 1,12 с; г – ТА4 при $t_{провала}$ = 0,53 с; д – ТА5 при $t_{провала}$ = 0,82 с

Согласно блок-схеме на рис. 2, на первом этапе создается компьютерная модель исследуемого электротехнического комплекса. В качестве инструмента для компьютерного моделирования выбрана программа PSCAD. Имитационная модель показана на рис. 4. Вводными данными модели являются топология сети электроснабжении предприятия, длины линий, мощности асинхронных двигателей и информация об участвующих в технологическом процессе приводных механизмах (в данном случае центробежных насосах). Значения электромеханических постоянных времени T_j для технологических агрегатов (номер агрегата соответствует номеру двигателя) представлены в табл. 1.

Таблица 1. **Значения электромеханических постоянных времени технологических агрегатов T_j**

ТА 1	ТА 2	ТА 3	ТА 4	ТА 5
2 с	4 с	3 с	3 с	10 с

Результаты исследования. В результате имитационного моделирования работы технологических агрегатов ТА1-ТА5 с нагрузкой в виде центробежного насоса при возникновении КЗ [8] были найдены значения критических времен устойчивости агрегатов (рис. 5), удовлетворяющих показанным на рис. 1 условиям, т.е. когда одновременно обеспечивается самозапуск асинхронных двигателей и сохраняется технологическая устойчивость процесса. В качестве предельного значения $p_{предел}$ для давления в насосах выбрано значение 0,7 $p_{ном}$. Для технологической защиты, реагирующей на отклонение давления, на всех агрегатах выбрана выдержка времени, равная 0,5 с. Защиты от перегрузки, отключающие двигатели при неудачном самозапуске, работают с выдержкой времени 12 с. Второй двигатель Д2 загружен на 80 %, третий Д3 – на 60 %, остальные – на 100 %. Результаты отображены в табл. 2.

Таблица 2**. Значения критических времен устойчивости технологических агрегатов**

ТА 1	ТА 2	ТА 3	ТА 4	ТА 5
0,37 с	1 с	1,12 с	0,53 с	0,82 с

Согласно полученным значениям, наименьшим критическим временем 0,37 с обладает агрегат ТА1. Оно принимается за крити-

ческое время провала напряжения для всего исследуемого технологического процесса. Это то время, в течение которого должно обеспечиваться восстановление стабильности напряжения на предприятии.

В виду того что нарушение работы было вызвано возникновением КЗ в сети внутреннего электроснабжения, рассматриваются сценарии его устранения с помощью традиционных средств РЗА.

Одним из наиболее распространенных типов противоаварийных устройств в сетях напряжением 10 кВ является максимальная токовая защита (МТЗ) [9]. На рис. 6 показан временной сценарий (в секундах) устранения КЗ с помощью МТЗ в виде диаграммы Ганта.

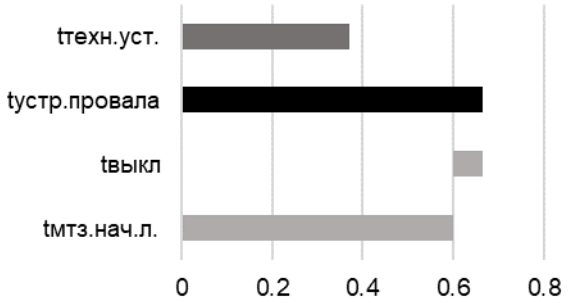


Рис. 6. Временной сценарий устранения КЗ с помощью МТЗ

При возникновении КЗ в начале линии L_1 срабатывает реле с выдержкой времени $t_{\text{мтз нач. л}}$ = 0,6 с и отключает линию силовым вакуумным выключателем $Q1$, время действия которого $t_{\text{выкл}}$ = 0,065 с.

Анализ полученных результатов (рис. 6) показывает, что результирующее время устранения провала напряжения $t_{\text{устр. провала}}$ значительно больше по величине значения критического времени устойчивости технологического процесса $t_{\text{техн. уст}}$. Следовательно, МТЗ не подходит для защиты оборудования от провалов напряжения.

Дифференциальная защита линий (ДЗЛ) является эффективной и быстродействующей защитой, обладающей абсолютной селективностью [10]. Это техническое решение позволяет устранить КЗ за короткий период времени, сравнивая токи в начале и конце линии [11].

На рис. 7 изображена временная диаграмма Ганта, демонстрирующая сценарий устранения (в секундах) провала напряжения с помощью ДЗЛ.

В момент начала провала напряжения возникает ток КЗ, на который реагирует ДЗЛ за время $t_{\text{дзл}}$ = 0,025 с и подает сигнал на отключение линии выключателем $Q1$, срабатывающим за время $t_{\text{выкл}}$ = 0,065 с. Таким образом, время устранения провала меньше критического времени $t_{\text{устр. провала}} < t_{\text{техн. уст}}$, что обеспечивает сохранение устойчивости исследуемого технологического процесса.

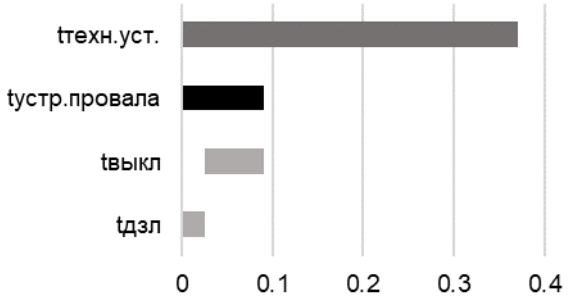


Рис. 7. Временной сценарий устранения КЗ с помощью ДЗЛ

Выводы. Разработанная методика оценки эффективности мероприятий для обеспечения устойчивости технологического процесса промышленных предприятий при провалах напряжения по результатам проведенного исследования показала свою эффективность. Предлагаемая методика может быть использована на существующих или вновь проектируемых предприятиях со сложным технологическим циклом.

Список литературы

1. **Королёва О.А.** Категории надежности электроснабжения кустов добывающих скважин нефтегазовых месторождений // PROНЕФТЬ. Профессионально о нефти. – 2018. – № 1. – С. 73–76. DOI: 10.24887/2587-7399-2018-1-73-76.

2. **Тухватуллин Л.Т., Исаков Р.Г.** Способы повышения стабильности напряжения в системе электроснабжения промышленных предприятий // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2025. – Т. 27, №. 3. – С. 82–101. DOI: 10.30724/1998-9903-2025-27-3-82-101.

3. **Гуревич Ю.Е., Кабиков К.В.** Особенности электроснабжения, ориентированного на бесперебойную работу промышленного потребителя. – М.: Элекс-КМ, 2005. – 407 с.

4. **Николаев А.А., Денисевич А.С., Ивекеев В.С.** Повышение устойчивости работы преобразователей частоты с активными выпрямителями при коммутациях электрооборудования электросталеплавильного комплекса // Вестник ИГЭУ. – 2019. – Вып. 5. – С. 48–58. DOI: 10.17588/2072-2672.2019.5.048-058.

5. **CIGRE/** CIRED/ UIE joint working group C4.110, voltage dip immunity of equipment in installations – Main contributions and conclusions / M. Bollen, M. Stephens, S.Z. Djokic, et al. // CIRED 2009 – 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. Part 1. – Prague, Czech Republic, 2009. – P. 1–4. DOI: 10.1049/cp.2009.0584.

6. **Kang Z., Yuan T., Liu J.** Assessment and Treatment of Voltage Sag Based on Electric-Process PIT // 21st International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). – Chengdu, China, 2024. – P. 730–735. DOI: 10.1109/ICHQP61174.2024.10768758.

7. **Тухватуллин Л.Т., Исаков Р.Г.** Определение критического времени устойчивости работы технологического агрегата при провалах напряжения // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2026. – Т. 69, № 1. – С. 85–92. DOI: 10.17213/0136-3360-2026-1-85-92.

8. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025694425 Российская Федерация. Имитационная модель технологического агрегата с нагрузкой в виде центробежного насоса для исследования устойчивости при провалах напряжения / Л.Т. Тухватуллин, Р.Г. Исаков; опубл. 05.12.2025.

9. **Мультичастотная** направленная защита от замыканий на землю в некомпенсированных сетях 6–10 кВ / К.С. Алёшин, Н.В. Кузьмина, А.А. Сёмушкин и др. // Вестник ИГЭУ. – 2025. – Вып. 5. – С. 39–49. DOI: 10.17588/2072-2672.2025.5.039-049.

10. **Новый** принцип осуществления токовой дифференциальной защиты для линий электропередачи ультравысокого напряжения / Д. Хо, Ю. Ли, Б. Ли, Ш. Сюе // Электричество. – 2015. – № 2. – С. 17–22.

11. **Левиуш А.И.** Дифференциальная защита линий электропередач // Релейная защита и автоматизация. – 2014. – № 4(17). – С. 30–34.

References

1. Koroleva, O.A. Kategorii nadezhnosti elektrosnabzheniya kustov dobyvayushchikh skvazhin neftegazovykh mestorozhdeniy [Power supply reliability category of oil and gas fields consumers]. *PRONEFT'. Professional'no o nefti*, 2018, no. 1, pp. 73–76. DOI: 10.24887/2587-7399-2018-1-73-76.

2. Tukhvatullin, L.T., Isakov, R.G. Sposoby povysheniya stabil'nosti napryazheniya v sisteme elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy [Ways to improve voltage stability in the power supply system of industrial enterprises]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*, 2025, issue 27, no. 3, pp. 82–101. https://doi.org/10.30724/1998-9903-2025-27-3-82-101

3. Gurevich, Yu.E., Kabikov, K.V. *Osobennosti elektrosnabzheniya, orientirovannogo na bespereboynuyu rabotu promyshlennogo potrebitelya* [Features of power supply aimed at uninterrupted operation of industrial consumers]. Moscow: Eleks-KM, 2005. 407 p.

4. Nikolaev, A.A., Denisevich, A.S., Ivekeev, V.S. Povyshenie ustoychivosti raboty preobrazovateley chastoty s aktivnymi vypryamitelyami pri kommutatsiyakh elektrooborudovaniya elektrostaleplavil'nogo kompleksa [Improving of operation stability of frequency converters with active rectifiers in electric steel-making complex electrical equipment switching]. *Vestnik IGEU*, 2019, issue 5, pp. 48–58. DOI: 10.17588/2072-2672.2019.5.048-058.

5. Bollen, M., Stephens, M., Djokic, S.Z., Neumann, R., McEachern, A., Milanović, J.V., Gordon, J.M.R., Brumsickle, B., Ethier, G., Zavoda, F., Stockman, K. CIGRE/ CIRED/ UIE joint working group C4.110, voltage dip immunity of equipment in installations – Main contributions and conclusions. *CIRED 2009 – 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. Part 1.* Prague, Czech Republic, 2009, pp. 1–4. DOI: 10.1049/cp.2009.0584.

6. Kang, Z., Yuan, T., Liu, J. Assessment and Treatment of Voltage Sag Based on Electric-Process PIT. *21st International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP).* Chengdu, China, 2024, pp. 730–735. DOI: 10.1109/ICHQP61174.2024.10768758.

7. Tukhvatullin, L.T., Isakov, R.G. Opredelenie kriticheskogo vremeni ustoychivosti raboty tekhnologicheskogo agregata pri provalakh napryazheniya [Determination of the critical time of stability of operation of a technological unit during voltage dips]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*, 2026, vol. 69, no. 1, pp. 85–92. DOI: 10.17213/0136-3360-2026-1-85-92.

8. Tukhvatullin, L.T., Isakov, R.G. *Imitatsionnaya model' tekhnologicheskogo agregata s nagruzkoy v vide tsentrobezhnogo nasosa dlya issledovaniya ustoychivosti pri provalakh napryazheniya* [Simulation model of a process unit with a centrifugal pump load for studying stability during voltage dips]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM RF [Certificate of State Registration of Computer Program in Russia]. No. 2025694425, 2025.

9. Aleshin, K.S., Kuz'mina, N.V., Semushkin, A.A., Shadrikova, T.Y., Shuin, V.A. Mul'tichastotnaya napravlennaya zashchita ot zamykaniy na zemlyu v nekompensirovannykh setyakh 6–10 kV [Multi-frequency directional protection against earth faults in uncompensated 6–10 kV networks]. *Vestnik IGEU*, 2025, issue 5, pp. 39–49. DOI: 10.17588/2072-2672.2025.5.039-049.

10. Ho, D., Li, Yu., Li, B., Syue, Sh. Novyy printsip osushchestvleniya tokovoy differentsial'noy zashchity dlya liniy elektroperedachi ul'travysokogo napryazheniya [A New Principle for Implementing Differential Current Protection for Extra-High-Voltage Power Lines]. *Elektrichestvo*, 2015, no. 2, pp. 17–22.

11. Leviush, A.I. Differentsial'naya zashchita liniy elektroperedach [Differential Protection of Power Lines]. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya,* 2014, no. 4(17), pp. 30–34.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 681.518.5

Юрий Нургалиевич Кожубаев
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», кандидат технических наук, доцент Высшей школы управления кибер-физическими системами, Россия, Санкт-Петербург,
e-mail: kozhubaev_yun@spbstu.ru

Арсений Александрович Градецкий
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», студент Высшей школы управления кибер-физическими системами Института компьютерных наук и кибербезопасности, Россия, Санкт-Петербург, e-mail: gradetskij.aa@edu.spbstu.ru

Кирилл Юрьевич Федоров
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», студент Высшей школы управления кибер-физическими системами Института компьютерных наук и кибербезопасности, Россия, Санкт-Петербург, e-mail: fedorov.kyu@edu.spbstu.ru

Комплексный метод обнаружения аномалий для прогнозирования технического обслуживания ленточных конвейеров

Авторское резюме

Состояние вопроса. Ленточные конвейеры являются критически важными транспортными системами в горнодобывающей промышленности, производстве и логистике. Непредвиденные отказы приводят к дорогостоящим простоям и возникновению рисков безопасности. Существующие системы контроля, основанные на традиционных пороговых методах, часто вызывают ложные срабатывания из-за кратковременных технологических помех и не обеспечивают своевременного обнаружения зарождающихся дефектов. В связи с этим актуальной задачей является разработка методов фильтрации и анализа сигналов, устойчивых к переходным шумам. Целью исследования является разработка и обоснование комплексного метода автоматизированного мониторинга на базе мультисенсорной системы и алгоритмов временной обработки данных для раннего обнаружения аномалий и предупреждения аварийных ситуаций.
Материалы и методы. Предложенный метод интегрирует мультисенсорную систему, включающую датчики натяжения, отклонения, перегрузки, провисания и акустические датчики, с централизованным блоком управления. Обработка данных выполняется во временной области с использованием адаптивных пороговых значений, сформированных на основе статистических характеристик сигналов, полученных в период штатной эксплуатации конвейера. Обнаружение аномалий основано на анализе последовательных превышений пороговых значений в заданном временном окне, что позволяет уменьшить влияние случайных помех и кратковременных выбросов.
Результаты. Предложена архитектура мультисенсорной системы мониторинга с дублированием критически важных датчиков. Разработан метод обработки данных во временной области с адаптивными пороговыми значениями, настраиваемыми по архивным данным периодов безаварийной эксплуатации. Теоретически и экспериментально обосновано, что процедура принятия решений по серии последовательных превышений в пределах заданного временного окна обеспечивает отделение аномальных событий от случайных шумов. Продемонстрировано более устойчивое обнаружение смещения ленты, перегрузок и аномальных акустических сигналов по сравнению

© Кожубаев Ю.Н., Градецкий А.А., Федоров К.Ю., 2026
Вестник ИГЭУ, 2026, вып. 5, с. 79–88.

с контролем единичных превышений порога. Метод обеспечивает регистрацию данных в реальном времени и поддерживает прогнозную аналитику посредством интеграции алгоритмов машинного обучения.
Выводы. Совокупность полученных результатов обеспечивает достижение цели исследования – повышение надежности ленточного конвейера и создание научно-методической базы для стратегий технического обслуживания на основе состояния. Практическая ценность предложенного метода заключается в сокращении незапланированных простоев и снижении рисков безопасности на промышленных предприятиях. Дальнейшее развитие исследований в этой области связано с экспериментальной оценкой предложенного метода на действующих производственных объектах, выполнением технико-экономического анализа его применения и последующей интеграцией методов машинного обучения для развития средств прогнозной аналитики.

Ключевые слова: ленточный конвейер, обнаружение аномалий, прогнозируемое техническое обслуживание, мониторинг состояния, промышленный Интернет, временная фильтрация сигналов

Yuriy Nurgalievich Kozhubaev
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor, Higher School of Cyber-Physical Systems Management, Russia, St. Petersburg, e-mail: kozhubaev_yun@spbstu.ru

Arseniy Aleksandrovich Gradetskiy
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Student of Higher School of Cyber-Physical Systems Management, Institute of Computer Science and Cybersecurity, Russia, St. Petersburg, e-mail: gradetskij.aa@edu.spbstu.ru

Kirill Yuryevich Fedorov
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Student of Higher School of Cyber-Physical Systems Management, Institute of Computer Science and Cybersecurity, Russia, St. Petersburg, e-mail: fedorov.kyu@edu.spbstu.ru

Comprehensive anomaly detection method for predictive maintenance of belt conveyors

Abstract

Background. Belt conveyors are critical transport systems in the mining, manufacturing, and logistics industries. Unforeseen failures lead to costly downtime and safety risks. Existing monitoring systems based on traditional threshold methods often trigger false alarms due to transient process disturbances and fail to provide timely anomaly detection. In this regard, the development of signal filtering and analysis methods robust to transient noise is a pressing task. The aim of the study is to develop and substantiate a comprehensive automated monitoring method based on a multisensor system and temporal data processing algorithms for early detection of anomalies and the prevention of emergency situations.
Materials and methods. The proposed method integrates a multi-sensor system comprising tension, misalignment, overload, sag, and acoustic sensors with a centralized control unit. Data processing is performed in the time domain using adaptive threshold values derived from the statistical characteristics of signals obtained during normal conveyor operation. Anomaly detection is based on analyzing consecutive threshold exceedances within a specified time window, which mitigates the impact of random noise and transient spikes.
Results. An architecture for a multisensor monitoring system featuring redundancy for critical sensors has been proposed. A time-domain data processing method utilizing adaptive thresholds has been developed to filter out random noise and sporadic spikes. It has been theoretically and experimentally demonstrated that the decision-making procedure based on a series of consecutive exceedances within a specified time window enables the separation of anomalous events from random noise. It is demonstrated that employing a criterion based on the accumulation of consecutive exceedances ensures more robust detection of belt misalignment, overloads, and anomalous acoustic signals compared to monitoring individual threshold violations. The method enables real-time data recording and supports predictive analytics through the integration of machine learning algorithms.
Conclusions. The results achieved fulfill the research objective: to enhance belt conveyor reliability and establish a foundation for condition-based maintenance strategies. The practical value lies in reducing unplanned downtime and mitigating safety risks at industrial facilities. Future work will focus on experimentally evaluating the proposed method at operational production sites, conducting a cost-benefit analysis of its implementation, and subsequently integrating machine learning techniques to advance predictive analytics capabilities.

Key words: belt conveyor, anomaly detection, predictive maintenance, condition monitoring, Industrial Internet, temporal signal filtering

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.5.079-088

Введение. Ленточные конвейеры широко используются для транспортировки сыпучих материалов в таких отраслях, как горнодобывающая промышленность, сельское хозяйство, автомобилестроение и переработка отходов. Их непрерывная работа имеет важное значение для эффективности производства, а любой неожиданный отказ может привести к значительным экономическим потерям и рискам безопасности. Традиционные системы мониторинга основаны на дискретных

датчиках (например, выключателях с тяговым шнуром, детекторах раскачивания ленты), которые реагируют только после возникновения неисправности и часто не способны прогнозировать начинающиеся отказы [1, 2].

Последние достижения в области сенсорных технологий и анализа данных открыли возможность предиктивного технического обслуживания, при котором состояние оборудования оценивается в режиме реального времени, а техническое обслуживание проводится только тогда, когда показатели демонстрируют признаки ухудшения. В ряде патентов и публикаций предложены усовершенствованные схемы мониторинга. Например, в российском патенте RU147927 [3] описывается конвейер с контроллером на основе нечеткой логики, который регулирует приводные и натяжные барабаны на основе измерений натяжения, но его фиксированная база правил ограничивает адаптивность к непредвиденным сценариям. В другом патенте, RU2803670 [4], представлен магнитный сканер для обнаружения обрывов троса на конвейерных лентах, однако система дорога и сложна в установке. Китайские патенты CN117856691 [5] и CN115173770 [6] сосредоточены на усовершенствованном управлении двигателем (надежные наблюдатели, предиктивное управление), но не рассматривают целостный мониторинг состояния механических компонентов конвейера.

Общим недостатком существующих решений является отсутствие интегрированного подхода, который бы объединял различные типы датчиков (механические, акустические, электрические) с интеллектуальными алгоритмами, способными отличать подлинные аномалии от фонового шума. Кроме того, большинству систем не хватает механизмов самокалибровки, адаптирующихся к изменяющимся условиям эксплуатации.

В системах контроля технического состояния традиционно используются пороговые методы: сигнал сравнивается с некоторым фиксированным уровнем и при его превышении формируется аварийное сообщение. Недостаток такого подхода заключается в том, что он одинаково реагирует как на опасное отклонение, так и на случайное, вызванное кратковременной помехой. Повысить помехоустойчивость можно путем введения зоны нечувствительности, однако это увеличивает время обнаружения и может привести к пропуску начальной стадии аварии. В предлагаемом решении вместо мгновенной оценки состояния анализируется поведение параметра в динамике на некотором временном интервале. Смысл такого подхода состоит в следующем: шумовые отклонения не образуют устойчивых серий и не повторяются систематически, а развивающийся дефект проявляется в виде повторяющихся или последовательных отклонений от нормы. Это свойство дает возможность различать случайные помехи и начинающиеся неисправности, не снижая чувствительности системы и не добавляя задержек в работу алгоритма.

Предлагаемый подход не является новым способом обработки сигналов в строгом математическом смысле, а представляет собой применение известных принципов статистического обнаружения к задаче мониторинга ленточных конвейеров. Если случайные помехи приводят преимущественно к одиночным выбросам измеряемого параметра, то развитие неисправности сопровождается устойчивым отклонением сигнала, наблюдаемым в течение некоторого времени. Именно поэтому решение принимается не по факту разового превышения порога, а по совокупности последовательных превышений.

Целью настоящего исследования является разработка комплексного автоматизированного метода мониторинга [7] и управления ленточными конвейерами, который позволяет решить следующие задачи:

- интегрирует множество датчиков (натяжения, отклонения, перегрузки, провисания, акустических) в единую систему сбора данных;
- обрабатывает данные датчиков во временной области, используя адаптивные пороговые значения, полученные на основе истории безотказной работы;
- обнаруживает аномалии путем подсчета превышений пороговых значений за заданный временной интервал или последовательно, тем самым уменьшая количество ложных срабатываний;
- поддерживает непрерывную регистрацию и аварийные оповещения оператора в реальном времени и будущую интеграцию с машинным обучением для прогнозной аналитики.

Методы исследования. Система мониторинга устанавливается на типичном ленточном конвейере, включающем приводной барабан, натяжной барабан, опциональный дополнительный приводной барабан и отклоняющий барабан, и использует следующие датчики (рис. 1):

1. *Датчики натяжения* (аналоговые или цифровые тензодатчики, оптические, ультразвуковые или индуктивные датчики), расположенные в точках набегания и сбегания ленты на каждом приводном барабане. Они измеряют натяжение ленты в горизонтальном, вертикальном, радиальном или тангенциальном направлениях, обеспечивают точное измерение натяжения ленты в критических точках, передавая аналоговые сигналы в блок управления, который обрабатывает полученные данные для оценки распределения нагрузки по всей длине ленты.

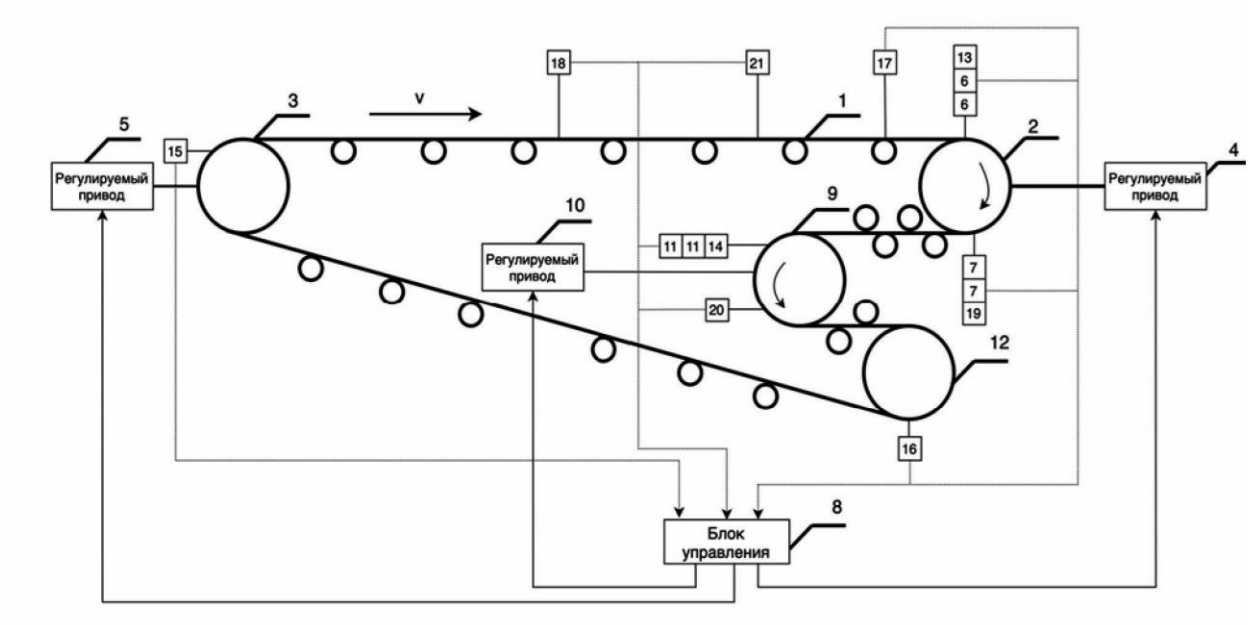


Рис. 1. Схема ленточного конвейера и расположения датчиков

2. *Датчики схода ленты* (электронные, емкостные, индуктивные, оптические датчики), установленные вблизи приводных и натяжных барабанов с возможностью детектирования направления схода ленты в точках сбегания. Они позволяют своевременно выявлять отклонения в движении ленты и предотвращать ее сход. В случае обнаружения отклонений блок управления принимает меры по корректировке работы приводов или активации аварийных сигналов. Дополнительно датчики схода ленты устанавливаются вблизи точки сбегания с натяжного барабана и вблизи точки сбегания с отклоняющего барабана, что позволяет контролировать движение ленты по всей длине конвейера.

3. *Датчики перегрузки* (пьезоэлектрические датчики, аналоговые или цифровые сенсоры перегрузки, оптические сенсоры), установленные над лентой для определения чрезмерной нагрузки материала. Датчик перегрузки обеспечивает защиту системы от потенциальных повреждений, фиксируя превышение допустимой нагрузки на ленте и активируя светозвуковое оповещение для информирования операторов о возникших проблемах.

4. *Датчики провисания* (ультразвуковые датчики, лазерные сенсоры, индуктивные устройства), расположенные между роликоопорами для контроля провисания ленты. Для комплексного анализа провисания ленты большой длины устанавливаются дополнительные датчики провисания на одинаковом расстоянии друг от друга, что позволяет точно отслеживать провисание на всей длине конвейера. Эти датчики передают сигналы в блок управления, который обрабатывает полученные данные для регулирования работы конвейера и предотвращения повреждений системы.

5. *Акустические/вибрационные датчики* (акселерометры, виброметры, микрофоны, пьезоэлектрические датчики), размещаемые рядом с приводными барабанами для регистрации аномальных звуков (например, свистящего звука от трения или иных звуков). Датчики шума настраиваются на высокочастотный сигнал и устанавливаются вблизи приводных барабанов, чтобы зафиксировать спектр шума при возникновении предаварийных или аварийных режимов работы приводных барабанов. Датчики шума могут быть как аналоговыми, так и цифровыми [8].

Критические датчики дублируются в ключевых местах для обеспечения отказоустойчивости. Дублирование датчиков обеспечивается дублированием сенсоров на ключевых позициях и автоматическим переключением на резервный канал при отказе. Все датчики подключены к центральному блоку управления (вычислительному устройству, МРС-контроллеру), который последовательно выполняет сбор, фильтрацию, проверку достоверности и анализ данных в соответствии с заложенным алгоритмом принятия решений [9].

Сбор данных измерений датчиков выполняют следующим образом:

- измеряя натяжение ленты вдоль одного или нескольких направлений (горизонтальное, вертикальное, осевое, радиальное, тангенциальное) с использованием аналоговых или цифровых тензодатчиков, оптических, ультразвуковых и индуктивных сенсоров;
- измеряя момент на приводных барабанах с использованием аналоговых или цифровых датчиков момента, магнитных и оптических сенсоров;
- контролируя сход ленты с использованием электронных, емкостных, индуктивных и

оптических датчиков в горизонтальном или вертикальном направлениях;

• фиксируя перегрузки ленты с помощью пьезоэлектрических датчиков, аналоговых или цифровых сенсоров перегрузки и оптических сенсоров;

• измеряя провисания ленты между роликоопорами с помощью ультразвуковых датчиков, лазерных сенсоров и индуктивных устройств [10];

• осуществляя мониторинг шума и вибраций с использованием акселерометров, виброметров, микрофонов и пьезоэлектрических датчиков [11].

Сигналы датчиков дискретизируются с соответствующей частотой и преобразуются в цифровую форму. При выборе датчиков учитывались условия их размещения на конвейере: все применяемые устройства имеют пылевлагозащитное исполнение не ниже IP65, а для оптических и лазерных сенсоров (датчики перегрузки и провисания) предусмотрена защита линз от оседания пыли. В случае сильных электромагнитных помех, характерных для частотно-регулируемых приводов, аналоговая передача сигналов заменена на цифровые интерфейсы с экранированными линиями связи.

Для уменьшения влияния акустических помех на показания шумовых датчиков применяется фильтр высоких частот, который подавляет сигналы ниже заданного уровня среза. Это позволяет отсечь низкочастотные вибрации, не связанные с работой приводных барабанов, и выделить высокочастотную составляющую, характерную для предаварийных режимов.

Встроенный контроль достоверности данных выполняется путем сравнения показаний взаимосвязанных датчиков. Если в течение заданного интервала времени сигналы с разных сенсоров, отражающих близкие по физическому смыслу параметры, изменяются разнонаправленно, система маркирует такие данные как недостоверные и при выработке управляющих решений опирается на резервные каналы либо на предшествующие достоверные значения. Это позволяет отличить сбой отдельного датчика от реального изменения состояния оборудования.

Дополнительным фактором повышения достоверности является использование нескольких независимых источников информации. В производственных условиях показания отдельных датчиков могут изменяться под воздействием запыленности, вибраций, повышенной влажности или электромагнитных помех. В этом случае окончательное решение принимается только после сопоставления информации, поступающей по нескольким измерительным каналам, что позволяет снизить вероятность ошибочной диагностики.

Данные снабжены временными метками и хранятся в памяти вычислительного устройства. Связь между датчиками и блоком управления может осуществляться по проводным или беспроводным каналам. Передача данных на МРС-регулятор может быть осуществлена как проводным (подключение по кабелю Ethernet), так и беспроводным способом (Profibus, Profinet, OPC UA или иного протокола промышленного интернета). Передача аварийного сигнала оператору осуществляется на внешние устройства (ППК, серверы), а также на звуковые и световые оповещатели. Взаимодействие с внешними системами управления реализуется через стандартные промышленные протоколы (OPC UA, MQTT) и API с использованием проводных (RS-485, Ethernet) или беспроводных (Wi-Fi, Bluetooth) каналов связи с последующим логированием данных в формате CSV и базах данных [12].

В предлагаемой архитектуре принцип надежности пересмотрен за счет введения функциональной избыточности, которая реализована на двух уровнях. Первый уровень – аппаратное дублирование критических датчиков, второй уровень – информационная избыточность, при которой контролируемые параметры имеют перекрывающиеся физические смыслы. Например, увеличение шума в районе приводного барабана и одновременное возрастание натяжения ленты с высокой вероятностью указывают на одну и ту же развивающуюся проблему – повышенное трение или заклинивание. Если один из этих датчиков выходит из строя, второй продолжает фиксировать косвенные признаки неисправности, позволяя системе сохранить диагностическую функцию.

Кроме того, в структуру управления заложен режим деградационного функционирования. При отказе одного или двух малозначимых датчиков общая логика работы не блокируется, а переключается на упрощенный контроль по оставшимся каналам. Аварийная остановка конвейера происходит только при подтверждении аномалии несколькими независимыми сенсорами либо при отказе датчиков, отвечающих за критически важные параметры, непосредственно влияющие на безопасность.

Таким образом, в системе реализован принцип отказоустойчивости с сохранением функциональности, при котором потеря отдельных измерительных каналов не приводит к полной потере управляемости и не увеличивает риск аварийной ситуации. Напротив, наличие нескольких перекрывающихся источников информации повышает достоверность принимаемых решений по сравнению с системами, использующими единичные датчики.

С точки зрения теории надежности предложенная структура относится к системам с функциональным резервированием. В подобных системах работоспособность диагностической функции определяется не состоянием отдель-

ного измерительного канала, а сохранением достаточного объема информации, необходимого для принятия диагностического решения.

Предлагаемый алгоритм построен как многоступенчатая процедура, в которой решение о наличии аномалии принимается с учетом временной структуры сигнала, в отличие от стандартных схем, где порог срабатывает однократно и задействует правило накопления: отклонение считается подтвержденным только при многократном или последовательном превышении порогового уровня в течение определенного интервала.

В настоящем исследовании под интеллектуальной обработкой данных понимается автоматизированная обработка измерительной информации, включающая фильтрацию сигналов, сравнение с эталонными значениями, анализ временной структуры отклонений и объединение диагностических признаков, полученных от различных типов датчиков. Формирование диагностического заключения осуществляется без непосредственного участия оператора на основе заранее заданных правил принятия решений.

Архитектура автоматизированной системы принятия решений включает пять функциональных уровней (рис. 2): сбор измерительной информации; агрегирование данных; предварительная обработка данных; обнаружение аномалий; формирование управляющих воздействий. Такое разделение обеспечивает последовательную обработку информации и позволяет локализовать возможные ошибки на каждом этапе анализа.

Теоретическим основанием для правила фиксации аномалии по серии последовательных превышений служит различие в статистических свойствах шума и сигнала неисправности. Шумовые составляющие в измерениях имеют случайный, некоррелированный характер, что означает, что их выбросы распределены во времени хаотично и редко следуют друг за другом. Изменение параметра при появлении дефекта носит направленный характер и сохраняется на нескольких последовательных отсчетах.

Вычислительная процедура обнаружения аномалий включает в себя четыре последовательных этапа:

1. *Определение базовых (эталонных) значений*. В течение начального периода обучения система записывает средние и пиковые значения каждого параметра в нормальных условиях. Эталонное значение рассчитывают на основе исторических данных бесперебойной безаварийной работы ленточного конвейера и среднего или пиковых значений параметров. Для определения допустимого диапазона изменения контролируемого параметра адаптивное пороговое значение может быть рассчитано по выражению

$$T_i = \mu_i + k\sigma_i ,$$

где T_i – пороговое значение для i-го контролируемого параметра; μ_i – среднее значение параметра, определенное по данным безаварийной эксплуатации; σ_i – среднеквадратическое отклонение; k – коэффициент чувствительности, выбираемый в зависимости от условий эксплуатации.

Такой способ задания порога позволяет учитывать естественный разброс измерений и снижает вероятность ложных срабатываний при сохранении чувствительности алгоритма.

Величина отклонения определяется как разность между текущим и эталонным значениями контролируемого параметра:

$$\Delta_i = x_i - \mu_i ,$$

где x_i – текущее значение параметра; μ_i – соответствующее эталонное значение.

Эти базовые значения сохраняются и могут быть скорректированы вручную оператором или автоматически перекалиброваны при изменении условий эксплуатации (например, другой тип материала, скорость ленты). Калибровка эталонов производится при изменении условий работы или вручную через интерфейс оператора.

2. *Установка пороговых значений и правил подсчета.* Определяются отклонения контролируемых параметров путем сравнения агрегированных значений с эталонными значениями при помощи фиксации аномального состояния при превышении порогового значения заданное количество раз в течение интервала времени или заданное количество раз подряд. Такой подход согласуется с известными результатами теории вероятностей: вероятность того, что случайный процесс сгенерирует серию из нескольких последовательных выбросов за пороговый уровень, уменьшается экспоненциально с ростом длины серии. Иными словами, единичный всплеск с высокой вероятностью является помехой, тогда как серия всплесков указывает на изменение физического состояния объекта контроля. Такой подход позволяет исключить ложные срабатывания, вызванные случайными выбросами или кратковременными помехами [13].

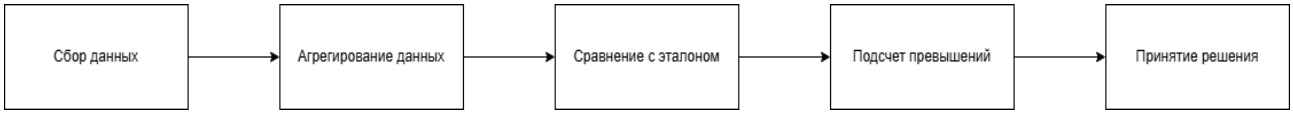


Рис. 2. Алгоритм обнаружения аномалий

3. *Непрерывный мониторинг*. Обработку данных измерений, полученных с мультисенсорной системы датчиков, выполняют во временном представлении таким образом, что определяют отклонения путем сравнения агрегированных значений с эталонными значениями. В частности, могут определяться отклонения редуктора, приводного барабана, конвейерной ленты. Обработку данных во временном представлении в течение интервала времени осуществляют путем обработки данных с использованием весовых коэффициентов, аналитических методов или искусственных нейронных сетей.

4. *Адаптация*. Осуществляется адаптация алгоритмов анализа с помощью машинного обучения [14, 15] или через обновление программного обеспечения, при этом адаптация происходит с учетом полученных отклонений. В частности, адаптация алгоритмов анализа с учетом изменений нагрузки может быть осуществлена посредством алгоритмов предиктивного управления в MPC-регуляторе, а также с помощью машинного обучения или через обновление программного обеспечения [16].

Результаты обработки данных с мультисенсорной системы фиксируются в памяти вычислительного устройства. К ним относятся данные о выявленных отклонениях: результаты вычислений по натяжению ленты, крутящему моменту, нагрузке на электроприводы, провисанию ленты и уровню акустического шума, а также сигналы управления модуляцией инвертора [17].

По результатам обработки данных с помощью вычислительного устройства формируют управляющий сигнал, передаваемый далее на электропривод приводного барабана конвейера, электропривод натяжного барабана конвейера, электропривод отклоняющего барабана конвейера.

При обнаружении признаков неисправности, например увеличения частоты шума или изменения спектра звука, блок управления автоматически снижает скорость вращения электропривода. Это позволяет уменьшить механическую нагрузку на систему и предотвратить развитие поломки. Дополнительно активируется светозвуковое оповещение для предупреждения оператора [18].

Результаты исследования. Предлагаемая система мониторинга и управления ленточным конвейером обеспечивает комплексный подход к контролю состояния оборудования, что способствует повышению его надежности и снижению затрат на обслуживание. Интеграция различных типов датчиков и современных технологий анализа данных создает условия для безопасной и эффективной работы ленточного конвейера в различных отраслях промышленности.

При эксплуатации ленточного конвейера могут возникать неисправности промышленного оборудования, которые могут привести к снижению эффективности или даже к простоям. Для решения этой проблемы предлагается применение способа автоматизированного мониторинга и управления ленточным конвейером, включающего сбор, хранение и мониторинг состояния отдельных элементов конвейера на основе предиктивной аналитики.

На конвейере устанавливаются датчики схода ленты вблизи приводных барабанов с возможностью детектирования направления схода ленты в точках сбегания. Сигналы, поступающие с этих датчиков, отправляются в блок управления, который анализирует положение ленты. В случае выхода ленты за пределы допустимого положения блок управления принимает решение о корректировке работы приводов или активации аварийных сигналов. Дополнительно установленные датчики схода ленты вблизи точки сбегания с натяжного барабана и вблизи точки сбегания с отклоняющего барабана позволяют контролировать движение ленты по всей длине конвейера.

При возникновении на конвейерной ленте препятствия или постороннего предмета срабатывает датчик наличия перегрузки ленты, который установлен вблизи приводного барабана на небольшой высоте от ленты. Датчик перегрузки выдает цифровой сигнал в блок управления, который в свою очередь активирует светозвуковое оборудование, предупреждая операторов о наличии проблемы на конвейере. В случае обнаружения перегрузки блок управления снижает скорость вращения приводов или останавливает систему для предотвращения повреждений.

Для контроля провисания ленты устанавливается датчик провисания ленты, расположенный между верхними роликоопорами. Этот датчик может быть аналоговым или цифровым. Сигнал от датчика провисания передается в блок управления, где он анализируется. В случае превышения допустимого уровня провисания блок управления направляет сигнал на регулировку скорости приводов или на активацию аварийной сигнализации.

Для детектирования свистящего звука от трения или иных звуков установлены датчики шума, которые настроены на высокочастотный сигнал. Эти датчики устанавливаются вблизи приводных барабанов, чтобы зафиксировать спектр шума при возникновении предаварийных или аварийных режимов работы приводных барабанов. Датчики шума подключаются к блоку управления, который обрабатывает поступающие данные.

Для уменьшения влияния посторонних шумов применяются фильтры для шумоподавления. Одним из таких решений является внедрение фильтра высоких частот (ФВЧ), который используется в комбинации с датчиками шума. ФВЧ фильтрует сигналы с частотой ниже заданного

уровня среза, что позволяет подавить низкочастотные помехи и улучшить точность измерений.

Датчики шума передают сигналы в блок управления, где их данные анализируются для обнаружения аномальных звуков, характерных для возникновения неисправностей, таких как перегрузка приводных барабанов или износ элементов конвейера. При обнаружении признаков неисправности, например увеличения частоты шума или изменения спектра звука, блок управления автоматически снижает скорость вращения электропривода. Это позволяет уменьшить механическую нагрузку на систему и предотвратить развитие поломки. Дополнительно активируется светозвуковое оповещение для предупреждения оператора. Такое управление оборотами электропривода минимизирует риск повреждения приводных барабанов и сохраняет работоспособность конвейера.

Результаты демонстрируют, что предложенный многосенсорный метод с временной фильтрацией на основе подсчета превышений порога эффективно обнаруживает различные неисправности конвейера, отклоняя при этом транзиентные шумы. Это является значительным улучшением по сравнению с традиционными пороговыми системами, которые срабатывают на любое единичное превышение, что приводит к частым ложным тревогам.

По сравнению с контроллером нечеткой логики (патент RU147927), предложенный подход не полагается на фиксированную базу правил; вместо этого он изучает нормальное поведение и адаптирует пороговые значения с течением времени. В отличие от магнитного сканера (патент RU2803670), предложенная система использует недорогие, широкодоступные датчики и может быть модернизирована на существующих конвейерах с минимальными изменениями.

Способность коррелировать данные от нескольких типов датчиков (например, одновременное увеличение натяжения и акустической эмиссии) может еще больше повысить точность диагностики. Важно отметить, что использование нескольких типов датчиков не только преследует цель повышения информативности, но и выполняет резервирующую функцию. В условиях реальной эксплуатации отказ отдельного сенсора не является критическим событием, поскольку его диагностическая роль частично компенсируется данными с других каналов, измеряющих взаимосвязанные параметры. Такое построение системы в конечном счете повышает отказоустойчивость АСУ ТП по сравнению с системами, где утрата единственного датчика приводит к полной потере контроля над соответствующим параметром. Внедрение предиктивной аналитики в систему мониторинга позволяет не только фиксировать текущие параметры работы конвейера, но и предсказывать возможные неисправности на основе анализа собранных данных. Это значительно повышает эффективность эксплуатации оборудования и безопасность производственного процесса.

Вопрос экономической оправданности предлагаемого решения также требует внимания. Увеличение капитальных затрат на мультисенсорную систему должно оцениваться с учетом сокращения потерь от аварийных простоев. По оценкам, стоимость одного часа внеплановой остановки конвейера средней длины в горнодобывающей отрасли сопоставима с затратами на оснащение системы всеми перечисленными датчиками. Следовательно, предотвращение даже одного серьезного инцидента в год делает предлагаемое решение экономически оправданным. При этом количественная оценка окупаемости требует учета конкретных условий эксплуатации и может быть выполнена на этапе проектирования системы для каждого предприятия индивидуально.

Выводы. Представленный новый автоматизированный метод мониторинга и управления ленточными конвейерами интегрирует разнообразный набор датчиков (натяжения, схода, перегрузки, провисания, акустических) и применяет надежный алгоритм обнаружения аномалий во временной области, основанный на адаптивных пороговых значениях и подсчете количества превышений.

К основным научным результатам проведенного исследования можно отнести следующее:

1. Разработана архитектура многосенсорной системы мониторинга ленточного конвейера, в которой отказоустойчивость обеспечивается не только аппаратным дублированием критических датчиков, но и информационной избыточностью – перекрытием диагностических функций между датчиками разных типов. Такой подход позволяет сохранять работоспособность системы при выходе из строя отдельных измерительных каналов.

2. Предложен метод обработки данных во временном представлении, при котором отклонения определяются путем сравнения агрегированных значений с эталонными значениями и фиксации превышения порогового значения заданное количество раз в течение интервала времени или подряд, что позволяет отфильтровывать случайные помехи.

3. Установлено, что эталонные значения должны рассчитываться на основе исторических данных бесперебойной работы с возможностью калибровки при изменении условий эксплуатации.

4. Показана возможность адаптации алгоритмов анализа с использованием машинного обучения или обновления программного обеспечения на основе накопленных данных об отклонениях.

Теоретическая значимость исследований состоит в обосновании перехода от точечных пороговых решений к критериям накопления

применительно к задачам мониторинга ленточных конвейеров. Показано, что такой подход позволяет разделить случайные отклонения сигнала и систематические отклонения, связанные с развитием неисправностей, без потери быстродействия и без снижения чувствительности измерительных каналов.

Разработанный метод соответствует поставленным задачам: интеграция разнородных датчиков; обработка данных во временной области с адаптивными порогами; обнаружение аномалий с фильтрацией ложных срабатываний; поддержка прогнозной аналитики. Предложенный подход повышает надежность ленточного конвейера, сокращает незапланированные простои и создает основу для стратегий предиктивного обслуживания.

Полученные результаты следует рассматривать как основу для дальнейшей экспериментальной проверки предложенной архитектуры. В последующих исследованиях предполагается выполнить количественную оценку надежности системы, определить экономическую эффективность ее внедрения и провести опытную эксплуатацию на действующих ленточных конвейерах.

Список литературы

1. **Blazej R., Jurdziak L., Kozłowski T.** Conveyor belt condition evaluation via non-destructive testing techniques // Measurement. – 2024. – Vol. 215. – P. 112856. DOI: 10.1016/j.measurement.2024.112856.
2. **Li H., Zhao W., Zhang Y.** LSTM-based fault detection in industrial systems // Sensors. – 2021. – Vol. 21, No. 5. – P. 1789. DOI: 10.3390/s21051789.
3. **Пат.** на полезную модель № 147927 U1 Российская Федерация, МПК B65G 23/44 (2006/01). Ленточный конвейер: № 2014124594: заявл. 17.06.2014: опубл. 20.11.2014 / И.М. Семёнов, Ю.Н. Кожубаев; Бюл. № 32.
4. **Пат.** № 2803670 Российская Федерация. Способ и система сканирования состояния тросовой транспортерной ленты ленточного конвейера. – 2023.
5. **Пат.** № 117856691 Китай. Способ оптимального управления с использованием робастного наблюдателя нагрузки. – 2024.
6. **Пат.** № 115173770 Китай. Система предиктивного управления синхронной машиной с PID-регулятором. – 2022.
7. **Anusha P.V.S., Peravali S., Koti Reddy D.V.R.** Digital transformation technologies for conveyor belts predictive maintenance: a review // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2024. – Vol. 36, No. 1. – P. 639–646. DOI: 10.11591/ijeecs.v36.i1.pp639-646.
8. **Галкин В.И., Дмитриев В.Г.** Современные методы диагностики ленточных конвейеров // Горное оборудование и электромеханика. – 2022. – № 3. – С. 24–31.
9. **Unsupervised** multimodal fusion of in-process sensor data for advanced manufacturing process monitoring / M. McKinney, A. Garland, D. Cillessen, J. Adamczyk // Journal of Manufacturing Systems. – 2025. – Vol. 78. – P. 271–282. DOI: 10.1016/j.jmsy.2024.12.003.
10. **Acoustic** emission method for conveyor belt damage detection / T. Kozłowski, J. Wodecki, R. Zimroz, et al. // Measurement. – 2023. – Vol. 206. – P. 112256. DOI: 10.1016/j.measurement.2023.112256.
11. **Vibration-based** diagnostics of conveyor belt damage / P. Dąbek, J. Wodecki, R. Zimroz, A. Wyłomańska // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2022. – Vol. 168. – P. 108677. DOI: 10.1016/j.ymssp.2022.108677.
12. **Zhang L., Zhu Y., Liu X.** Digital twin-based smart manufacturing: challenges and opportunities // International Journal of Production Research. – 2021. – Vol. 59, No. 17. – P. 5290–5303. DOI: 10.1080/00207543.2021.1927224.
13. **A deployable** IIoT framework for condition-based maintenance: case study on LSTM RUL prediction / S. Pani, B.K. Pattanayak, B.K. Gupta, A.K. Habboush // Tikrit Journal of Engineering Sciences. – 2025. – Vol. 32, No. 3. – P. 2706. DOI: 10.25130/tjes.32.3.6.
14. **Zhang K., Jiang T.** Deep learning for time-series prediction in IIoT: progress, challenges, and prospects // IEEE Internet of Things Journal. – 2023. – Vol. 9, No. 5. – P. 3456–3467. DOI: 10.1109/JIOT.2022.3215678.
15. **A systematic** literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance / T.P. Carvalho, F.A.A.M.N. Soares, R. Vita, et al. // Computers & Industrial Engineering. – 2019. – Vol. 137. – P. 106024. DOI: 10.1016/j.cie.2019.106024.
16. **Hybrid-sequence** self-learning model: unsupervised anomaly detection and localization in multivariate time series / Y. Wang, M. Xu, H. Liu, J. Zhang // Advanced Engineering Informatics. – 2026. – Vol. 78. – Article 102989. DOI: 10.1016/j.aei.2026.102989.
17. **Machine** learning for predictive maintenance: a multiple classifier approach / G.A. Susto, A. Schirru, S. Pampuri, et al. // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2015. – Vol. 11, No. 3. – P. 812–820. DOI: 10.1109/TII.2014.2349359.
18. **Deep** learning in the industrial Internet of things: potentials, challenges, and emerging applications / M. Chen, Y. Ma, Y. Li, W. Zhang // IEEE Transactions on Industrial Informatics. – 2023. – Vol. 16, No. 12. – P. 7425–7434. DOI: 10.1109/TII.2023.3289123.

References

1. Blazej, R., Jurdziak, L., Kozłowski, T. Conveyor belt condition evaluation via non-destructive testing techniques. *Measurement*, 2024, vol. 215, p. 112856. DOI: 10.1016/j.measurement.2024.112856.
2. Li, H., Zhao, W., Zhang, Y. LSTM-based fault detection in industrial systems. *Sensors*, 2021, vol. 21, no. 5, p. 1789. DOI: 10.3390/s21051789.
3. Semenov, I.M., Kozhubaev, Yu.N. *Lentochnyy konveer* [Belt conveyor]. Patent RF, no. 147927, 2014.
4. Pridorozhnyy, A.G. *Sposob i sistema skanirovaniya sostoyaniya trosovoy transportnoy lenty lentochnogo konveera* [Method and system for scanning the condition of a steel-cord conveyor belt of a belt conveyor]. Patent RF, no. 2803670, 2023.
5. *Sposob optimal'nogo upravleniya s ispol'zovaniem robastnogo nablyudatelya nagruzki* [Optimal control method using a robust load observer]. Patent CN, no. 117856691, 2024.
6. *Sistema prediktivnogo upravleniya sinkhronnoy mashinoy s PID-regulyatorom* [Predictive control system for a synchronous machine with a PID controller]. Patent CN, no. 115173770, 2022.
7. Anusha, P.V.S., Peravali, S., Koti Reddy, D.V.R. Digital transformation technologies for conveyor belts

predictive maintenance: a review. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 2024, vol. 36, no. 1, pp. 639–646. DOI: 10.11591/ijeecs.v36.i1.pp639-646.

8. Galkin, V.I., Dmitriev, V.G. Sovremennye metody diagnostiki lentochnykh konveerov [Modern methods of diagnostics of belt conveyors]. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*, 2022, no. 3, pp. 24–31.

9. McKinney, M., Garland, A., Cillessen, D., Adamczyk, J. Unsupervised multimodal fusion of in-process sensor data for advanced manufacturing process monitoring. *Journal of Manufacturing Systems*, 2025, vol. 78, pp. 271–282. DOI: 10.1016/j.jmsy.2024.12.003.

10. Kozłowski, T., Wodecki, J., Zimroz, R., Błażej, R., Hardygóra, M. Acoustic emission method for conveyor belt damage detection. *Measurement*, 2023, vol. 206, p. 112256. DOI: 10.1016/j.measurement.2023.112256.

11. Dąbek, P., Wodecki, J., Zimroz, R., Wyłomańska, A. Vibration-based diagnostics of conveyor belt damage. *Mechanical Systems and Signal Processing,* 2022, vol. 168, p. 108677. DOI: 10.1016/j.ymssp.2022.108677.

12. Zhang, L., Zhu, Y., Liu, X. Digital twin-based smart manufacturing: challenges and opportunities. *International Journal of Production Research*, 2021, vol. 59, no. 17, pp. 5290–5303. DOI: 10.1080/00207543.2021.1927224.

13. Pani, S., Pattanayak, B.K., Gupta, B.K., Habboush, A.K. A deployable IIoT framework for condition-based maintenance: case study on LSTM RUL prediction. *Tikrit Journal of Engineering Sciences*, 2025, vol. 32, no. 3, p. 2706. DOI: 10.25130/tjes.32.3.6.

14. Zhang, K., Jiang, T. Deep learning for time-series prediction in IIoT: progress, challenges, and prospects. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, vol. 9, no. 5, pp. 3456–3467. DOI: 10.1109/JIOT.2022.3215678.

15. Carvalho, T.P., Soares, F.A.A.M.N., Vita, R., Francisco, R.P., Basto, J.P., Alcalá, S.G.S. A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, vol. 137, p. 106024. DOI: 10.1016/j.cie.2019.106024.

16. Wang, Y., Xu, M., Liu, H., Zhang, J. Hybrid-sequence self-learning model: unsupervised anomaly detection and localization in multivariate time series. *Advanced Engineering Informatics*, 2026, vol. 78, article 102989. DOI: 10.1016/j.aei.2026.102989.

17. Susto, G.A., Schirru, A., Pampuri, S., McLoone, S., Beghi, A. Machine learning for predictive maintenance: a multiple classifier approach. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2015, vol. 11, no. 3, pp. 812–820. DOI: 10.1109/TII.2014.2349359.

18. Chen, M., Ma, Y., Li, Y., Zhang, W. Deep learning in the industrial Internet of things: potentials, challenges, and emerging applications. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2023, vol. 16, no. 12, pp. 7425–7434. DOI: 10.1109/TII.2023.3289123.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ

УДК 621.311.22

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

Илья Андреевич Кокулин
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры прикладной математики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45, e-mail: ilyakokulin@gmail.com

Владимир Николаевич Виноградов
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры химии и химических технологий в энергетике, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-96-08, e-mail: office@ivenser.com

Сергей Дмитриевич Горшенин
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, заведующий кафедрой тепловых электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-34, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Евгений Витальевич Барочкин
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры тепловых электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-13, e-mail: bar@ivenser.com

Постановка и решение обратной задачи диагностики состояния многоступенчатых испарительных установок мгновенного вскипания

Авторское резюме

Состояние вопроса. Многоступенчатые испарительные установки мгновенного вскипания широко применяются в энергетике, химической промышленности и ЖКХ. Такое использование многоступенчатых испарительных установок мгновенного вскипания во многом связано с их эффективной и экономичной работой. Однако следует отметить, что нарушение режима одной из ступеней может приводить к снижению производительности или ухудшению качества готового дистиллята. Своевременная диагностика и устранение неисправностей является актуальной задачей научных исследований.
Материалы и методы. Решение прямых и обратных задач диагностики многоступенчатых испарительных установок мгновенного вскипания выполнено в рамках матричных математических моделей оборудования, построенных на основе балансовых уравнений энергии и массы**.**
Результаты. На основе матричного подхода выполнено моделирование, постановка и решение обратных задач диагностики многоступенчатых испарительных установок мгновенного вскипания с учетом капельного уноса перегретой воды и возможного загрязнения поверхностей нагрева ступени. На базе полученных решений разработаны

© Жуков В.П., Кокулин И.А., Виноградов В.Н., Горшенин С.Д., Барочкин Е.В., 2026
Вестник ИГЭУ, 2026, вып. 5, с. 89–94.

рекомендации по устранению обнаруженных дефектов. Предложены алгоритмы диагностики, которые предполагается реализовать в информационном комплексе мониторинга состояния оборудования многоступенчатых испарительных установок мгновенного вскипания.
Выводы. Для совершенствования и доведения информационной системы до практического использования необходима организация обмена актуальными данными со штатными измерительными приборами реального энергетического оборудования.

Ключевые слова: многоступенчатые испарительные установки, перегретая вода, мгновенное вскипание, капельный унос, прямая задача, обратная задача

Vladimir Pavlovich Zhukov
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-45, e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Ilya Andreevich Kokulin
Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student of Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-45, e-mail: ilyakokulin@gmail.com

Vladimir Nikolaevich Vinogradov
Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Chemistry and Chemical Technologies in Energy Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-96-08, e-mail: office@ivenser.com

Sergei Dmitrievich Gorshenin
Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Head of Thermal Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-34, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Evgeniy Vitalyevich Barochkin
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Thermal Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-13, e-mail: bar@ivenser.com

Formulation and solution of the inverse problem of diagnostics of the state of multi-stage flash evaporative units

Abstract

Background. Multi-stage flash evaporation units (MSF EUs) are widely used in the power generation, chemical, and housing and utilities sectors. This MSF EUs are widely used due to their efficient and cost-effective operation. However, it should be noted that a malfunction in one of the stages can lead to reduced productivity or deterioration in the quality of the finished distillate. Timely diagnostics and troubleshooting are a pressing research objective.
Materials and methods. The solution of direct and inverse problems of diagnostics of MSF EUs is carried out within the framework of matrix mathematical models of equipment, based on the balance equations of energy and mass.
Results. Based on the matrix approach, modeling, formulation and solution of inverse diagnostic problems of MSF EUs have been carried out, taking into account the droplet entrainment of superheated water and possible contamination of the heating surfaces of the stage. Based on the solutions obtained, recommendations have been developed to eliminate the detected defects. Diagnostic algorithms are proposed, which are supposed to be implemented in the information complex for monitoring the condition of MSF EUs equipment.
Conclusions. To improve and bring the information system to practical use, it is necessary to organize the exchange of current data with standard measuring instruments of real power equipment.

Key words: multi-stage evaporation plants, superheated water, instantaneous boiling, drip entrainment, direct problem, inverse problem

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.5.089-094

Введение. Широкое использование испарительных установок мгновенного вскипания выявило ряд узких мест, неисправностей и дефектов, которые приводят к нарушению нормального функционирования оборудования [1–5]. Оперативное выявление этих дефектов и неисправностей позволяет своевременно на них реагировать, минимизируя технологические и финансовые потери [6–10]. К указанным дефектам можно отнести загрязнение поверхностей теплообмена в чистом отсеке установки и нарушение температурного режима. Своевременное обнаружение и исправление таких дефектов позволит обеспечить заданное качество дистиллята в заданном количестве, что обусловливает актуальность ранней диагностики состояния оборудования.

Методы исследования. Решение прямых и обратных задач диагностики многоступенчатых испарительных установок мгновенного вскипания (МИУМВ) выполняется в рамках матрич-

ных математических моделей оборудования, построенных на основе балансовых уравнений энергии и массы**.** Под прямыми задачами для испарительных установок [11, 12] понимается определение температуры и расхода теплоносителей на выходе МИУМВ по заданным входным параметрам теплоносителей, а под обратными задачами – диагностика возможных неисправностей МИУМВ по известным значениям параметров теплоносителей на входе и выходе системы. Следует отметить, что, в зависимости от набора известных параметров, возможны различные постановки обратных задач МИУМВ.

Результаты исследования. Объектом исследования является многоступенчатая испарительная установка, схема потоков теплоносителей в которой приведена на рис. 1.

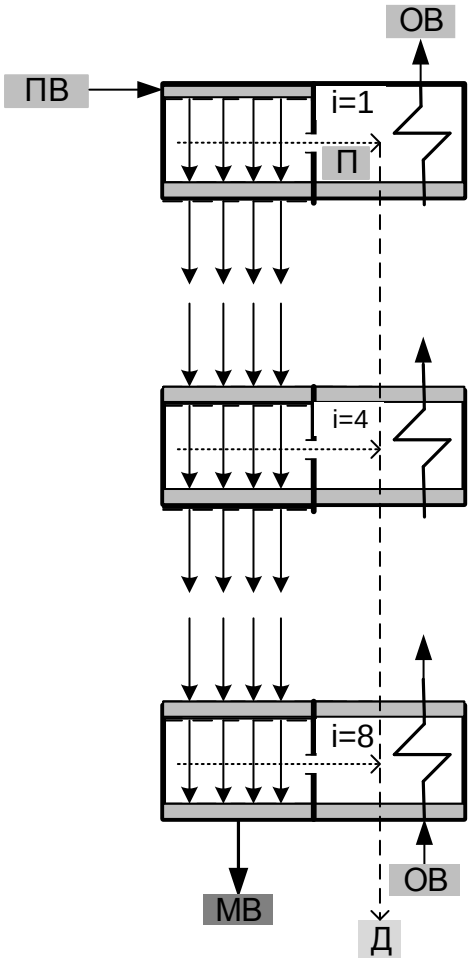


Рис. 1. Схема потоков теплоносителей в многоступенчатой испарительной установке мгновенного вскипания: ПВ – перегретая вода; ОВ – охлаждающая вода; МВ – минерализованная вода; Д – дистиллят; П – пар

Перегретая вода (ПВ) подается в первую ступень, где частично испаряется. Образовавшийся пар (П) переходит в чистый отсек, где за счет теплообмена с охлаждающей водой (ОВ) происходит его конденсация. Полученный при конденсации дистиллят (Д) стекает в нижнюю ступень. Охлаждающая вода, нагреваясь в чистом отсеке за счет теплоты конденсации пара, поступает в следующую верхнюю ступень. В грязном отсеке скапливается минерализованная вода (МВ), обогащенная солями. Между грязным и чистым отсеками часто устанавливается каплеуловитель, предотвращающий капельный унос влаги из грязного отсека.

Целью исследования является постановка и решение обратной задачи диагностики состояния многоступенчатых испарительных установок мгновенного вскипания.

Для достижения поставленной цели предлагается решение следующих задач:

1. Постановка обратной задачи диагностики многоступенчатых испарительных установок мгновенного вскипания и разработка алгоритма ее решения.

2. Решение обратной задачи диагностики испарительной установки для трех вариантов распознаваемых дефектов на примере конкретной схемы многоступенчатой испарительной установки.

Следует отметить, что дефекты могут быть разные и их симптоматика может существенно различаться, а может быть и очень схожа. Часть диагнозов может быть поставлена при ограниченном числе данных, для других, более сложных дефектов или при их сочетании могут потребоваться дополнительные исследования или дополнительные замеры технологических параметров.

Для решения обратных задач диагностики предлагается следующий алгоритм (рис. 2). Сначала в рамках решения прямой задачи задается и рассчитывается режим работы с выбранным тестовым дефектом, определяются выходные параметры согласно разработанной в [3] математической модели. Задавая входные и выходные технологические параметры на вход модуля решения обратной задачи, определяют искомые тестовые дефекты по минимальному значению целевой функции, вид которой может различаться для каждой решаемой задачи.

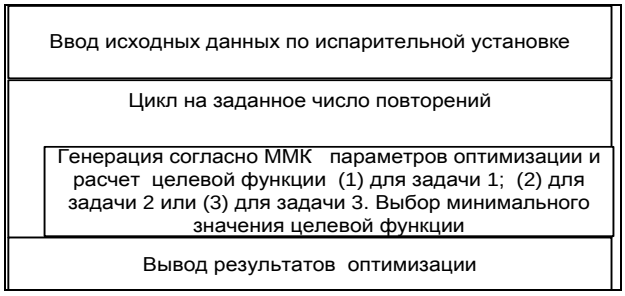


Рис. 2. Алгоритм решения оптимизационной задачи методом Монте–Карло (ММК)

Ниже рассматривается несколько вариантов постановки и решения задач диагностики, начиная с простых и переходя к более сложным дефектам и неисправностям.

Задача 1. Схема анализируемой многоступенчатой испарительной установки представлена на рис. 1. Вертикально расположенные восемь ступеней установки последовательно соединены по дистилляту и охлаждающей воде. Для расчета ее работы в базовом номинальном режиме была разработана математическая модель [3]. В выбранную ступень под номером 4 вносится тестовый дефект – увеличение отложений на поверхности теплообмена в ступени, что приводит к уменьшению коэффициента теплопередачи в заданное число раз. Принимается, что в качестве измерительных приборов на МИУМВ установлены термометры для определения температуры перегретой и охлаждающей воды на входе в каждую ступень. В ходе решения обратной задачи диагностики нужно установить для выбранной тестовой ступени степень ее загрязнения, которое оценивается уменьшением значения коэффициента теплопередачи k_0. Решение обратной задачи в данном случае сводится к решению одномерной оптимизационной задачи. На первом этапе решения оптимизационной задачи формируется целевая функция оптимизации, которая определяется суммой квадратов отклонений замеренных и рассчитанных значений температуры горячего теплоносителя по всем ступеням установки:

$$F_{C1} = \sum_{i=1}^{8} \left(t_i - \tilde{t}_i \right)^2 \Rightarrow \min_{k_4}, \qquad (1)$$

где $\tilde{t}_i$ соответствует замеренной температуре горячего теплоносителя.

Решение сформулированной оптимизационной задачи выполняется методом Монте–Карло [13]. В ходе решения оптимизационной задачи генерируется случайным образом вектор значений искомых параметров и выполняется расчет целевой функции. Найденное значение целевой функции сравнивается с минимальным. Если найденное значение меньше минимального, то минимальное значение обновляется. Указанная процедура повторяется заданное число раз или до достижения требуемой точности решения. Описанный алгоритм решения оптимизационной задачи методом Монте–Карло представлен на рис. 2.

Полученное решение для рассматриваемого примера приводится на рис. 3 в виде зависимости целевой функции от коэффициента теплопередачи в диагностируемой ступени. Тестовое значение коэффициента теплопередачи, которое нужно было определить, и найденное в ходе решения оптимизационной задачи минимальное значение целевой функции приведены в таблице.

Результаты решения задач 1,2,3

№ задачи	Точное значение	Численное решение	Целевая функция
1	$K = 375$	$K_0 = 374{,}4$	$F_{c1} = 0{,}0001$
2	$K = 375$ $n = 4$	$K_0 = 376{,}1$ $n_0 = 4$	$F_{c2} = 0{,}01$
3	$a = 1661$ $b = -160{,}7$	$a_0 = 1650{,}8$ $b_0 = -163{,}8$	$F_{c3} = 0{,}1$

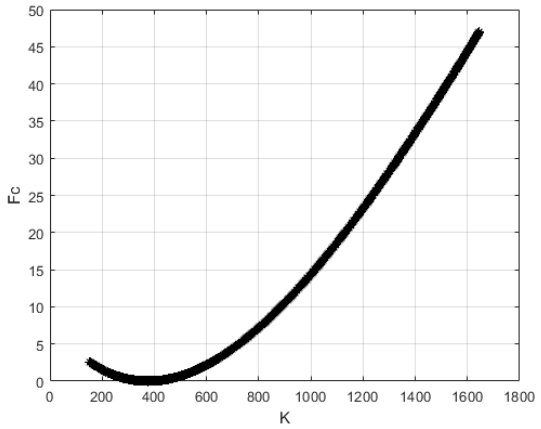


Рис. 3. Решение задачи 1 в виде зависимости целевой функции (1) от параметра оптимизации: определение оптимального значения коэффициента теплопередачи по минимальному значению целевой функции

Задача 2. Более сложный и практически значимый пример соответствует случаю, когда неизвестен номер ступени и степень ее загрязнения. При решении задачи нужно определить два параметра: номер загрязненной ступени n_0 и степень загрязнения k_0. В данном случае вид целевой функции сохраняется, но число параметров оптимизации увеличивается до двух: нужно определить место загрязнения и степень этого загрязнения. Целевая функция при этом записывается в виде

$$F_{C2} = \sum_{i=1}^{8} \left(t_i(k_i) - \tilde{t}_i \right)^2 \Rightarrow \min_{k_i, n}. \qquad (2)$$

Следует отметить, что метод Монте–Карло усложняется при изменении числа параметров оптимизации незначительно. Число генераций вариантов увеличивается, но не становится критическим, как при реализации координатных методов, которые катастрофически усложняются при росте числа параметров оптимизации. К недостаткам метода Монте–Карло можно отнести нахождение для сгенерированных вариантов экстремального значения целевой функции, которое может существенно отличаться от глобального экстремума.

В данной постановке (2) задача имеет два параметра оптимизации, а ее решение наглядно представлено на рис. 4 в виде зависимостей целевой функции от коэффициента теплопередачи для разных ступеней установки. Полученное решение соответствует минимуму целевой функции (рис. 4, кривая 8). Результаты численного решение оптимизационной задачи 2, представленные в таблице, практически совпадают с точным решением.

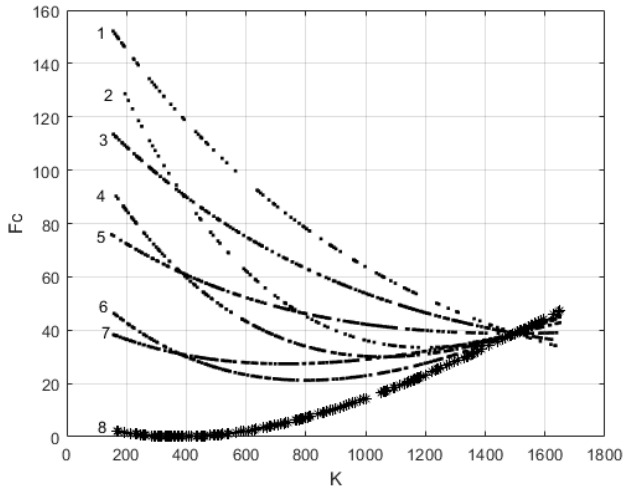


Рис. 4. Зависимость целевой функции от двух параметров оптимизации для решения задачи 2. Определение по минимальному значению целевой функции номера ступени и коэффициента теплопередачи: 1–7 – дефекты в ступнях 1–3 и 5–8; 8 – дефект в ступени 4, которому соответствует минимальное значение целевой функции (2) и найденное решение оптимизационной задачи

Задача 3. Наиболее интересная и практически значимая задача рассматривается в следующей постановке: в общем случае все ступени МИУМВ могут быть загрязнены в разной степени, в этом случае распределение отложений может быть описано функцией, вид которой нужно определить. Данная задача относится к вариационным [14], в ходе решения которых определяется вид функции. В рассматриваемом примере задача решается на классе линейных функций загрязнения ступеней. Решение этой задачи сводится к решению двухпараметрической оптимизационной задачи. В данном случае принимается линейная функция распределения отложений по ступеням вида

$$k_i = a + b * i,$$

где a, b – искомые параметры распределения.

Целевая функция оптимизации для третьей задачи записывается следующим образом:

$$F_{c3} = \sum_{i=1}^{8} \left(t_i(a,b) - \tilde{t}_i \right)^2 \Rightarrow \min_{a,b}. \qquad (3)$$

Решение оптимизационной задачи (3) получено методом Монте–Карло. Заданная и найденная зависимости $k(i)$ приведены на рис. 5. Сравнение этих зависимостей позволяет оценить качество решения вариационной задачи по определению степени загрязнения поверхностей МИУМВ.

В данном случае алгоритм решения обратной задачи следующий: по известным расходам охлаждающей воды и дистиллята и известному распределению температур теплоносителей по ступням определяются квадратичные отклонения точного от диагностируемого распределения температур по ступеням. Практическое совпадение зависимостей для обоих распределений свидетельствует о корректном решении оптимизационной задачи. Численные результаты решения задачи (3) приведены также в таблице.

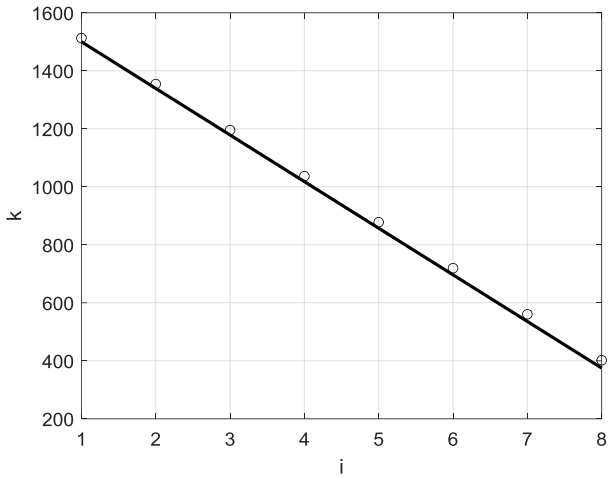


Рис. 5. Точная (линия) и диагностированная (точки) зависимости коэффициента теплопередачи от номера ступени МИУМВ

В ходе дальнейших исследований планируется увеличение числа вариантов задачи диагностики на случай сочетания дефектов загрязнения и возможного капельного уноса перегретой воды.

Выводы. Разработанный алгоритм решения обратной задачи диагностики МИУМВ для трех вариантов распознаваемых дефектов на примере конкретной схемы многоступенчатой испарительной установки позволяет определить место и характер диагностируемых неисправностей.

Более сложные варианты постановки обратной задачи, включающие одновременную диагностику нескольких дефектов, планируются к постановке и решению в ходе дальнейших исследований.

Список литературы

1. **Мошкарин А.В., Мошкарин А.А**. Анализ схем испарительных установок тепловых электростанций. – Иваново, 2007. – 271 с.

2. **Матричная** формализация расчета многоступенчатой испарительной установки мгновенного вскипания / В.П. Жуков, А.В. Мошкарин, Е.В. Барочкин и др. // Состояние и перспективы развития электротехнологии: сб. науч. тр. Междунар. науч.-техн. конф. (XI Бенардосовские чтения). – Иваново, 2003. – С. 182.

3. **Simulation** of Droplet Entrainment in Multistage Flash Evaporating Units / V.P. Zhukov, I.A. Kokulin, V.N. Vinogradov, A.E. Barochkin // Thermal Engineering. – 2023. – Vol. 70, No. 11. – P. 957–963.

4. **Термообессоливающая** установка Exerger [Электронный ресурс]. – Режим доступа. https://storage.yandexcloud.net/startupvillage20/uploads/2e/f35387f3395c325a3bb9a919809c35.pdf (дата доступа 08.11.2022).

5. **Рыжкин В.Я.** Тепловые электрические станции. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 328 с.

6. **Буров В.Д., Дорохов Е.В., Елизаров Д.П.** Тепловые электрические станции. – М.: Изд. дом МЭИ, 2007. – 466 с.

7. **Справочник** по теплообменникам: в 2 т. Т. 1: пер. с англ. / под ред. О.Г. Мартыненко. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 560 с.

8. **Исаченко В.П.** Теплообмен при конденсации. – М.: Энергия, 1977. – 240 с.

9. **Процессы** и аппараты химической технологии: в 5 т. Т. 2 / под ред. А.М. Кутепова. – М.: Логос, 2000. – 480 с.

10. **Касаткин А.Г.** Основные процессы химической технологии. – М.: Химия, 1973. – 750 с.

11. **Самарский А.А., Вабищевич П.Н.** Численные методы решения обратных задач математической физики. – М.: Изд-во ЛКИ, 2009. – 480 с.

12. **Фомичев М.Д., Жуков В.П.** Расчетный анализ влияния неравномерности распределения теплоносителей по сечению градирни на температуру охлажденной воды // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии: сб. науч. тр. Междунар. науч.-техн. конф. (XXII Бенардосовские чтения). – Иваново, 2023. – С. 392–395.

13. **Гмурман В.Е**. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Высш. шк., 1997. – 480 с.

14. **Зельдович Я.Б., Мышкис А.Д.** Элементы прикладной математики. – М.: Наука, 1967. – 648 с.

References

1. Moshkarin, A.V., Moshkarin, A.A. *Analiz skhem isparitel'nykh ustanovok teplovykh elektrostantsiy* [Analysis of schemes of evaporative installations of thermal power plants]. Ivanovo, 2007. 271 p.

2. Zhukov, V.P., Moshkarin, A.V., Barochkin, E.V., Moshkarin, A.A., Andronov, A.A. Matrichnaya formalizatsiya rascheta mnogostupenchatoy isparitel′noy ustanovki mgnovennogo vskipaniya [Matrix formalization of the calculation of a multi-stage instantaneous boiling evaporation plant]. *Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektrotekhnologii» (XI Benardosovskie chteniya)* [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference “State and Prospects of Electrotechnology Development” (XI Benardos Readings)]. Ivanovo, 2003, p. 182.

3. Zhukov, V.P., Kokulin, I.A., Vinogradov, V.N., Barochkin, A.E. Simulation of Droplet Entrainment in Multistage Flash Evaporating Units. *Thermal Engineering*, 2023, vol. 70, no. 11, pp. 957–963.

4. *Termoobessolevayushchaya ustanovka Exerger* [Exerger thermal desalination Plant [Electronic Resource]. Available at: https://storage.yandexcloud.net /startupvillage20/uploads/2e/f35387f3395c325a3bb9a919809c35.pdf [accessed 11/08/2022].

5. Ryzhkin, V.Ya. *Teplovye elektricheskie stantsii* [Thermal power plants]. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 328 p.

6. Burov, V.D., Dorokhov, E.V., Elizarov, D.P. *Teplovye elektricheskie stantsii* [Thermal power plants]. Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 2007. 466 p.

7. Martynenko, O.G. (ed.). *Spravochnik po teploobmennikam v 2 t., t. 1* [Handbook of heat exchangers in 2 vols., vol. 1]. Moscow: Energoatomizdat, 1987. 560 p.

8. Isachenko, V.P. *Teploobmen pri kondensatsii* [Heat exchange during condensation]. Moscow: Energiya, 1977. 240 p.

9. Kutepov, A.M. (ed.). *Protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii v 5 t., t. 2* [Processes and devices of chemical technology in 5 vols., vol. 2]. Moscow: Logos, 2000. 480 p.

10. Kasatkin, A.G. *Osnovnye protsessy khimicheskoy tekhnologii* [Basic processes of chemical technology]. Moscow: Khimiya, 1973. 750 p.

11. Samarskiy, A.A., Vabishchevich, P.N. *Chislennye metody resheniya obratnykh zadach matematicheskoy fiziki* [Numerical methods for solving inverse problems of mathematical physics]. Moscow: Izdatel′stvo LKI, 2009. 480 p.

12. Fomichev, M.D., Zhukov, V.P. Raschetnyy analiz vliyaniya neravnomernosti raspredeleniya teplonositeley po secheniyu gradirni na temperaturu okhlazhdennoy vody [Calculation analysis of the influence of uneven distribution of coolants over the cross-section of a cooling tower on the temperature of chilled water]. *Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii» (XXII Benardosovskie chteniya)* [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference “State and Prospects of Electrotechnology Development” (XXII Benardos Readings)]. Ivanovo, 2023, pp. 392–395.

13. Gmurman, V.E. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Probability theory and mathematical statistics]. Moscow: Vysshaya shkola, 1997. 480 p.

14. Zel′dovich, Ya.B., Myshkis, A.D. Elementy prikladnoy matematiki [Elements of Applied Mathematics]. Moscow: Nauka, 1967. 648 p.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ В ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК ИВАНОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА»

В журнал принимаются рукописи в электронном виде. Средний объем статьи – 6 страниц. Статьи сопровождаются двумя рецензиями – кафедральной (с места работы автора с указанием даты обсуждения и номера протокола) и внешней.

Правила оформления статьи.

Обязательно указывается УДК.

Фамилия, имя, отчество авторов полностью, место работы, должность, звание, ученая степень, страна и город, контактная информация (на русском и английском языках) располагаются по ширине страницы.

Название статьи (на русском и английском языках)*, авторское резюме* (на русском и английском языках), ключевые слова (на русском и английском языках) располагаются по ширине страницы.

Основной текст располагается **в две колонки**, используется шрифт **Arial**, размер шрифта – **10**.

Графики и рисунки должны быть выполнены на компьютере, желательно в программах векторной графики либо в Word. Надписей на рисунках (кроме основополагающих понятий) быть не должно, они обозначаются цифрами и далее расшифровываются, а все расшифровки выносятся под рисунок, размер шрифта – 9 (шрифт **Arial**). Рисунки, так же, как и графики, должны быть **только черно-белыми**, любые другие цвета недопустимы.

Формулы набираются в редакторе формул Math Type (шрифт **Arial**), размер шрифта – **10**, располагаются в тексте в одну колонку.

В конце статьи размещаются пристатейные библиографические списки (на русском языке и References).

Примеры оформления авторского резюме и библиографических списков см. на сайте:
http://vestnik.ispu.ru/ru/node/14

Редакционно-издательский отдел оставляет за собой право на редактирование статей.

ВЕСТНИК ИВАНОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Выпуск 5

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций.
Реестровая запись от 18.01.2022 г. серия ПИ № ФС77-82616

Подписано в печать 26.10.2026. Выход в свет 2.11.2026. Формат 60x84 $^1/_8$.
Усл. печ. л. 11,16. Уч.-изд. л. 11,95. Тираж 100 экз. Цена свободная. Заказ

Адрес редакции журнала: 153003, Ивановская область, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34,
Ивановский государственный энергетический университет
Адрес издательства: 153003, Ивановская область, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34,
Ивановский государственный энергетический университет
Типография ООО «ПресСто»: 153025, Ивановская область, г. Иваново, ул. Дзержинского, 39, строение 8