



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

2022 / Вып. 2

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)

С.В. Ключина (Иваново)

А.Р. Колганов, д-р техн. наук (Иваново)

С.В. Косяков, д-р техн. наук (Иваново)

В.В. Курейчик, д-р техн. наук (Таганрог)

В.Е. Мизонов, д-р техн. наук (Иваново)

М.Ш. Мисриханов, д-р техн. наук (Москва)

В.Ф. Очков, д-р техн. наук (Москва)

А.И. Тихонов, д-р техн. наук (Иваново)

В.А. Шуин, д-р техн. наук (Иваново)

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

D. Antić, профессор (Сербия)

H. Berthiaux, профессор (Франция)

H. Otwinowski, доктор (Польша)

K. Tannous, профессор (Бразилия)

J.-C. Vannier, профессор (Франция)

Над номером работали:

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

Начальник УИУНЛ
Технический редактор
Редактор

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

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

**Б.Л. Шелыгин, С.А. Панков, С.Д. Горшен-
нин, Г.В. Ледуховский, И.А. Кокулин.** Раз-
работка математической модели котла-ути-
лизатора П-102 для режимов совместной ра-
боты с газотурбинной установкой ГТУ-6П.....5

Е.А. Карпычев. Определение сорбцион-
ных характеристик шлама гидроксидов
алюминия, образующегося на стадии пре-
дочистки ВПУ.....15

**А.И. Сокольский, Е.В. Гусев, П.А. Шомов,
В.Ю. Пронин.** Методика тепломассообмен-
ного расчета процесса охлаждения техниче-
ской воды на ТЭЦ при работе пруда-охладите-
ля с брызгальными устройствами.....21

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

**Ю.Н. Кондрашова, О.В. Газизова,
А.В. Малафеев.** Повышение эффективно-
сти противоаварийной автоматики при пер-
спективном подключении источников рас-
пределенной генерации.....29

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

**А.И. Тихонов, А.В. Подобный, И.С. Снить-
ко, А.В. Стулов, А.А. Каржевин.** Метод
коррекции имитационной модели однофаз-
ного трансформатора с использованием ос-
циллограмм тока холостого хода.....38

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Д. Н. Аксаментов. Исследование адаптивного закона управления мостовым краном на его макете.....**47**

МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

С. П. Бобков, И. А. Астраханцева. Применение агентного подхода для моделирования процессов теплопроводности.....**58**

Мизонов Вадим Евгеньевич – замечательный человек, выдающийся ученый и талантливый педагог.....**67**

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

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

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



Ivanovo State Power Engineering University

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

The Journal has been published since 2001

ISSN 2072-2672

2022 / Issue 2

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

EDITORIAL BOARD:

G.V. Ledukhovskiy, Doctor of Engineering (Ivanovo)
(Chief Editor)
I.K. Muravyov, 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)
S.V. Klyunina (Ivanovo)
A.R. Kolganov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
S.V. Kosyakov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
V.V. Kureychik, Doctor of Engineering (Taganrog)
V.E. Mizonov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
M.Sh. Misrikhanov, Doctor of Engineering (Moscow)
V.F. Ochkov, Doctor of Engineering (Moscow)
A.I. Tikhonov, Doctor of Engineering (Ivanovo)
V.A. Shuin, Doctor of Engineering (Ivanovo)

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD:

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

The issue is prepared by:

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

Chief of Educational and Scientific
Literature Publishing Office
Technical Editor
Editor

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

CONTENT

HEAT AND POWER ENGINEERING

B.L. Shelygin, S.A. Pankov, S.D. Gorshenin, G.V. Ledukhovskiy, I.A. Kokulin. Development of mathematical model of P-102 waste heat boiler for modes of joint operation with GTU-6P gas turbine unit.....**5**

E.A. Karpychev. Determination of sorption characteristics of aluminum hydroxide sludge formed at the stage of pre-purification of water treatment plant.....**15**

A.I. Sokolsky, E.V. Gusev, P.A. Shomov, V.Y. Pronin. Method of heat and mass transfer calculation of cooling technical water process at CHP plant when cooling pond with spray devices is operated.....**21**

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

J.N. Kondrashova, O.V. Gazizova, A.V. Malafeev. Improving the efficiency of emergency control systems for future-oriented connection of sources of distributed generation.....**29**

ELECTROMECHANICS

A.I. Tikhonov, A.V. Podobnyi, I.S. Snitko, A.V. Stulov, A.A. Karzhevin. Method to revise a simulation model of single-phase transformer using no-load current waveforms.....**38**

AUTOMATION CONTROL SYSTEMS

D.N. Aksamentov. Study of adaptive control law of overhead crane using its model.....**47**

METHODS OF MATHEMATICAL SIMULATION

S.P. Bobkov, I.A. Astrakhantseva. Application of agent-based approach for heat conduction processes simulation.....**58**

Mizonov Vadim Evgenievich – a wonderful man, an outstanding scientist and a talented teacher.....**67**

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

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

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

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311.22

Борис Леонидович Шелыгин

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Сергей Алексеевич Панков

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Сергей Дмитриевич Горшенин

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Григорий Васильевич Ледуховский

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, заведующий кафедрой тепловых электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-34, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Илья Андреевич Кокулин

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», ассистент кафедры тепловых электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Разработка математической модели котла-утилизатора П-102 для режимов совместной работы с газотурбинной установкой ГТУ-6П

Авторское резюме

Состояние вопроса. Энергетическая установка на базе газотурбинного двигателя ГТУ-6П и котла-утилизатора П-102 является проверенным на практике примером эффективного технического решения по модернизации действующих промышленных котельных и ТЭЦ малой мощности. Для дальнейшего совершенствования установки, а также обоснования эффективности ее применения в условиях различных энергообъектов необходима математическая модель, являющаяся результатом синтеза математических моделей газотурбинной установки и котла-утилизатора. Котел-утилизатор П-102 как объект моделирования имеет существенные особенности, поскольку допускает как автономную работу, так и работу с утилизацией теплоты дымовых газов ГТУ-6П. Целью настоящего исследования является разработка математической модели котла-утилизатора П-102 для режима совместной работы с ГТУ-6П в регулировочном диапазоне нагрузок.

Методы и материалы. Математическая модель котла-утилизатора разработана с применением программного комплекса «ТРАКТ». Разработка математического описания для проведения экспресс-оценки показателей эффективности установки выполнена методами регрессионного анализа данных. Показатели точности математической модели оценены путем сопоставления с опытными данными, полученными в условиях эксплуатации энергоустановки рассматриваемого типа.

Результаты. Получена математическая модель котла-утилизатора П-102 при его совместной работе с газотурбинным двигателем ГТУ-6П, с приемлемой для проведения практических расчетов точно-стью описывающая показатели работы оборудования.

Выводы. Разработанная в программном комплексе «ТРАКТ» математическая модель позволяет решать задачи режимной оптимизации энергетической установки. Получаемые при использовании этой модели результаты расчета отличаются от эксплуатационных данных в среднем на 2,2 %. Математическое описание для экспресс-оценки показателей эффективности установки характеризуется неопределенностью на уровне 6,3 %.

Ключевые слова: котел-утилизатор, газотурбинная установка, математическая модель, теплогидравлический расчет котла, тепловая экономичность

Boris Leonidovich Shelygin

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Heat Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Sergei Alekseevich Pankov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Heat Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Sergei Dmitrievich Gorshenin

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Heat Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Grigorii Vasilyevich Ledukhovskiy

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Head of Heat Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-34, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Iliya Andreevich Kokulin

Ivanovo State Power Engineering University, Teaching Assistant of Heat Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Development of mathematical model of P-102 waste heat boiler for modes of joint operation with GTU-6P gas turbine unit

Abstract

Background. Application of the power plant based on GTU-6P gas turbine engine and P-102 waste heat boiler is a proven example of an effective technical solution to modernize existing industrial boiler houses and low-capacity combined heat and power plants. To improve the power plant, as well as to prove the effectiveness of its use under conditions of various power facilities, a mathematical model is needed. This model is the result of the synthesis of mathematical models of a gas turbine plant and a waste heat boiler. P-102 waste-heat boiler as an object of modeling has significant features, since it allows both autonomous operation and operation with the utilization of heat of GTU-6P flue gases. The purpose of this study is to develop a mathematical model of P-102 waste heat boiler for joint operation with GTU-6P in the adjustment range limits of loads.

Materials and methods. The mathematical model of the waste heat boiler is developed using the TRAKT software package. The development of a mathematical description for a rapid assessment of the plant efficiency indicators is carried out using the methods of regression analysis of data. The indicators of accuracy of the mathematical model are evaluated by comparison with experimental data. Experimental data is obtained under the operating conditions of the power plant of the type under consideration.

Results. The authors have developed a mathematical model of P-102 waste heat boiler in joint operation with GTU-6P gas turbine engine. The performance of the equipment is described with an accuracy acceptable for practical calculations.

Conclusions. The mathematical model developed in the TRAKT software package makes it possible to solve the problems of mode optimization of a power plant. The calculation results obtained using this model

differ from the operational data by an average of 2,2 %. The mathematical description for the rapid assessment of the plant efficiency indicators is characterized by the uncertainty of 6,3 %.

Key words: waste heat boiler, gas turbine plant, mathematical model, thermal-hydraulic calculation of the boiler, thermal efficiency

DOI: 10.17588/2072-2672.2022.2.005-014

Введение. Основным направлением стратегии развития теплоэнергетики России в настоящее время является перевооружение энергетических установок и ввод новых генерирующих мощностей на базе газотурбинных установок. При этом для крупных энергоблоков предпочтение отдается парогазовым установкам, а для объектов малой генерации и промышленных котельных – комбинации газотурбинных установок (ГТУ) и котлов-утилизаторов (КУ) [1–4].

Разработка технических решений по модернизации существующих и проектированию новых энергетических установок базируется на комплексных исследованиях их эффективности в различных условиях эксплуатации. Основу при этом составляют математические модели, адекватно описывающие показатели работы реального оборудования.

Объектом исследования является энергетический модуль, включающий следующее оборудование:

- ГТУ типа Урал-6000 (ГТУ-6П) номинальной электрической мощностью 6 МВт производства АО «ОДК-Авиадвигатель» (г. Пермь);

- КУ марки П-102 (Е-50-0,7-250Г) разработки АО «Подольский машиностроительный завод» (АО «ЗиО») с номинальной паропроизводительностью 50 т/ч и проектными значениями давления и температуры перегретого пара 7 ата и 250 °С соответственно.

Целью исследования является разработка математической модели КУ рассматриваемого типа для режима совместной работы с ГТУ в регулировочном диапазоне нагрузок.

Разработка математической модели выполняется для двух режимов:

- 1) режим с утилизацией теплоты уходящих из ГТУ-6П газов в топочной камере КУ при электрической мощности ГТУ N_3 от 5 до 6 МВт;

- 2) режим с утилизацией теплоты уходящих из ГТУ-6П газов при использовании их в качестве окислителя дополнительно

сжигаемого топлива в топочной камере КУ для достижения паропроизводительности D_n от 30 до 50 т/ч.

Методы исследования. Исследование КУ П-102 выполнено с использованием модели, реализованной в программном комплексе «ТРАКТ» с учетом рекомендаций [5, 6]. Использованный программный комплекс, по существу, реализует нормативный метод теплового расчета котлов [7].

Расчетная модель котла в программном комплексе «ТРАКТ» формируется из подмоделей водопарового, газового, воздушного трактов, а также тракта подогрева сетевой воды (последнее является особенностью котла П-102). В КУ рассматриваемого типа по ходу газового тракта за топочной камерой размещены фестон, пакет конвективного пароперегревателя, поверхности испарительного пакета, водяной экономайзер и подогреватель сетевой воды.

Расчетная схема, согласно [6], включает четыре тракта (рис. 1, 2). Каждый элемент имеет уникальный номер NE и соответствующий номер конструкции НК.

Газовый тракт (рис. 1) включает 16 элементов. Узел ввода воздуха в горелочное устройство газового тракта «Возд.» (NE=2) сопряжен с выходным элементом воздушного тракта (NE=304) (рис. 2).

Элементы « $-Q_{KO1}$ » (NE=4) и « $-Q_{ГТ}$ » (NE=5) предусматривают отвод части теплоты продуктов сгорания камеры сгорания (КС) ГТУ-6П на нагрев воздуха в ее осевом компрессоре (ОК) и производство электроэнергии.

Элемент « $-P_{ук}$ » (NE=6) предусматривает байпасирование продуктов сгорания за пределы топочной камеры в элемент « $+P_{ук}$ » (NE=9). В элемент « $Q_{тор}$ » (NE=7) вводится значение количества теплоты в случае сжигания в топке дополнительного топлива. Элемент «КС ГТ» (NE=3) является элементом газового тракта, в котором условно размещены фиктивные испарительные экраны (NE=104) и барабан «Б» (NE=110).

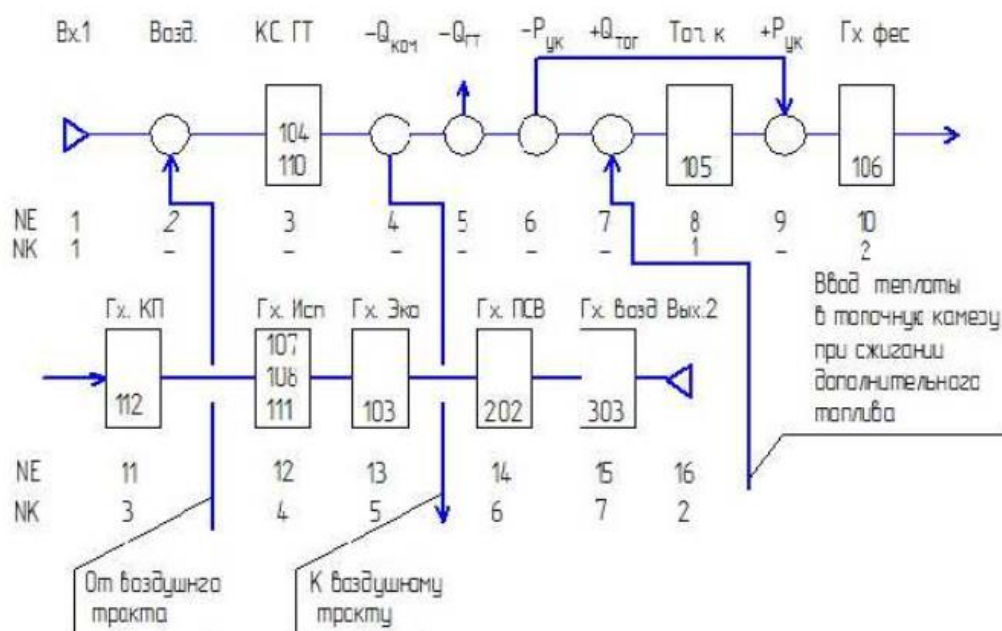


Рис. 1. Расчетная схема котла-утилизатора П-102. Газовый тракт

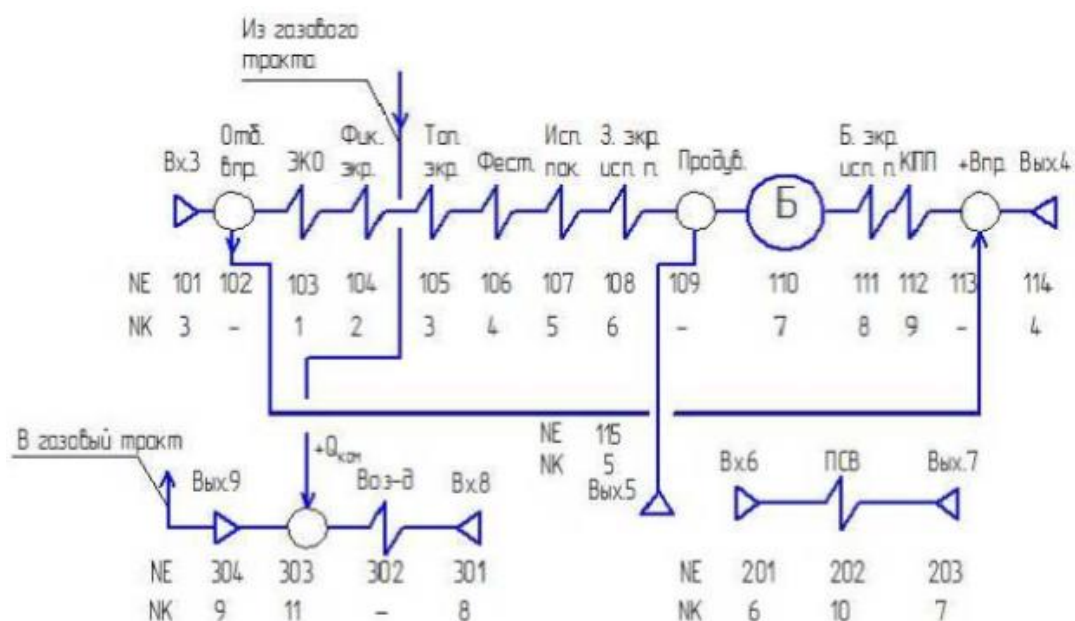


Рис. 2. Расчетная схема котла-утилизатора П-102. Водопаровой, воздушный тракты и тракт нагрева сетевой воды

На входе в водопаровой тракт (рис. 2) перед элементом «ЭКО» предусмотрен отбор питательной воды на впрыск (NE=102). Этот элемент сопряжен с элементом «+Впр» за конвективным пароперегревателем «NE=113». Утилизация уходящих из ГТУ-6П газов заканчивается в подогревателе сетевой воды (ПСВ) (NE=202).

Фиктивный воздушный тракт КУ П-102 (рис. 2) состоит из четырех элементов. В элемент «+Q_{ком}» (NE=303) передается соответствующее количество теплоты от

элемента газового тракта при сжатии воздуха в ОК ГТУ.

В качестве топлива принят природный газ с теплотой сгорания $Q_n^c = 8539$ ккал/м³, плотностью топлива $\rho_f = 0,725$ кг/м³ при значениях теоретических объемов воздуха и дымовых газов $V^0 = 9,48$ м³/м³ и $V_f^0 = 10,65$ м³/м³ соответственно [7].

Значение температуры наружного воздуха принято проектным и равным $t_{нар} = 15$ °С, а коэффициента избытка воздуха за КС ГТУ – $\alpha_{кс}'' = 3,9$.

Результаты исследования. В результате проведенного исследования получены следующие *показатели работы КУ при утилизации теплоты уходящих из ГТУ газов и изменении ее электрической мощности*:

- тепловая мощность продуктов сгорания КС ГТ, расходуемая на привод электрогенератора ГТУ, ккал/с,

$$Q_{\text{ген}} = N_3 \cdot 10^3 / (4,19 \eta_{\text{мех}} \eta_{\text{ген}}) = 243,5 N_3, \quad (1)$$

где N_3 – электрическая мощность ГТУ, МВт; $\eta_{\text{мех}} = \eta_{\text{ген}} = 0,99$ – механический КПД установки и КПД турбогенератора соответственно;

- температура воздуха за ОК ГТУ, °С,

$$t_k'' = (t_{\text{нар}} + 273) \left[1 + (\pi^{(k-1)/k} - 1) / \eta_k \right] - 273, \quad (2)$$

где $\pi = 9$ – кратность повышения давления воздуха в ОК ГТУ; k – показатель изопоэнтропы; $\eta_k = 0,84$ – КПД ОК ГТУ;

- расход топлива в КС ГТУ, $\text{нм}^3/\text{с}$,

$$B_T = N_3 \cdot 10^3 / 4,19 Q_{\text{н}}^c \eta_{\text{ГТУ}} = 0,028 N_3 / \eta_{\text{ГТУ}}, \quad (3)$$

где $\eta_{\text{ГТУ}}$ – КПД ГТУ по производству электроэнергии;

- расход топлива в КС ГТУ, $\text{нм}^3 \cdot 10^{-3}/\text{ч}$,

$$B_{\text{КС}} = 3,6 \cdot B_T = 0,101 N_3 / \eta_{\text{ГТУ}}; \quad (4)$$

- расход воздуха в ГТУ, кг/с,

$$G_B = \alpha_{\text{ГТУ}}'' V^0 B_T \rho_B^0 = 12,23 \alpha_{\text{ГТУ}}'' B_T, \quad (5)$$

где $\alpha_{\text{ГТУ}}''$ – коэффициент избытка воздуха в дымовых газах за газовой турбиной; $\rho_B^0 = 1,26 \text{ кг}/\text{м}^3$ – плотность воздуха;

- тепловая мощность, отбираемая в ГТУ на нагрев воздуха при его сжатии в ОК ГТУ, ккал/с,

$$Q_K = c_B G_B (t_K'' - t_{\text{нар}}), \quad (6)$$

где $c_B = 0,24 \text{ ккал}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{С})$ – средняя теплоемкость воздуха.

Исследование выполнялось для значений N_3 в диапазоне от 5 до 6 МВт.

Исходные данные для многовариантного расчета представлены в табл. 1.

При $N_3 = 5 \text{ МВт}$ и расходе топлива $B_{\text{КС}} = 2,09 \text{ нм}^3 \cdot 10^{-3}/\text{ч}$ ожидаемая паропроизводительность КУ равна $D_{\text{п}} = 14,9 \text{ т/ч}$.

Ориентировочные значения $D_{\text{п}}$ при значениях N_3 от 5,25 до 6,0 МВт определяются по формуле, т/ч,

$$D_{\text{п}}^{\text{ор}} = 14,9 B_{\text{КС}} / 2,09 = 7,43 B_{\text{КС}}. \quad (7)$$

При использовании разработанной в программном комплексе «ТРАКТ» математической модели с учетом полученных исходных данных проведена серия численных экспериментов. Для каждого режима при постоянной величине $B_{\text{КС}}$ изменялись значения питательной воды $D_{\text{п.в}}$ и перегретого пара $D_{\text{п}}$. При этом изменялось значение температуры перегретого пара $t_{\text{пе}}$. Критерием окончания расчетов являлось достижение температурой $t_{\text{пе}}$ значений, входящих в диапазон от 237 до 241 °С, требуемый по условию нормальной работы потребителя пара. Результаты расчетов сведены в табл. 1.

При определении показателей эффективности энергетического модуля «ГТУ–КУ» использованы следующие расчетные выражения:

- тепловосприятие водопарового тракта КУ, ккал/ч,

$$Q_{\text{п}} = 595 D_{\text{п}} 10^3; \quad (8)$$

- тепловосприятие тракта продувочной воды, ккал/ч,

$$Q_{\text{прод}} = 5,8 D_{\text{п}} 10^3; \quad (9)$$

- тепловосприятие тракта сетевой воды, ккал/ч,

$$Q_{\text{с.в}} = 2,0 D_{\text{с.в}} 10^6, \quad (10)$$

где $D_{\text{с.в}} = 100 \text{ т/ч}$ – расход сетевой воды;

- коэффициент полезного действия КУ, ед.,

$$\eta_{\text{КУ}} = (Q_{\text{п}} + Q_{\text{прод}} + Q_{\text{с.в}}) / (B_{\text{КС}} \cdot J_{\text{Г}}^{\text{вх}} \cdot 10^3), \quad (11)$$

где $B_{\text{КС}}$ – расход топлива в КС ГТУ, $\text{нм}^3 \cdot 10^{-3}/\text{ч}$;

- коэффициент утилизации теплоты топлива, ед.,

$$\eta_{\text{утил}} = (Q_{\text{п}} + Q_{\text{прод}} + Q_{\text{с.в}}) / (B_{\text{КС}} \cdot 10^3 \cdot Q_{\text{н}}^c); \quad (12)$$

- КПД энергетического модуля «ГТУ–КУ», ед.,

$$\eta_{\text{мод}} = (0,86 N_3 \cdot 10^6 + Q_{\text{п}} + Q_{\text{прод}} + Q_{\text{с.в}}) / (B_{\text{КС}} \cdot 10^3 \cdot Q_{\text{н}}^c). \quad (13)$$

Таблица 1. Исходные данные и результаты расчета показателей работы энергоустановки при утилизации в КУ теплоты уходящих из ГТУ газов и изменении ее электрической мощности

Наименование показателя, обозначение, единица измерения	Значение показателя				
Исходные данные					
1. Электрическая мощность ГТУ N_3 , МВт	5,0	5,25	5,5	5,75	6,0
2. КПД ГТУ, ед.	0,241	0,245	0,247	0,249	0,251
3. Предварительный расход топлива в камеру сгорания ГТУ $B_{КС}$, $\text{нм}^3 \cdot 10^{-3}/\text{ч}$	2,09	2,17	2,25	2,33	2,41
4. Ориентировочная производительность КУ D_n^{op} , т/ч	14,9	16,1	16,7	17,3	17,9
5. Непрерывная продувка воды из барабана КУ $q_{прод}$, %	5,0				
6. Ориентировочный расход питательной воды в КУ $D_{п.в}^{op}$, т/ч	16,3	16,9	17,5	18,1	18,8
7. Температура питательной воды $t_{п.в}$, °C	104				
8. Давление питательной воды $p_{п.в}$, ата	12,0				
9. Ожидаемая температура перегретого пара $t_{пе}$, °C	240				
10. Потеря теплоты от наружного охлаждения КУ q_6 , %	1,33	1,3	1,28	1,25	1,23
11. Тепловая мощность продуктов сгорания КС ГТУ, расходуемая на привод электрогенератора $Q_{ген}$, ккал/с	1216	1275	1336	1398	1460
12. Тепловая мощность, отбираемая в ГТУ на нагрев воздуха при его сжатии в ОК $Q_{ком}$, ккал/с	1810	1876	1945	2010	2090
13. Расход сетевой воды в ПСВ $G_{с.в}$, т/ч	100				
14. Температура воды на входе в ПСВ $t_{п.с}$, °C	60				
Результаты расчетов					
15. Температура газов на входе в КУ $v'_{ку}$, °C	482	481	480	482	480
16. Энтальпия газов на входе в топочную камеру КУ $J_{гх}^{вх}$, ккал/нм ³	6066	6064	6054	6067	6053
17. Температура газов на выходе из топочной камеры КУ $v''_{ку}$, °C	464	463	464	464	463
18. Температура уходящих газов v_{yx} , °C	98	99	100	100	101
19. Расход перегретого пара за КУ D_n , т/ч	14,9	15,24	15,7	16,3	16,57
20. Температура перегретого пара $t_{пе}$, °C	238	240	241	240	240
21. Энтальпия перегретого пара $h_{пе}$, ккал/кг	698	699	700	699	699
22. Энтальпия сетевой воды за ПСВ КУ $h''_{с.в}$, ккал/кг	79	80	80	81	81
23. КПД КУ $\eta_{ку}$, ед.	0,865	0,848	0,838	0,834	0,818
24. Коэффициент утилизации теплоты топлива $\eta_{утил}$, ед.	0,615	0,600	0,594	0,591	0,580
25. КПД энергетического модуля «ГТУ–КУ» $\eta_{мол}$, ед.	0,856	0,846	0,843	0,841	0,831

Зависимости основных показателей эффективности установки от электрической мощности ГТУ, полученные по результатам расчетов в программном комплексе «ТРАКТ» с учетом (8)–(13), представлены на рис. 3.

Для обеспечения возможности экспресс-оценки показателей эффективности энергетического модуля в рассматриваемом режиме дополнительно получены следующие обобщающие регрессионные зависимости [9]:

$$\eta_{ку} = 0,86 - 0,043(N_3 - 5)^{0,91}; \quad (14)$$

$$\eta_{утил} = 0,61 - 0,031(N_3 - 5)^{0,95}; \quad (15)$$

$$\eta_{мод} = 0,854 - 0,016(N_3 - 5)^{0,98}. \quad (16)$$

Анализ полученных данных позволяет заключить, что при температурах газов на входе в КУ $v'_{ку}$ в диапазоне от 480 до 482 °C значения энтальпии этих газов $J_r^{вх}$ практически не меняются и составляют от 6053 до 6067 ккал/м³. Поэтому с увеличением расхода топлива в камеру сгорания $B_{кс}$ на 14÷15 % значения всех рассматриваемых КПД уменьшаются. Так, значения КПД $\eta_{ку}$ и $\eta_{утил}$ уменьшаются на 4÷5 %. Учитывая дополнительную выработку электроэнергии, уменьшение КПД модуля энергоустановки $\eta_{мод}$ оказывается в 1,3÷1,4 раза ниже.

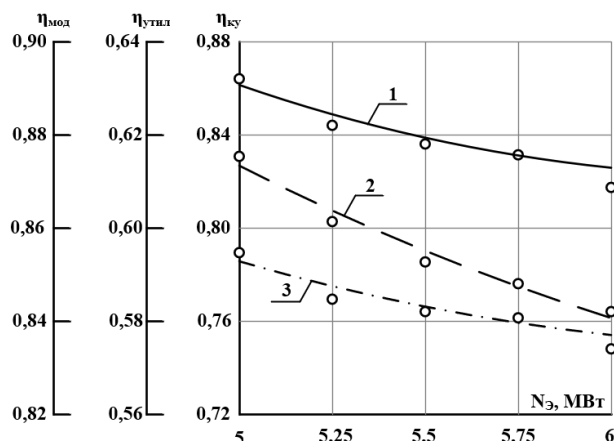


Рис. 3. КПД КУ (1), КПД утилизации теплоты сгорания топлива (2) и КПД модуля энергоустановки (3) в зависимости от электрической мощности ГТУ: точки – результаты расчетов, полученные при моделировании установки в программном комплексе «ТРАКТ»; линии – аппроксимация результатов расчетов по выражениям (14)–(16); обозначения приведены в тексте

Результаты исследования показателей работы КУ при сжигании дополнительного топлива и использовании в качестве окислителя уходящих газов ГТУ. Сжигание дополнительного топлива в топочной камере КУ необходимо для достижения требуемой паропроизводительности D_n в диапазоне от 30 до 50 т/ч.

Известно [10], что при температурах от 400 до 500 °С и объемной доле молекулярного кислорода за ГТУ более 13 % эффективное сжигание дополнительного топлива в потоке дымовых газов возможно без специальной подачи воздуха.

В рассматриваемых условиях при $\alpha''_{гту} = 3,9$ концентрация кислорода за ГТУ составит

$$Q_2^r = (0,21V^0(\alpha''_{гту} - 1) \cdot 10^3) / (\alpha''_{гту}V^0) = 18,8(1 - 1/\alpha''_{гту}) = 13,9\%. \quad (17)$$

Исследование проводилось при неизменной электрической мощности ГТУ $N_э = 6$ МВт и значениях паропроизводительности КУ D_n , равных 30, 35, 40 и 50 т/ч.

В результате проведенного исследования получены следующие показатели работы КУ при сжигании дополнительного топлива и использовании в качестве окислителя уходящих газов ГТУ:

- ожидаемый расход дополнительно топлива в топочную камеру КУ для обеспечения требуемой его производительности, $\text{нм}^3/\text{с}$,

$$B_{\text{доп}}^{\text{ожид}} = (D_n - 15)\Delta h_{p.c} 10^3 / (\eta_k Q_n^c) = 79,1(D_n - 15), \quad (18)$$

где $\Delta h_{p.c} = 590$ ккал/кг – приращение энтальпии рабочей среды в водопаровом тракте КУ; $\eta_k = 0,88$ – ориентировочное значение КПД КУ (брутто);

- количество теплоты, выделяющейся в топочной камере КУ при сжигании дополнительного ожидаемого расхода топлива, ккал/с,

$$Q_{\text{доп}}^{\text{ожид}} = \beta_{\text{сг}} B_{\text{доп}}^{\text{ожид}} Q_n^c / 3600 = 2,35 B_{\text{топ}}^{\text{ожид}}, \quad (19)$$

где $\beta_{\text{сг}} = 0,99$ – степень сгорания топлива;

- расход уходящих из ГТУ газов, используемых в качестве окислителя горючих компонентов дополнительно сжигаемого топлива, $\text{нм}^3/\text{с}$,

$$V_r^{\text{топ}} = B_{\text{доп}}^{\text{ожид}} V_r^0 (O_2^B / O_2^r) (\beta / 3600) = 5,4 \cdot 10^{-3} B_{\text{доп}}^{\text{ожид}}, \quad (20)$$

где $O_2^B = 21\%$ – объемная доля молекулярного кислорода в воздухе; O_2^r – то же в газах; $\beta = 1,2$ – коэффициент расхода воздуха для эффективности сжигания топлива в обедненной кислородом среде;

- минимальное значение доли газов ГТУ, байпасирующих топочную камеру КУ,

$$d_6 = 1 - (V_r^{\text{топ}} / V_r^{\text{гту}}), \quad (21)$$

где $V_r^{\text{гту}}$ – расход газов за ГТУ в утилизационном режиме работы КУ без сжигания дополнительного топлива при $N_э = 6$ МВт, $\text{нм}^3/\text{с}$.

По условию обеспечения минимально допустимой температуры уходящих газов за КУ на уровне $t_{\text{вх}} = (98 \div 100)$ °С при уменьшении паропроизводительности КУ D_n от 50 до 30 т/ч расход сетевой воды $G_{\text{с.в}}$ уменьшается от 100 до 60 т/ч.

Для обеспечения эффективного сжигания дополнительного расхода топлива $B_{\text{доп}}^{\text{ожид}}$ при снижении D_n доля байпасирования газов d_6 увеличивается от 0,4 до 0,8.

В табл. 2 представлены исходные данные для проведения численных экспериментов.

Согласно данным табл. 2, при электрической мощности ГТУ $N_э = 6,0$ МВт суммарное значение тепловой мощности, отбираемой в ГТУ на нагрев воздух при его сжатии в ОК и производство электроэнергии составляет, $Q_{\text{ком}} + Q_{\text{ген}} = 3550$ ккал/с.

При конкретном значении паропроизводительности КУ (30, 35, 40, 45 и 50 т/ч) с

изменением $Q_{\text{доп}}^{\text{ожид}}$ окончательное значение тепловой мощности, выделяемой в топочной камере КУ при сжигании дополнительного топлива $Q_{\text{топ}}$, принималось по величине температуры перегретого пара $t_{\text{пе}}$ в диапазоне от 238 до 241 °С. При $D_{\text{п}} = (40 \div 50)$ т/ч для поддержания указанных значений $t_{\text{пе}}$ при включении впрыскивающего пароохла-

дителя доля отбора питательной воды составляет $d_{\text{отб}} = (0,01 \div 0,05)$.

Расход дополнительно сжигаемого топлива, $\text{м}^3 \cdot 10^{-3}/\text{ч}$, рассчитывается как

$$B_{\text{доп}} = B_{\text{доп}}^{\text{ожид}} Q_{\text{доп}}^{\text{ожид}} / Q_{\text{топ}} \quad (22)$$

Результаты расчетов сведены в табл. 2.

Таблица 2. Исходные данные и результаты расчета показателей работы энергоустановки при $N_3 = 6,0$ МВт, сжигании дополнительного топлива и использовании в качестве окислителя уходящих из ГТУ газов

Наименование показателя, обозначение, единица измерения	Значение показателя				
Исходные данные					
1. Электрическая мощность ГТУ N_3 , МВт	6,0				
2. Расход топлива в КС ГТУ $B_{\text{КС}}$, $\text{м}^3 \cdot 10^{-3}/\text{ч}$	2,41				
3. Паропроизводительность КУ $D_{\text{п}}$, т/ч	30	35	40	45	50
4. Расход питательной воды $D_{\text{п.в.}}$, т/ч	31,7	36,8	42,5	47,5	52,5
5. Суммарная тепловая мощность, отбираемая в ГТУ на нагрев воздуха в ОК и производство электроэнергии ($Q_{\text{ком}} + Q_{\text{ген}}$), ккал/с	3550				
6. Ожидаемый расход дополнительного топлива, подаваемого в топку КУ $B_{\text{доп}}^{\text{ожид}}$, $\text{м}^3 \cdot 10^{-3}/\text{ч}$	1,181	1,45	1,76	2,13	2,39
7. Ожидаемое количество теплоты, выделяющееся в топке КУ при сжигании дополнительного топлива $Q_{\text{доп}}^{\text{ожид}}$, ккал/с	2505	3540	4150	5080	6150
8. Потеря теплоты от наружного охлаждения КУ q_5 , %	1,1	1,08	1,05	1,0	0,95
9. Доля байпасирования газов ГТУ топочной камеры КУ d_0 , ед.	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4
10. Расход сетевой воды в ПСВ $G_{\text{с.в.}}$, т/ч	60	65	70	80	100
Результаты расчетов					
11. Температура газов на входе в КУ $\upsilon_{\text{гк}}$, °С	483				
12. Энтальпия газов на входе в топочную камеру КУ $J_{\text{гк}}$, ккал/м ³	6098				
13. Температура газов на выходе из топочной камеры КУ $\upsilon_{\text{гк}}''$, °С	846	1027	1126	1193	1249
14. Температура уходящих газов $\upsilon_{\text{гк}}$, °С	98	99	98	99	98
15. Расход перегретого пара за КУ $D_{\text{п}}$, т/ч	30	35	40	45	50
16. Температура перегретого пара $t_{\text{пе}}$, °С	238	239	239	238	239
17. Энтальпия перегретого пара $h_{\text{пе}}$, ккал/кг	697	699	699	697	699
18. Энтальпия сетевой воды за ПСВ КУ $h_{\text{с.в.}}''$, ккал/кг	87	85	86	86	86
19. Количество теплоты, выделяющееся в топочной камере КУ при сжигании дополнительного топлива $Q_{\text{топ}}$, ккал/с	2505	3473	4093	5109	5679
20. Расход дополнительного сжигаемого топлива $B_{\text{доп}}$, $\text{м}^3 \cdot 10^{-3}/\text{ч}$	1,28	1,41	1,65	2,06	2,29
21. Тепловосприятие водопарового тракта КУ $Q_{\text{п}} \cdot 10^{-6}$, ккал/ч	17,85	20,83	23,81	26,98	29,76
22. Тепловосприятие тракта продувочной воды $Q_{\text{прод}} \cdot 10^{-3}$, ккал/ч	0,174	0,21	0,231	0,26	0,29
23. Тепловосприятие тракта сетевой воды $Q_{\text{с.в.}} \cdot 10^{-6}$, ккал/ч	1,51	1,63	1,76	2,01	2,51
24. Тепловыделение в топочной камере КУ при сжигании дополнительного топлива $Q_{\text{топ}}$, ккал/с	2505	3473	4093	5109	5679
25. Расход дополнительного сжигаемого топлива $B_{\text{доп}}$, $\text{м}^3 \cdot 10^{-3}/\text{ч}$	1,28	1,41	1,65	2,06	2,29
26. Коэффициент полезного действия КУ, $\eta_{\text{ку}}$	0,745	0,779	0,842	0,873	0,909
27. Коэффициент утилизации теплоты топлива, $\eta_{\text{утил}}$	0,712	0,754	0,773	0,791	0,796
28. Коэффициент полезного действия модуля (ГТУ-КУ), $\eta_{\text{мод}}$	0,774	0,828	0,887	0,911	0,925

Зависимости дополнительного расхода топлива $B_{\text{доп}}$ в топочную камеру КУ и температуры газов на выходе из нее $v_{\text{ку}}''$ получены в следующем виде:

$$B_{\text{доп}} = 1,29 + 0,035(D_{\text{п}} - 30)^{1,14}; \quad (23)$$

$$v_{\text{ку}}'' = 1010 + 4,25(D_{\text{п}} - 30)^{1,16} \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (24)$$

При увеличении паропроизводительности КУ в диапазоне от 30 до 50 т/ч уменьшается доля байпасирования газов d_6 от 0,8 до 0,4.

Показатели эффективности, представленные в табл. 2, определялись согласно следующим зависимостям:

- тепловосприятие водопарового тракта КУ, ккал/ч,

$$Q_{\text{п}} = 0,595D_{\text{п}}10^6; \quad (25)$$

- тепловосприятие тракта сетевой воды, ккал/ч,

$$Q_{\text{с.в}} = G_{\text{с.в}}(h_{\text{с.в}}'' - 61) = 0,025G_{\text{с.в}} \cdot 10^6; \quad (26)$$

- коэффициент полезного действия КУ, ед.,

$$\eta_{\text{ку}} = (Q_{\text{п}} + Q_{\text{прод}} + Q_{\text{с.в}}) / (B_{\text{кв}} \sqrt{t_{\text{кв}}} + Q_{\text{топ}} \cdot 3600); \quad (27)$$

- коэффициент утилизации теплоты топлива, ед.,

$$\eta_{\text{утил}} = (Q_{\text{п}} + Q_{\text{прод}} + Q_{\text{с.в}}) / ((B_{\text{кв}} + B_{\text{доп}})Q_{\text{н}}^{\text{с}} \cdot 10^3); \quad (28)$$

- КПД модуля «ГТУ–КУ», ед.,

$$\eta_{\text{мод}} = (0,86 \cdot N_{\text{э}} \cdot 10^6 + Q_{\text{п}} + Q_{\text{прод}} + Q_{\text{с.в}}) / ((B_{\text{кв}} + B_{\text{доп}})Q_{\text{н}}^{\text{с}} \cdot 10^3). \quad (29)$$

Результаты расчета показателей эффективности установки, полученные в ходе моделирования КУ в программном комплексе «ТРАКТ» с учетом (25)–(29), представлены на рис. 4.

Анализ результатов показывает, что с увеличением паропроизводительности КУ $D_{\text{п}}$ от 30 до 50 т/ч увеличивается расход дополнительно сжигаемого топлива $B_{\text{доп}}$ от 1178 до 1247 нм³/ч. При этом значения всех КПД увеличиваются на 8÷18 %.

Дополнительно получены следующие обобщающие регрессионные зависимости для экспресс-оценки показателей эффективности [9]:

$$\eta_{\text{ку}} = 0,73 + 0,016(D_{\text{п}} - 30)^{0,81}; \quad (30)$$

$$\eta_{\text{утил}} = 0,61 + 0,027(D_{\text{п}} - 30)^{0,65}; \quad (31)$$

$$\eta_{\text{мод}} = 0,77 + 0,021(D_{\text{п}} - 30)^{0,68}. \quad (32)$$

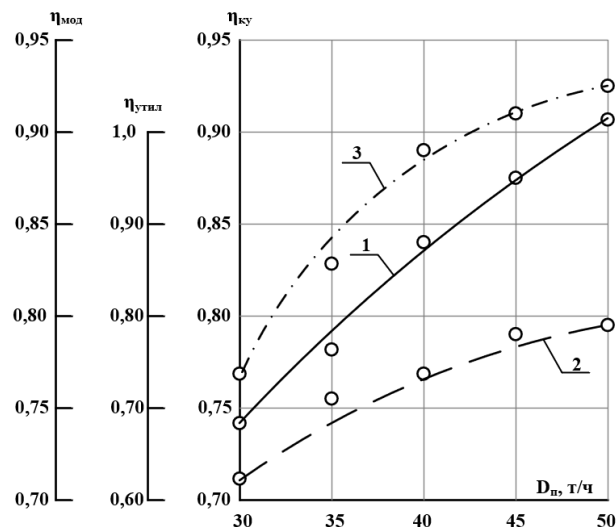


Рис. 4. КПД КУ (1), КПД утилизации теплоты сгорания топлива (2) и КПД модуля энергоустановки (3) в зависимости от паропроизводительности при электрической мощности ГТУ $N_{\text{э}} = 6$ МВт: точки – результаты расчетов, полученные при моделировании установки в программном комплексе «ТРАКТ»; линии – аппроксимация результатов расчетов по выражениям (30)–(32)

Выводы. Результаты расчета основных показателей (табл. 1, 2) практически совпадают с фактическими показателями промышленной эксплуатации рассматриваемого энергетического модуля на Ивановской ТЭЦ-1 [4, 8]. Предельное относительное расхождение расчетных и опытных данных оценивается на уровне 1,9 % для режима работы энергоустановки при утилизации в КУ теплоты уходящих из ГТУ газов и изменении ее электрической мощности и на уровне 2,4 % для режима номинальной электрической нагрузки при сжигании дополнительного топлива. В среднем отклонение составляет 2,2 %. Это подтверждает высокие прогностические возможности разработанной в программном комплексе «ТРАКТ» математической модели КУ.

Полученные зависимости (14)–(15) и (30)–(32), предназначенные для экспресс-оценки показателей эффективности энергоустановки в рассматриваемых режимах, характеризуются внесением дополнительной неопределенности на уровне 4,1 %. Таким образом, суммарная неопределенность этих зависимостей составляет 6,3 % (относительных).

С учетом этого для решения задач проектирования энергетического модуля, включающего оборудование рассматриваемого типа, рекомендуется использовать разработанную в программном комплексе «ТРАКТ» математическую модель. На этапе разработки предварительного технико-экономического обоснования с приемлемой точностью результаты могут быть оценены с применением упрощенных зависимостей (14)–(15) и (30)–(32).

Список литературы

1. **Махнутин А.К., Кавалеров Б.В.** О вопросах применения газотурбинных установок и парогазовых установок в энергетике // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2015. – № 15. – С. 84–96.
2. **Berezinets P.A., Tereshina G.E.** Heat recovery steam generators of binary combined-cycle units // *Thermal Engineering*. – 2021. – Т. 68, No. 6. – P. 452–460. DOI: 10.1134/S0040601521060021.
3. **Ольховский Г.Г.** Масштабы и особенности применения газотурбинных и парогазовых установок за рубежом // Теплоэнергетика. – 2002. – № 9. – С. 72–77.
4. **Шелыгин Б.Л., Мошкарин А.В.** Котлы-утилизаторы парогазовых установок электростанций. – Иваново, 2012. – 284 с.
5. **Гудзюк В.Л., Ривкин А.С., Шелыгин Б.Л.** Тепловой поверочный расчет паровых котлов на ЭВМ. – Иваново, 1989. – 36 с.
6. **Шелыгин Б.Л., Барочкин А.Е., Барочкин Е.В.** Тепловой поверочный расчет паровых котлов на ПЭВМ. – Иваново, 2021. – 44 с.
7. **Кузнецов Н.В., Дубовский И.Е., Митор В.В.** Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод) / под ред. Н.В. Кузнецова. – М.: Энергия, 1973. – 296 с.
8. **Кромов С.А.** Опыт реконструкции и эксплуатации Ивановской ТЭЦ-1 // Электрические станции. – 2007. – № 9. – С. 15–19.

9. **Heinhold I.** Ingenieur statistic. – München; Wien: Springer Verlag, 1964. – 352 p.

10. **Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н.** Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций / под ред. С.В. Цанева. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 584 с.

References

1. Makhnutin, A.K., Kavalero, B.V. *Vestnik PNIPU. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya*, 2015, no. 15, pp. 84–96.
2. Berezinets, P.A., Tereshina, G.E. *Thermal Engineering*, 2021, vol. 68, no. 6, pp. 452–460. DOI: 10.1134/S0040601521060021.
3. Ol'khovskiy, G.G. *Teploenergetika*, 2002, no. 9, pp. 72–77.
4. Shelygin, B.L., Moshkarin, A.V. *Kotly-utilizatory parogazovykh ustanovok elektrostantsiy* [Waste heat boilers of steam-gas plants of power plants]. Ivanovo, 2012. 284 p.
5. Gudzyuk, V.L., Rivkin, A.S., Shelygin, B.L. *Teplovoy poverochnyy raschet parovykh kotlov na EVM* [Thermal verification calculation of steam boilers on a computer]. Ivanovo, 1989. 36 p.
6. Shelygin, B.L., Barochkin, A.E., Barochkin, E.V. *Teplovoy poverochnyy raschet parovykh kotlov na PEVM* [Thermal verification calculation of steam boilers on a PC]. Ivanovo, 2021. 44 p.
7. Kuznetsov, N.V., Dubovskiy, I.E., Mitor, V.V. *Teplovoy raschet kotel'nykh agregatov (normativnyy metod)* [Thermal calculation of boiler units (standard method)]. Moscow: Energiya, 1973. 296 p.
8. Kromov, S.A. *Elektricheskie stantsii*, 2007, no. 9, pp. 15–19.
9. Heinhold, I. Ingenieur statistic. München; Wien: Springer Verlag, 1964. 352 p.
10. Tsanev, S.V., Burov, V.D., Remezov, A.N. *Gazoturbinnye i parogazovye ustanovki teplovykh elektrostantsiy* [Gas turbine and combined cycle plants of thermal power plants]. Moscow: Izdatel'stvo MEI, 2002. 584 p.

УДК 628.161.3

Евгений Александрович Карпычев

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры химии и химических технологий в энергетике, Россия, Иваново, телефон: (4932) 26-96-09, e-mail: karpuchev3108@bk.ru

Определение сорбционных характеристик шлама гидроксидов алюминия, образующегося на стадии предочистки ВПУ

Авторское резюме

Состояние вопроса. Актуальной задачей проводимого исследования является описание свойств образующегося при коагуляции шлама в зависимости от типа источника водоснабжения, а именно определение сорбционной емкости шлама по основным удаляемым из воды компонентам (соединения железа, органические вещества и соединения кремниевой кислоты). Данный показатель позволяет напрямую определить эффективность применения коагуляции: при сравнении реальных значений этого показателя с практически достижимыми значениями можно сделать вывод о недостатке или избытке подаваемого на обработку коагулянта.

Материалы и методы. Для расчета удельных сорбционных емкостей шлама использованы следующие показатели: содержание органических соединений, массовая концентрация соединений кремниевой кислоты в пересчете на SiO_2 и массовая концентрация соединений железа в пересчете на Fe. Определение содержания конечных компонентов после высушивания и прокаливания шлама, растворения полученного минерального остатка в растворе осуществлено с использованием общепринятых методик анализа воды.

Результаты. Впервые предложена методика определения удельных сорбционных емкостей шлама гидроксидов алюминия по органическим соединениям, соединениям железа в пересчете на Fe, соединениям кремниевой кислоты в пересчете на SiO_2 . Предложена классификация природных маломутных вод с увеличенным содержанием железоорганических соединений. В рамках предложенной классификации вод получены ранее не определяемые фактические удельные сорбционные емкости шлама, а также даны рекомендации по достижению практических значений сорбционных характеристик шлама.

Выводы. Предложенный метод расчета сорбционных емкостей шлама гидроксидов алюминия и сам показатель сорбционной емкости шлама рекомендуется использовать как параметр, определяющий условия и эффективность применения технологии коагуляции сульфатом алюминия. Избыточные дозы коагулянта, обеспечивающие сорбционную емкость шлама, большую по сравнению с рекомендуемыми значениями, приводят к значительному перерасходу реагента и к увеличению расхода продувочной воды. Зная это, можно предусмотреть мероприятия, позволяющие привести сорбционную емкость шлама к практически достижимым значениям, например, за счёт подкисления воды.

Ключевые слова: классификация природных вод, маломутные воды с повышенным содержанием железоорганических соединений, коагуляция природной воды, удельная сорбционная емкость шлама

Evgenii Alexandrovich Karpuchev

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Chemistry and Chemical Technologies in Energy Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-96-09, e-mail: karpuchev3108@bk.ru

Determination of sorption characteristics of aluminum hydroxide sludge formed at the stage of pre-purification of water treatment plant

Abstract

Background. An urgent task of the research is to describe the properties of the sludge formed during coagulation depending on the type of water supply source. Namely, the aim is to study the sorption capacity of the sludge for the main components removed from the water (iron compounds, organic substances, and silicic acid compounds). This indicator allows you to directly determine the effectiveness of the coagulation. When

comparing the actual values of this indicator with practically obtainable values, one can say about the lack or excess of the coagulant supplied for processing.

Materials and methods. To calculate the specific sorption capacities of the sludge, the following indicators have been used: organic content, the weight concentration of silicic acid compounds in terms of SiO_2 and the weight concentration of iron compounds in terms of Fe. After drying and calcining the sludge, the resulting mineral residue has been dissolved in the solution, and the content of the final components was determined. Conventional water analysis methods have been applied.

Results. For the first time, a method is proposed to determine the specific sorption capacities of aluminum hydroxide sludge for organic compounds, for iron compounds in terms of Fe, for silicic acid compounds in terms of SiO_2 . A classification of natural low-turbidity waters with an increased content of iron-organic compounds is proposed. Within the framework of the proposed classification of waters, the authors have obtained previously undetermined actual specific sorption capacities of the sludge. Recommendations have been given to get practical importance values of the sorption characteristics of the sludge.

Conclusions. The proposed method to calculate the sorption capacity of aluminum hydroxide sludge and index of sorption capacity of the sludge are recommended to be used as a parameter that determines the conditions and efficiency of application of the aluminum sulfate coagulation technology. Excessive doses of the coagulant that provide a sorption capacity of the sludge greater than the recommended values, lead to an excessive consumption of both the reagent itself and purge water. Thus, some measures can be taken to bring the sorption capacity of the sludge to practically achievable values, for example, aquatic acidification.

Key words: classification of natural waters, low-turbidity waters with a high content of iron-organic compounds, coagulation of natural waters, specific sorption capacity of sludge

DOI: 10.17588/2072-2672.2022.2.015-020

Введение. Процесс коагуляции природных вод в значительной степени зависит от качества самой воды (солесодержание, щелочность, содержание органических примесей, содержание соединений железа) и от технологических факторов, в особенности от дозы коагулянта, показателя pH_{25} коагулированной воды и температуры. По-прежнему единственным основным способом подбора технологии предварительной очистки и ее оптимальных режимных параметров остается пробная коагуляция.

В ряде литературных источников [1, 2] для удобства классификации применяемых технологий коагулирования их принято разделять на классы.

С учетом существующих классификаций и специфики применения коагуляции в области водоподготовки энергетики предлагается более универсальная система классификации природных маломутных вод с увеличенным содержанием железно-органических соединений по химическому состав (табл. 1). С использованием пред-

ложенной классификации удобнее объяснить причины увеличенных или уменьшенных значений фактической удельной сорбционной емкости шлама, а также предложить для каждого типа природных вод наиболее оптимальные режимные условия ведения коагуляционной обработки.

Для вод первого и второго типов условия применения коагуляционной обработки более удобные (способность воды к коагуляции, увеличенные значения щелочного резерва), так как они характеризуются меньшими значениями окисляемости и содержания соединений железа, а большее содержание солей благотворно влияет на процесс коагуляции [3, 4]. Однако и для данных типов вод характерны свои особенности, например необходимость применения повышенных доз коагулянта для обеспечения требуемых значений pH_{25} коагулированной воды. Это приводит к значительному выделению углекислоты, усиливающей процессы флотации в осветлителях.

Таблица 1. Разделение маломутных вод с увеличенным содержанием железноорганических соединений на группы (классы) по составу примесей

Тип поверхностного источника воды	Минерализация, мг/л	Щ_0 , мг-экв/л	Ок, мгО/л	Массовая концентрация соединений железа в пересчете на Fe, мг/л
1	более 250	от 2,5 до 4,5	от 7,0 до 12,0	от 0,4 до 1,0
2	от 100 до 250	от 1,5 до 2,0	от 9,0 до 20,0	от 0,7 до 1,0
3	менее 100	от 0,5 до 1,0	от 7,0 до 20,0	от 0,6 до 1,5

Маломинерализованные воды третьего типа отличаются более высокими значениями окисляемости, содержания соединений железа и, как следствие, высокой цветностью. Обработка этих вод методом коагуляции сульфатом алюминия зачастую вызывает трудности и в значительной степени зависит от режимных факторов, таких как доза коагулянта, показатель pH_{25} и сложность его поддержания и регулирования в рекомендуемом диапазоне 5,5–6,5 в условиях пониженных значений щелочности исходной воды [3].

Ко всем имеющимся средствам оценки применения сульфата алюминия в системах водоподготовки требуется дополнительный параметр, позволяющий оценить эффективность применения технологии коагуляции.

Определение сорбционной емкости (далее, удельной сорбционной емкости) шлама гидроксидов алюминия по органическим веществам, соединениям железа, соединениям кремниевой кислоты необходимо для уточнения практически необходимых доз сульфата алюминия. Показатель удельной сорбционной емкости шлама позволяет определить фактическое количество примеси воды, которое сорбируется одним мг-экв образующегося в процессе коагуляции гидроксида алюминия $Al(OH)_3$.

Подобные показатели сорбционной емкости непосредственно к процессу коагуляции природных вод ранее не применялись и не рассматривались. Наибольшее количество опубликованных трудов в основном посвящено использованию шламов водоподготовительных установок для сорбции нефтепродуктов и очистки сточных вод [5–7].

Методы исследования. Основным критерием опытного подбора дозы коагулянта при пробных коагуляциях является либо цветность, либо окисляемость воды. Эмпирическая формула, устанавливающая связь между окисляемостью исходной воды и рекомендуемой дозой коагулянта (D_k , мг-экв/дм³), имеет вид

$$D_k = 0,07 \cdot Ok, \quad (1)$$

где Ok – перманганатная окисляемость обрабатываемой воды, мгО/л.

Данная формула фактически устанавливает рекомендуемый расход коагулянта и ожидаемую сорбционную емкость

гидроксида алюминия по органическим соединениям.

Согласно (1), полезная удельная сорбционная емкость шлама гидроксида алюминия по органическому веществу составит

$$EШ_{орг}^{полезн} = \frac{1}{0,07 \cdot \Xi_{Al(OH)_3}} = 0,55 \frac{мгО}{мг-экв}, \quad (2)$$

где $\Xi_{Al(OH)_3}$ – эквивалентная масса гидроксида алюминия, равная 26 мг/мг-экв.

С использованием литературы [8] была установлена формула для оценки содержания органических веществ (гуматов) в составе перманганатной окисляемости воды:

$$C^{орг} = 2,15 \cdot Ok. \quad (3)$$

С учетом (3) полезная удельная сорбционная емкость шлама по органическому веществу гуматов составит

$$EШ_{орг}^{полезн} = \frac{C^{орг}}{D_k} = \frac{2,15}{0,07} = 30,7 \frac{мг}{мг-экв}. \quad (4)$$

Фактическую сорбционную емкость шлама по органическому веществу, по соединениям железа в пересчете на Fe, по соединениям кремниевой кислоты в пересчете на SiO_2 можно определить с использованием химического анализа образовавшегося в результате коагуляции шлама.

Для оценки содержания органических веществ рекомендуется использовать показатель потери массы при прокаливании (ПП), мг. В этом случае фактическая сорбционная емкость шлама по органическому веществу рассчитывается следующим образом:

- в пересчете на 1 мг шлама

$$EШ_{орг}^{факт} = \frac{C^{орг}}{D_k} = \frac{ПП}{МО}, \frac{мг}{мг}; \quad (5)$$

- в пересчете на 1 мг-экв $Al(OH)_3$

$$EШ_{орг}^{факт} = \frac{ПП \cdot 26}{МО}, \frac{мг}{мг-экв}, \quad (6)$$

где МО – минеральный остаток после прокаливании шлама исследуемой навески шлама, мг; ПП – потери массы при прокаливании шлама исследуемой навески шлама, мг; 26 – эквивалентная масса гидроксида алюминия, мг/мг-экв.

Для оценки содержания соединений железа рекомендуется использовать массовую концентрацию соединений железа в

пересчете на Fe, мг/л. В этом случае фактическая сорбционная емкость шлама по соединениям железа в пересчете на Fe рассчитывается следующим образом:

- в пересчете на 1 мг шлама

$$ЕШ_{Fe}^{факт} = \frac{C^{Fe} V}{МО^п}, \frac{мг}{мг}; \quad (7)$$

- в пересчете на 1 мг-экв $Al(OH)_3$

$$ЕШ_{Fe}^{факт} = \frac{C^{Fe} V \cdot 26}{МО^п}, \frac{мг}{мг-экв}, \quad (8)$$

где $МО^п$ – проба минерального остатка, полученного после прокаливания шлама, мг; C^{Fe} – массовая концентрация соединений железа в пересчете на Fe, мг/л; V – объем исследуемой пробы воды, л.

Для оценки содержания соединений кремниевой кислоты рекомендуется использовать массовую концентрацию соединений кремниевой кислоты в пересчете на SiO_2 , мг/л. В этом случае фактическая сорбционная емкость шлама по соединениям кремниевой кислоты в пересчете на SiO_2 рассчитывается следующим образом:

- в пересчете на 1 мг шлама

$$ЕШ_{SiO_2}^{факт} = \frac{m^{SiO_2}}{МО^п}, \frac{мг}{мг}; \quad (9)$$

- в пересчете на 1 мг-экв $Al(OH)_3$

$$ЕШ_{SiO_2}^{факт} = \frac{m^{SiO_2} \cdot 26}{МО^п}, \frac{мг}{мг-экв}, \quad (10)$$

где $МО^п$ – проба минерального остатка, полученного после прокаливания шлама, мг; m^{SiO_2} – масса SiO_2 , полученная при прокаливании беззольного фильтра, мг.

Показатели качества: ПП, массовая концентрация соединений железа, массовая концентрация соединений кремниевой кислоты – определялись в подготовленных пробах шлама.

Пробы шлама были отобраны из систем предварительной очистки воды, поддерживающих режим коагуляции. В качестве объектов исследования выбраны предприятия, использующие в качестве исходной воды поверхностные источники, входящие в перечень предложенной классификации (см. табл. 1).

Образцы шлама подвергались просушиванию в сушильном шкафу при температуре 110 °С до сохранения постоянной массы, а их хранение перед непосред-

ственным анализом осуществлялось в лабораторных условиях в эксикаторе.

Потери при прокаливании определялись путем сжигания и прокаливания навески шлама в муфельной печи при температуре 850 °С. Далее следовало гравиметрическое измерение массы оставшегося минерального остатка. Разница между исходной массой навески и минеральным остатком и является потерями при прокаливании.

Далее навеска минерального остатка подвергалась растворению в концентрированной соляной кислоте с трехкратным упариванием. Полученный раствор отфильтровывался через беззольный фильтр.

Беззольный фильтр сжигался в муфельной печи при температуре 900 °С и определялась масса несгоревшего остатка, который считается как нерастворимый остаток. В состав нерастворимого осадка входит только SiO_2 , так как компоненты кремниевой кислоты не растворимы в соляной кислоте.

Для определения массовой концентрации соединений железа в пересчете на Fe использовался метод определения ионов железа в соответствии с ГОСТ 23268.11-78. Анализ подвергался отфильтрованный раствор, полученный при растворении навески минерального остатка шлама.

Результаты исследования. Исследованы шламы, полученные при коагуляции следующих вод:

– вода типа 1 – р. Ухтохма (г. Комсомольск, Ивановские ПГУ, осветлители ВТИ-350, в режиме коагуляции и в режиме коагуляции с флокулянтom марки AN 923 PWG);

– вода типа 2 – р. Шексна (г. Череповец, ПАО «Северсталь», ТЭЦ-ПВС УГЭ, горизонтальные осветлители максимальной производительностью 300 м³/ч, в режиме коагуляции и в режиме коагуляции с флокулянтom Праестол 853 ВС);

– вода типа 3 – оз. Нигозеро (г. Кондопога, ТЭС КБК, горизонтальные осветлители проектной максимальной производительностью 300 м³/ч, в режиме коагуляции с подщелачиванием).

Основные результаты исследований удельных сорбционных емкостей шламов гидроксида алюминия приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты определения фактических удельных сорбционных емкостей шламов (в пересчете на гидроксид алюминия)

Источник водоснабжения и условия коагуляции		$E_{\text{орг}}^{\text{факт}}$, г/г (г/г-экв)	$E_{\text{Fe}}^{\text{факт}}$, г/г (г/г-экв)	$E_{\text{SiO}_2}^{\text{факт}}$, г/г (г/г-экв)
р. Ухтохма, тип 1, г. Комсомольск, Ивановские ПГУ (доза коагулянта 2,0 мг-экв/дм ³ ; щелочность, исходной воды 3,4 мг-экв/дм ³)	без флокулянта	0,92 (23,92)	0,122 (3,17)	0,269 (7,00)
	с флокулянтом AN 923 PWG	1,00 (26,00)	0,214 (5,56)	0,195 (5,07)
	без флокулянта	0,75 (19,5)	0,045 (1,17)	-
р. Шексна, тип 2, г. Череповец, ПАО «Северсталь» (доза коагулянта 1,0 мг-экв/дм ³ ; щелочность, исходной воды 1,5 мг-экв/дм ³)	без флокулянта	1,35 (35,1)	0,051 (1,33)	0,294 (7,64)
	с флокулянтом Праестол 853 BC	1,54 (40,04)	0,058 (1,51)	0,348 (9,05)
оз. Нигозеро, тип 3, г. Кондопога, КБК (доза коагулянта 0,6 мг-экв/дм ³ ; щелочность, исходной воды 0,16 мг-экв/дм ³)	без флокулянта	2,24 (58,24)	0,094 (1,79)	0,091 (2,37)

Примечание. Результаты расчета фактических удельных сорбционных емкостей шламов при коагуляции вод сульфатом алюминия приведены в пересчете на гидроксид алюминия. При малых значениях pH образуется шлам, состоящий из гидроксида алюминия и его основных сульфатов. По этой причине данные таблицы для вод типа 3 являются оценочными.

Результаты исследования сорбционных характеристик шламов гидроксида алюминия (табл. 2) показывают следующее:

1) практически наблюдаемая удельная сорбционная емкость шлама по органическим веществам $E_{\text{орг}}^{\text{факт}}$ при коагуляции увеличивается при увеличении номера типа воды (следовательно, ее щелочности и солесодержания). Значение $E_{\text{орг}}^{\text{факт}}$ для вод типа 1 немного меньше, чем значение емкости, рассчитанной по эмпирической формуле (4), используемой для определения рекомендуемой дозы коагулянта. Для вод типов 2 и 3 значение $E_{\text{орг}}^{\text{факт}}$ существенно больше, чем для вод типа 1. Это свидетельствует о наличии большего избытка коагулянта, требующегося для установления уменьшенного значения pH_{25} вод типа 1. Обоснованием этого предположения является возможность равноэффективной коагуляционной очистки воды р. Уводь на Ивановской ТЭЦ-2 как при обработке воды сульфатом алюминия с дозой 1,2 мг-экв/дм³, так и при совместной обработке воды сульфатом алюминия с дозой 0,8 мг-экв/дм³ и серной кислотой с дозой 0,4 мг-экв/дм³. В данном случае экономия коагулянта и соответствующее уменьшение выхода шлама гидроксида алюминия (ориентировочно на 30 %) могут быть достигнуты при подкислении исходной воды серной кислотой;

2) большее значение удельной сорбционной емкости по органическим веществам и, соответственно, экономия коагулянта (и щелочи при необходимости подщелачивания воды) достигаются при коагуляционной обработке маломинерализованных вод (например, воды из оз. Нигозеро) за счет проведения коагуляции сульфатом алюминия с уменьшенной на 25 % дозой по отношению к рекомендованной дозе, определяемой формулой (1), и меньших значениях pH_{25} коагулированной воды;

3) удельная сорбционная емкость шлама по соединениям железа $E_{\text{Fe}}^{\text{факт}}$ при коагуляции увеличивается при увеличении номера типа воды (следовательно, ее щелочности и солесодержания). Этот опытный результат не противоречит факту симбатности и пропорциональности уменьшений окисляемости и железосодержания вод при коагуляции. При увеличении доли железоорганики в общей массе органических соединений ее сорбция усилена и увеличены значения $E_{\text{Fe}}^{\text{факт}}$.

При коагуляционной обработке сульфатом алюминия вод типа 2, как и для вод типа 1, фактические значения оптимальных доз также больше рекомендованной дозы, рассчитанной по (1). Это объясняется большей эффективностью коагуляции при уменьшенных значениях pH_{25} . Уменьшение доз сульфата алюминия при использовании серной кислоты с сохранением оптимального уменьшенного значения показана

теля pH_{25} способствует для всех ВПУ уменьшению выхода шлама, а для ВПУ, работающих по технологии ионитного обессоливания маломинерализованной воды, обеспечивает также меньшую потребность в кислоте и гидроксиде натрия для регенерации.

Выводы. Полученные значения сорбционных емкостей шлама по органическому веществу для вод второго и третьего типов избыточны по сравнению с полезной удельной сорбционной емкостью шлама соответственно на 22,1 и 89,6 %. Прослеживается взаимосвязь сорбционных емкостей по органическим веществам, соединениям железа и соединениям кремниевой кислоты, так как все эти компоненты входят в состав гуминовых веществ и коллоидных примесей. Полученные результаты свидетельствуют об избыточном количестве коагулянта и возможности снизить затраты на реагенты. Действительно, при стоимости 18-водного сульфата алюминия 2775 руб/кг-экв (25000 руб/т) и стоимости технической 92 %-й серной кислоты 323 руб/кг-экв (6600 руб/т) прямые эксплуатационные затраты на приобретение реагентов меньше при комбинированной обработке воды сульфатом алюминия и серной кислотой. Возможность снижения затрат при уменьшении потребления коагулянта существует при коагуляционной обработке вод с увеличенной щелочностью и относительно небольшой окисляемостью. К таким водам можно отнести, например, воду р. Уводь (Ивановская ТЭЦ-2, ВПУ подпитки теплосети) и продувочные воды многих систем оборотного охлаждения с градирнями, используемые в качестве исходных вод ВПУ.

Список литературы

1. Гетманцев С.В. Система выбора эффективных технологий очистки природных вод с применением алюмосодержащих коагулянтов // Водоснабжение и санитарная техника. – 2011. – Вып. 8. – С. 4–9.

2. Широкова В.А. Классификации природных вод: прошлое, настоящее, будущее // Вестник ТГУ. – 2013. – Вып. 3. – С. 1023–1027.

3. Драгинский В.Л., Алексеева Л.П., Гетманцев С.В. Коагуляция в технологии очистки природных вод. Науч. изд. – М., 2005. – 576 с.

4. Гетманцев С.В., Гандурина Л.В., Сычев А.В. Сравнение эффективности алюмосодержащих коагулянтов при очистке мутных речных вод // Водоснабжение и сан. техника. – 2012. – № 4. – С. 44–46.

5. Николаева Л.А., Голубчиков М.А. Влияние природы гидрофобизатора на сорбционную емкость шлама осветлителей ТЭС // Вода: химия и экология. – 2011. – № 10. – С. 46–49.

6. Николаева Л.А., Исхакова Р.Я. Очистка оборотных и сточных вод ТЭС от нефтепродуктов модифицированным шламом водоподготовки // Теплоэнергетика. – 2017. – № 6. – С. 72–78. DOI: 10.1134/S0040363617060042

7. Николаева Л.А., Недзвецкая Р.Я. Исследование утилизации шлама водоподготовки ТЭС в качестве сорбента при биологической очистке сточных вод промышленных предприятий // Вода: химия и экология. – 2012. – № 8. – С. 80–84.

8. Лурье Ю.Ю. Унифицированные методы анализа вод. – М.: Изд-во «Химия», 1973. – 376 с.

References

1. Getmantsev, S.V. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*, 2011, issue 8, pp. 4–9.

2. Shirokova, V.A. *Vestnik TGU*, 2013, issue 3, pp. 1023–1027.

3. Draginskiy, V.L., Alekseeva, L.P., Getmantsev, S.V. *Koagulyatsiya v tekhnologii ochistki prirodnykh vod* [Coagulation in natural water treatment technology]. Moscow, 2005. 576 p.

4. Getmantsev, S.V., Gandurina, L.V., Sychev, A.V. *Vodosnabzhenie i san. tekhnika*, 2012, no. 4, pp. 44–46.

5. Nikolaeva, L.A., Golubchikov, M.A. *Voda: khimiya i ekologiya*, 2011, no. 10, pp. 46–49.

6. Nikolaeva, L.A., Iskhakova, R.Ya. *Teploenergetika*, 2017, no. 6, pp. 72–78. DOI: 10.1134/S0040363617060042

7. Nikolaeva, L.A., Nedzvetskaya, R.Ya. *Voda: khimiya i ekologiya*, 2012, no. 8, pp. 80–84.

8. Lur'e, Yu.Yu. *Unifitsirovannye metody analiza vod* [Unified methods for water analysis]. Moscow: Izdatel'stvo «Khimiya», 1973. 376 p.

УДК 536.3

Анатолий Иванович Сокольский

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры энергетики теплотехнологий и газоснабжения, Россия, Иваново, e-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Евгений Валентинович Гусев

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры энергетики теплотехнологий и газоснабжения, Россия, Иваново, e-mail: gusev_pcm@mail.ru; tevp@tvp.ispu.ru

Петр Аркадьевич Шомов

Научно-технический центр «Промышленная энергетика», кандидат технических наук, директор, Россия, Иваново, e-mail: ljwtyinfo@ipromenergo.ru

Владимир Юрьевич Пронин

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры энергетики теплотехнологий и газоснабжения, Россия, Иваново, e-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Методика тепломассообменного расчета процесса охлаждения технической воды на ТЭЦ при работе пруда-охладителя с брызгальными устройствами

Авторское резюме

Состояние вопроса. Производство электрической энергии на тепловых и атомных электростанциях связано с отводом большого количества тепловой энергии, для утилизации которой применяют охлаждающие устройства (градирни, брызгальные бассейны, водохранилища). Повышение эффективности охлаждающей способности данного оборудования в системе оборотного водоснабжения ТЭЦ связано с понижением температур, отвечающих оптимальным технико-экономическим показателям работы объекта. Этим проблемам посвящены работы И.И. Макарова, В.А. Гладкова, Б.С. Фарфаровского, З.К. Маймекова, С.А. Супруна. В связи с этим актуальным является разработка методики расчета процесса охлаждения технической воды для создания температурного режима работы оборудования при конденсации отработанного рабочего тела паровых турбин и минимизации количества добавочной воды из реки Томь в теплый период года.

Материалы и методы. Для оценки работы брызгательных устройств использованы экспериментальные данные, полученные при обследовании пруда-охладителя Западно-Сибирской ТЭЦ (г. Новокузнецк), методы физического моделирования тепломассопереноса.

Результаты. Для повышения эффективности охлаждения технической воды на ТЭЦ предлагается дополнительно к существующему пруду-охладителю установить брызгальные устройства. Разработана методика расчета процесса охлаждения воды в брызгальных устройствах при совместной работе с прудом-охладителем, основанная на расчете оптимальной температуры воды в точке забора при соблюдении режимных параметров работы конденсаторов турбогенераторов и отличающаяся от существующих учетом влияния явлений теплоотдачи и массообмена в пограничном слое у поверхности диспергированных капель воды.

Выводы. Полученные экспериментально-расчетные данные подтверждают, что применение брызгательных устройств в пруде-охладителе снижает количество добавочной воды, забираемой из реки Томь, по сравнению с лимитным ее расходом почти в 10 раз при установленном перепаде температур при конденсации отработанного пара в летний период года. Методика расчета охлаждения технической воды в пруде-охладителе с брызгательными устройствами рекомендуется к внедрению на Западно-Сибирской ТЭЦ (г. Новокузнецк).

Ключевые слова: техническая вода, пруд-охладитель, брызгальные устройства, сопла, конденсатор, система охлаждения, теплоотдача, массообмен, самоиспарение

Anatoly Ivanovich Sokolsky

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Thermal Technologies and Gas Supply Department, Russia, Ivanovo, e-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Evgenii Valentinovich Gusev

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Thermal Technologies and Gas Supply Department, Russia, Ivanovo, e-mail: gusev_pcm@mail.ru; tevp@tvp.ispu.ru

Petr Arkadieievich Shomov

Research and Development Center "Industrial Energy", Candidate of Engineering Sciences (PhD), Director, Russia, Ivanovo, e-mail: ljwtyinfo@ivpromenergo.ru

Vladimir Yurievich Pronin

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Thermal Technologies and Gas Supply Department, Russia, Ivanovo, e-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Method of heat and mass transfer calculation of cooling technical water process at CHP plant when cooling pond with spray devices is operated

Abstract

Background. The generation of electrical energy at thermal and nuclear power plants is associated with outward heat transmission of large amount. Cooling devices (cooling towers, spray pools, reservoirs) are used for its utilization. The increase of the efficiency of the cooling capacity of this equipment in the circulating water supply system of the CHP plant is occurred due to a decrease of temperatures that meet the optimal technical and economic performance of the facility. The studies of I.I. Makarova, V.A. Gladkova, B.S. Farfarovsky, Z.K. Maimekova, S.A. Suprun are devoted to these issues. The aim of the study is to develop a methodology to calculate the process of cooling technical water to create an operating temperature mode of the equipment during condensation of the waste heat of steam turbines and to minimize the amount of additional water from the Tom River in the warm season.

Materials and methods. To evaluate the operation of spray devices the authors have used experimental data obtained during the survey of the cooling pond of the West Siberian CHP plant in Novokuznetsk city and methods of physical modeling of heat and mass transfer.

Results. To increase the efficiency of technical water cooling at the CHP plant, it is proposed to install spray devices in addition to the existing cooling pond. A method has been developed to calculate the process of water cooling in spray devices during collaboration with a cooling pond. The method is based on the calculation of the optimal water temperature at the intake point in accordance with the operating parameters of turbine generator condensers. The method differs from the existing ones as it considers the influence of heat transfer and mass transfer phenomena in the boundary layer near the surface of dispersed drops water.

Conclusions. The experimental and calculated results confirm that the use of spray devices in the cooling pond reduces the amount of additional water taken from the Tom River compared to its limit flow by almost 10 times at the established temperature difference during the condensation of exhaust steam in the summer period of the year. The method to calculate the cooling of technical water in a cooling pond with spray devices is recommended for implementation at the West Siberian CHP plant in Novokuznetsk city.

Key words: technical water, cooling pond, spray devices, nozzles, condenser, cooling system, heat transfer, mass transfer, self-evaporation

DOI: 10.17588/2072-2672.2022.2.021-028

Введение. На тепловых электростанциях при выработке электрической энергии выделяется значительное количество тепловой энергии в виде нагретой воды, особенно в теплый период года. Эффективное охлаждение воды искусственных или естественных водоемов за счет увеличения их поверхностной площади зеркала далеко не всегда возможно, поэтому на практике широко применяются и другие способы, одним из которых является распыление воды на мелкие капли при помощи форсунок (сопел), конструкции и режимные параметры которых определяют поверхность охла-

ждения водяного факела. При повышении напора она увеличивается вследствие удлинения траекторий полета капель и уменьшения их диаметра.

Совместная работа брызгальных устройств с водохранилищами-охлаждающими используется при недостаточной охлаждающей способности водоема в теплый период года. Работа брызгальных устройств в этих случаях носит периодический характер, исходя из обеспечения максимально допустимой по технологическим требованиям температуры воды в точке забора.

Ниже определяется эффективность снижения расхода добавочной технической воды из водоема (в точке забора) за счет повышения охлаждающей способности пруда-охладителя с брызгальными устройствами при совместной работе с турбинными установками при выработке электрической мощности 400 МВт в теплый период года.

Методы исследования. Объектом исследований является Западно-Сибирская ТЭЦ – филиал «ЕВРАЗ ЗСМК» (в дальнейшем ЗС ТЭЦ). ЗС ТЭЦ располагается рядом с территорией Западно-Сибирского металлургического комбината (г. Новокузнецк), который является главным потребителем производимой на ТЭЦ тепловой энергии. В настоящее время установленная электрическая мощность ТЭЦ составляет 600 МВт, тепловая мощность – 1307,5 Гкал/ч.

Для выполнения расчетов используются данные климатических наблюдений: среднемесячные значения температур наружного воздуха; максимальные и минимальные значения зафиксированных температур (по данным метеостанции г. Новокузнецка) в теплое время года (табл. 1).

Система охлаждения ЗС ТЭЦ прямо-точно-оборотная, состоит из пруда-охладителя, береговой насосной станции, циркуляционных водоводов, каналов и т.д. В качестве добавочной воды используется вода, забираемая из реки Томь. Расход добавочной воды составляет 20–30 % от общего расхода.

Согласно «Нормам водопотребления ЗС ТЭЦ», общий расход воды системы охлаждения турбогенераторов (ТГ) состав-

ляет 40049 м³/ч, в том числе расход воды на маслогазоохладители (МГО) – 3131 м³/ч. Забор воды из реки ограничен лимитом по договору. Максимальное значение лимитного расхода составляет 16800 м³/ч.

Основными потребителями технической воды на электростанции являются конденсаторы турбогенераторов.

Расход циркуляционной воды летом составляет 50–60 тыс. м³/ч, зимой – 24 тыс. м³/ч.

Средние за летние месяцы температуры составили: наружного воздуха 18 °С; исходной воды 16,9 °С; охлаждающей воды 26 °С.

Для повышения эффективности охлаждения технической воды на ТЭЦ предлагается дополнительно к существующему пруду-охладителю установить брызгальные устройства. Суммарный расход охлаждаемой воды должен обеспечивать нагревание воды в конденсаторах на 9–12 °С при выработке мощности 400 МВт.

Комплекс проведенных расчетов показывает, что требуемые параметры охлажденной воды могут быть достигнуты при охлаждении ее в пруду при расходах 19 тыс. м³/ч, в брызгальных устройствах – 36 тыс. м³/ч.

Брызгальные устройства предлагается выполнить в виде шести отдельных модулей производительностью по 6000 м³/ч с использованием сопел типа ЦО-85. Такая конструкция позволит в широком диапазоне регулировать температуру охлаждающей воды в зависимости от температурных условий наружного воздуха.

Таблица 1. Среднемесячные данные работы ЗС ТЭЦ (за 2018 год)

Параметры	Месяцы				
	V	VI	VII	VIII	IX
Среднее количество ТГ в работе	5,0	4,7	4,4	5,0	5,3
Выработка электроэнергии, тыс. кВт·ч	232680	170508	170810	199571	227511
– всего	1001080				
– по теплофикационному циклу	86620	28444	31533	32419	53125
Средняя мощность (брутто), МВт, в т.ч.	312,7	236,8	229,6	268,2	316,0
– по теплофикационному циклу	116,4	39,5	42,4	43,6	73,8
– по конденсационному циклу	196,3	197,3	187,2	224,7	242,2
Температура циркуляционной воды на входе в конденсатор, °С	19,2	28,1	27,8	30,3	24,9
Среднее давление в конденсаторе, кПа	8,3	11,2	12,6	14,1	–
УРУТ на отпуск электроэнергии, г/кВт·ч	411,66	481,21	482,35	478,04	394,68
Электрическая энергия на собственные нужды, %	10,6	13,29	12,14	12,32	10,79

Для расчета охлаждения циркуляционной воды брызгальными устройствами используется методика АО «ВНИИГ имени Б.Е. Веденеева», согласно которой температура охлажденной воды определяется в зависимости от режима работы охладителя при заданном давлении воды и метеоусловий [1–2].

При известных метеорологических условиях, параметрах циркуляционной воды, конструкции сопла на основе уравнения тепломассообмена между охлаждаемой водой и воздухом за счет тепловой конвекции и испарения температура воды t_{6y} на выходе из брызгального устройства определяется по выражению

$$t_{6y} = t_{16y} - K_{исп} \left[0,4t_p + \frac{r_p P_p^H}{c_{цв} P} - \left(0,4t_b + \varphi_{воз} \frac{r_b P_b^H}{c_{цв} P} \right) \right], \quad (1)$$

где $K_{исп} = \beta_p F / V_{6y}$ – число испарения; β_p – коэффициент массоотдачи, отнесенный к разности парциальных давлений, кг/(м²с); F – общая поверхность капель в факеле разбрызгивания, м²; V_{6y} – расход воды в брызгальном устройстве, м³/с; $t_{16y} = t_{2x}$ – температура воды на входе в брызгальное устройство, °С; t_p – расчетная температура в брызгальном устройстве, °С; r_p – удельная теплота парообразования при t_p , кДж/кг; P_p^H – давление насыщенного пара при температуре t_p , кПа; $c_{цв}$ – удельная теплоемкость воды, кДж/кг; P – давление наружного воздуха, кПа; t_b – температура воздуха, °С; $\varphi_{воз}$ – относительная влажность наружного воздуха; r_b – удельная теплота парообразования при t_b , кДж/кг; P_b^H – давление насыщенного пара при t_b , кПа.

Используя приведенную методику, методом последовательных приближений рассчитываются температура циркуляционной воды на выходе из брызгального устройства с учетом влияния нагрева воды в конденсаторах турбин и температура воды в точке забора. Расчет производится для сопла ЦО-85 при давлении воды перед соплом 0,14 МПа. Температура свободной поверхности пруда-охладителя $t_{св} = 34$ °С.

Правильность расчетов проверим по методике, учитывающей процессы теплоотдачи и массообмена, протекающие в пограничном слое у поверхности капель при определяющей температуре t_0 [3].

Современные турбины обычно проектируются так, что экономическая нагрузка

составляет 0,8–0,9 от той максимальной мощности, которую турбина может развивать в течение длительного времени [4].

Для получения требуемой электрической мощности $N_{тр}^э = 400$ МВт принимаем к расчету 6 турбоагрегатов: ТГ1, ТГ2, ТГ3, ТГ4, ТГ5, ТГ6, электрическая мощность которых приведена в табл. 2. Каждая из турбин имеет систему регенерации.

Таблица 2. Рабочие параметры турбин

Тип турбины	Мощность, МВт	Расход пара, кг/с	Тепловой поток, кВт
ТГ-1	48,25	48,67	82287,7
ТГ-2	39,75	40,1	67798,1
ТГ-3	48,25	48,67	82287,7
ТГ-4	82,25	82,97	140279,7
ТГ-5	90,75	91,55	154786,1
ТГ-6	90,75	91,55	154786,1

Расход пара на теплофикационную турбину с регенеративными отборами определяется выражением

$$D_{тгi} = \beta_p (D_{тг(k)} + \sum D_T y_T), \quad (2)$$

где β_p – коэффициент, учитывающий увеличение расхода пара на турбину с регенеративными отборами (для современных теплофикационных турбин $\beta_p \approx 1,15$); $D_{тг(k)}$ – расход пара на турбину с теми же параметрами, но без регенерации; D_T – расход пара на теплофикационные отборы; y_T – коэффициент недовыработки мощности паром теплофикационных отборов.

В летний период турбоагрегаты работают в конденсационном режиме при $D_T y_T = 0$.

Расход пара на турбину без регенерации составляет

$$D_{тг(k)i} = N_{тгi}^э / H_i \eta_i \eta_{гi}, \quad (3)$$

где $H_i = (h_0 - h_{ki})$ – использованный теплоспад турбины [5]; h_0 – энтальпия пара на входе в турбину при P_0 , t_0 ; h_{ki} – энтальпия пара на выходе из турбины при P_k , $x_k = 0,9$; η_m – механический КПД; η_g – КПД генератора.

Коэффициент η_g зависит от мощности генератора, числа оборотов и способа охлаждения [6]. Для генераторов большой мощности (от 50 МВт и выше) с водородным охлаждением при $n = 3000$ об/мин можно принимать $\eta_g = 0,985$; $\eta_m = 0,99$.

Начальные параметры пара, рекомендуемые для турбин ТЭЦ, следующие: $P_0 = 130$ кг/см², $t_0 = 560$ °С. Рекомендуемое

для летних условий давление в конденсаторах составляет $P_k = 7$ кПа при $h_0 = 3500$ кДж/кг, $h_{ki} = 2331$ кДж/кг; энтальпия конденсата – $h'_{ki} = 163,4$ кДж/кг при $P_k = 7$ кПа, $x = 0$.

Конденсационные установки ТГ1, ТГ2, ТГ3 состоят из одного конденсатора, а ТГ4, ТГ5, ТГ6 – из двух конденсаторов. Общее количество конденсаторов – 9 шт. с номинальным расходом циркуляционной воды $V_{цв}^H = 8000$ м³/ч или $G_{цв}^H = 2206,7$ кг/с.

Тепловой поток рассчитывается из уравнения

$$Q_{ТГ}^K = D_{ТГ}^K (h_{ki} - h'_{ki}). \quad (4)$$

Рассчитанные рабочие параметры турбин приведены в табл. 2.

Рекомендуемый расход циркуляционной воды на конденсаторы составляет $V_k = 55000$ м³/ч или $G_k = 15170,8$ кг/с [7–8]. В связи с этим фактический расход циркуляционной воды на один конденсатор составляет $V_{цв} = 55000/9 = 6111,1$ м³/ч или $G_{цв} = 1685,6$ кг/с.

Результаты поверочного расчета конденсаторов приведены в табл. 3.

Исходными данными для расчета охлаждения воды в брызгальном устройстве являются: расход воды $V_{бв} = 140,2$ м³/ч; диаметр сопла $d_c = 0,085$ м; высота факела $h_{ф} = 6$ м; расходы циркуляционной воды: общий $V_{цв} = 55000$ м³/ч, через пруд-охладитель $V_{пр} = 19000$ м³/ч и брызгальные устройства $V_{бв} = 36000$ м³/ч; температура воздуха $t_b = 25,6$ °С; температура мокрого термометра $t_m = 19$ °С; относительная влажность воздуха $\varphi_{воз} = 0,55$; давление наружного воздуха $P = 98067$ Па = 735,6 мм рт.ст.; температура свободной поверхности пруда $t_{ов} = 34$ °С; число испарения $K_{исп} = 0,6$.

Расчетная температура воды в брызгальном устройстве составляет

$$t_p = t_{2к} - 0,5 \Delta t_{ксп} = 36,77 - 0,5 \cdot 10,83 = 31,35 \text{ °С}. \quad (5)$$

При этом давление насыщенного пара и удельная теплота парообразования при температуре t_p имеют значения: $P_p^H = 4,587$ кПа; $r_p = 2427$ кДж/кг.

Температура воды на выходе из брызгального устройства определяется выражением (1):

$$t_{2бв} = 36,77 - 0,6 \left(0,4 \cdot 31,35 + \frac{2427 \cdot 4,587}{4,19 \cdot 98,067} \right) - 0,6 \left(0,4 \cdot 25,6 + 0,55 \cdot \frac{2440 \cdot 3,283}{4,19 \cdot 98,067} \right) = 25,56 \text{ °С}.$$

Температура охлажденной воды на выходе из пруда-охладителя рассчитывается из уравнения

$$t_{ов} = t_{св} - 0,25 \Delta t_K = 34 - 0,25 \cdot 10,83 = 31,29 \text{ °С}. \quad (6)$$

Температура циркуляционной воды на входе в конденсаторы составляет

$$t'_{1к} = (V_{пр} t_{ов} + V_{бв} t_{2бв}) / V_{цв} = (19000 \cdot 31,29 + 36000 \cdot 25,56) / 55000 = 27,54 \text{ °С}. \quad (7)$$

Уточнение температуры циркуляционной воды на входе в конденсатор производится по полученным значениям температуры $t'_{1к}$.

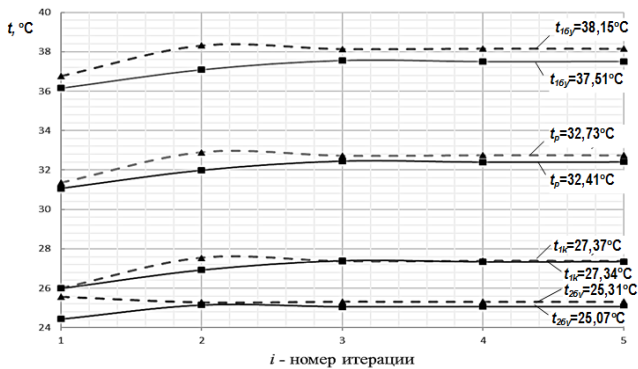
Температура циркуляционной воды на выходе из конденсаторов рассчитывается как

$$t_{2к} = \frac{G_{цв}}{G_k} \left[(t'_{1к} + \Delta t_{к1}) + (t'_{1к} + \Delta t_{к2}) + (t'_{1к} + \Delta t_{к3}) + 2(t'_{1к} + \Delta t_{к4}) + 2(2(t'_{1к} + \Delta t_{к4})) \right] = \frac{1685,6}{15170,8} \left[(27,54 + 11,69) + (27,54 + 9,636) + (27,54 + 11,69) + 2(27,54 + 9,969) + 2(2(27,54 + 9,969)) \right] = 38,31 \text{ °С}. \quad (8)$$

Используя метод последовательных приближений, повторяют расчет $t'_{1к}$ и $t_{2к}$ до постоянных значений. Результаты расчета приведены на рисунке.

Таблица 3. Результаты поверочного расчета конденсаторов

Тип турбины	$F_p, \text{ м}^2$	$\omega_{цв}, \text{ м/с}$	$d_k, \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{ч)}$	$\bar{K}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°С)}$	$\Delta t_k, \text{ °С}$	$\Delta t, \text{ °С}$	$P'_k, \text{ кПа}$
ТГ1	3027,7	1,409	45,13	4959,7	11,69	1,568	7,094
ТГ2	2933,1	1,684	37,6	5341,3	9,636	1,105	6,193
ТГ3	2933,1	1,684	46,59	6721	11,69	0,755	6,792
ТГ4	6279,3	1,609	37,1	5282,1	9,969	1,042	6,285
ТГ5,6	6279,3	1,609	40,93	5250,9	11	1,167	6,690



Значения температур оборотной воды при работе турбогенераторов и $P_c = 0,14$ МПа: - - - - - на расчетной мощности; — на номинальной мощности

Погрешность между полученными окончательными температурами составляет

$$\delta = \frac{t'_{1к} - t''_{1к}}{t'_{1к}} = \left(\frac{27,38 - 27,37}{27,38} \right) 100 = 0,03 \%. \quad (9)$$

Число устанавливаемых сопел равно

$$n_c = V_c / V_c = 36000 / 140,2 = 257 \text{ шт.} \quad (10)$$

Средняя температура циркуляционной воды в процессе испарения определяется полученными из расчета данными (см. рисунок):

$$t_{6y}^{cp} = 0,5(t_{16y} + t_{26y}) = 0,5(38,15 + 25,31) = 31,73 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (11)$$

При этой температуре плотность, удельная теплоемкость воды, удельная теплота парообразования составляют: $\rho_{цв} = 995,1 \text{ кг/м}^3$; $c_{цв} = 4,174 \text{ кДж/кг}$; $r_{и} = 2426 \text{ кДж/кг}$.

Скорость истечения воды из сопла определяется из уравнения расхода:

$$\omega_c = \frac{4V_c}{3600\pi d_c^2} = \frac{4 \cdot 140,2}{3600 \cdot 3,14 \cdot 0,085^2} = 6,866 \text{ м/с}. \quad (12)$$

Средняя скорость капель в факеле рассчитывается как

$$\omega_{cp} = 0,5\omega_c = 0,5 \cdot 6,866 = 3,433 \text{ м/с}. \quad (13)$$

Время пребывания капель в факеле составляет

$$\tau = 2h_{ф} / \omega_{cp} = (2 \cdot 6) / 3,433 = 3,49 \text{ с}. \quad (14)$$

При $\omega_{cp} > 0,5$ м/с парциальное давление водяного пара в движущемся воздухе можно рассчитать по выражению

$$P_{п} = P'_{нас} - A(t_b - t_m)P, \quad (15)$$

где $P'_{нас}$ – давление насыщенного пара при t_m ; A – коэффициент, зависящий от ряда факторов, из которых основным является скорость воздуха:

$$A = 0,00001(65 + 6,75/\omega_{cp}) = 0,00001(65 - 6,75/3,433) = 0,00063. \quad (16)$$

Парциальное давление водяного пара с учетом выражения (15) составляет

$$P_{п} = 16,48 - 0,00063(25,6 - 19)735,6 = 13,41 \text{ мм рт. ст.}$$

Определяющая температура равна

$$t_o = 0,5(t_{cp}^{6y} + t_b) = 0,5(31,73 + 25,6) = 28,66 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (17)$$

При рассчитанных значениях температуры t_b и влагосодержания воздуха в пограничном слое при $\varphi_{пс} = 0,5(\varphi_{нас} + \varphi_{воз}) = 0,8 \text{ кг(Н}_2\text{О)/кг(св)}$ температура мокрого термометра составляет $t_m = 25,9 \text{ } ^\circ\text{C}$ и давление $P_{нас} = 25,08 \text{ мм рт. ст.}$

Скорость испарения рассчитывается как

$$G_{и} = 0,04075\omega_{cp}^{0,8}\Delta P = 0,04075 \cdot 3,433^{0,8} \times (25,08 - 13,41) = 1,276 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{ч)}. \quad (18)$$

Количество теплоты, отданное каплями в процессе испарения, составляет

$$Q_{и} = \frac{V_c \rho_{цв} c_{цв}}{3600} (t_{16y} - t_{26y}) = \frac{140,2 \cdot 995,1 \cdot 4,174}{3600} \times (38,15 - 25,31) = 2077 \text{ кВт}. \quad (19)$$

Количество испаренной влаги равно

$$W_{и} = Q_{и} / r_{и} = 2077 / 2426 = 0,856 \text{ кг/с}. \quad (20)$$

Поверхность капель рассчитывается как

$$F_{к} = W_{и} / G_{и} = 0,856 / 0,000354 = 2418 \text{ м}^2. \quad (21)$$

Диаметр капель составляет

$$d_{к} = \frac{6V_c \tau}{F_{к}} = \frac{6 \cdot 140,2 \cdot 3,49}{3600 \cdot 2418} = 0,000337 \text{ м}. \quad (22)$$

А.В. Нестеренко на основе экспериментальных работ предложил определять коэффициент теплоотдачи α для испарения воды со свободной поверхности по следующей критериальной зависимости [9]:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot \ell}{\lambda} = 4(Gr \cdot Pr)^{0,108}, \quad (23)$$

где теплофизические параметры воздуха при определяющей температуре $t_b = 28,66 \text{ } ^\circ\text{C}$: $Pr = \mu \cdot c / \lambda = 0,702$ – критерий Прандтля; $\lambda = 0,0269$ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); $\nu = 15,7 \cdot 10^{-6}$ – кинематический

коэффициент вязкости, м²/с; Gr – критерий Грасгофа:

$$Gr = \frac{g \ell^3}{\nu^2} (t_{\text{б}}^{\text{ср}} - t_{\text{в}}) \beta_t = \frac{9,81 \cdot (0,597 \cdot 10^{-3})^3}{(15,7 \cdot 10^{-6})^2} \times \quad (24)$$

$$\times (31,73 - 25,6) 0,0033 = 0,171,$$

где

$$\ell = \sqrt{\pi d_k^2} = \sqrt{3,14 (0,337 \cdot 10^{-3})^2} = 0,597 \cdot 10^{-3} -$$

определяющий размер, м; $\beta_t = T_{\text{в}}^{-1} = (25,6 + 273)^{-1} = 0,0033$ – коэффициент объемного расширения, 1/К.

Критерий Нуссельта определяется по уравнению (23):

$$Nu = 4(0,171 \cdot 0,702)^{0,108} = 3,215.$$

Коэффициент теплоотдачи рассчитывается как

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{\ell} = \frac{3,215 \cdot 2,69 \cdot 10^{-2}}{0,597 \cdot 10^{-3}} = 144,8 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}. \quad (25)$$

Количество теплоты, переданное в процессе теплообмена равно

$$Q_m = \alpha (t_{\text{б}}^{\text{ср}} - t_{\text{в}}) F_k 10^{-3} = 144,8 (31,73 - 25,6) 2418 \cdot 10^{-3} = 2147 \text{ кВт}. \quad (26)$$

Погрешность расчета составляет

$$\delta_Q = \frac{Q_m - Q_u}{Q_m} = \left(\frac{2147 - 2077}{2147} \right) 100 = 3,26 \%. \quad (27)$$

Количество испаренной влаги для определения коэффициента испарения с поверхности жидкости в турбулентный газовый поток рассчитывается по обобщенному уравнению:

$$Nu_m = 0,027 Re_m^{0,8} Pr_m^{0,33}, \quad (28)$$

где Re_m – критерий Рейнольдса:

$$Re_m = \frac{\omega_{\text{ср}} d_k}{\nu} = \frac{3,433 \cdot 0,332 \cdot 10^{-3}}{15,7 \cdot 10^{-6}} = 72,59; \quad (29)$$

Pr_m – массообменный критерий Прандтля:

$$Pr_m = \nu / D = 15,7 \cdot 10^{-6} / 25,05 \cdot 10^{-6} = 0,627, \quad (30)$$

где D – коэффициент диффузии:

$$D = D_0 \left(\frac{T_0}{273} \right)^{1,5} = 21,9 \cdot 10^{-6} \left(\frac{298,6}{273} \right)^{1,5} = 25,05 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \quad (31)$$

Массообменный критерий Нуссельта по критериальному уравнению (28) составит:

$$Nu_m = 0,027 \cdot 72,59^{0,8} \cdot 0,627^{0,33} = 0,713.$$

Интенсивность испарения влаги с поверхности жидкости рассчитывается по выражению

$$W'_i = \beta \cdot F \cdot \Delta X = 0,063 \cdot 2418 \cdot (0,0174 - 0,0116) = 0,883 \text{ кг/с}, \quad (32)$$

где β – коэффициент массоотдачи:

$$\beta = \frac{Nu_m D}{d_k} \rho_{\text{в}} = \frac{0,713 \cdot 25,05 \cdot 10^{-6}}{0,332 \cdot 10^{-3}} 1,18 = 0,063 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}; \quad (33)$$

X_1 – влагосодержание воздуха при температуре воздуха, кг(Н₂O)/кг(св):

$$X_1 = \frac{0,622 P_{\text{нас}} \varphi_{\text{пс}}}{(P - P_{\text{нас}} \varphi_{\text{пс}})} = \frac{0,622 \cdot 25,08 \cdot 0,8}{(735,6 - 25,08 \cdot 0,8)} = 0,0174 \text{ кг(Н}_2\text{O)/кг(св)}. \quad (34)$$

Погрешность расчета составляет

$$\delta_W = \frac{(W'_i - W_i)}{W'_i} 100 = \frac{(0,883 - 0,856)}{0,883} 100 = 3,05 \%. \quad (35)$$

Результаты расчета процессов охлаждения в брызгальном устройстве при заданном давлении, номинальной и расчетной мощностях турбин представлены в табл. 4.

В результате самоиспарения с поверхности зеркала пруда и испарения диспергированных капель количество охлаждающей воды можно рассчитать по выражению

Таблица 4. Результаты расчета процессов охлаждения

Давление P_c перед соплом, МПа	$t_{\text{б}}^{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$	$\omega_{\text{ср}}, \text{м/с}$	$\tau, \text{с}$	$F, \text{м}^2$	$d_k, \text{мм}$	$Q_m, \text{кВт}$	$W_i, \text{кг/с}$	$\delta_Q, \%$	$\delta_W, \%$
Номинальная мощность турбин									
0,10	33,74	2,899	3,79	1628	0,459	1573	0,668	1,46	4,19
0,12	32,43	3,178	3,58	1981	0,391	1761	0,756	1,72	2,24
0,14	31,25	3,433	3,49	2443	0,334	1997	0,831	0,2	1,21
Расчетная мощность турбин									
0,14	31,73	3,433	3,49	2418	0,332	2147	0,883	3,26	3,05

$$W_o = n_c W_{и} / \rho + W_{пр} = (n_c W_{и} + G_{и} F_{пр}) / \rho =$$

$$= (257 \cdot 0,883 \cdot 3600 +$$

$$+ 1,276 \cdot 700000) / 995 = 1719 \text{ м}^3/\text{ч},$$

где $F_{пр} = 700000 \text{ м}^2$ – поверхность зеркала пруда.

Выводы. Анализ полученных результатов позволяет сделать ряд выводов.

1. Показана возможность установки брызгальных устройств для увеличения охлаждающей способности пруда-охладителя ЗС ТЭЦ и получения электрической мощности 400 МВт в летний период.

2. Выполненный поверочный расчет установленных конденсаторов паровых турбин с учетом степени их загрязненности показал, что установка брызгальных устройств в пруде-охладителе позволяет минимизировать расход лимитной воды из реки Томь в теплое время года почти в 10 раз.

Список литературы

1. **Макаров И.И.** Особенности формирования гидротермического режима в нагруженных водохранилищах-охладителях и упрощенные способы расчета охлаждения воды // Тр. координ. совещ. по гидротехн. Вып. 105. – Л., 1975. – С. 46–50.

2. **Макаров И.И., Соколов А.С., Шульман С.Г.** Моделирование гидротермических процессов водохранилищ-охладителей ТЭС и АЭС. – Л.: Энергоиздат, 1986. – 184 с.

3. **Мамейков З.К., Малофеев Н.А., Малузов В.А.** Массообмен при испарении капель в воздух в колонне распылительного типа // ТОХТ. – 1984. – Т. 18, № 5. – С. 669–673.

4. **Шляхин П.Н.** Паровые и газовые турбины. – М.: Энергия, 1974. – 224 с.

5. **Бродов Ю.М., Савельев Р.З.** Конденсационные установки паровых турбин. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 288 с.

6. **Фарфоровский Б.С., Фарфоровский В.Б.** Охладители циркуляционной воды тепловых электростанций. – Л.: Энергия, 1972. – 111 с.

7. **Мадоян А.А., Паламарчук А.В., Симгин А.С.** Повышение эффективности использования охлаждающей воды прудов-охладителей АЭС и ТЭС // Экология промышленного производства. – 2005. – № 3. – С. 49–52.

8. **Кропоткин Б.И., Шеденко О.И.** Результаты исследований водозаборно-водовыпускных сооружений ТЭС и АЭС // Вестник КрасГАУ. – 2012. – № 12. – С. 159–163.

9. **Лыков А.В.** Тепломассообмен: справочник. – М.: Энергия, 1971. – 560 с.

10. **Оптимизация** циркуляционного потока охлаждающей воды на водоеме-охладителе БГРЭС-1 / С.А. Супрун, А.С. Савельев, О.Г. Морозова, М.А. Янова // Вестник КрасГАУ. – 2017. – № 11. – С. 147–153.

References

1. Makarov, I.I. Osobennosti formirovaniya gidrotermicheskogo rezhima v nagruzhennykh vodokhranilishchakh-okhladitelyakh i uproschennyye sposoby rascheta okhlazhdeniya vody [Features of the formation of the hydrothermal regime in loaded cooling reservoirs and simplified methods for calculating water cooling]. *Trudy koordinatsionnogo soveshchaniya po gidrotekhnike. Vyp. 105* [Proceedings of the coordination meetings on hydraulic engineering. Vol. 105]. Leningrad, 1975, pp. 46–50.

2. Makarov, I.I., Sokolov, A.S., Shul'man, S.G. *Modelirovanie gidrotermicheskikh protsessov vodokhranilishch-okhladiteley TES i AES* [Modeling of hydrothermal processes in reservoirs-coolers of TPPs and NPPs]. Leningrad: Energoizdat, 1986. 184 p.

3. Mameykov, Z.K., Malofeev, N.A., Malusov, V.A. Massoobmen pri isparenii kapel' v vozdukh v kolonne raspylitel'nogo tipa [Mass exchange during evaporation of droplets into air during evaporation of droplets into air in a spray column]. *ТОХТ*, 1984, vol. 18, no. 5, pp. 669–673.

4. Shlyakhin, P.N. *Parovye i gazovye turbiny* [Steam and gas turbines]. Moscow: Energiya, 1974. 224 p.

5. Brodov, Yu.M., Savel'ev, R.Z. *Kondensatsionnye ustanovki parovykh turbin* [Steam turbine condensing units]. Moscow: Energoatomizdat, 1994. 288 p.

6. Farforovskiy, B.S., Farforovskiy, V.B. *Okhladiteli tsirkulyatsionnoy vody teplovykh elektrostantsiy* [Circulating water coolers for thermal power plants]. Leningrad: Energiya, 1972. 111 p.

7. Madoyan, A.A., Palamarchuk, A.B., Simagin, A.C. Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya okhlazhdayushchey vody prудov-okhladiteley AES i TES [Improving the efficiency of using the cooling water of the cooling ponds of nuclear power plants and thermal power plants]. *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva*, 2005, no. 3, pp. 49–52.

8. Kropotkin, B.I., Shedenko, O.I. Rezul'taty issledovaniy vodozaborno-vodovypusknykh sooruzheniy TES i AES [Research results of water intake and water supply structures of TPP and NPP]. *Vestnik KrasGAU*, 2012, no. 12, pp. 159–163.

9. Lykov, A.V. *Heat and mass transfer: a reference book*. Moscow: Energy, 1971. 560 p.

10. Suprun, S.A., Savel'ev, A.S., Morozova, O.G., Yanova, M.A. Optimizatsiya tsirkulyatsionnogo potoka okhlazhdayushchey vody na vodoeme-okhladitele BGRES-1 [Optimization of the circulating flow of cooling water on the cooling pond BGRES-1]. *Vestnik KrasGAU*, 2017, no. 11, pp. 147–153.

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.3

Юлия Николаевна Кондрашова

ФГБОУВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова», кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий, Россия, Магнитогорск,
e-mail: rotjuil720@mail.ru

Ольга Викторовна Газизова

ФГБОУВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова», кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий, Россия, Магнитогорск,
e-mail: logan_b_7@mail.ru

Алексей Вячеславович Малафеев

ФГБОУВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова», кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий, Россия, Магнитогорск,
e-mail: malapheev_av@mail.ru

Повышение эффективности противоаварийной автоматики при перспективном подключении источников распределенной генерации

Авторское резюме

Состояние вопроса. Совершенствование энергоемких технологических процессов промышленных предприятий требует повышения надежности и экономичности электроснабжения потребителей. В связи с этим в энергетической отрасли осваивается одно из приоритетных направлений, связанных с повсеместным внедрением источников распределенной генерации. Данная тенденция имеет не только положительные аспекты, она усложняет управление нормальными, аварийными и послеаварийными режимами систем электроснабжения предприятий черной металлургии. При внедрении новых источников распределенной генерации в условиях сложнзамкнутой системы электроснабжения необходимо оценить уровень токов короткого замыкания для проверки электрооборудования и остаточные напряжения на шинах ответственных потребителей черной металлургии, определить предельные времена отключения генераторов и оценить их устойчивость при выходе на раздельную работу.

Материалы и методы. Алгоритм автоматизированного поиска точки раздела при аварийном выходе на раздельную работу в зависимости от баланса мощностей в целях сохранения устойчивости разработан на основе сочетания методов последовательного эквивалентирования и последовательных интервалов.

Результаты. В целях повышения надежности ответственных потребителей разработан алгоритм автоматического поиска точки раздела при работе делительной автоматики в зависимости от баланса мощностей для сохранения устойчивости генераторов. Разработано оригинальное программное обеспечение для оценки эффективности противоаварийной автоматики многоуровневой сложнзамкнутой системы электроснабжения металлургического предприятия.

Выводы. Выполненные расчеты и анализ аварийных и послеаварийных режимов предназначены для разработки комплексного подхода, содержащего совокупность мероприятий для обеспечения надежности и сохранения устойчивости ответственных потребителей в режиме автоматического поиска.

Ключевые слова: энергоемкий потребитель, объекты распределенной генерации, динамическая устойчивость, надежность потребителей, противоаварийная делительная автоматика

Julia Nikolaevna Kondrashova

Magnitogorsk State Technical University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Power Supply of Industrial Enterprises Department, Russia, Magnitogorsk, e-mail: rotjuil720@mail.ru

Olga Viktorovna Gazizova

Magnitogorsk State Technical University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Power Supply of Industrial Enterprises Department, Russia, Magnitogorsk, e-mail: logan_b_7@mail.ru

Alexey Vacheslavovich Malafeev

Magnitogorsk State Technical University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Power Supply of Industrial Enterprises Department, Russia, Magnitogorsk, e-mail: malapheev_av@mail.ru

Improving the efficiency of emergency control systems for future-oriented connection of sources of distributed generation

Abstract

Background. Improvement of energy-intensive technological processes of industrial enterprises requires increasing the reliability and efficiency of power supply of consumers. In this regard, one of the priority areas associated with introduction of the sources of distributed generation is mainstreamed in energy industry. This trend has both beneficial and negative impacts. It makes difficult to control normal, emergency, and post-emergency modes of power supply systems of enterprises of ferrous metallurgy. When new sources of distributed generation are introduced under the conditions of complex closed-loop power supply system, it is necessary to assess the level of short-circuit currents to check the electrical equipment and residual voltages across the busbars of the consumers of ferrous metallurgy. Also, it is necessary to determine the critical time of generators dropping and evaluate the stability in case of isolated operation.

Materials and methods. An algorithm has been developed for automated search of a dividing point in case of an emergency and isolated operation depending on the power balance to maintain stability. It is based on a combination of the method of successive network reduction and step-by-step method.

Results. To improve the reliability of essential consumers, the authors have developed an algorithm for automatic search for the dividing point during operation of emergency control system depending on the power balance to maintain stability. The authors have developed proprietary software to assess the effectiveness of emergency automation equipment of multi-level complex closed-loop power supply system of metallurgical enterprise.

Conclusions. Performed calculations and analysis of emergency and post-emergency modes are designed to develop a comprehensive approach of a set of measures to ensure the reliability and stability of essential consumers in the mode of automatic search.

Key words: energy-intensive consumer, distributed generation facilities, dynamical stability, reliability of consumers, emergency control system

DOI:10.17588/2072-2672.2022.2.029-037

Введение. Как показывает современное состояние энергетики и ресурсов энергосбережения РФ, важной задачей развития в области электроэнергетики России является последовательная интеллектуализация систем электроснабжения. При этом, согласно проекту Энергетической стратегии России на период до 2035 года, необходимы разработка и внедрение современных технологий, обеспечивающих эффективность

управления режимами, повышение надежности и безопасности. В условиях расширения собственной энергетической базы промышленных предприятий особый интерес представляют анализ последствий выхода на отдельную работу генераторов собственных нужд электростанций в различных условиях и оценка эффективности точки делительной автоматики. Проводимые исследования являются актуальными и в

дальнейшем позволят оценить и спрогнозировать варианты рабочих схем и выдать рекомендации по конфигурации промышленных энергоузлов для реализации их в общей энергосистеме. Комплекс мер позволит предотвратить развитие, снизить возникшие последствия аварий и повысить показатели качества электроэнергии путем обеспечения бесперебойности основных производственных цехов технологического процесса.

Расчеты для данных исследований предполагается производить с помощью оригинального программного обеспечения с использованием разработанного авторами алгоритма автоматического поиска точки раздела при работе делительной автоматики в зависимости от баланса мощностей в целях сохранения устойчивости генераторов.

Методы исследования. В общем случае крупный промышленный энергоузел представляет собой сложный многоступенчатый объект, сочетающей в себе разные функциональные назначения и объекты с разным номинальным напряжением. Особый интерес представляет внедрение разнородных объектов распределенной генерации в составе крупных энергоузлов предприятий черной металлургии, имеющих собственные источники распределенной генерации и связь с энергосистемой большой мощности. Как правило, в таких узлах вся вырабатываемая электроэнергия затрачивается на собственные цеха. Такая электроэнергия на порядок дешевле покупной, поскольку общая доля российских электростанций работает на природном газе, который в последнее время имеет динамику роста цен для промышленных предприятий. Основная же часть используемого газа на этих электростанциях является вторичным энергоресурсом – это доменный и коксовый газы. Максимальная мощность генерирующего оборудования на промышленных электростанциях, как правило, изменяется от 4 до 60 МВт. Большую долю составляют конденсационные паровые турбины, часть которых работает в теплофикационном режиме. Также на промышленной площадке присутствуют и генераторы с противодавлением. Вырабатываемая электроэнергия по классу напряжения различна и составляет от 3,15 до 10,5 кВ с дальнейшей трансформацией на 110 кВ. Схема электроснабжения промышленного энергоузла подключена к энергосистеме напряжением 220 и 500 кВ. Основное пита-

ние он получает с подстанций связи напряжением 500/220/110 кВ.

Как и в любом металлургическом производстве черной металлургии, покрывающем затраты на электроэнергию в соответствии с собственными потребностями, четко прослеживается, что режим работы металлообрабатывающего производства и металлообработки производителя полного металлургического цикла, начиная с подготовки железорудного сырья и заканчивая глубокой переработкой черных металлов, зависит от режима работы системы электроснабжения. Так, отключение электроэнергии приводит к нарушению технологических процессов, что ведет к значительным материальным затратам и временному простоям оборудования до нескольких месяцев. Наличие собственной электростанции и сети небольшой протяженности приводит к большим значениям токов короткого замыкания и низким остаточным напряжениям. Присутствует зависимость режима от напряжения энергосистемы, что объясняется неполным использованием функции регулирования реактивной мощности в электростанциях из-за высокой нагрузки на генератор по активной мощности. Для данной системы электроснабжения характерно наличие множества потребителей электроэнергии с разной установленной мощностью. Иногда установленная мощность агрегата может превышать номинальную мощность генератора, поэтому двигатели высокого напряжения следует рассматривать индивидуально. Наличие крупномасштабных энергоустановок на ограниченных территориях промышленной зоны и короткие связи между источниками энергии создают специфические условия работы для всей энергосистемы промышленного энергоузла. Создаются сложные условия для работы релейной защиты и противоаварийной автоматики. Таким образом, изучение этого объекта непременно сыграет положительную роль для повышения эффективности оперативной диспетчеризации систем электроснабжения и объектов распределенной генерации.

В качестве объекта исследования была выбрана паровоздуховная электростанция (ПВЭС-3), основной задачей которой является обеспечение бесперебойного снабжения обогащенного кислородом дутья на доменную печь. В настоящее время в рассматрива-

емом энергоузле функционируют ПВЭС-1,2, обеспечивающие цех, помимо электро-энергии, дутьем. Кроме трех воздуходувок, будут дополнительно установлены два генератора суммарной установленной мощностью 100 МВт (рис. 1). Их работа будет осуществляться через силовые трансформаторы на ОРУ-110 кВ. Особенно примечательно то, что на то же ОРУ-110 кВ в дальнейшем предполагается подключение двух газовых утилизационных бескомпрессорных турбин (ГУБТ) с максимальной мощностью 20 МВт каждая. В настоящее время такое решение зарекомендовало себя как актуальное и полезное, особенно в связи с действием положения об экологической политике стандарта ISO 14001. Все вышесказанное открывает новые перспективы к обеспечению долговечности электрооборудования и бесперебойной работе устройств технологической линии черной металлургии. Само же ОРУ-110 кВ ПВЭС-3 будет присоединяться в общую энергосистему посредством врезки в две линии связи 110 кВ, врезанные между одной из существующих собственных электростанций ЦЭС и подстанцией № 96.

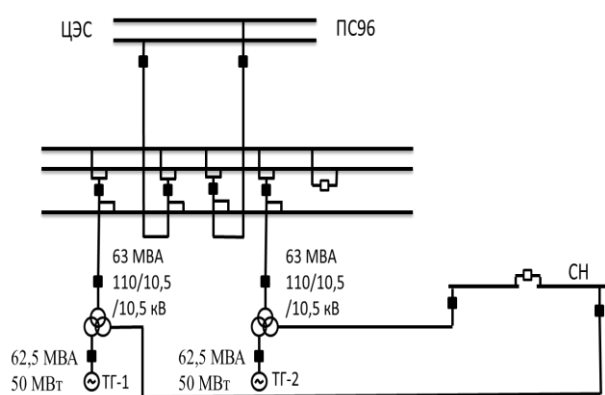


Рис. 1. Высоковольтная схема ПВЭС-3

Чтобы оценить актуальность исследований на реальной промышленной паровоздуходувной электростанции ПВЭС-2, был произведен анализ аварийных ситуаций. Результаты обработки статистических данных по аварийным ситуациям, произошедшим в период с 2016 и по 1 квартал 2021 года, сведены в таблицу, в которой отмечены наиболее значимые аварийные ситуации, связанные с выходом из строя цехового оборудования, с указанием места и события.

Аварийные ситуации на ПВЭС-1, 2

Участок	Место	Событие
ПС № 25	Дымосос-3Б	Ремонт электрического кабеля
ПС № 25	ф.25-17 (ф.26-24 рабочий ввод)	Ремонт масляного выключателя
Турбинный участок	Турбогенератор-1	Сброс нагрузки (потеря возбуждения)
Турбинный участок	Турбогенератор-4	Определение поврежденного кабеля
Котельный участок	Котел-7	КЗ на выводах двигателя дутьевого вентилятора 7Б
Котельный участок	Дутьевой вентилятор-7А	Ремонт кабеля
Электротехнический участок	Трансформатор-10	Пробой изоляции. Перенапряжение
Турбинный участок	Турбогенератор-3	Ремонт системы возбуждения
Турбинный участок	Турбогенератор-3	КЗ обмотки ротора
Турбинный участок	Турбогенератор-2	КЗ статора
Турбинный участок	Турбогенератор-1	Ремонт системы возбуждения (разрыв обмотки возбуждения)
Турбинный участок	Турбогенератор-4	Устранение действия дифференциальной защиты отключения турбогенератора от сети
Турбинный участок	Турбогенератор-4	Ремонт системы возбуждения
Котельный участок	Котел-1	КЗ на выводах двигателя дутьевого вентилятора 1А 90 (КЗ вывод двигателя)
Котельный участок	Котел-3	КЗ на дымосос 3А (КЗ статора на ротор)
Электротехнический участок	Ячейка 11 (ДБ-75 25 кВА)	Ремонт вентилятора обдува электродвигателя
Турбинный участок	ПС 25, 26 (1,2,3 системы шин)	КЗ на линии 110 кВ
Котельный участок	Котел-6	КЗ на выводах двигателя дутьевого вентилятора 6А
Турбинный участок	Турбогенератор-2	Падение изоляции обмотки ротора
Турбинный участок	Турбогенератор-4	Короткое замыкание на линии
Турбинный участок	Турбогенератор-3	Возгорание высоковольтного ввода

Анализ полученных данных показывает, что возникновение коротких замыканий является одной из частых причин нарушения электроснабжения ответственных потребителей производственных механизмов. Подобные аварии могут приводить к длительным простоям цеховых электроприемников, что обуславливает актуальность проводимых исследований.

Анализ аварийных инцидентов, произошедших с электрооборудованием, показывает, что основная часть аварий в большинстве случаев связана с дефектами непосредственно самих генераторов. Например, за рассмотренный период произошло девять аварий, основная их часть приходится на потерю возбуждения генератора, а именно: короткое замыкание в обмотке ротора; неисправность станции возбуждения; неисправность самого возбуждателя. В остальных случаях это повреждение обмотки статора. На втором месте – инциденты, связанные с повреждением кабельных и воздушных линий электропередач. На третьем месте – неисправности силовых трансформаторов. Диаграмма аварийности электрооборудования ПВЭС-1,2 приведена на рис. 2.

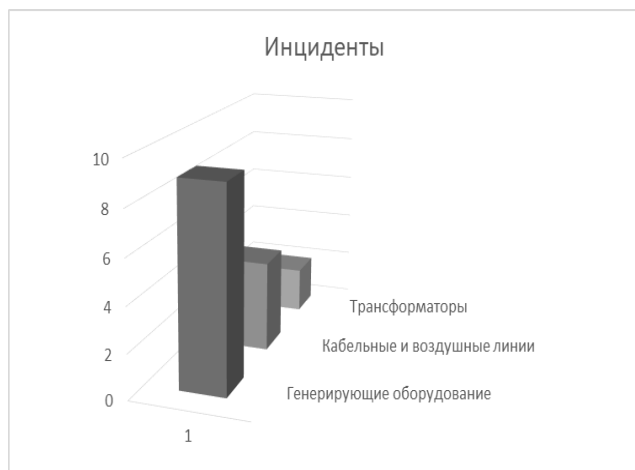


Рис. 2. Диаграмма аварийности электрооборудования ПВЭС-1,2

Особый интерес представляют аварийные ситуации, связанные с выходом узла на раздельную работу из режима короткого замыкания. Так, короткое замыкание может возникнуть в результате повреждения изоляции, перенапряжений, ударов молнии и т.д. Как показывает практика, деление автоматически происходит по шинам связи с энергосистемой ОРУ-110 кВ и данные шины автоматически становятся точкой

отделения от энергосистемы. Соответственно, длительность короткого замыкания определяет параллельную работу с энергосистемой. Следующим этапом работает дифференциальная защита шин, и электростанция выходит на раздельную работу. Связь между источниками осуществляется по шинам генераторного напряжения. Машины при этом должны втянуться в синхронизм относительно друг друга, затем должна быть обеспечена достаточная статическая устойчивость послеаварийного режима. Основной проблемой таких режимов у собственных электростанций является сбалансированность генерируемых и потребляемых активных и реактивных мощностей, что не всегда будет обеспечено, так как ремонты генераторов в летнее время существенно изменяют состав работающих источников и ухудшают устойчивость. Кроме того, нормативные документы, как правило, предполагают сбалансированность генерируемых и потребляемых мощностей с учетом заранее выбранных точек делительной автоматики, а шины с коротким замыканием не рассматривают.

Вопросам анализа динамической и результирующей устойчивости электроэнергетических систем посвящено значительное количество работ как зарубежных [1–6], так и отечественных ученых [7–12]. На рис. 3 показан алгоритм автоматизированного поиска точки раздела при аварийном выходе на раздельную работу в зависимости от баланса мощностей в целях сохранения устойчивости. Данный алгоритм актуален как при выходе на раздельную работу в результате снижения частоты в системе, так и при работе дифференциальной защиты шин при отключении короткого замыкания с последующим отделением от энергосистемы. Необходимость разработки алгоритма обусловлена также тем, что при внедрении источников распределенной генерации в сложносвязанной промышленной системе электроснабжения в течение суток могут существенно изменяться нагрузки цехов и, как следствие, потокораспределение мощностей в сети. При выходе на раздельную работу сохранение баланса мощностей генераторов и нагрузки в выделившемся узле является одним из условий сохранения устойчивости и возможности последующей ресинхронизации с энергосистемой. В целях обеспечения такого баланса возможно применение циф-

ровых двойников, позволяющих на основе информации о нагрузках и сведениях о составе генераторов выбирать либо точки деления с энергосистемой, либо отключение нагрузок или перевод их на резервные источники в процессе отделения от сети.

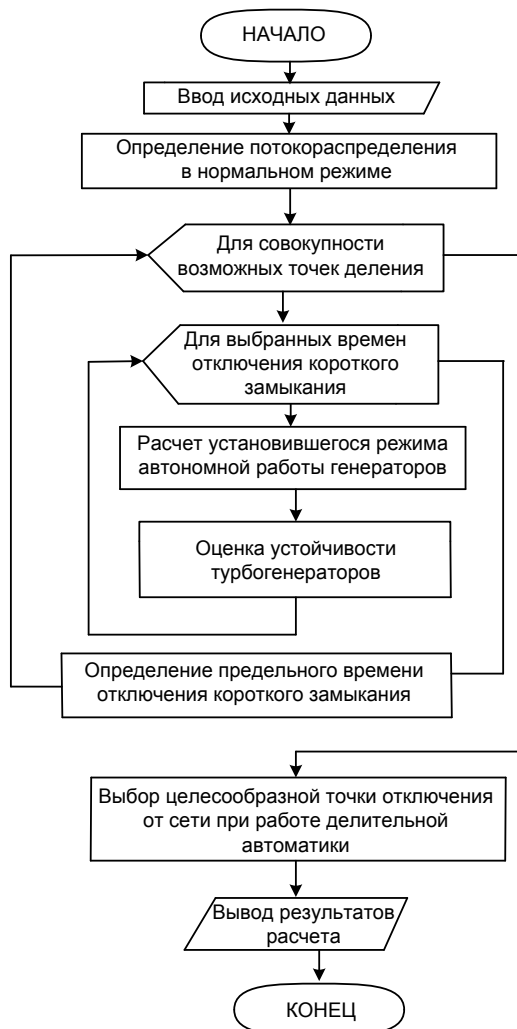


Рис. 3. Алгоритм автоматизированного поиска точки раздела при работе делительной автоматики в зависимости от баланса мощностей

На этапе планирования эксплуатационных режимов предполагается предварительный расчет установившегося режима в соответствии с имеющимися нагрузками, при котором определяется потокораспределение в сети. Далее для выбранных ранее возможных точек действия делительной автоматики определяется динамическая устойчивость синхронных генераторов в режиме короткого замыкания и его последующего отключения с выходом на раздельную работу. По результатам совокупности расчетов определяется критическое время отключения короткого замыкания в зависимости от конфигурации сети.

Затем происходит выбор конфигурации сети с учетом предельного времени отключения. Полученный алгоритм в сочетании с разработанным с участием авторов оригинальным программным обеспечением расчета режимов позволит повысить устойчивость заводских синхронных генераторов и снизить количество аварийных простоев электроприемников металлургических цехов.

С учетом данных положений были проведены исследования на электростанции ПВЭС-3. Расчет токов режимов короткого замыкания и выхода на раздельную работу проводился с помощью оригинального программного комплекса [13–15]. Особенности математического моделирования промышленных электроприемников изложены в [15–17]. В таких режимах большое значение имеет правильная работа систем регулирования возбуждения и скорости [18–20].

Результаты исследования. Как показывают расчеты, при выходе на раздельную работу генераторов ПВЭС-3 при коротком замыкании максимальное время отключения составляет 0,4 с. Во всех режимах зафиксировано увеличение напряжения на секциях сборных шин 110 кВ на 10–15 %, что свидетельствует об избытке реактивной мощности, возникающем вследствие отключения части нагрузки, а также увеличение частоты примерно на 0,3 %, что свидетельствует о незначительном переизбытке активной мощности, возникающем вследствие отключения части нагрузки, и об эффективной работе регулятора скорости.

На рис. 4 и 5 изображены взаимные углы в режиме раздельной работы ПВЭС-3 при коротком замыкании на линии 110 кВ ЦЭС – ПС № 96 относительно ТГ1 ПВЭС-3.

При выходе на раздельную работу основными показателями устойчивости являются не собственные, а взаимные углы генераторов относительно друг друга. Программное обеспечение [21] позволяет анализировать изменение углов во времени и судить о результирующей устойчивости при выходе на раздельную работу. На взаимные углы существенно влияет время отключения КЗ, так как генераторы не существенно удалены от шин ЦЭС и ПС № 96 (см. рис. 1). При увеличении времени отключения короткого замыкания наблюдается выпадение генераторов из синхронизма (рис. 5).

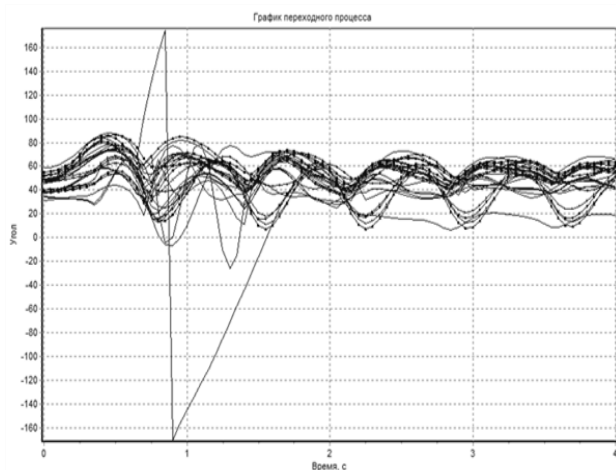


Рис. 4. Взаимные углы генераторов относительно ТГ1 ПВЭС-3 при выходе на раздельную работу при $t_{\text{предел.откл}} = 0,4$ (возможный вариант №1 и №2)

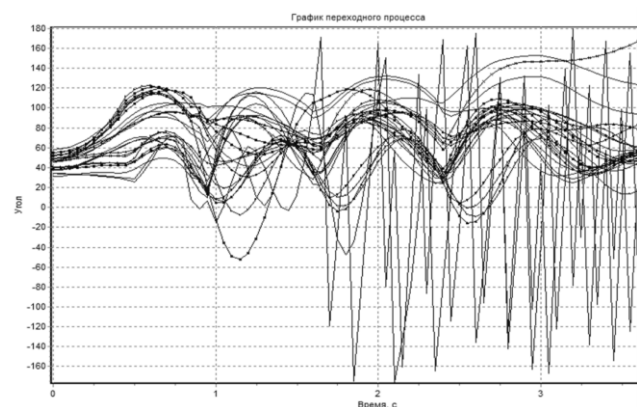


Рис. 5. Взаимные углы генераторов ПВЭС-3 при выходе на раздельную работу при $t_{\text{предел.откл}} = 0,5$

Выводы. В ходе исследований проблемы влияния источников распределенной генерации на надежность и устойчивость систем электроснабжения сложной конфигурации предприятий черной металлургии установлено, что их внедрение наряду с повышением бесперебойности питания ответственных потребителей и экономичности вызывает существенное усложнение возможных нормальных эксплуатационных и аварийных режимов.

Разработанный алгоритм автоматизированного поиска точки раздела при работе делительной автоматики в зависимости от баланса мощностей в целях сохранения устойчивости и оригинальное программное обеспечение для оценки эффективности противоаварийной автоматики многоуровневой сложносвязанной системы электроснабжения металлургического предприятия могут быть использованы в каче-

стве рекомендаций в схеме для реализации установившихся и переходных режимов, а также для изменения проверки уставок релейной защиты и делительной автоматики на действующем объекте.

Одним из основных мероприятий при этом станет определение эффективной конфигурации при выходе на раздельную работу, что снизит время простоев промышленных потребителей в случае развития аварийных ситуаций.

Список литературы

1. Shi X., Mu S. Research on Measures to Improve Stability of the Power System // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 742. – P. 648–652.
2. Power System Stability Enhancement Using FACTS Controllers in Multimachine Power Systems / Y. Welhazi, T. Guesmi, I. Ben Jaoued, H.H. Abdallah // *J. Electrical Systems*. – 2014. – No. 10–3. – P. 276–291.
3. Harikrishna D., Srikanth N.V. Dynamic Stability Enhancement of Power Systems Using Neural-Network Controlled Static-Compensator // *TELKOMNIKA*. – March, 2012. – Vol. 10, no. 1. – P. 9–16.
4. Boudour M., Hellal A. Power System Dynamic Security Mapping Using Synchronizing and Damping Torques Technique // *The Arabian Journal for Science and Engineering*. – 2005. – Vol. 30, no. 1B.
5. Post-disturbance transient stability assessment of power systems by a self-adaptive intelligent system / R. Zhang, Y. Xu, Z. Dong, K. Wong // *The Institution of Engineering and Technology IET Gener. Transm. Distrib.* – 2015. – Vol. 9, issue 3. – P. 296–305.
6. Trajectory sensitivity analysis on the equivalent one-machine-infinite-bus of multi-machine systems for preventive transient stability control / Y. Xu, Z.Y. Dong, J. Zhao, et al. // *The Institution of Engineering and Technology IET Gener. Transm. Distrib.* – 2015. – Vol. 9, issue 3. – P. 276–286.
7. Жданов П.С. Вопросы устойчивости энергетических систем / под ред. Л.А. Жукова. – М.: Энергия, 1979. – 456 с.
8. Кимбарк Э. Синхронные машины и устойчивость электрических систем. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 392 с.
9. Казовский Е.Я. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока. – М.; Л.: Изд-во Академии наук СССР, 1962. – 625 с.
10. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.
11. Абрамович Б.Н., Устинов Д.А., Поляков В.Е. Динамическая устойчивость электромеханических комплексов с синхронными

и асинхронными двигателями на предприятиях с непрерывным технологическим циклом // Промышленная энергетика. – 2011. – № 4. – С. 21–23.

12. **Гусев Ю.П., Каюмов А.Г.** Влияние динамической несинфазности синхронных генераторов на токи коротких замыканий в электроэнергетических системах // Электричество. – 2021. – № 3. – С. 26–32.

13. **Kondrashova Y.N., Gazizova O.V., Malapheev A.V.** Increasing the efficiency of power resource management as a solution of issues of the power supply system stability // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 128. – P. 759–763.

14. **Gazizova O.V., Kondrashova Y.N., Sokolov A.P.** Analysis of Short Circuit Transients with Separate Operation of Iron and Steel Industry Power Plant with Account of Dynamic Characteristics of Industrial Load // *Proceedings – 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2019*. – 2019. – P. 7–12.

15. **Газизова О.В., Кондрашова Ю.Н., Малафеев А.В.** Повышение эффективности управления режимами электростанций промышленного энергоузла за счет прогнозирования статической и динамической устойчивости при изменении конфигурации сети // *Электротехнические системы и комплексы*. – 2016. – № 3(32). – С. 27–38.

16. **Gazizova O.V., Malafeyev A.V., Kondrashova Y.N.** Mathematical simulation of the operating emergency conditions for the purpose of energy efficiency increase of thermal power plants management // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Ser. "International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2015, MEACS 2015"*. – 2016. – C. 012056.

17. **Повышение** качества электро-снабжения современного ГОКа / Г.П. Корнилов, И.Р. Абдулвелеев, Ю.Н. Кондрашова, К.Э. Одинцов // *Горный журнал*. – 2020. – № 12. – С. 82–86.

18. **Анализ** допустимости режима потери возбуждения синхронного генератора в условиях промышленной системы электроснабжения сложной конфигурации / О.В. Газизова, А.П. Соколов, Н.Т. Патшин, Ю.Н. Кондрашова // *Электротехнические системы и комплексы*. – 2019. – № 2(43). – С. 12–18.

19. **Sokolov A.P., Gazizova O.V., Kondrashova Y.N.** Study of the Transients with the Loss of Field of the Synchronous Generator in the Industrial Electric Power Station // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Scientific-Practical Conference on Quality Management and Reliability of Technical Systems 2019*. – 2019. – C. 012033.

20. **Sokolov A.P., Gazizova O.V.** Improving the Accuracy Mathematical Modeling of Transients Emergency Mode Industrial Facilities Distributed Generation // *2018 International Youth Scientific and*

Technical Conference Relay Protection and Automation, RPA 2018. – 2018. – C. 8537190.

21. **Свидетельство** о регистрации программы для ЭВМ RU 2019610251. Комплекс автоматизированного режимного анализа КАТРАН 10.0 / В.А. Игуменцев, А.В. Малафеев, Е.А. Панова и др. Заявка № 2018661952 от 29.10.2018; опубл. 09.01.2019.

References

1. Shi, X., Mu, S. Research on Measures to Improve Stability of the Power System. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 742, pp. 648–652.

2. Welhazi, Y., Guesmi, T., Ben Jaoued, I., Abdallah, H.H. Power System Stability Enhancement Using FACTS Controllers in Multimachine Power Systems. *J. Electrical Systems*, 2014, no. 10–3, pp. 276–291.

3. Harikrishna, D., Srikanth, N.V. Dynamic Stability Enhancement of Power Systems Using Neural-Network Controlled Static-Compensator. *TELKOMNIKA*, March 2012, vol. 10, no. 1, pp. 9–16.

4. Boudour, M., Hellal, A. Power System Dynamic Security Mapping Using Synchronizing and Damping Torques Technique. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 2005, vol. 30, no. 1B.

5. Zhang, R., Xu, Y., Dong, Z.Y., Wong, K. Post-disturbance transient stability assessment of power systems by a self-adaptive intelligent system. *The Institution of Engineering and Technology IET Gener. Transm. Distrib.*, 2015, vol. 9, issue 3, pp. 296–305.

6. Xu, Y., Dong, Z.Y., Zhao, J., Xue, Y., Hill, D.J. Trajectory sensitivity analysis on the equivalent one-machine-infinite-bus of multi-machine systems for preventive transient stability control. *The Institution of Engineering and Technology IET Gener. Transm. Distrib.*, 2015, vol. 9, issue 3, pp. 276–286.

7. Zhdanov, P.S. *Voprosy ustoychivosti energeticheskikh sistem* [Issues of stability of power systems]. Moscow: Energiya, 1979. 456 p.

8. Kimbark, E. *Sinkhronnye mashiny i ustoychivost' elektricheskikh sistem* [Synchronous machines and stability of the electrical systems]. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat, 1960. 392 p.

9. Kazovskiy, E.Ya. *Perekhodnye protsessy v elektricheskikh mashinakh peremennogo toka* [Transients in AC electric machines]. Moscow; Leningrad: Izdatel'stvo Akademii nauk SSSR, 1962. 625 p.

10. Kovach, K.P., Rats, I. *Perekhodnye protsessy v mashinakh peremennogo toka* [Transients in AC machines]. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat, 1963. 744 p.

11. Abramovich, B.N., Ustinov, D.A., Polyakov, V.E. *Dinamicheskaya ustoychivost' elektromekhanicheskikh kompleksov s sinkhronnymi i asinkhronnymi dvigatelyami na predpriya-*

tiyakh s nepreryvnym tekhnologicheskim tsiklom [Dynamic stability of the electromechanical complexes with synchronous and induction motors at the enterprises with continuous technological cycle]. *Promyshlennaya energetika*, 2011, no. 4, pp. 21–23.

12. Gusev, Yu.P., Kayumov, A.G. Vliyanie dinamicheskoy nesinfaznosti sinkhronnykh generatorov na toki korotkikh замыkaniy v elektroenergeticheskikh sistemakh [Influence of dynamic non-synchronous synchronous generators on the short-circuit currents in the electrical power systems]. *Elektrichestvo*, 2021, no. 3, pp. 26–32.

13. Kondrashova, Y.N., Gazizova, O.V., Malapheev, A.V. Increasing the efficiency of power resource management as a solution of issues of the power supply system stability. *Proceedings of Engineering*, 2015, vol. 128, pp. 759–763.

14. Gazizova, O.V., Kondrashova, Y.N., Sokolov, A.P. Analysis of Short Circuit Transients with Separate Operation of Iron and Steel Industry Power Plant with Account of Dynamic Characteristics of Industrial Load. *Proceedings – 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2019*, 2019, pp. 7–12.

15. Gazizova, O.V., Kondrashova, Yu.N., Malafeev, A.V. Povyshenie effektivnosti upravleniya rezhimami elektrostantsiy promyshlennogo energouzla za schet prognozirovaniya staticheskoy i dinamicheskoy ustoychivosti pri izmenenii konfiguratsii seti [Increasing the efficiency of power plant modes control of industrial power plants by predicting static and dynamic stability when changing the network configuration]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*, 2016, no. 3(32), pp. 27–38.

16. Gazizova, O.V., Malafeyev, A.V., Kondrashova, Y.N. Mathematical simulation of the operating emergency conditions for the purpose of energy efficiency increase of thermal power plants management. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Ser. "International Conference on Mechanical*

Engineering, Automation and Control Systems 2015, MEACS 2015", 2016, pp. 012056.

17. Kornilov, G.P., Abdulveleev, I.R., Kondrashova, Yu.N., Odintsov K.E. Povyshenie kachestva elektrosnabzheniya sovremennogo GOKa [Improvement of power supply quality of modern mining and processing plant]. *Gornyy zhurnal*, 2020, no. 12, pp. 82–86.

18. Gazizova, O.V., Sokolov, A.P., Patshin, N.T., Kondrashova, Yu.N. Analiz dopustimosti rezhima poteri возбужdeniya sinkhronnogo generatora v usloviyakh promyshlennoy sistemy elektrosnabzheniya slozhnoy konfiguratsii [Analysis of admissibility of excitation loss mode of synchronous generator in conditions of industrial power supply system of complex configuration]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*, 2019, no. 2(43), pp. 12–18.

19. Sokolov, A.P., Gazizova, O.V., Kondrashova, Yu.N. Study of the Transients with the Loss of Field of the Synchronous Generator in the Industrial Electric Power Station. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Scientific-Practical Conference on Quality Management and Reliability of Technical Systems 2019*, 2019, pp. 012033.

20. Sokolov, A.P., Gazizova, O.V. Improving the Accuracy Mathematical Modeling of Transients Emergency Mode Industrial Facilities Distributed Generation. *2018 International Youth Scientific and Technical Conference Relay Protection and Automation, RPA 2018*, 2018, pp. 8537190.

21. Igumenshchev, V.A., Malafeev, A.V., Panova, E.A., Varganova, A.V., Gazizova, O.V., Kondrashova, Yu.N., Zinov'ev, V.V., Yuldasheva, A.I., Krubtsova, A.A., Anisimova, N.A., Nasibullin, A.T., Tremasov, M.A., Shcherbakova, V.S., Bogush, V.K. Kompleks avtomatizirovannogo rezhimnogo analiza KATRAN 10.0 [Automated mode analysis complex KATRAN 10.0]. *Svidetel'stvo o registratsii programmy dlya EVM RU 2019610251* [Registration certificate for computer software RU 2019610251], 2018.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.321

Андрей Ильич Тихонов

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

Александр Викторович Подобный

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант, Россия, Иваново, e-mail: pav@talan.tel

Ирина Сергеевна Снитко

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

Алексей Вадимович Стулов

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

Андрей Александрович Каржевин

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант, Россия, Иваново, e-mail: drusja95@gmail.com

Метод коррекции имитационной модели однофазного трансформатора с использованием осциллограмм тока холостого хода¹

Авторское резюме

Состояние вопроса. Одно из направлений цифровизации промышленности связано с понятием цифровых двойников, позволяющих имитировать работу реальных устройств в различных режимах. В настоящее время для этого используются имитационные пакеты, например MatLab Simulink, или системы моделирования физических полей, например ANSYS Maxwell. Проблема состоит в том, что, несмотря на декларируемую точность, практически ни одна модель технического устройства не способна демонстрировать точное совпадение результатов моделирования с результатами экспериментов, особенно в переходных режимах, что вызвано разбросом характеристик материалов и сложно-

¹ Работа была выполнена при финансовой поддержке РФФИ, региональный конкурс Ивановской области, проект № 20-48-370001 от 19.01.2021.

The project is carried out with financial support of Russian Foundation for Basic Research (RFBR), local contest of Ivanovo region № 20-48-370001 dated 19.01.2021.

стью учета технологических факторов. Целью настоящего исследования является разработка способа коррекции имитационной модели однофазного трансформатора, после которой данная модель способна обеспечить 95 %-ю точность совпадения мгновенных значений токов в обмотках при моделировании работы трансформатора как в установившихся, так и в переходных режимах.

Материалы и методы. Используются методы моделирования электрических цепей, метод имитационного моделирования с использованием пакета MatLab Simulink SimPowerSystem, а также экспериментальные методы регистрации осциллограмм токов и напряжений.

Результаты. Проведено исследование возможности точного моделирования переходных и установившихся процессов в однофазном трансформаторе с учетом нелинейности магнитных свойств электротехнической стали и взаимного влияния магнитных потоков обмоток, замыкающихся за пределами магнитопровода, с применением для коррекции модели разработанного многоканального быстродействующего регистратора. Разработана методика коррекции имитационной модели однофазного трансформатора с использованием экспериментальных осциллограмм напряжения и тока холостого хода.

Выводы. Применение предложенной методики коррекции кривой намагничивания трансформатора с использованием экспериментальных осциллограмм реального трансформатора, а также расчет сопротивления параллельной ветви намагничивания схемы замещения трансформатора по данной осциллограмме позволяют получить практически идеальное совпадение кривой тока холостого хода, полученной при моделировании, с экспериментальной кривой. Предложенная методика построения имитационной модели дает более точные результаты моделирования переходных режимов в трансформаторах по сравнению с аналогами.

Ключевые слова: однофазный трансформатор, цифровые двойники, теория цепей, обыкновенные дифференциальные уравнения, имитационные модели.

Andrey Ilyich Tikhonov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor, Head of Physics Department, Russia, Ivanovo, e-mail: aitispu@mail.ru

Alexander Viktorovich Podobnyi

Ivanovo State Power Engineering University, Post-graduate student, Russia, Ivanovo, e-mail: pav@talan.tel

Irina Sergeevna Snitko

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

Aleksey Vadimovich Stulov

LLC "NPK AVTOPRIBOR", Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Vice Director for Technological Development, e-mail: alxstl@mail.ru

Andrey Alexandrovich Karzhev

Ivanovo State Power Engineering University, Post-graduate student, Russia, Ivanovo, e-mail: drusja95@gmail.com

Method to revise a simulation model of single-phase transformer using no-load current waveforms

Abstract

Background. One of the areas of industrial digitalization is associated with the concept of digital twins, which allows simulating the operation of real devices in various modes. Currently, simulation packages such as MatLab Simulink, or physical field modeling systems, such as ANSYS Maxwell are applied. The problem is that, despite the declared accuracy, practically no model of a technical device can demonstrate a point-to-point correspondence of the simulation results and the experimental results, especially under transient conditions. It is caused by variations of material characteristics and difficulty to consider technological factors. The purpose of this article is to develop a method to revise the simulation model of a single-phase transformer. So, this model can provide 95 % accuracy of the coincidence of the instantaneous values of currents in the windings when simulating the operation of the transformer both in steady state and in transient modes.

Materials and methods. The authors have used the methods to model electrical circuits, simulation modeling using the MatLab Simulink SimPowerSystem package, experimental methods to record current and voltage oscillograms.

Results. The authors have studied the possibility of accurate modeling of transient and steady processes in a single-phase transformer, considering the nonlinearity of the magnetic properties of electrical steel and the

mutual influence of magnetic fluxes of windings that close outside the magnetic core. To revise the model, a multichannel high-speed recorder developed by the authors has been used. A technique to revise a simulation model of a single-phase transformer using experimental oscillograms of voltage and no-load current has been developed.

Conclusions. Application of the proposed method to revise the transformer magnetization curve using experimental oscillograms of a real transformer, as well as calculating the resistance of the parallel magnetization branch of the equivalent circuit of the transformer based on the oscillogram, makes it possible to obtain an almost point-to-point correspondence of the no-load current curve obtained when modeling with the experimental curve. The proposed technique to develop a simulation model gives more accurate results of modeling transient modes of transformers in comparison with analogues.

Key words: single phase transformer, digital twins, circuit theory, ordinary differential equations, simulation models

DOI: 10.17588/2072-2672.2022.2.038-046

Введение. Одно из направлений цифровизации промышленности связано с понятием цифровых двойников (ЦД), под которыми понимаются виртуальные копии реальных устройств, с помощью которых можно имитировать их работу в различных режимах. В соответствии с ГОСТ Р 57700.37², различают несколько видов ЦД технических устройств, среди которых можно выделить:

1) цифровой прототип изделия, который может быть представлен функциональной моделью, используемой на стадии проектирования класса однотипных устройств для имитации работы не существующего пока еще устройства;

2) цифровой двойник экземпляра устройства, используемый для имитации работы конкретного устройства в целях прогнозирования последствий принятия тех или иных решений по выбору режимов его эксплуатации.

В последнем случае к ЦД предъявляются повышенные требования в плане совпадения результатов моделирования с экспериментальными данными.

Особенность проблемы состоит в том, что, несмотря на декларируемую точность, практически ни одна модель технического устройства не способна продемонстрировать точное совпадение результатов моделирования с результатами эксперимента. Основная причина этого состоит в невозможности точного описания характеристик материалов, из которых изготовлено устрой-

ство. Как правило, в данных характеристиках существует значительный разброс. Например, кривая намагничивания электротехнической стали, из которой изготавливается трансформатор, даже в пределах одной партии поставки может иметь разброс, укладываемый в 20 %-й коридор. Говорить при этом о 95 %-й точности моделирования невозможно даже при наличии идеально точного модельного описания физических процессов в данном устройстве.

Следует отметить также, что на характеристики изготовленного устройства большое влияние оказывает множество факторов технологического характера. Поэтому, даже если нам известна точная кривая намагничивания данной конкретной партии электротехнической стали, после ее раскроя, а также в процессе сборки трансформатора ее характеристики могут существенно измениться. Причем зачастую эти изменения носят случайный характер.

Тем не менее проблема повышения точности имитационных моделей трансформатора имеет решение. Особенно если речь идет не о цифровом прототипе проектируемого устройства, а о цифровом двойнике конкретного экземпляра устройства.

Ниже предлагается один из способов коррекции имитационной модели однофазного трансформатора, после которой данная модель способна обеспечить 95 %-ю точность совпадения мгновенных значений токов в обмотках при моделировании работы трансформатора как в установившихся, так и в переходных режимах.

Методы исследования. В [2] рассмотрена имитационная модель однофазного трансформатора, реализованная в среде MatLab Simulink с использованием библиотеки SimPowerSystem [3] (рис. 1).

² ГОСТ Р 57700.37 – 2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения: национальный стандарт РФ. – М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2021. – Дата утверждения 16.09.2021.

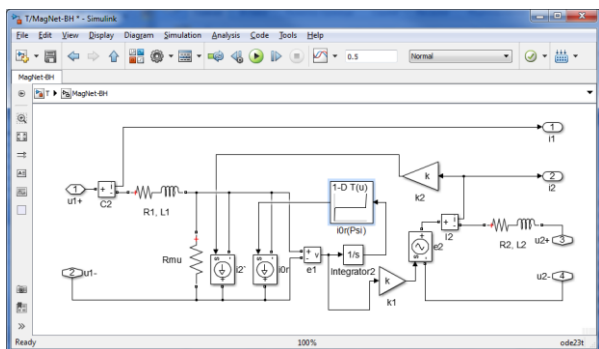


Рис. 1. Модель реального однофазного нелинейного трансформатора

В основе данной модели лежит принцип идеального трансформатора [4], построенного с использованием управляемого источника тока в первичной обмотке и управляемого источника ЭДС во вторичной. Алгоритм функционирования идеального трансформатора сводится к условиям:

$$e_2(t) = k e_1(t), \quad (1)$$

$$i_1(t) = k i_2(t),$$

где e_1 , e_2 , i_1 , i_2 – соответственно мгновенные ЭДС и токи в первичной и вторичной обмотках; k – коэффициент трансформации.

Данная модель дополняется сопротивлениями R_1 , R_2 и индуктивностями рассеяния L_1 , L_2 первичной и вторичной обмоток, а также ветвью намагничивания с параллельным соединением активного сопротивления R_μ , соответствующего магнитным потерям в сердечнике трансформатора, и нелинейной индуктивности L_μ , имитируемой управляемым источником намагничивающего тока i_{0r} , мгновенные значения которого вычисляются по кривой намагничивания трансформатора, заданной в форме $i_{0r}(\Psi_1)$, где Ψ_1 – потокосцепление первичной обмотки, вычисляемое по формуле

$$\Psi_1(t) = -\int_0^t e_1(t) dt. \quad (2)$$

Именно точность расчета кривой $i_{0r}(\Psi_1)$ и величины сопротивления R_μ определяет точность расчета мгновенных значений тока холостого хода (ХХ) трансформатора в установившихся режимах. Как уже отмечалось, рассчитать эти параметры с должной точностью на этапе проектирования трансформатора практически невозможно по причинам технологического характера.

Следует отметить, что точный расчет кривой тока ХХ невозможен без учета яв-

ления магнитного гистерезиса. Анализ работ [4, 5] говорит о сложности данной проблемы, особенно если в условие задачи входит необходимость учета остаточной намагниченности электротехнической стали в момент включения трансформатора (особенно остро данная проблема встает при имитационном моделировании трансформатора с сердечником из аморфной стали, в которой остаточная намагниченность может быть существенной). Поэтому проблему в любом случае необходимо упрощать, иначе задача становится практически нерешаемой.

В качестве гипотезы примем, что гистерезисные явления на заданной частоте питающего напряжения достаточно точно учитываются сопротивлением R_μ . Как будет показано ниже, остаточную намагниченность стали при этом учесть не удастся, однако влияние магнитного гистерезиса в установившемся режиме удастся учесть с большой точностью.

Для построения кривой намагничивания конкретного экземпляра трансформатора был разработан 12-канальный быстродействующий регистратор, способный регистрировать мгновенные значения токов и напряжений с частотой до 100 кГц по каждому каналу. Разрядность каналов составляет 12 бит. Регистратор может использоваться для фиксации осциллограмм токов и напряжений во всех обмотках как однофазного, так и трехфазного трансформатора (рис. 2).



Рис. 2. Печатная плата 12-канального регистратора для регистрации осциллограмм напряжений и токов в обмотках трансформатора

Осциллограммы выгружаются на персональный компьютер для последующего

анализа. Алгоритм построения кривой намагничивания и расчета сопротивления R_{Σ} приводится ниже на примере результатов исследования однофазного трансформатора.

Как показывает анализ, точность имитационной модели однофазного трансформатора (рис. 1) существенно зависит от величины тока нагрузки. Дело в том, что индуктивности рассеяния L_1 и L_2 в первичной и вторичной обмотках рассчитываются обычно из опыта короткого замыкания (КЗ) трансформатора. А так как первичная и вторичная обмотки трансформатора обычно выполняются концентрическими, то в опыте КЗ их магнитные поля, замыкающиеся за пределами магнитопровода, направлены навстречу друг другу, существенно ослабляясь. Поэтому, например, индуктивность L_1 , вычисляемая из опыта КЗ, оказывается на порядки меньше значения, которое фиксируется в опыте ХХ при отсутствии тока во вторичной обмотке. При моделировании переходных режимов в трансформаторе этой ошибкой пренебрегать нельзя.

Строго говоря, согласно [7], индуктивности рассеяния обмоток должны рассчитываться по формулам:

$$L_1 = L_{11} - L_{12} k; \quad (3)$$

$$L_2 = L_{22} - \frac{L_{21}}{k}, \quad (4)$$

где L_{11} , L_{22} – собственные индуктивности первичной и вторичной обмоток трансформатора, обусловленные магнитными полями, замыкающимися за пределами магнитопровода, рассчитываемые из условия отсутствия токов в противоположных обмотках; L_{12} , L_{21} – взаимные индуктивности обмоток, обусловленные магнитными полями, замыкающимися за пределами магнитопровода.

С учетом сказанного имитационная модель однофазного трансформатора принимает вид, рекомендуемый в [8] (рис. 3). Вместо индуктивностей рассеяния здесь присутствуют управляемые источники тока, на управляющие входы которых подаются токи i_1 и i_2 , рассчитываемые с использованием матрицы индуктивностей $[L]$, обусловленной полями обмоток, замыкающимися за пределами магнитопровода (балластные сопротивления, включенные параллельно с данными источниками тока, служат для устранения конфликта при использовании методов численного интегрирования). При этом

$$\begin{Bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{Bmatrix} = -[L]^{-1} \begin{Bmatrix} \Psi_{\sigma 1} \\ \Psi_{\sigma 2} \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix}^{-1} \int_0^t \begin{Bmatrix} e_{\sigma 1} \\ e_{\sigma 2} \end{Bmatrix} dt, \quad (5)$$

где $\Psi_{\sigma 1}$, $\Psi_{\sigma 2}$ – потокоцепления первичной и вторичной обмоток с магнитным полем за пределами магнитопровода; $e_{\sigma 1}$, $e_{\sigma 2}$ – ЭДС, наводимые этими полями в первичной и вторичной обмотках трансформатора.

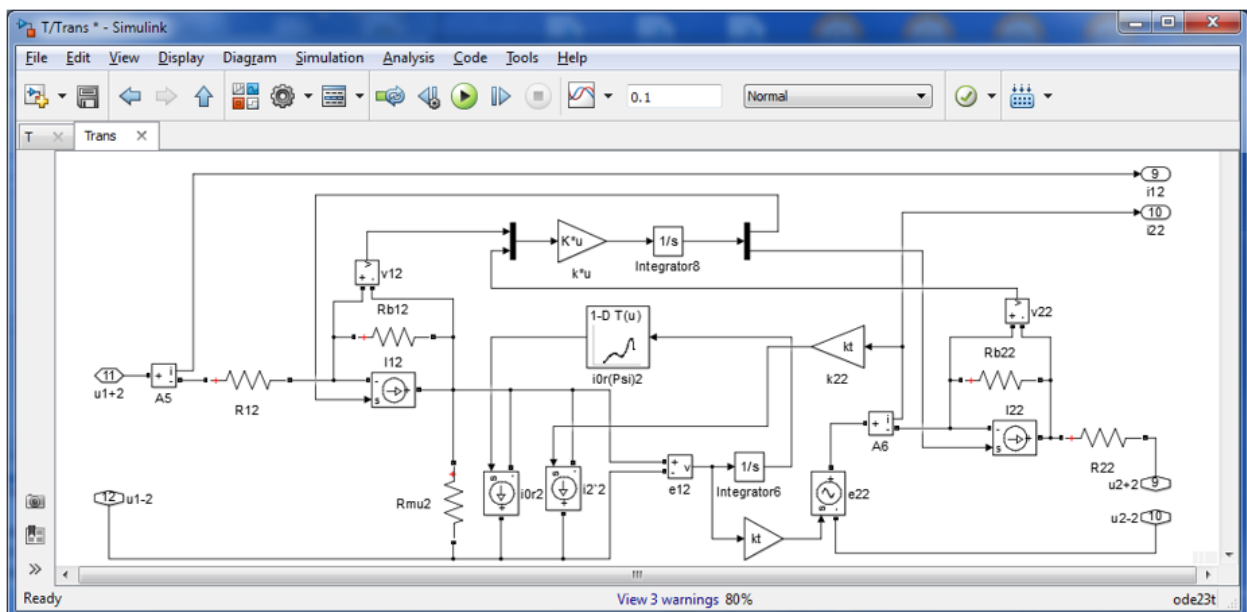


Рис. 3. Модель однофазного нелинейного трансформатора с использованием взаимного влияния магнитных полей обмоток за пределами магнитопровода

Для расчета элементов матрицы [L] использована технология, описанная в [9], опирающаяся на расчет магнитных полей отдельных обмоток, замыкающихся за пределами магнитопровода. Расчет осуществлялся методом конечных элементов в осесимметричной постановке с использованием библиотеки EMLib (авторская разработка).

Результаты исследований. В качестве объекта исследования был выбран однофазный радиотрансформатор ОСМ1-0,063ЗУЗ (рис. 4). Несмотря на малую мощность выбранного объекта, все приведенные алгоритмы могут быть применены и к однофазным силовым трансформаторам большой мощности.



Рис. 4. Объект исследования (ОСМ1-0,063ЗУЗ)

Осциллограмма напряжения и установившегося тока ХХ данного трансформатора на одном периоде, снятая с использованием разработанного регистратора (см. рис. 2) и отфильтрованная от высокочастотных шумов, представлена на рис. 5.

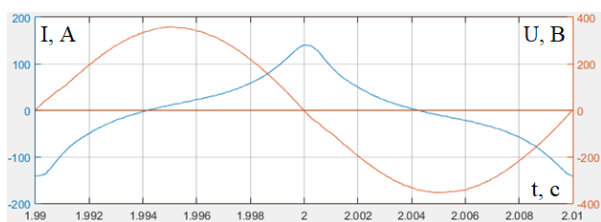


Рис. 5. Осциллограмма напряжения и тока ХХ исследуемого объекта

По данной осциллограмме рассчитывается мощность магнитных потерь по формуле

$$P_0 = \int_0^T u(t) i(t) dt \approx \frac{1}{T} \sum_{k=1}^n u_k i_k \Delta t_k, \quad (6)$$

где T – период; n – количество точек на периоде; u_k , i_k – мгновенные значения напряжения и тока ХХ на k -м интервале времени Δt_k .

Расчет сопротивления ветви намагничивания осуществляется по формуле

$$R_\mu = \frac{U_1^2}{P_0} - R_1, \quad (7)$$

где U_1 – действующее значение приложенного напряжения; R_1 – активное сопротивление первичной обмотки.

Кривая намагничивания трансформатора независимо от его мощности строится на основе осциллограммы по формуле

$$\Psi(t) = \int_0^t \left[u(t) - R_1 i(t) - L_{11} \frac{di(t)}{dt} \right] dt \approx \sum_{k=1}^n [u_k - R_1 i_k] \Delta t_k - L_{11} \Delta i_k, \quad (8)$$

где Δi_k – приращение тока на k -м интервале времени.

Полученная кривая, имеющая форму кривой магнитного гистерезиса, представлена на рис. 6.

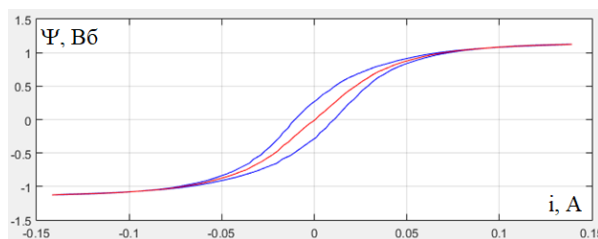


Рис. 6. Кривая намагничивания трансформатора

На основе данной кривой строится основная кривая намагничивания по формуле

$$\Psi_k \approx \frac{\Psi_{k+} + \Psi_{k-}}{2}, \quad (9)$$

где Ψ_{k+} , Ψ_{k-} – потокосцепления на восходящей и нисходящей ветвях кривой магнитного гистерезиса при одинаковых значениях тока.

Основная кривая намагничивания, представленная в табличной форме, указывается в блоке кривой намагничивания в модели, представленной на рис. 3.

Для получения более точного результата в качестве питающего напряжения, подаваемого на первичную обмотку в модели, использовался управляемый источник ЭДС, на управляющий вход которого подавалась реальная осциллограмма напряжения на периоде, которая несколько отличается от идеальной синусоиды (см. рис. 5).

Результат расчета тока ХХ в сравнении с реальной осциллограммой представлен на рис. 7.

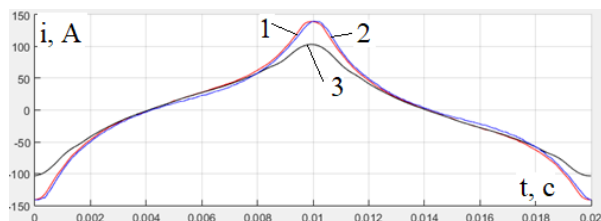


Рис. 7. Кривые установившегося тока ХХ трансформатора: 1 – расчетная кривая; 2 – реальная осциллограмма; 3 – расчетная кривая, полученная при подстановке в модель кривой намагничивания, снятой классическим способом

Кривые 1 и 2 на рис. 7, полученные соответственно расчетным и экспериментальным путем, практически совпали, что говорит о высокой точности моделирования. Причем совпадение произошло с учетом несимметрии этих кривых относительно точки максимума, вызванной наличием магнитного гистерезиса, что говорит о том, что магнитный гистерезис в данном случае учитывается также с большой точностью, несмотря на простоту модели. Помимо точного расчета по осциллограмме основной кривой намагничивания конкретного экземпляра трансформатора необходим точный расчет сопротивления параллельной ветви намагничивания R_{Σ} .

Следует обратить внимание на кривую 3, представленную на рис. 7. Данная кривая получена на модели с кривой намагничивания, снятой по результатам опыта ХХ при разных напряжениях на первичной обмотке. Опыт ХХ проводился по классической методике, т. е. путем фиксации действующих значений напряжения и тока ХХ с последующим пересчетом по формуле

$$\Psi(U_1) = \frac{|\dot{U}_1 - iZ|}{4,44 \cdot f}, \quad (10)$$

где \dot{U}_1, i – комплексные значения напряжения и тока ХХ; Z – комплексное сопротивление первичной обмотки; f – частота сети.

При такой постановке задачи в расчетной и экспериментальной кривых тока ХХ присутствуют существенные отличия (кривые 1 и 3 на рис. 7), что вызвано в первую очередь неприемлемым в данном

случае допущением о синусоидальности тока ХХ.

Следует также отметить различия между решениями, полученными в переходных режимах на моделях, представленных на рис. 1 и рис. 3. При включении трансформатора на ХХ при повышенном напряжении (насыщенный магнитопровод, нулевая начальная фаза напряжения на первичной обмотке) в кривых первичного тока присутствуют явные различия (рис. 8).

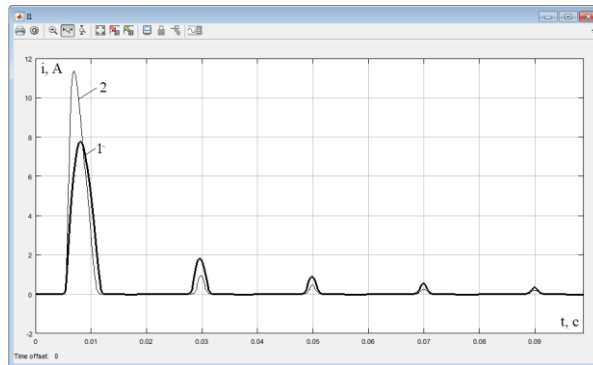


Рис. 8. Кривые первичного тока при включении трансформатора на ХХ: 1 – расчет на модели с учетом взаимного влияния магнитных полей обмоток за пределами магнитопровода; 2 – расчет на модели без учета взаимного влияния

Как и ожидалось, в обоих случаях наблюдаются значительные броски тока на первом полупериоде, которые со времени затухают, после чего в установившемся режиме кривая тока принимает форму, представленную на рис. 7. Однако в случае, когда не учитывается взаимное влияние магнитных полей обмоток, замыкающихся за пределами магнитопровода, бросок тока оказывается больше, чем в случае учета данного фактора. Отличие составляет около 30 %. Это говорит о некорректности традиционного способа учета данного явления с использованием индуктивностей рассеяния.

В установившемся режиме кривые тока ХХ, полученные на двух моделях, полностью совпадают, что объясняется тем, что в установившемся режиме поток рассеяния первичной обмотки пренебрежительно мал и практически не влияет на ток ХХ.

Как показано в [8], аналогичный результат (несовпадение кривых первичного тока при включении трансформатора и совпадение данных кривых в установившемся режиме) получается и при включении трансформатора на нагрузку. Объясняется

это тем, что в установившемся режиме полностью выполняются требования симметрии намагничивающих сил первичной и вторичной обмоток, что соответствует условиям опыта КЗ, на основе которого вычисляются индуктивности рассеяния. В переходных режимах это условие не выполняется в модели, представленной на рис. 1, но полностью учитывается в предлагаемой нами модели, приведенной на рис. 3.

Выводы. Проведенное исследование возможности точного моделирования переходных и установившихся процессов в однофазном трансформаторе с учетом нелинейности магнитных свойств электротехнической стали и взаимного влияния магнитных потоков обмоток, замыкающихся за пределами магнитопровода, показало, что применение предложенной методики коррекции кривой намагничивания трансформатора с использованием экспериментальных осциллограмм реального трансформатора, а также расчет сопротивления параллельной ветви намагничивания схемы замещения трансформатора по данной осциллограмме позволяют получить практически идеальное совпадение кривой тока ХХ, полученной при моделировании, с экспериментальной кривой.

Однако данное совпадение достигается только в установившемся режиме ХХ. Для построения уточненной модели было применено решение, предложенное в [8], что позволило выйти на модели, позволяющие получить высокую точность совпадения результатов с экспериментом как в установившихся, так и в переходных режимах.

Дальнейшее развитие данных исследований видится в разработке методики эксперимента, позволяющей рассчитать точное значение элементов матрицы индуктивностей, учитывающей взаимное влияние магнитных полей обмоток, замыкающихся за пределами магнитопровода (в данном исследовании использовались величины, полученные из расчета магнитного поля), что позволит, по мнению авторов, выйти на полное совпадение расчетных и экспериментальных кривых в любых переходных режимах.

Список литературы

1. **Разработка** и исследование динамической модели однофазного трансформатора с сердечником из аморфной стали / А.И. Тихонов,

А.А. Каржевин, А.В. Подобный, Д.Е. Дрязгов // Вестник ИГЭУ. – 2019. – Вып. 2. – С. 59–70.

2. **Черных И.В.** Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPower Systems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

3. **Попов В.П.** Теория электрических цепей. – 7-е изд., перераб. и доп. – Ч. 1. – М.: Юрайт, 2020. – 378 с.

4. **Принципы** моделирования переходных процессов в трансформаторе с учетом топологии свойств магнитопровода / С.Е. Зирка, Ю.И. Мороз, Е.Ю. Мороз и др. // Электротехника. – 2013. – № 1. – С. 16–24.

5. **Зирка С.Е., Мороз Ю.И.** Моделирование трехфазного трансформатора как системы с сосредоточенно-распределенными параметрами // Техн. электродинамика. – 2014. – № 3. – С. 28–32.

6. **Лейтес Л.В.** Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. – М.: Энергия, 1981. – 392 с.

7. **Разработка** модели переходных режимов с учетом взаимной индуктивности полей рассеяния для реализации цифрового двойника трансформатора / И.С. Снитко, А.И. Тихонов, А.В. Стулов, В.Е. Мизонов // Вестник ИГЭУ. – 2021. – Вып. 4. – С. 47–56.

8. **Шмелев А.С., Пайков И.А., Булатов Л.Н.** Методика организации численного исследования электротехнических устройств с использованием библиотеки конечно-элементного моделирования магнитного поля // Вестник ИГЭУ. – 2014. – № 1. – С. 55–61.

References

1. Tikhonov, A.I., Karzhevin, A.A., Podobnyy, A.V., Dryazgov, D.E. Razrabotka i issledovanie dinamicheskoy modeli odnofaznogo transformatora s serdechnikom iz amorfnoy stali [Development and study of a dynamic model of a single-phase transformer with an amorphous steel core]. *Vestnik IGEU*, 2019, issue 2, pp. 59–70.

2. Chernykh, I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* [Modeling electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow: DMK Press; Saint-Petersburg: Piter, 2008. 288 p.

3. Popov, V.P. *Teoriya elektricheskikh tsepey. Ch. 1* [Theory of electrical circuits Part 1]. Moscow: Yurayt, 2020. 378 p.

4. Zirka, S.E., Moroz, Yu.I., Moroz, E.Yu., Evdokunin, G.A., Dmitriev, M.V., Arturi, Ts.M. Printsipy modelirovaniya perekhodnykh protsessov v transformatore s uchetom topologii svoystv magnetoprovođa [Principles of modeling transient processes in a transformer, taking into account the topology of the properties of the magnetic circuit]. *Elektrotehnika*, 2013, no. 1, pp. 16–24.

5. Zirka, S.E., Moroz, Yu.I. Modelirovanie trekhfaznogo transformatora kak sistemy s sosredotochenno-raspredeleennymi parametrami [Modeling of a three-phase transformer as a system with concentrated-distributed parameters]. *Tech. electrodynamics*, 2014, no. 3, pp. 28–32.

6. Leytes, L.V. *Elektromagnitnye raschety transformatorov i reaktorov* [Electromagnetic calculations of transformers and reactors]. Moscow: Energiya, 1981. 392 p.

7. Snit'ko, I.S., Tikhonov, A.I., Stulov, A.V., Mizonov, V.E. Razrabotka modeli perekhodnykh rezhimov s uchetom vzaimnoy induktivnosti poley rasseyaniya dlya realizatsii tsifrovogo dvoynika

transformatora [Development of a model of transient modes taking into account the mutual inductance of stray fields for the implementation of a digital twin of a transformer]. *Vestnik IGEU*, 2021, issue 4, pp. 47–56.

8. Shmelev, A.S., Paykov, I.A., Bulatov, L.N. Metodika organizatsii chislennogo issledovaniya elektrotekhnicheskikh ustroystv s ispol'zovaniem biblioteki konechno-elementnogo modelirovaniya magnitnogo polya [Methodology for the organization of numerical research of electrical devices using the library of finite element modeling of the magnetic field]. *Vestnik IGEU*, 2014, no. 1, pp. 55–61.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 621.865.8; 681.51

Дмитрий Николаевич Аксаментов

ФГБОУВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», аспирант кафедры автоматизации производственных процессов, Россия, Иркутск, e-mail: Gaastra104@mail.ru

Исследование адаптивного закона управления мостовым краном на его макете

Авторское резюме

Состояние вопроса. В современном мире грузоподъемные краны широко применяются в различных сферах промышленной деятельности, многие из них используют подвесное крепление груза, что сопряжено с его колебанием во время транспортировки. Раскачивание груза чаще всего возникает при ускорении или торможении тележки крана, реже – из-за внешних возмущений, например воздействия ветра. Одно из основных направлений развития такого рода кранов является создание автоматизированной системы управления, способной гасить маятниковые колебания груза. В настоящее время предложено немалое количество систем управлений, однако большинство из них требует предварительной настройки под конкретные параметры переносимого груза. Задачей настоящего исследования является создание и отладка алгоритма управления на макете мостового крана ранее разработанного адаптивного закона управления, способного обеспечить точное позиционирование и гашение колебаний груза в условиях текущей параметрической неопределенности. Исследование на экспериментальной установке позволит определить и разобрать особенности внедрения закона управления перед его применением на промышленных кранах.

Материалы и методы. Адаптивный закон управления в условиях текущей неопределенности параметров груза и внешних возмущений исследуется на макете мостового крана. Данный метод управления основан на схеме адаптивного управления с идентификатором и неявной эталонной моделью с использованием «упрощенных» условий адаптируемости.

Результаты. Описаны ранее разработанный адаптивный закон управления мостовым краном и экспериментальная установка мостового крана. Разработан алгоритм адаптивного управления макетом мостового крана. Представлены результаты первых экспериментальных исследований предлагаемого способа управления, которые подтверждают его работоспособность в реальных условиях.

Выводы. Результаты опытных испытаний показывают эффективность адаптивного закона управления. Система обеспечивает точное перемещение груза за малый промежуток времени, демпфирует маятниковые колебания груза при разгоне и торможении тележки, а также при внешних возмущениях. Адаптивный закон управления позволяет перемещать груз в назначенное положение и гасить маят-

никовые колебания при минимальной предварительной настройке системы управления. На качестве управления практически не сказывается изменения параметров груза и длины подвеса, поскольку идентификация параметров происходит в текущем времени.

Ключевые слова: мостовой кран, маятниковые колебания, адаптивный закон управления, эталонная модель, алгоритм текущей идентификации

Dmitriy Nikolayevich Aksamentov

Irkutsk State Transport University, Postgraduate student of Automation of Production Processes Department, Russia, Irkutsk, e-mail: Gaastra104@mail.ru

Study of adaptive control law of overhead crane using its model

Abstract

Background. Nowadays, cargo cranes are widely used in various areas of industries. Many of cranes use suspended load fastening, which is associated with load swinging during transportation. Load swinging is most often caused by acceleration or deceleration of the crane trolley, less often it occurs due to external disturbances, such as wind. One of the key directions of the development of this kind of cranes is the development of an automated control system that can dampen pendular oscillations of the load. At present, a considerable number of control systems have been developed, but most of them require preset adjustment of specific parameters of the transported load. The task of this study is to develop and debug a control algorithm using a model of an overhead crane of previously developed adaptive control law that can provide fine positioning and damping of load oscillations under the current parametric uncertainty. The study using the pilot plant will allow us to determine and analyze the features of the implementation of the control law before its application for industrial cranes.

Materials and methods. An adaptive control law is studied using the model of overhead crane under conditions of a current parametric uncertainty of the load and external disturbances. This control method is based on an adaptive control approach with an identifier and an implicit reference model using “simplified” adaptation conditions.

Results. A previously developed adaptive control law for an overhead crane is described. An experimental model of an overhead crane is described. An algorithm for adaptive control of an overhead crane model has been developed. The first experimental studies of the proposed control method have been carried out. They confirm its performance in real conditions.

Conclusions. The results of experimental tests have shown the effectiveness of the adaptive control law. The system ensures fine motion of the load in a short period of time, dampens the pendular oscillations of the load during acceleration and deceleration of the trolley, as well as during external disturbances. The adaptive control law allows you to move the load to the designated position and dampen the pendular oscillations with minimal preset adjustment of the control system. Since the identification of parameters occurs at the current time, the changes of the parameters of the load and the length of suspension do not affect the quality of control.

Key words: overhead crane, adaptive control law, pendular oscillations, reference model, current identification algorithm

DOI: 10.17588/2072-2672.2022.2.047-057

Введение. При эксплуатации грузовых кранов с подвесным креплением груза, в частности мостовых кранов, зачастую возникают трудности в управлении из-за раскачивания транспортируемого груза. Колебания груза могут возникать по разным причинам: ускорение или торможение тележки, неровности подкранового пути, воздействие ветра. Все эти факторы могут в значительной мере повлиять на точность позиционирования, качество, эффективность управления и безопасность эксплуата-

ции крана. Многие исследования способов управления крановыми системами направлены на минимизацию угла качания переносимого груза и обеспечение его перемещения в желаемое положение за наименьший промежуток времени [1–9]. Известен метод, в основе которого лежит обычное релейное управление приводом [1]. Период разгона тележки крана разбивается на три этапа с различными ускорениями, что позволяет выйти на режим максимальной скорости перемещения с

минимальным углом отклонения груза от вертикальной прямой. Есть решение этой задачи [2], основанное на использовании ПИД-регулятора, который обеспечивает плавный разгон и торможение при хорошо настроенных коэффициентах, что для разных условий обеспечить трудно. В [3] представлена двухконтурная система управления с ПИД-регулированием: в первом контуре обеспечивается гашение колебаний груза, а во втором решается задача перемещения груза в заданное место. В [4] описан модернизированный ПД-регулятор с сигмоидальной функцией. В [5–6] демпфирование колебаний достигается за счет управления с нечеткой логикой. В [7] используется ПД-регулятор с самонастраивающимся коэффициентом усиления посредством нейронной сети. В [8] предложена комбинация нейронной сети и управления скользящим режимом. Управление скользящим режимом использовано в качестве алгоритма самонастройки в целях определения необходимых параметров. Известен способ [9] адаптивной системы управления с идентификационным алгоритмом, с помощью которого в начальный момент времени оцениваются параметры крана, затем строится управление на основе использования функции Ляпунова. Однако использование ПИД-регуляторов подразумевает предварительную настройку системы под заранее известные параметры. В [9] параметры оцениваются заранее только перед перемещением груза, что может отрицательно сказаться на качестве переходного процесса. Управление с нечеткой логикой не всегда справляется с «нештатными» ситуациями и всем спектром возмущений, что наглядно представлено в [10], где на имитационной компьютерной модели исследовались три способа управления мостовым краном: управление с ПИД-регулированием, управление с нечеткой логикой и способ адаптивного управления [11].

Ниже исследуется адаптивный закон управления мостовым краном, основная цель которого минимизировать колебания груза как от собственного возбуждения при ускорении и торможении крана, так и при внешних возмущениях на систему (ветер,

неровности подкранового пути и т.д.) в условиях текущей параметрической неопределенности. Испытания системы на экспериментальной установке позволяет проверить работоспособность закона управления на реальном объекте управления с учетом всех факторов, присущих реальной эксплуатации крана, которые достаточно сложно предусмотреть при аналитическом моделировании.

Описание объекта управления.

Математическое описание рассматриваемого объекта управления с перемещением груза по одной оси хорошо изучено в [12]. Схема движения тележки крана и линейного перемещения подвешенного груза представлена на рис. 1, где m_1 – масса тележки; $V_{\text{упр}} = V = \dot{x}$ – скорость перемещения тележки (она же – управляющий сигнал); $f_{\text{упр}}$ – управляющая сила; $f_{\text{тр}}$ – сила трения, действующая на тележку; m_2 – масса груза; J – центральный момент инерции; $f_{\text{вн}}$ – горизонтальное внешнее возмущение, действующее на груз; l – длина гибкой подвески, с помощью которой груз связан с тележкой; ϕ – угол отклонения троса от вертикальной оси; $x_{\text{гр}}$ – координата перемещения груза по оси X .

Если считать управляющим воздействием силу привода, то уравнения поступательного и вращательного движения системы «тележка–маятник» без учета массы троса и трения углового движения (в силу их малости) и без учета начальных значений переменных по положению и скорости имеют следующий вид [12]:

$$\begin{cases} (m_1 + m_2) \ddot{x} + (m_2 l \cos \phi) \ddot{\phi} = \\ = f_{\text{упр}} + m_2 l \dot{\phi}^2 \sin \phi - k_x \dot{x} - f_{\text{с.тр}}, \\ (m_2 l \cos \phi) \ddot{x} + (m_2 l^2 + J) \ddot{\phi} = \\ = -m_2 g l \sin \phi - l f_{\text{вет}} \cos \phi, \\ x_{\text{гр}} = x + l \sin \phi, \end{cases} \quad (1)$$

где k_x – коэффициент вязкого трения поступательного перемещения тележки; $f_{\text{тр}}$ – сила сухого трения; g – ускорение свободного падения (указанные производные переменных взяты по времени (t); перечисленные выше параметры крана являются переменными и заранее неизвестными, кроме параметров g , m_1 и $m_{1\text{max}}$).

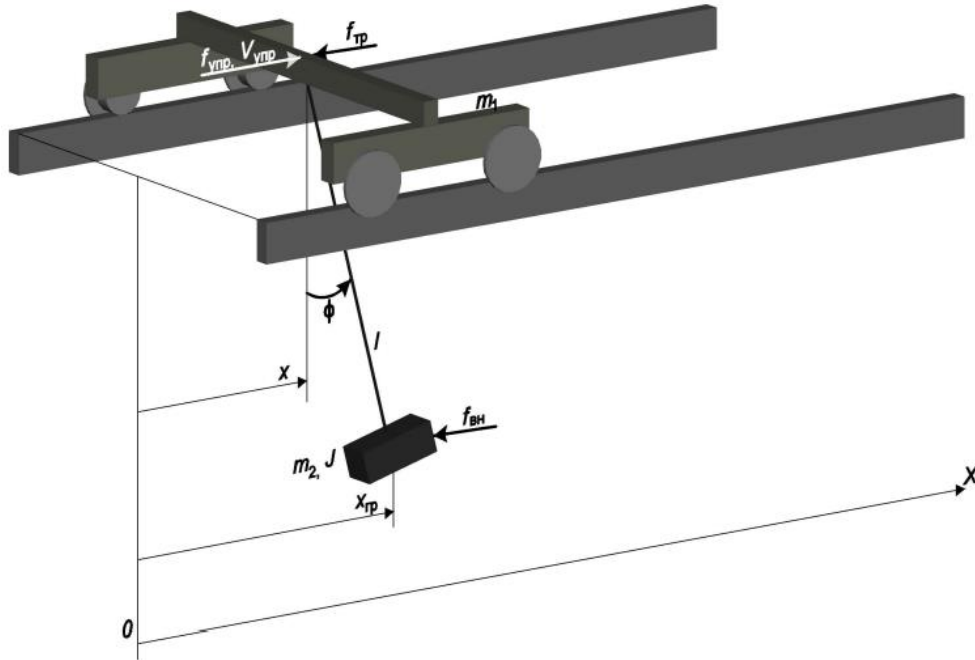


Рис. 1. Схема перемещения груза по одной оси

Поскольку угол отклонения груза от вертикальной прямой невелик ($|\phi| < 30^\circ$), так же как и угловая скорость, примем следующие упрощения: $\sin\phi \approx \phi$, $\cos\phi \approx 1$, $\dot{\phi}^2 \sin\phi \approx 0$. При этом система (1) переписывается относительно переменных \ddot{X} , $\ddot{\phi}$, $x_{гр}$ в следующем виде:

$$\begin{cases} \ddot{X} \approx a_{x1}f_{упр} + a_{x2}\phi + a_{x3}\dot{X} + a_{x4}, \\ \ddot{\phi} \approx a_{\phi1}f_{упр} + a_{\phi2}\phi + a_{\phi3}\dot{X} + a_{\phi4}, \\ x_{гр} \approx X + l\phi, \end{cases} \quad (2)$$

где $a_{x1} = \gamma^{-1}(m_2 l^2 + J)$; $a_{x2} = \gamma^{-1}g(m_2 l)^2$;

$$a_{x3} = -\gamma^{-1}(m_2 l^2 + J)k_x;$$

$$a_{x4} = \gamma^{-1}[-(m_2 l^2 + J)f_{с.тр} + m_2 l^2 f_{вет}];$$

$$a_{\phi1} = -\gamma^{-1}m_2 l; a_{\phi2} = -\gamma^{-1}(m_1 + m_2)m_2 g l;$$

$$a_{\phi3} = \gamma^{-1}m_2 l k_x;$$

$$a_{\phi4} = \gamma^{-1}l[m_2 f_{с.тр} - (m_1 + m_2)f_{вет}];$$

$$\gamma = [m_1 m_2 l^2 + (m_1 + m_2)J].$$

Из последнего равенства системы (2) на основании первых двух получаем уравнение динамики исследуемого объекта, управляемого силой [11]:

$$\ddot{X}_{тр} \approx a_1 f_{упр} + a_2 \phi + a_3 \dot{X} + a_4. \quad (3)$$

Для вывода уравнения динамики перемещения груза в зависимости от скорости

тележки из первой зависимости системы (2) выразим значение $f_{упр}$ и подставим его в (3), с учетом $(a_3 - a_1 a_{x3}/a_{x1}) = 0$ получим

$$\ddot{X}_{тр} \approx a_1^V \dot{V} + a_2^V \phi + a_3^V, \quad (4)$$

где $a_1^V = a_1/a_{x1} = J/(J + m_2 l^2)$, $1 \geq a_1^V > 0$;

$$a_2^V = (a_2 - a_1 a_{x2}/a_{x1}); a_3^V = (a_4 - a_1 a_{x4}/a_{x1}).$$

Далее это уравнение будем использовать в качестве объекта управления.

Закон управления. В соответствии с [13], в качестве эталонной модели, задающей требуемые характеристики перемещения груза, принимается неявная модель в виде колебательного звена со значениями переменных в начальный момент времени, равными соответствующим для исходного объекта [12]:

$$\ddot{x}_m = a_{m1}\dot{x}_m + a_{m0}(x_m - x_{гр}^{зад}), \quad x_m(t_0) = x_{гр}(t_0), \quad (5)$$

где x_m – переменная, описывающая эталонную динамику движения груза по оси X ; $x_{гр}^{зад}$ – заданное значение $x_{гр}$; $a_{m1} = -2\xi_m\omega_m$,

$a_{m0} = -(\omega_m)^2$ – выбираемые параметры эталонной модели; $\xi_m > 0$ – эталонное значение относительного коэффициента затухания;

$\omega_m = 0,5\sqrt{g/\hat{l}_{30\%}} > 0$ – эталонное значение собственной частоты; $\hat{l}_{30\%}$ – оценка длины подвеса груза с погрешностью не более $\pm 30\%$ [11]; t_0 – начальный момент времени.

Если правая часть уравнения (4) описывается в соответствии с назначенным эталоном (5), то в силу принятых условий и (2) поведение объекта будет близко к поведению эталонной модели:

$$\ddot{x}_{\text{гр}} \cong a_{m1} \dot{x}_{\text{гр}} + a_{m0} (x_{\text{гр}} - x_{\text{гр}}^{\text{зад}}). \quad (6)$$

Подставляя в уравнение (4) вместо его левой части правую часть уравнения (6) и заменяя $\dot{x}_{\text{гр}}$ на \dot{x} , чтобы устранить внутреннюю неустойчивость [13], определяем идеальную управляющую скорость $V_{\text{упр}}$, вычисленную при точных значениях параметров объекта:

$$\begin{aligned} T\dot{V}_{\text{упр}} + V_{\text{упр}} = \\ = -a_{m1}^{-1} [a_{m0} (x_{\text{гр}} - x_{\text{гр}}^{\text{зад}}) - a_2^V \phi - a_3^V], \end{aligned} \quad (7)$$

где $T = -a_1^V / a_{m1}$.

Полученный закон управления (7) построен при условии, что параметры объекта управления (a_1^V, a_2^V, a_3^V) известны. Однако на практике они будут неопределенны. Для поиска оценок указанных параметров в (4) в текущем времени используем алгоритм идентификации, способный оценивать переменные по времени, – рекуррентный метод наименьших квадратов с фактором забывания [15]:

$$\begin{cases} \hat{\theta}_i = \hat{\theta}_{i-1} + P_i y_i \varepsilon_i; \quad \varepsilon_i \triangleq z_i - y_i^T \hat{\theta}_{i-1}, \\ P_i = [P_{i-1} - P_{i-1} y_i y_i^T P_{i-1} (1 + y_i^T P_{i-1} y_i)^{-1}] / \beta, \\ P_0 = \vartheta E_2, \quad \beta < 1, \quad \beta \rightarrow 1, \end{cases} \quad (8)$$

где индекс $i = 1, 2, 3 \dots$ – дискретные моменты времени с шагом Δt ; $\hat{\theta}_i \triangleq [\hat{a}_{2i}^V, \hat{a}_{3i}^V]^T$ – вектор искомых оценок; верхний индекс T – транспонирование; $y_i = [\phi, 1]^T$ – вектор регрессоров, соответствующий искомым оценкам; ε_i – невязка идентификации; z_i – отклик объекта (в данном случае $z_i = (\ddot{x}_{\text{гр}} - \hat{a}_1^V \dot{x})$); оценка \hat{a}_1^V будет назначаться постоянной в силу свойств замкнутой адаптивной системы управления, построенной на «упрощенных» условиях адаптивности [13]; P_i – матричный коэффициент усиления алгоритма (2×2); β – назначаемый фактор забывания прошедших измерений для слежения за изменяющимися во времени искомыми параметрами;

ϑ – большое положительное число, определяющее начальную скорость изменения оценок параметров; E_2 – единичная (2×2) матрица.

Как вариант, можно построить двухэтапную процедуру идентификации, как это предложено в [15].

Закон управления с учетом оцениваемых параметров объекта управления вместо их действительных величин имеет вид

$$\hat{T}\dot{V}_{\text{упр}} + V_{\text{упр}} = -\hat{a}_{m1}^{-1} [a_{m0} (\hat{x}_{\text{гр}} - x_{\text{гр}}^{\text{зад}}) - \hat{a}_2^V \phi - \hat{a}_3^V], \quad (9)$$

где $\hat{T} = -\hat{a}_1^V / \hat{a}_{m1}$; $\hat{x}_{\text{гр}} = \int_0^t V_{\text{упр}}(t) dt + \hat{l}_{30\%} \phi$.

Как показано в [11, 13], требование к точности оценки \hat{a}_1^V может быть очень слабым (соответствует «упрощенным» условиям адаптируемости) и сводится к соотношениям:

$$\begin{aligned} \text{sign}(\hat{a}_1^V) = \text{sign}(a_1^V); \\ |\hat{a}_1^V|/2 \leq \hat{a}_1^V \leq |\hat{a}_1^V|_{\max}; \quad d\hat{a}_1^V/dt \rightarrow 0, \end{aligned} \quad (10)$$

где $|\hat{a}_1^V|_{\max} \geq 2|\hat{a}_1^V|$ – верхнее ограничение указанной оценки, которое определяется экспериментально по качеству результирующего управления (поэтому эта оценка выбрана постоянной, с экспериментальным выбором максимального ее значения).

В силу быстрой сходимости невязки идентификации в алгоритме (8) буквально с первых шагов работы алгоритма (доказательство см. в [13]), уравнение объекта управления (4) можно переписать как

$$\ddot{x}_{\text{гр}} \approx \hat{a}_1^V \dot{x} + \hat{a}_2^V \phi + \hat{a}_3^V.$$

Макет мостового крана. Для возможности исследования существующих и отладки новых способов управления краном на реальном объекте управления был собран макет, полностью повторяющий динамику движения грузоподъемных кранов мостового типа [16]. Собранный макет крановой установки представлен на рис. 2.

Размеры установки: длина 1250 мм, ширина 250 мм, высота от 1000 до 1400 мм. Высота макета регулируется за счет раздвижной конструкции ножек. Рабочий ход тележки составляет 1200 мм, максимальная высота подъема груза от пола – 1300 мм.

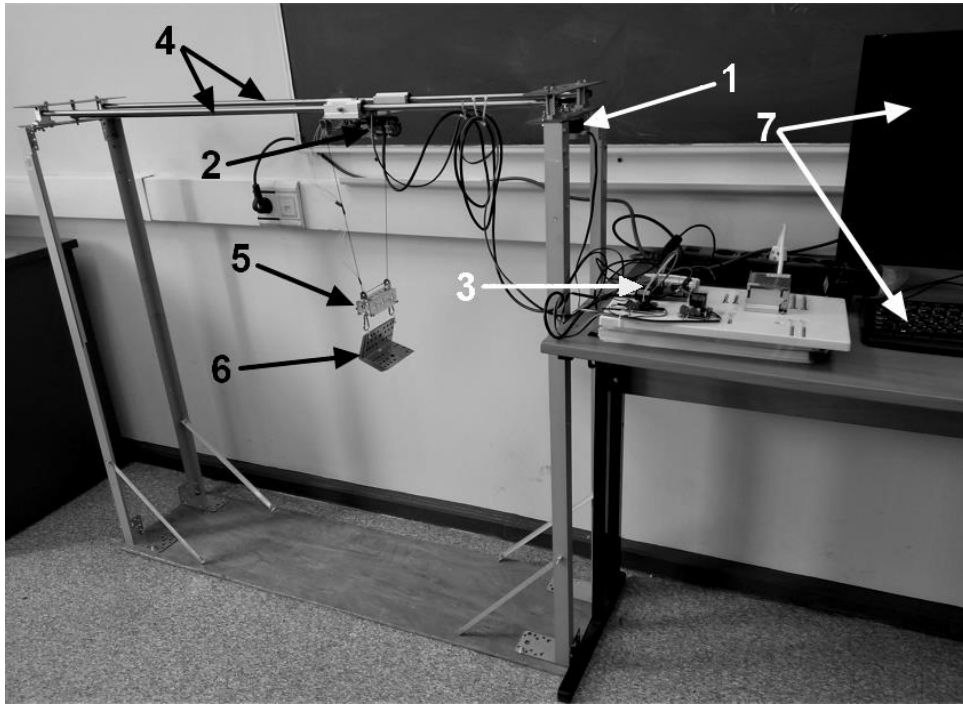


Рис. 2. Макет мостового крана: 1 – привод тележки; 2 – привод подъемного механизма; 3 – одноплатный компьютер Raspberry Pi 3 Model B+; 4 – цилиндрические направляющие; 5 – датчик угловой скорости GY-521 (на фотографии не видно); 6 – транспортируемый груз; 7 – монитор и клавиатура для управления одноплатным компьютером

В качестве привода тележки используется шаговый двигатель NEMA 17 со следующими характеристиками: момент удержания 4,8 кг·см; ток 2,5 А; угловой шаг 1,8 град/импульс. Двигатель расположен на неподвижной раме крановой установки. Поступательное движение от двигателя к тележке передается за счет зубчатого ремня, который натягивается с разных сторон макета с помощью зубчатых колес. С одной стороны зубчатое колесо расположено на валу шагового двигателя, с другой стороны – на неподвижной оси.

Тележка крана передвигается по двум стальным цилиндрическим осям диаметром 12 мм посредством линейных подшипников качения серии SCL.

Мотор редуктор, используемый для поднятия и опускания груза, закреплен на нижней части тележки. На его валу расположено колесо, которое наматывает леску с грузом. Мотор редуктор включает в себя электродвигатель постоянного тока с напряжением питания 12 В и планетарный редуктор, все узлы собраны в едином корпусе.

В качестве контроллера используется одноплатный компьютер Raspberry Pi 3 Model B+ с установленной операционной системой Raspbian [16]. Для определения угла отклонения троса от вертикальной оси

и линейного ускорения используется датчик GY-521 [18], построенный на микромеханическом чипе MPU-6000/MPU-6050, измеряющем угловые скорости и линейные ускорения по трем осям. Датчик установлен на 3 см выше места крепления груза.

Структурная схема системы управления представлена на рис. 3. На ней изображены все основные компоненты управления. Контроллер осуществляет сбор данных с датчика GY-521 и принимает команды оператора, которые задаются с компьютера. Далее после обработки полученной информации формируются управляющие сигналы на модули управления двигателями постоянного тока L298N, с которых, в свою очередь, осуществляется управление приводами тележки и подъемного механизма. Персональный компьютер необходим для удаленного подключения к Raspberry Pi.

Программный код алгоритма управления написан на языке высокого уровня Python. Упрощенная блок-схема разработанного алгоритма управления краном представлена на рис. 4, где используются следующие обозначения: $t_{\text{тек}}$ – период пройденного времени с начала работы алгоритма; $t_{\text{зад}}$ – заданное время работы алгоритма.

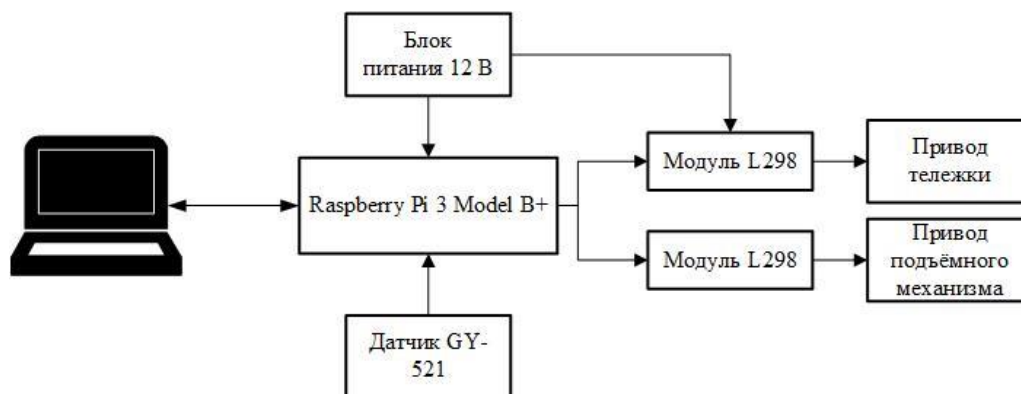


Рис. 3. Структурная схема системы управления макетом мостового крана

В процессе управления крановой установкой производится запись следующих переменных: расстояние, пройденное тележкой; расстояние, пройденное подвешенным грузом; значение угла отклонения троса от вертикальной оси; управляющий сигнал. Запись значений производится в виде вектора состояний (например, $x = (x_1, x_2, \dots, x_i)$). Для удобства анализа результатов работы системы на основе полученных векторов состояний строятся графики их значений от времени с помощью библиотеки Matplotlib¹.

В рамках отладочных работ для улучшения качества управления в алго-

ритм добавили дополнительное условие, при котором будет производиться текущая идентификация оценок параметров объекта управления, а также комплементарный фильтр первого порядка, предназначенный для определения $\ddot{x}_{гр}$ по показаниям акселерометра и датчика угловой скорости. Ввиду того что при приближении груза к заданной точке поведение объекта управления становится близко к линейному, текущая идентификация в этот момент отключается. А в вычислении $V_{упр}$ используются оценки, полученные на предыдущих итерациях.

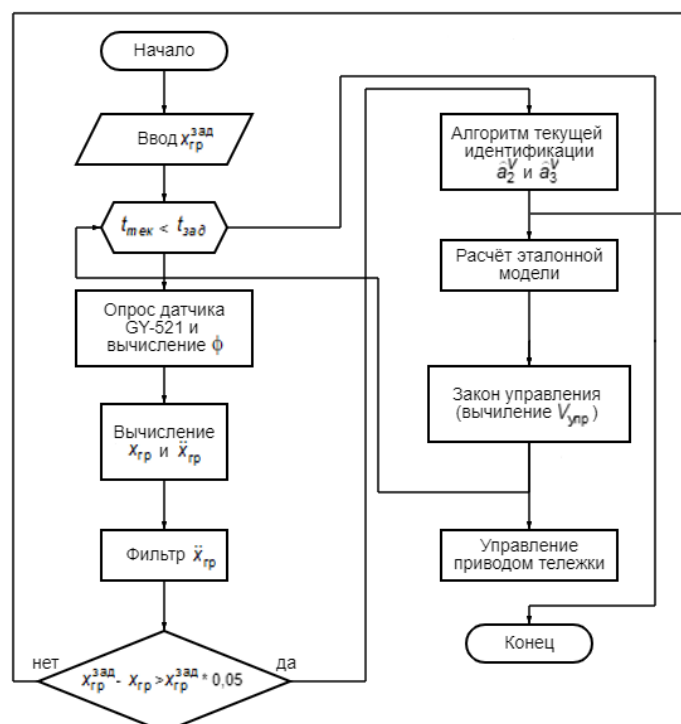


Рис. 4. Блок-схема алгоритма адаптивного управления макетом мостового крана

¹ https://jhub2.jinr.ru/user/anikina/notebooks/Project_School_Matplotlib_original.ipynb#

Результаты исследования. Исследование системы управления на макете мостового крана производилось с различными вариантами параметров груза и длины троса: $m_2 = 1,05$ кг и $m_2 = 0,7$ кг, $l = 0,61$ м и $l = 0,3$ м. Длина троса в течение одного исследования постоянна. Масса тележки $m_1 = 0,85$ кг. Значение ϕ определялось интегрированием измеренного $\dot{\phi}$. Определение переменной x осуществляется по количеству сформированных управляющих импульсов шагового двигателя (привода тележки). Момент инерции грузов рассчитывался согласно [19].

Параметры эталонной модели (5): $\xi_M = 0,9$; $\omega_M = 1,92$ с⁻¹. Заданное расстояние $x_{гр}^{зад} = 0,5$ м. Параметры алгоритма иден-

тификации (8) и (9): дискретный момент времени зависит от времени прохождения одного цикла управления; средние значения составляют $\Delta t = 0,01$ с; $\hat{a}_1^V = 0,0334$; $\vartheta = 100$; $\beta = 0,993$.

Параметры эталонной модели и алгоритма идентификации во время всех исследований не изменялись.

Для анализа свойств парирования внешних возмущений в каждом исследовании по завершении переходного процесса кратковременным импульсным воздействием вновь раскачивали груз.

На рис. 5–8 представлены результаты исследования адаптивной системы управления при различных параметрах.

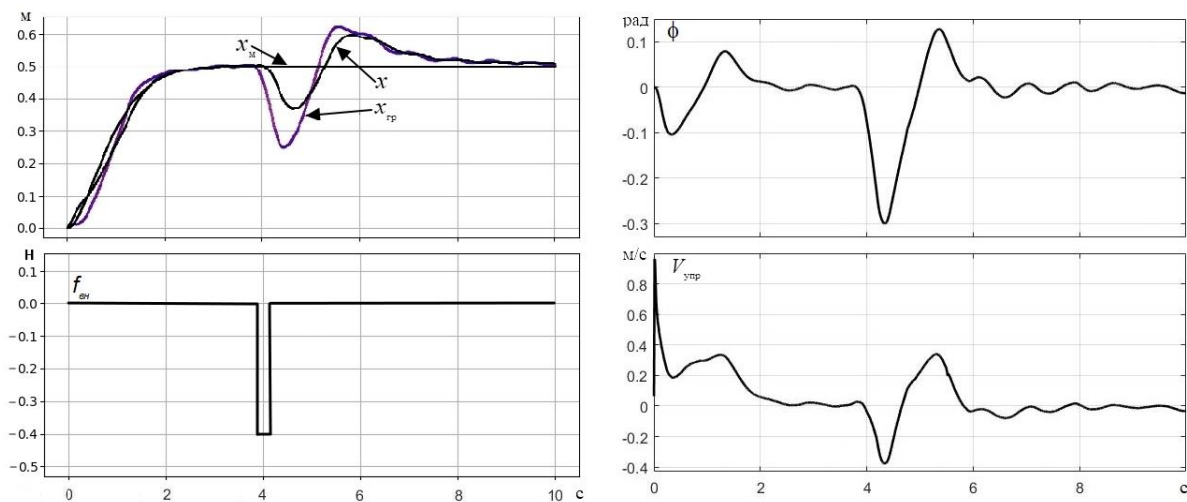


Рис. 5. Результаты исследования при параметрах: $m_2 = 1,05$ кг, $J = 0,011655$ кг·м², $l = 0,61$ м

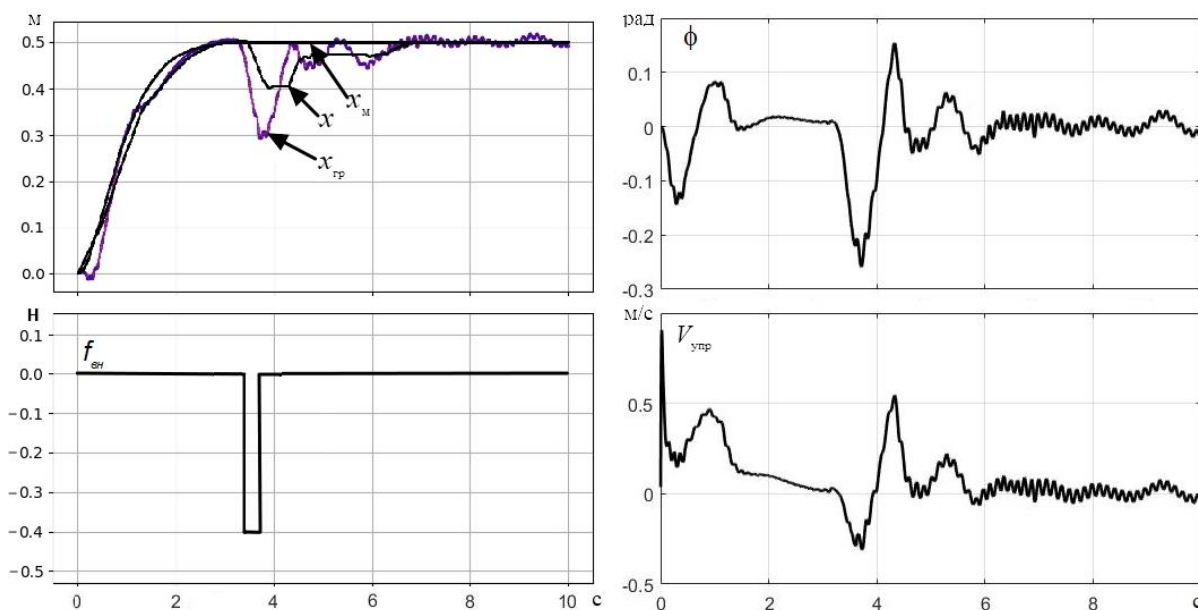


Рис. 6. Результаты исследования при параметрах: $m_2 = 1,05$ кг, $J = 0,011343$ кг·м², $l = 0,30$ м

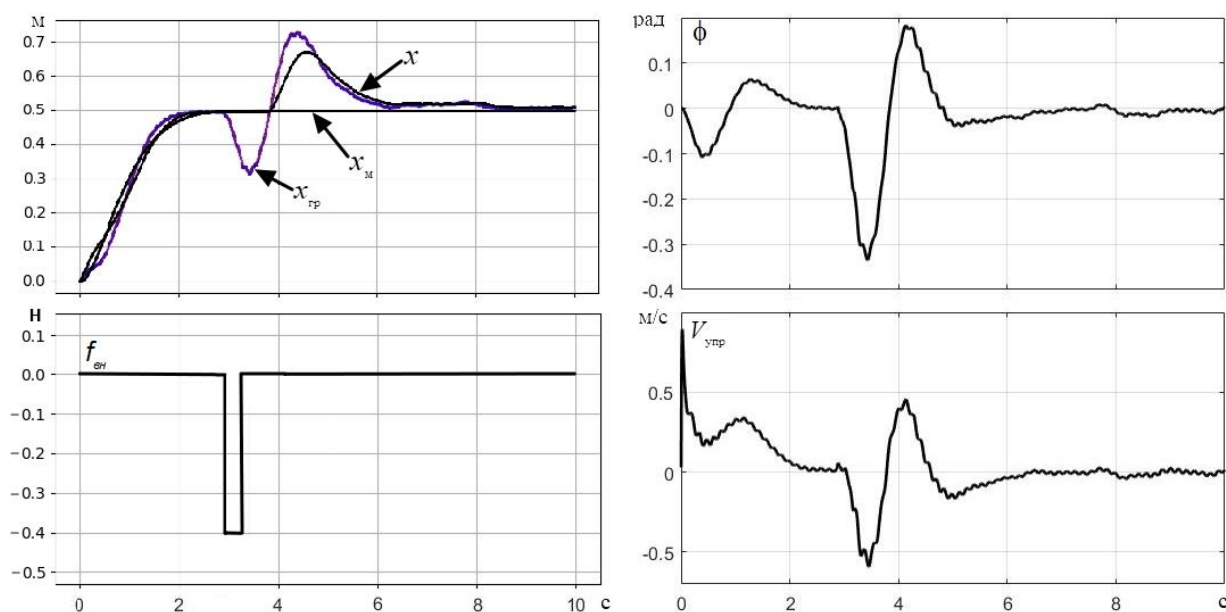


Рис. 7. Результаты исследования при параметрах: $m_2 = 1,05$ кг, $J = 0,011343$ кг·м², $l = 0,61$ м

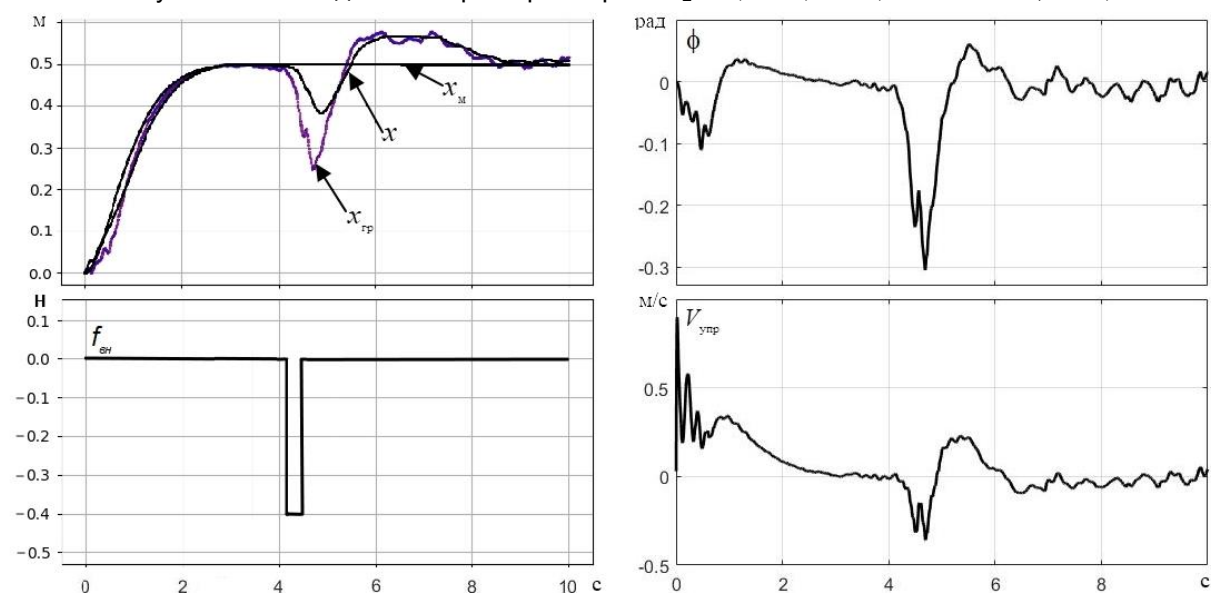


Рис. 8. Результаты исследования при параметрах: $m_2 = 0,7$ кг, $J = 0,000379$ кг·м², $l = 0,3$ м

Результаты исследования адаптивной системы управления на макете мостового крана подтверждают ее работоспособность. Характеристики переходного процесса схожи с теми, что были получены в [11] при исследовании системы управления в программной среде Matlab Simulink.

Также стоит отметить, что при изменении массы груза, его момента инерции и длины подвеса характеристики переходного процесса менялись незначительно. А внешнее импульсное возмущение парировалось за короткий промежуток времени (не более 4,2 с).

Выводы. Представленный адаптивный закон управления мостовым краном с управлением тележкой крана по скорости перемещения и отслеживанием текущего положения груза требует минимальных начальных настроек и способен подстраиваться в текущий момент времени под реальные характеристики объекта управления и внешних неконтролируемых возмущений.

В рамках данного исследования была настроена аппаратная часть экспериментальной установки, разработан алгоритм предлагаемого адаптивного закона управления на языке высокого уровня Python с опросом и обработкой данных с датчиков

обратной связи, с возможностью строить графики зависимостей необходимых переменных от времени. Результаты исследования на экспериментальной установке полностью совпали с результатами ранее проведенных имитационных компьютерных исследований, что подтверждает эффективность предложенного способа управления.

Система обеспечивает точное перемещение груза за малый промежуток времени, демпфирует маятниковые колебания груза при разгоне и торможении тележки, а также при внешних импульсных возмущениях. Переходный процесс составил не более 3 с при различных параметрах груза и длине подвеса.

Анализ полученных графиков показывает, что при перемещении груза с длиной подвеса 30 см появляются высокочастотные колебания, которых при исследовании в [11] не наблюдалось. Данные колебания передаются на датчик GY-521 от провода, к которому он подключен, на самом же грузе подобные колебания отсутствуют. Однако на качество управления в целом это не повлияло.

Список литературы

1. **Щедрин А.В., Сериков С.А., Колмыков В.В.** Автоматическая система успокоения колебаний груза для мостового крана // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2007. – № 8. – С. 13–17.
2. **Корытов М.С., Щербаков В.С., Шершнева Е.О.** Обоснование значений коэффициентов регуляторов гашения колебаний груза мостового крана // Вестник СибАДИ. – 2017. – № 1(53). – С. 12–19.
3. **Рогова Н.С., Юркевич В.Д.** Разработка алгоритмов управления для перемещения груза порталным краном // Сборник научных трудов НГТУ. – 2015. – № 3. – С. 43–54.
4. **Антипов А.С., Краснова С.А.** Система стабилизации положения тележки крана с использованием сигмоидальной функции // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2019. – Т. 20, № 10. – С. 609–614.
5. **Ухоботов В.И., Величко В.С.** Стабилизация математического маятника с основанием на колесе с помощью нечеткого алгоритма управления // Вестник ЮУрГУ. – 2014. – Т. 14, № 2. – С. 18–23.
6. **Петренко Ю.Н., Алави С.Э., Александровский С.В.** Исследование работы крана с контроллером нечеткой логики на основе трехмерной имитационной модели // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2011. – № 3. – С. 20–25.
7. **Saeidi H., Naraghi M., Raie A.A.** A neural network self tuner based on input shapers behavior for anti sway system of gantry cranes, J. Vib. Control. – 2013. – No. 19. – P. 1936–1949.
8. **Parallel** neural network combined with sliding mode control in overhead crane control system, J. Vib. / L. Lee, P. Huang, Y. Shih, et al. // Control. – 2014. – № 20. – P. 749–760.
9. **Boustany F., d'Andrea-Novel B.** Adaptive Control of an Overhead Crane using Dynamic Feedback Linearization and Estimation Desig. Centre Automatique et Systemes, Ecole des Mines de Paris. – 1992. – P. 1963–1968.
10. **Аксаментов Д.Н., Круглов С.П., Ковыршин С.В.** Сравнительный анализ методов управления мостовым краном // Электронный научный журнал «Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами». – 2019. – Т. 4. – С. 29–39.
11. **Круглов С.П., Аксаментов Д.Н.** Метод адаптивного управления мостовым краном с прямым отслеживанием перемещения груза // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2020. – № 21(12). – С. 682–688.
12. **Черноустько Ф.Л., Ананьевский И.М., Решмин С.А.** Методы управления нелинейными механическими системами. – М.: Физматлит, 2006. – 328 с.
13. **Круглов С.П.** Условия адаптируемости систем управления с идентификатором и эталоном. – М.: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, Saarbucken, Deutschland, 2012. – 125 с.
14. **Льюнг Л.** Идентификация систем. Теория для пользователя: пер. с англ. / под ред. Я.З. Цыпкина. – М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. – 432 с.
15. **Пат. на изобретение RU 2231819 С2.** Адаптивная система управления с двухэтапным идентификатором и неявной эталонной моделью / В.Н. Буков, С.П. Круглов, А.М. Бронников, Р.А. Сегедин; Приоритет 13.02.02.; опубл. 27.06.04, Бюл. № 18.
16. **Аксаментов Д.Н., Круглов С.П., Ковыршин С.В.** Установка по исследованию алгоритмов успокоения колебаний груза мостового крана // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – 2019. – Т. 2. – С. 288–292.
17. **Петин В.А.** Микрокомпьютеры Raspberry Pi. Практическое руководство. Сер.: Электроника. – СПб., 2015. – 240 с.
18. **Акселерометр и гироскоп MPU6050:** первое включение на STM32 и исследование показаний в статике / В.А. Жмудь, К.А. Кузнецов, Н.О. Кондратьев и др. // Автоматика и программная инженерия. – 2018. – № 3(25). – С. 9–22.

19. Сивухин Д.В. Общий курс физики. – М.: Наука, Механика, 1979. – Т. 1. – 3-е изд. – 520 с.

References

1. Shchedrinov, A.V., Serikov, S.A., Kolmykov, V.V. Avtomaticheskaya sistema uspokoeniya kolebaniy gruzha dlya mostovogo kрана [Automatic load vibration calming system for overhead crane]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika*, 2007, no. 8, pp. 13–17.
2. Korytov, M.S., Shcherbakov, V.S., Shershneva, E.O. Obosnovanie znacheniy koefitsientov regulatorov gasheniya kolebaniy gruzha mostovogo kрана [Substantiation of values of factors of bridge crane cargo vibration damping regulators]. *Vestnik SibADI*, 2007, no. 1(53), pp. 12–19.
3. Rogova, N.S., Yurkevich, V.D. Razrabotka algoritmov upravleniya dlya peremeshcheniya gruzha portal'nykh kранom [Development of control algorithms for moving load by a portal crane]. *Sbornik nauchnykh trudov NGTU*, 2015, no. 3, pp. 43–54.
4. Antipov, A.S., Krasnova, S.A. Sistema stabilizatsii polozheniya telezhki kрана s ispol'zovaniem sigmoidal'noy funktsii [System for stabilizing the position of the crane truck using the sigmoid function]. *Mekhatronika, automatizatsiya, upravlenie*, 2019, vol. 20, no. 10, pp. 609–614.
5. Ukhobotov, V.I., Velichko, V.S. Stabilizatsiya matematicheskogo mayatnika s osnovaniem na kolese s pomoshch'yu nechetkogo algoritma upravleniya [Stabilisation of the mathematical pendulum with the base on the wheel using an odd control algorithm]. *Vestnik YuUrGU*, 2014, vol. 14, no. 2, pp. 18–23.
6. Petrenko, Yu.N., Alavi, S.E., Aleksandrovskiy, S.V. Issledovanie raboty kрана s kontrol'rom nechetkoy logiki na osnove trekhmernoy imitatsionnoy modeli [Investigation of crane operation with odd logic controller based on 3D simulation model, Energy]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob"edineniy SNG*, 2011, no. 3, pp. 20–25.
7. Saeidi, H., Naraghi, M., Raie, A.A. A neural network self tuner based on input shapers behavior for anti sway system of gantry cranes, *J. Vib. Control*, 2013, no. 19, pp. 1936–1949.
8. Lee, L., Huang, P., Shih, Y., Chiang, T., Chang, C. Parallel neural network combined with sliding mode control in overhead crane control system, *J. Vib. Control*, 2014, no. 20, pp. 749–760.
9. Boustany, F., d'Andrea-Novell, B. Adaptive Control of an Overhead Crane using Dynamic Feedback Linearization and Estimation Desig. Centre Automatique et Systemes, Ecole des Mines de Paris, 1992, pp. 1963–1968.
10. Aksamentov, D.N., Kruglov, S.P., Kovyrsin, S.V. Sravnitel'nyy analiz metodov upravleniya mostovym kранom [Comparative analysis of bridge crane control methods]. *Elektronnyy nauchnyy zhurnal «Informatsionnye tekhnologii i matematicheskoe modelirovanie v upravlenii slozhnyimi sistemami»*, 2019, no. 4, pp. 29–39.
11. Kruglov, S.P., Aksamentov, D.N. Metod adaptivnogo upravleniya mostovym kранom s pryamym otslezhivaniem peremeshcheniya gruzha [A method of adaptive control of an overhead crane with direct tracking of the load movement]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2020, no. 21(12), pp. 682–688.
12. Chernous'ko, F.L., Anan'evskiy, I.M., Reshmin, S.A. *Metody upravleniya nelineynymi mekhanicheskimi sistemami* [Control methods of nonlinear mechanical systems]. Moscow: Fizmatlit, 2006. 328 p.
13. Kruglov, S.P. *Usloviya adaptiruемости sistem upravleniya s identifikatorom i etalonom* [The terms of the adaptability of control systems with an identifier and a benchmark]. Moscow: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, Saarbrücken, Deutschland, 2012. 125 p.
14. L'Yung, L. *Identifikatsiya sistem. Teoriya dlya pol'zovatelya* [System Identification: Theory for the User]. Moscow: Nauka, 1991. 432 p.
15. Bukov, V.N., Kruglov, S.P., Bronnikov, A.M., Segedin, R.A. *Adaptivnaya sistema upravleniya s dvukhetapnym identifikatorom i neyavnoy etalonnoy model'yu* [Adaptive control system with two-stage identifier and implicit reference model]. Patent RF, no. 2231819 C2, 2004.
16. Aksamentov, D.N., Kruglov, S.P., Kovyrsin, S.V. Ustanovka po issledovaniyu algoritmov uspokoeniya kolebaniy gruzha mostovogo kрана [Installation for investigation of bridge crane load vibration calming algorithms]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona*, 2019, vol. 2, pp. 288–292.
17. Petin, V.A. *Mikrokompyutery Raspberry Pi. Prakticheskoe rukovodstvo. Elektronika* [Raspberry Pi microcomputers. Practical guide]. Saint-Petersburg, 2015. 240 p.
18. Zhmud', V.A., Kuznetsov, K.A., Kondrat'ev, N.O., Trubin, V.G., Trubin, M.V. Akselerometr i giroskop MPU6050: pervoe vkl'yuchenie na STM32 i issledovanie pokazaniy v statike [Accelerometer and gyroscope MPU6050: the first inclusion on the STM32 and the study of readings in static]. *Avtomatika i programmaya inzheneriya*, 2018, no. 3(25), pp. 9–22.
19. Sivukhin, D.V. *Obshchiy kurs fiziki* [General course of physics]. Moscow: Nauka, Mekhanika, 1979, vol. 1, no. 3. 520 p.

МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

УДК 519.688

Сергей Петрович Бобков

ФГБОУВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», доктор технических наук, профессор кафедры информационных технологий и цифровой экономики, Россия, Иваново, e-mail: bsp@isuct.ru

Ирина Александровна Астраханцева

ФГБОУВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», доктор экономических наук, доцент, заведующий кафедрой информационных технологий и цифровой экономики, Россия, Иваново, e-mail: i.astrakhantseva@mail.ru

Применение агентного подхода для моделирования процессов теплопроводности

Авторское резюме

Состояние вопроса. Процессы теплопереноса лежат в основе большинства технологических процессов в энергетике. Это определяет важность и актуальность разработки современных подходов для компьютерной имитации и визуализации явлений переноса тепловой энергии в различных объектах. Классические модели в виде дифференциальных уравнений различного вида описывают процессы в непрерывном пространстве и времени. Их использование при исследовании нелинейных явлений, процессов в неоднородных средах при наличии разрывных решений на границах является затруднительным. В этих случаях приходится использовать упрощающие допущения, что понижает адекватность моделей. Представляет интерес использование принципиально иных подходов для описания процессов переноса, к которым можно отнести дискретные динамические модели. Целью настоящего исследования является рассмотрение возможностей использования дискретных подходов для моделирования нелинейных процессов теплопереноса в условиях неоднородности материала и наличия в нем объемных источников переменной мощности.

Материалы и методы. Изучены возможности использования агентного подхода к имитационному моделированию сложных систем, позволяющего рассматривать сплошную среду как совокупность взаимодействующих элементов (агентов), поведение которых полностью описывается локальными зависимостями. При этом законы функционирования отдельных элементов приняты детерминированными и соответствующими фундаментальным положениям теории теплопередачи.

Результаты. Исследована возможность применения дискретного подхода для имитационного моделирования процесса переноса тепла по молекулярному механизму. Описана общая методология разработки агентной детерминированной модели и рассмотрена ее применимость к описанию квазилинейных и нелинейных процессов теплопроводности. Рассмотрены примеры моделирования процес-

сов горения, осложненных экзотермическими и эндотермическими эффектами. Указаны достоинства и недостатки предлагаемого метода.

Выводы. Проведенные исследования показали, что дискретные агентные модели являются хорошей альтернативой классическим континуальным подходам при изучении процессов передачи тепла в неоднородных средах. Полученные результаты не противоречат современным подходам к описанию тепловых процессов. Также установлено, что применяемые в агентном подходе имитационные алгоритмы моделирования являются достаточно универсальными и легко адаптируются к изменениям условий задачи. Анализ результатов дает возможность рекомендовать дискретный агентный подход для разработки имитационных моделей сложных технологических процессов и систем.

Ключевые слова: дискретный подход, агентные модели, теплопроводность, горение

Sergey Petrovich Bobkov

Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Information Technologies and Digital Economy Department, Russia, Ivanovo, e-mail: bsp@isuct.ru

Irina Alexandrovna Astrakhantseva

Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Doctor of Economics (Post-doctoral degree), Associate Professor, Head of Information Technologies and Digital Economy Department, Russia, Ivanovo, e-mail: i.astrakhantseva@mail.ru

Application of agent-based approach for heat conduction processes simulation

Abstract

Background. Heat transfer processes are the basis of the most technological processes of the energy sector. Thus, the development of modern approaches for computer simulation and visualization of the phenomena of thermal energy transfer in various objects are of great importance and is relevant. Classical models in the form of differential equations of various types describe processes in continuous space and time. So, it is difficult to apply classical models to study nonlinear phenomena, and processes in inhomogeneous media in the presence of discontinuous solutions at the boundaries. In these cases, simplifying assumptions are used, thus, the adequacy of the models is reduced. It is of great interest to apply fundamentally different approaches to describe transfer processes, which include discrete dynamic models. The purpose of this project is to study the possibilities to apply discrete approaches to simulate nonlinear heat transfer processes under conditions of material inhomogeneity and the presence of volume sources of variable power.

Materials and methods. The paper studies the possibilities to apply the agent-based approach to simulate models of complex systems. This approach allows us to consider a continuum as a set of interacting elements (agents). The behavior of the elements is completely described by local dependencies. At the same time, the laws of functioning of individual elements are accepted as deterministic and they correspond to the fundamental principles of the theory of heat transfer.

Results. The possibility to apply a discrete approach for simulating the process of heat transfer by the molecular mechanism has been studied. The general methodology to develop an agent-based deterministic model is described. Its applicability to describe quasi-linear and nonlinear heat conduction processes is considered. The examples of simulation of combustion processes complicated by exothermic and endothermic effects are considered. The advantages and disadvantages of the proposed method are indicated.

Conclusions. The results of the study have shown that discrete agent models are a good alternative to classical continuum approaches to study heat transfer processes in inhomogeneous media. The results obtained do not contradict modern approaches to the description of thermal processes. It has also been found that the simulation algorithms used in the agent-based approach are quite universal and easily adapt to changes under the conditions of problem setting. The analysis of the results makes it possible to recommend a discrete agent-based approach to develop simulation models of complex technological processes and systems.

Key words: discrete approach, agent-based models, heat conduction, combustion

DOI: 10.17588/2072-2672.2022.2.058-066

Введение. В последние годы значительно возрос интерес к использованию дискретных подходов для имитационного

моделирования целого ряда сложных систем, включая технические, экономические, социальные и т.д. [1, 2]. Среди методов,

использующих рассмотрение поведения объектов в дискретных пространственно-временных координатах, выделяется агентное моделирование. Данный термин появился сравнительно недавно и означает группу подходов, позволяющих исследовать поведение децентрализованных элементарных подсистем, влияющих на поведение системы в целом. К агентным относят модели, построенные на базе теории игр, теории клеточных автоматов, методов эволюционного программирования, методов Монте-Карло и др. [3, 4]. Основная идея, объединяющая указанные методы имитационного моделирования, заключается в том, что изучается локальное поведение элементарных компонентов системы (агентов), а ее глобальное поведение возникает как результат совместной деятельности множества агентов [5].

Известен целый ряд работ, показывающих, что агентные модели могут быть достаточно серьезной альтернативой классическим методам моделирования, основанным на применении континуальных подходов, использующих системы уравнений различного вида. В частности, для имитационного моделирования технологических процессов успешно используются клеточные автоматы – одна из разновидностей агентных моделей [6]. Полученный опыт использования агентных моделей для решения технических задач показывает, что использование данного подхода позволяет получить адекватные результаты при исследовании нелинейных процессов в неоднородных средах [7]. Еще одним преимуществом агентного подхода является его объектная ориентированность, что позволяет использовать современные приемы системной инженерии и значительно облегчает разработку программного инструментария для имитационного моделирования.

Построение агентной модели. Известно, что процессы переноса вещества и энергии (тепловой, механической) являются базовыми технологическими процессами в энергетической, химической, строительной индустрии. Все эти явления происходят в пространстве, поэтому агентная модель должна включать в себя следующие базовые компоненты:

– множество агентов, локализованных внутри исследуемого объекта;

– принципы размещения и взаимодействия агентов (топология);

– совокупность правил, определяющих поведение агентов;

– законы взаимодействия объекта с окружающей средой.

Рассмотрим подробнее процедуру построения агентной модели процесса микроскопического переноса тепловой энергии (теплопроводности). В качестве агентов будут использоваться детерминированные конечные автоматы [8].

В двухмерной постановке исследуемый объект можно представить в виде плоской поверхности, которая заполнена дискретными элементами (агентами). Для простоты будем считать, что поверхность прямоугольная и агенты расположены в узлах равномерной ортогональной решетки. Стоит отметить, что объект может иметь произвольную форму. В этом случае несколько усложняется процедура программирования, но принципы моделирования не меняются.

Если мы имеем модель из M агентов, то местоположение каждого на решетке можно обозначить его именем m . Если размерность решетки составит $I \times J$, то именами могут служить координаты агента: $m = \{(i, j) : i = 0, 1, \dots, I, j = 0, 1, \dots, J\}$.

Каждый агент имеет соседей, с которыми он контактирует, и их количество зависит от его локализации. Так, экземпляры, расположенные внутри решетки, будут взаимодействовать с четырьмя соседями. У элементов, расположенных на границе решетки, соседей меньше.

Конечный автомат, поставленный в соответствие каждому агенту, определяется своим состоянием z . Переменная $z_{i,j}(t_k)$ характеризует состояние элемента (i, j) в момент дискретного времени k .

Поведение агентов и переходы между состояниями определяются правилами, которые можно задать в виде функциональных зависимостей, связывающих состояния агентов и воздействия на них со стороны соседей [9, 10]. При этом целесообразно использовать основные законы тепловых процессов. В частности, в качестве параметра состояния агента удобно взять его температуру – интенсивную величину, однозначно характеризующую тепловые явления. Внешние воздействия в таком случае будут описываться экстенсивными потоковыми величинами, а имен-

но тепловыми потоками между соседними агентами [11].

Взаимодействие системы с окружающей средой можно описать особым поведением агентов, находящихся на границе решетки, а именно наличием или отсутствием тепловых потоков от агента во внешнюю среду.

Изменение состояний агентов (их функционирование) осуществляется в модели синхронно.

Таким образом, в рассмотрение вводится система из M взаимосвязанных агентов, локальное поведение которых подчиняется индивидуальному алгоритму, построенному на базе фундаментальных законов моделируемого процесса [12].

Рассмотрим процесс получения правил поведения для агентной модели переноса тепла теплопроводностью.

Поскольку взаимодействие между агентами происходит путем обмена потоками тепла, можно применить закон Фурье, согласно которому вектор потока тепла пропорционален градиенту температуры [11].

Выражение для потока тепла к агенту (i, j) от соседнего агента в дискретный момент времени t_k можно записать в следующем виде:

$$q_{i,j}(t_k) = \lambda_{i,j} \frac{\pm[T_{i,j}(t_k) - T_o(t_k)]}{h^2}, \quad (1)$$

где q – удельная мощность теплового потока; $\lambda_{i,j}$ – коэффициент теплопроводности материала агента; $T_{i,j}(t_k)$ и $T_o(t_k)$ – температуры (состояния) рассматриваемого и соседнего агентов в момент времени t_k ; h – шаг по координатам.

Конкретный знак в числителе правой части выражения (1) определяется направлением вектора теплового потока.

Введя в рассмотрение тепловые потоки от соседних агентов, можно получить функциональную зависимость для определения температуры (состояния) агента на каждом шаге дискретного времени:

$$T_{i,j}(t_{k+1}) = T_{i,j}(t_k) + \frac{\Delta t}{C_{i,j} \rho_{i,j}} \sum_1^4 q_{i,j}(t_k), \quad (2)$$

где Δt – шаг по времени; $C_{i,j}$ и $\rho_{i,j}$ – теплоемкость и плотность материала агента (i, j) соответственно.

Выражения (1)–(2) содержат конкретные физические характеристики материала индивидуального агента (плотность, теплоемкость, теплопроводность), что позволяет

формулировать алгоритм поведения агентов при исследовании процесса в неоднородных средах.

Строго говоря, зависимость (2) полностью справедлива для элементов системы, расположенных внутри решетки и имеющих четырех ближайших соседей. Для агентов, находящихся на границе решетки, поток теплоты в окружающую среду определяется либо с использованием уравнения теплоотдачи (теплообмен с внешней средой), либо путем уменьшения числа слагаемых в сумме, входящей в выражение (2) (если граница изолирована).

В системе также будут присутствовать отдельные элементы, поведение которых подчиняется особым законам. К ним относятся агенты, имитирующие источники (стоки) тепла. Для сосредоточенных источников применимы законы изменения их состояния во времени либо законы изменения потока тепла от них:

$$T_{m,n}(t_k) = \Psi(t_k) \text{ или } q_{m,n}(t_k) = \Phi(t_k), \quad (3)$$

где m, n – координаты агента-источника; $T_{m,n}(t_k)$ – температура источника; $q_{m,n}(t_k)$ – тепловой поток; $\Psi(t_k)$ и $\Phi(t_k)$ – заданные функции дискретного времени (в общем случае и свойств материала).

Если в объекте имеется распределенный источник (например, объемная реакция горения), то в уравнение (2) следует ввести дополнительное слагаемое:

$$T_{i,j}(t_{k+1}) = T_{i,j}(t_k) + \frac{\Delta t}{C_{i,j} \rho_{i,j}} [\sum q_{i,j}(t_k) + \gamma(t_k)], \quad (4)$$

где $\gamma(t_k)$ – удельная мощность источника в момент времени t_k .

При исследовании поведения системы задается начальное состояние всех агентов. Указываются имена (координаты) источников или стоков тепла. Задаются условия на границах решетки. Далее динамика поведения системы реализуется в ходе последовательности итераций. Алгоритм каждой итерации следующий:

а) выбирается очередной агент, расположенный на решетке;

б) определяется его текущее состояние и состояния агентов-соседей;

в) по зависимостям (2)–(4) определяется новое состояние выбранного агента.

Описанная последовательность действий выполняется M раз, чтобы в ней приняли участие все агенты, далее итерации повторяются.

Результаты исследования. Рассмотрим примеры использования агентных моделей для имитации процесса теплопроводности. В качестве модельного объекта выбрана плоская пластина, на которой в узлах ортогональной решетки с шагом 1 мм размещены 41×41 агентов. Физические параметры материала агентов были выбраны следующими: плотность ρ 1500 кг/м³; удельная теплоемкость C 1000 Дж/(кг·К); теплопроводность λ 1,0 Вт/(м·К). Начальная температура пластины – 0 условных градусов. Шаг моделирования по времени – 0,35 с. Полученные результаты представлены на рис. 1, 2, где в правом верхнем углу указано время, на вертикальной оси – температура в условных единицах.

Приведем результаты имитационного моделирования прогрева однородной пластины источником постоянной мощности (уравнение (3)), расположенным на одной

из ее границ (рис. 1). При имитации процесса было принято допущение об отсутствии теплоотдачи в окружающую среду. Мощность источника составила 0,04 Вт.

На рис. 2 показано изменение температуры аналогичной пластины при ее нагреве источником тепла, находящимся внутри объекта. Мощность источника составила 0,025 Вт.

Представленные на рис. 1 и 2 результаты описывают процесс постепенного нагрева объекта. При этом ход процесса полностью соответствует существующим представлениям о природе молекулярного переноса тепла.

В имитационных экспериментах, результаты которых представлены выше, функционирование агентов системы подчинялось уравнениям (2) и (3). Это были достаточно тривиальные задачи в линейной постановке.

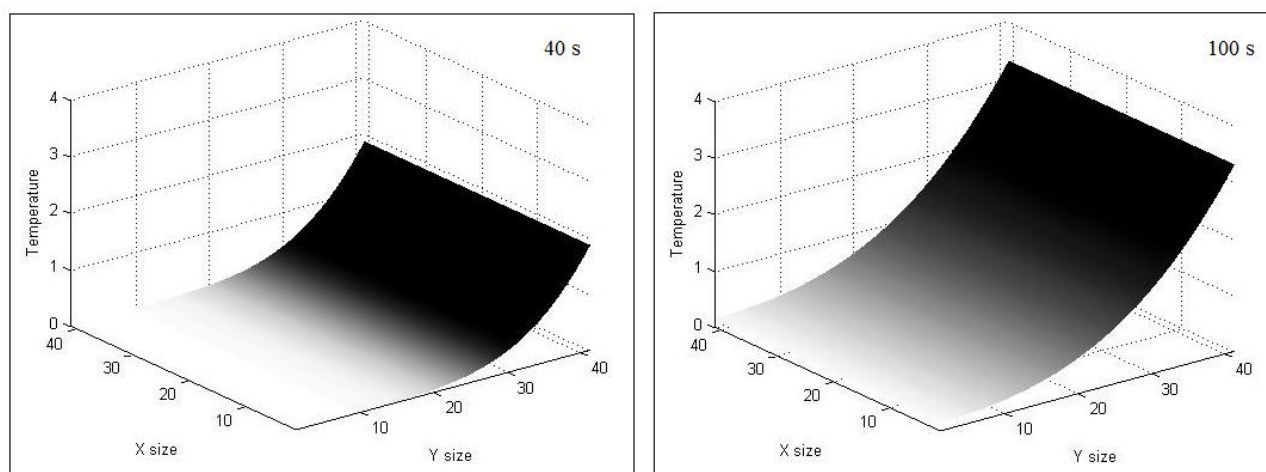


Рис. 1. Результаты моделирования нагрева пластины линейным источником тепла постоянной мощности

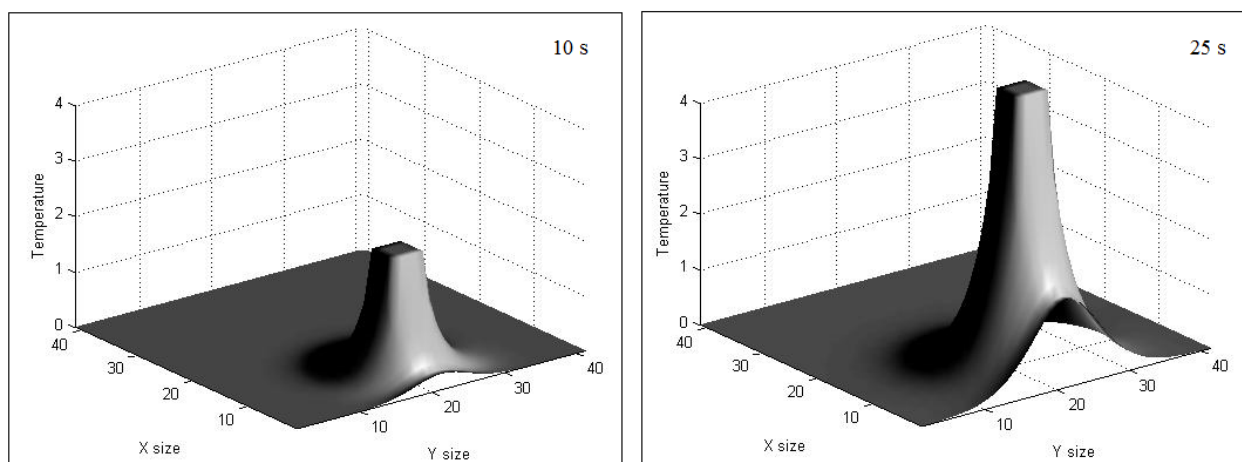


Рис. 2. Результаты моделирования нагрева пластины локальным тепловым источником постоянной мощности

Перейдем к более сложной квазилинейной задаче, имитирующей теплоперенос в процессе горения. Будем считать, что в пластине расположен объемный источник тепла и функционирование агентов подчиняется уравнению (4). Также примем, что справедлива следующая связь удельной мощности источников тепла с температурой T :

$$\gamma(T) = kT, \quad (5)$$

где k – константа.

Такая постановка задачи характерна для моделирования теплопереноса в условиях выделения тепла [13].

Предположим, что горение инициируется тепловым импульсом, расположенным в одном из углов решетки. Значение параметра k равно 0,025. Остальные параметры моделирования были взяты аналогичными описанным выше. Результаты моделирования представлены на рис. 3.

Анализ представленных результатов показывает, что сначала прогрев пластины происходит достаточно медленно. Однако затем температура резко возрастает, что характерно для начальных этапов процесса горения и соответствует общепринятым взглядам.

Ранее отмечалось, что агентные модели достаточно легко позволяют исследовать процессы в неоднородных средах. Для иллюстрации сказанного усложним предыдущую задачу, введя в пластину участки с различными теплофизическими свойствами. В частности, примем, что теплопроводность данных участков на два порядка ниже, чем у основного материала

пластины. Остальные параметры моделирования оставим прежними.

Рассмотрим два случая, при которых аномальные участки имеют различную локализацию. В первом случае аномальный (теплоизолирующий) участок имеет форму узкой полосы, а импульс, инициирующий горение, находится в середине одной из сторон пластины (рис. 4). Во втором случае участок имеет прямоугольную форму, а «поджигающий» импульс расположен в центре пластины (рис. 5).

Рис. 4 и 5 иллюстрируют резкое различие температуры общего теплового поля объекта, что характеризует его неравномерность.

Анализ приведенных выше результатов показывает, что пропорциональную зависимость удельной мощности внутренних источников теплоты от температуры (5), принятую в квазилинейной модели, можно считать достаточно грубым приближением при формализации законов теплопереноса при горении. К тому же в предыдущих примерах коэффициент теплопроводности считался константой, хотя в реальности он существенно зависит от температуры. Эти моменты позволили перейти к существенно нелинейной постановке задачи.

При такой постановке для учета изменения коэффициента теплопроводности при увеличении температуры будем его рассчитывать следующим образом:

$$\lambda(T) = \lambda_0 \alpha T, \quad (6)$$

где λ_0 – начальная теплопроводность материала; α – константа.

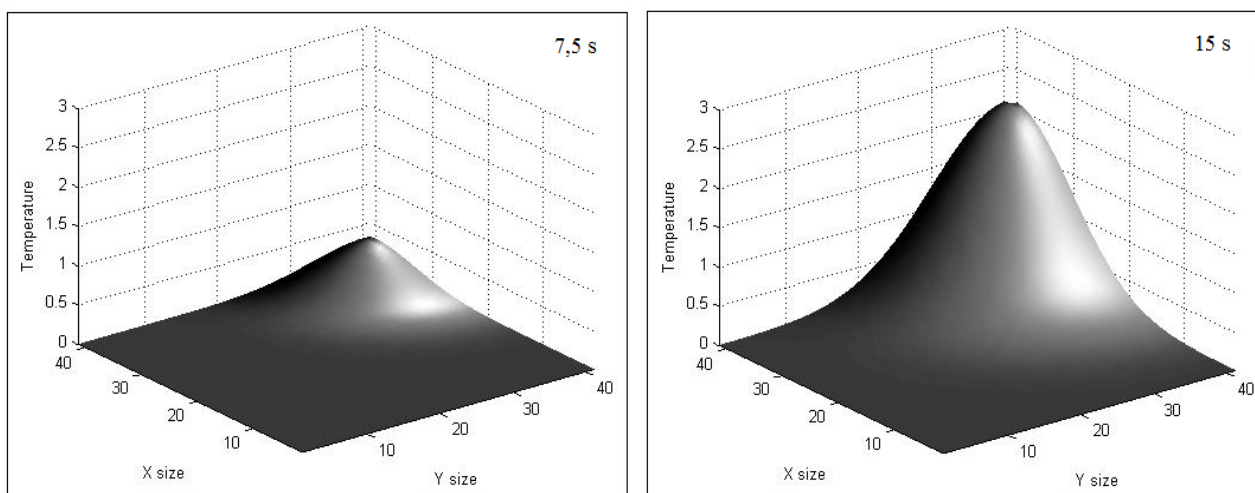


Рис. 3. Результаты моделирования квазилинейного процесса теплопроводности (имитация горения)

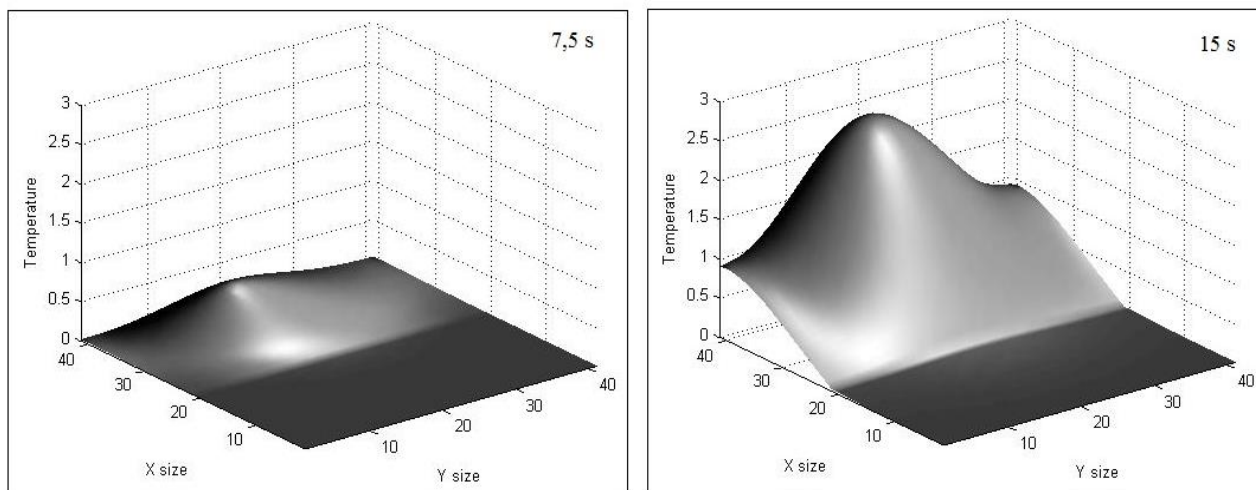


Рис. 4. Результаты моделирования квазилинейного процесса теплопроводности в объекте с линейной зоной аномальной теплопроводности

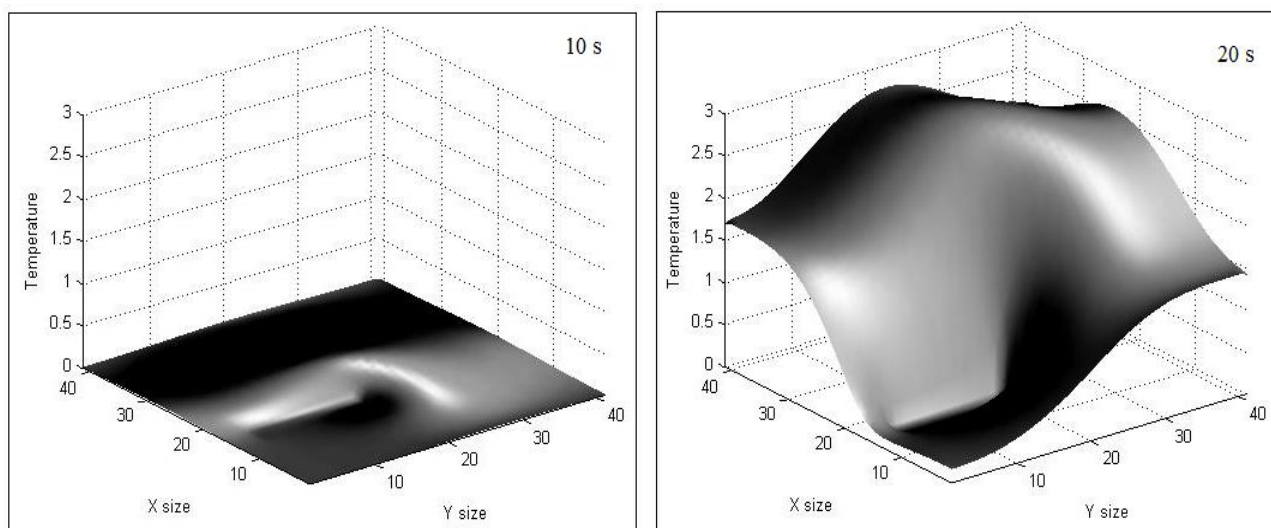


Рис. 5. Результаты моделирования квазилинейного процесса теплопроводности в объекте с прямоугольной зоной аномальной теплопроводности

Далее известно, что в реальных условиях ламинарному диффузионному горению часто сопутствуют эндотермические эффекты, связанные с тормозящим влиянием образующихся продуктов горения [14], поэтому вместо выражения (5) примем следующий нелинейный закон изменения мощности объемного источника [15]:

$$\gamma(T) = kT - \beta T^3, \quad (7)$$

где β – константа.

Наконец, импульс, инициирующий горение, поместим в середине одной из сторон пластины, а также предусмотрим отда-

чу тепла в окружающую среду, температуру которой будем считать постоянной.

Результаты моделирования при $k = 0,025$; $\alpha = 0,05$; $\beta = 0,01$ представлены на рис. 6.

Данные, представленные на рис. 6, значительно отличаются от приведенных выше. Их анализ показывает, что тепло распространяется ярко выраженным широким фронтом. Кроме того, имитация показала, что с течением времени рост температуры замедляется и она стремится к предельному значению. В реальных условиях такая ситуация может иметь место, например, при выгорании топлива.

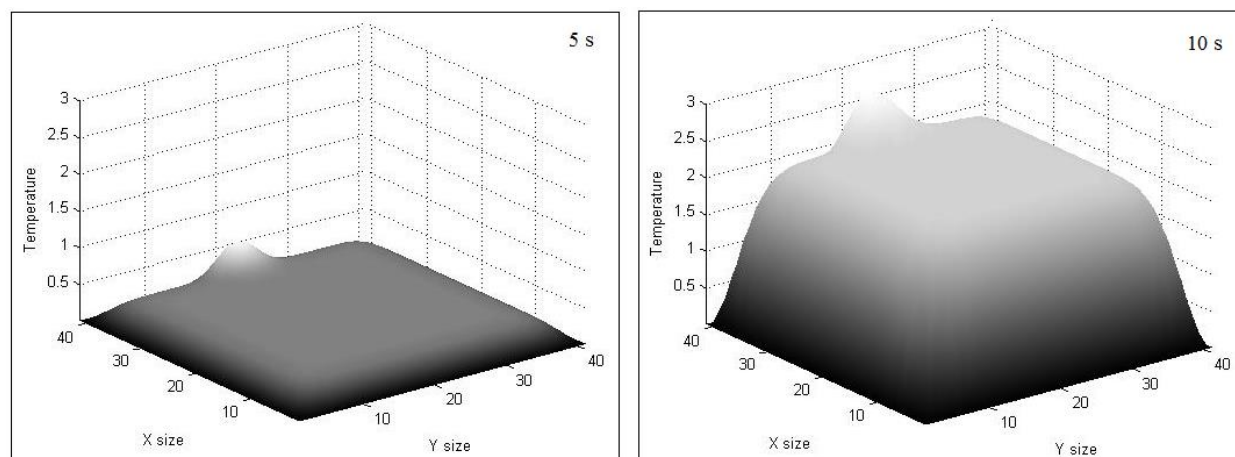


Рис. 6. Результаты моделирования нелинейного эндотермического процесса теплопроводности

Выводы. Полученные результаты согласуются с существующими представлениями о протекании процессов молекулярного переноса тепла. К тому же использованный дискретный подход представляется физически более ясным по сравнению с применением дифференциальных уравнений с частными производными и более простым в практической реализации. Следует отметить, что при изменении условий задачи имитационный алгоритм оставался практически без изменений. Менялись только зависимости, лежащие в основе алгоритмов поведения агентов и характеристики материала, при необходимости вводились координаты расположения аномальных участков.

Исследования показали, что агентные модели позволяют достаточно легко имитировать протекание процессов, описание которых классическими методами затруднительно. В частности, использование локализованных агентов позволяет моделировать объекты, имеющие сложную форму границ, а индивидуальное поведение агентов снимает проблемы моделирования, возникающие при описании изменения свойств материалов в пространстве или во времени. Еще одним преимуществом агентных моделей является легкая возможность перехода между детерминированными и стохастическими описаниями процесса. Для этого достаточно лишь использовать вероятностные функциональные зависимости для описания правил поведения агентов.

Представленный подход имеет ряд недостатков, главным из которых может считаться значительная потребность в вычислительных ресурсах. Повышение адек-

ватности модели требует увеличения числа используемых в ней агентов, что, в свою очередь, приводит к возрастанию объема вычислений. Однако данный недостаток не является острой проблемой. Сама идеология и архитектура дискретных моделей идеально подходят для успешного использования технологий параллельных вычислений, поэтому рост возможностей компьютеров в значительной степени компенсирует указанный недостаток.

В заключение можно отметить, что дискретный агентный подход позволяет создавать эффективные имитационные модели для изучения пространственно распределенных процессов и систем.

Агентный подход позволяет рассматривать большую и сложную систему как множество взаимодействующих элементов, т. е. первоначальная общая задача разбивается на несколько дискретных небольших задач. При этом действия локальных элементов формируют поведение системы в целом. С этих позиций набор агентов, обладающих конкретными свойствами, можно рассматривать как некий вычислительный инструмент, позволяющий имитировать реальные явления.

Список литературы

1. **Wolfram S.** A new kind of science. – Champaign, IL: Wolfram media inc, 2002.
2. **Бобков С.П., Астраханцева И.А., Волков В.С.** Имитационное моделирование системы массового обслуживания с целью анализа ее работы // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. – 2021. – № 3(67). – С. 58–62.
3. **Inverno M., Luck M.** Multi-agent systems research into the 21st century // The Knowledge

Engineering Review. – 2002. – Vol. 16. – P. 271–275.

4. **Yoav S., Leyton-Brown K.** Multiagent Systems: Algorithmic, Game-Theoretic and Logical Foundations. – Cambridge University Press, 2009. – 519 p.

5. **Macal C., North M.** Tutorial on Agent-Based Modelling and Simulation // Journal of Simulation. – 2010. – Vol. 4. – P. 151–162.

6. **Toffoli T., Margolus N.** Cellular Automata Machines / Massachusetts Institute of Technology Press. – Massachusetts, USA, 1987.

7. **Bobkov S., Galiaskarov E., Astrakhtantseva I.** The use of cellular automata systems for simulation of transfer processes in a non-uniform area // CEUR Workshop Proceedings, Moscow, 20 января 2021 года. – Moscow, 2021.

8. **Бобков С.П., Астраханцева И.А., Галиаскаров Э.Г.** Применение системного подхода при разработке математических моделей // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. – 2021. – № 1(65). – С. 66–71.

9. **Gilbert N.** Agent-Based Models. – Sage Publications: London, 2007. – 153 p.

10. **Galan J.** Errors and Artefacts in Agent-Based Modelling // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. – 2008. – Vol. 12, no. 1.

11. **Chen T.M.** Numerical solution of hyperbolic heat conduction problems in the cylindrical coordinate system by the hybrid Green's function method // International journal of heat and mass transfer. – 2010. – Vol. 7(53). – P. 1319–1325.

12. **Dastani M., Gomez-Sanz J.J.** Programming multi-agent systems // The Knowledge Engineering Review. – 2005. – Vol. 20. – P. 151–164.

13. **Bobkov S.P., Astrakhtantseva I.A.** The use of multi-agent systems for modeling technological processes // Journal of Physics: Conference Series: 2, Moscow, 01 июля 2021 года. – Moscow, 2021. – P. 012002.

14. **Полежаев Ю.В.** Законы горения. – М.: Энергомаш, 2006. – 352 с.

15. **Bobkov S.P.** Use of Discrete Approaches for Simulation the Basic Processes of Chemical Technology // Russian Journal of General Chemistry. – 2021. – Vol. 91, No. 6. – P. 1190–1197.

References

1. Wolfram, S. A new kind of science. Champaign, IL: Wolfram media inc, 2002.

2. Bobkov, S.P., Astrakhtantseva, I.A., Volkov, V.S. Imitatsionnoe modelirovanie sistemy massovogo obsluzhivaniya s tsel'yu analiza ee

raboty [Simulation modeling of system of mass service to analyze its operation]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii. Regional'noe prilozhenie*, 2021, no. 3(67), pp. 58–62.

3. Inverno, M., Luck, M. Multi-agent systems research into the 21st century. The Knowledge Engineering Review, 2002, vol. 16, pp. 271–275.

4. Yoav, S., Leyton-Brown, K. Multiagent Systems: Algorithmic, Game-Theoretic and Logical Foundations. Cambridge University Press, 2009. 519 p.

5. Macal, C., North, M. Tutorial on Agent-Based Modelling and Simulation. Journal of Simulation, 2010, vol. 4, pp. 151–162.

6. Toffoli, T., Margolus, N. Cellular Automata Machines. Massachusetts Institute of Technology Press. Massachusetts, USA, 1987.

7. Bobkov, S., Galiaskarov, E., Astrakhtantseva, I. The use of cellular automata systems for simulation of transfer processes in a non-uniform area. CEUR Workshop Proceedings, Moscow, 20 yanvarya 2021 goda. Moscow, 2021.

8. Bobkov, S.P., Astrakhtantseva, I.A., Galiaskarov, E.G. Primenenie sistemnogo podkhoda pri razrabotke matematicheskikh modeley [Application of a systematic approach while developing mathematical models]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii. Regional'noe prilozhenie*, 2021, no. 1(65), pp. 66–71.

9. Gilbert, N. Agent-Based Models. Sage Publications: London, 2007. 153 p.

10. Galan, J. Errors and Artefacts in Agent-Based Modelling. Journal of Artificial Societies and Social Simulation, 2008, vol. 12, no. 1.

11. Chen, T.M. Numerical solution of hyperbolic heat conduction problems in the cylindrical coordinate system by the hybrid Green's function method. International journal of heat and mass transfer, 2010, vol. 7(53), pp. 1319–1325.

12. Dastani, M., Gomez-Sanz, J.J. Programming multi-agent systems. The Knowledge Engineering Review, 2005, vol. 20, pp. 151–164.

13. Bobkov, S.P., Astrakhtantseva, I.A. The use of multi-agent systems for modeling technological processes. Journal of Physics: Conference Series: 2, Moscow, 01 iyulya 2021 goda. Moscow, 2021, p. 012002.

14. Polezhaev, Yu.V. *Zakony gorennya* [Laws of combustion]. Moscow: Energomash, 2006. 352 p.

15. Bobkov, S.P. Use of Discrete Approaches for Simulation the Basic Processes of Chemical Technology. Russian Journal of General Chemistry, 2021, vol. 91, no. 6, pp. 1190–1197.



МИЗОНОВ ВАДИМ ЕВГЕНЬЕВИЧ – ЗАМЕЧАТЕЛЬНЫЙ ЧЕЛОВЕК, ВЫДАЮЩИЙСЯ УЧЕНЫЙ И ТАЛАНТЛИВЫЙ ПЕДАГОГ

*23 марта 2022 года оборвалась жизнь лауреата Премии Правительства РФ в области науки и техники, почетного работника высшего профессионального образования РФ, заслуженного деятеля науки РФ, члена-корреспондента Академии инженерных наук, академика Международной академии системных исследований, доктора технических наук, профессора **Мизонова Вадима Евгеньевича**.*

«Нам всем очень горько это сознавать. Мы всегда будем помнить яркие, глубокие выступления Вадима Евгеньевича на заседаниях совета, его высочайший профессионализм, замечательные человеческие качества. Нам его будет очень не хватать. Скорбим вместе с коллегами из ИГЭУ».

Коллеги, диссертационный совет ИГХТУ

«Очень печальная новость, искренние соболезнования семье Вадима. Казалось бы, совсем недавно я получил от него поздравления с Рождеством и Новым годом. Жаль, что его больше нет с нами».

Henryk Otwinowski,
профессор, Польша

«Примите, пожалуйста, мои искренние соболезнования в связи со смертью Вадима Евгеньевича. Я у него учился, занимался наукой. Много он сделал хорошего для всех, и для меня в том числе. Человек он очень светлый, энергичный, добрый, отзывчивый, интересный. Всего и не перечислить. Светлая ему память».

Ананьев Сергей,
канд. техн. наук, Ярославль

«Какая грустная новость. Не верится, что такое может быть. Как много он для всех нас сделал! Благодаря его программе «Синтез знаний», я попал сразу после школы на второй курс ИГЭУ. Потом в аспирантуру. А затем и диссертацию Вадим Евгеньевич помог мне довести до ума уже здесь, в Техасе. Кажется, все это было совсем недавно, а на самом деле прошедшее время уже десятилетиями исчисляется. Но каждый раз, приезжая в Иваново, я знал, что могу прийти на кафедру прикладной математики и всех провести. А теперь Вадима Евгеньевича не стало. Как справиться с такой потерей?»

Глеб Межеумов,
Ph.D, Техас

«Это большая потеря не только для друзей и соратников Вадима, но и для науки. Вадим не только много работал сам, но и активно помогал другим. В нашем университете его знали многие и многие будут помнить о нем. Пусть земля будет ему пухом».

Владимир Першин,
профессор, Тамбов

«Я очень плохо себя чувствую после того, как узнал эту новость о смерти Вадима, я всегда буду помнить о нем. Надеюсь, что у вас все будет хорошо».

Arnold Camelo,
канд. техн. наук, Колумбия

«Уважаемые коллеги! Какое ГОРЕ, не укладывается в голове. Примите самые искренние соболезнования от всего коллектива Ярославского государственного технического университета и от меня

лично в связи с безвременной кончиной профессора Вадима Евгеньевича Мизонова. Мы глубоко разделяем ваше горе, это горе всех, кто когда-либо общался с профессором Мизоновым – человеком необъятной души, кристальной честности, искренности, высочайшего профессионализма и научной дотошности, бесконечно влюбленного в науку. Помогать другим во всем созидательном и прогрессивном – правило Вадима Евгеньевича, правило профессора Мизонова. Мы скорбим вместе с вами!»

Капранова Анна Борисовна,
профессор, ЯГТУ

«Скорбим вместе с вами. Ушел замечательный человек и великий энтузиаст-ученый!»

Дорохов Игорь Николаевич,
президент МАСИ, Москва

«Примите наши искренние соболезнования. Вадим Евгеньевич и Наталья Григорьевна были и останутся для всех, кто их знал, людьми с большой буквы. Буквально на Новый год Вадим написал мне, что здоров, работает и надеется на лучшее. И вот его не стало».

Evgeniy Grant,
Израиль

«Скорбим вместе с Вами. Примите наши искренние соболезнования и добрые слова об этом замечательном человеке, которого мы знаем как высочайшего профессионала, щедро одаренного самыми ценными человеческими качествами – добротой и отзывчивостью».

Виктор Николаевич Долгунин,
профессор, Тамбов

«Выражаю искренние соболезнования всему коллективу Ивановского государственного энергетического университета им. В.И. Ленина по поводу кончины замечательного человека, прекрасного, весьма неординарного ученого и педагога, д.т.н., профессора Вадима Евгеньевича Мизонова. На меня самое сильное впечатление произвела его защита докторской диссертации в МИХМе, уже в тот период я видел в нем прекрасного ученого, которого ждет большое будущее. Скорбь от кончины Вадима Евгеньевича глубоко затронула мое сердце, светлая память о нем сохранится у меня до последних дней».

А.С. Тимонин,
профессор, Москва

Вадим Евгеньевич родился 28 декабря 1946 г. в Иванове, в семье вузовских преподавателей, сумевших привить будущему профессору интерес к механике: мама – Анна Ивановна, доцент кафедры механических технологий и волокнистых материалов, и отец – Евгений Дмитриевич, заведующий кафедрой теоретической механики и сопротивления материалов. Оба работали в Ивановском текстильном институте (ИВТИ).

В 1971 г. Вадим Евгеньевич с отличием закончил энергомашиностроительный факультет Московского высшего технического училища им. Н.Э. Баумана (МВТУ), где в 1975 г. защитил кандидатскую диссертацию. В 1985 г. в Московском институте химического машиностроения (МИХМ) состоялась защита его докторской диссертации, результаты которой были непосредственно реализованы на практике в атомной промышленности и химическом производстве.

Начиная с 1974 г. жизнь Вадима Евгеньевича была неразрывно связана с ИГЭУ. Важным событием жизни первых лет его работы в нашем вузе стало зна-

комство Вадима Евгеньевича с заведующим кафедрой тепловых электрических станций (ТЭС) Станиславом Геннадьевичем Ушаковым, позднее перешедшее в плодотворное научное сотрудничество и дружбу. Собранный ими коллектив единомышленников и созданный на его базе НИИ «Технология и техника сыпучих материалов» при ИГЭУ стали «кузницей» научных кадров и исследовательских проектов, которые успешно внедрялись в энергетике и смежных отраслях промышленности. В соавторстве с коллегами Вадимом Евгеньевичем были разработаны новые технологии и аппараты, защищенные более чем 120 авторскими свидетельствами и патентами. К сожалению, преждевременный трагический уход из жизни профессора С.Г. Ушакова прервал это яркое и плодотворное сотрудничество.

В 1989 г. профессор В.Е. Мизонов организовал и возглавил новую кафедру – «Прикладная математика», где и работал до последнего дня. Под его руководством на кафедре создавалась и совершенство-

валась новая уникальная образовательная технология «Синтез знаний».

Вадим Евгеньевич, говоря об успехах и трудностях, связанных с продвижением этого образовательного проекта, для реализации которого, собственно, и создавалась кафедра, отмечал: «Проект “Синтез знаний” безраздельно занимал кафедру прикладной математики с конца 80-х годов прошлого века, предполагал объединенное изучение базового цикла фундаментальных дисциплин инженерного образования: математики, физики, теоретической механики, информатики, которые рассматривались как единая база подготовки инженеров-электромехаников. И удачи на этом пути были. Студенты эффективно вовлекались в учебно-исследовательскую и научно-исследовательскую работу, часто доводя свои разработки до публикаций во “взрослых” научных журналах. На основе этого проекта установились прочные связи с рядом европейских университетов, в которых наши студенты впоследствии проходили аспирантскую подготовку и защиты кандидатских диссертаций, часто продолжая стажировку в этих университетах. Развитию этой уникальной образовательной технологии в значительной степени способствовало то, что Министерство образования было относительно щедро на академические часы, выделяемые на подготовку инженеров. Такая поддержка развязывала руки в свободе маневра при выборе комбинаций модулей из предметов, включенных в синтез. Видимо, ныне экономия учебного времени становится доминантой в подготовке бакалавров: реализовать программу “Синтез знаний” сегодня становится все труднее и труднее. Но кафедра по-прежнему верит в притягательность и эффективность этого проекта и делает все возможное, чтобы не дать ему умереть. Мы очень надеемся, что в вузе найдутся силы, которые не оставят нас в этих желаниях».

Вадим Евгеньевич гордился тем, что в «Синтезе знаний» удалось преодолеть существующее противоречие вузовского образовательного процесса – рассогласованность учебных планов, когда изложение нового материала часто основывалось на еще не изученных темах смежных курсов. При составлении учебных программ была сделана попытка построить курс таким образом, чтобы как можно раньше и быстрее дать студентам базовый арсенал “работа-

ющей” математики, оставив строгость и частности “на потом”.

В.Е. Мизонов успешно сочетал в своей деятельности разработку новых технологий в вузовском образовании с научными исследованиями, связанными с применением цепей Маркова к математическому моделированию, расчетом и оптимизацией процессов в дисперсных средах. Известное высказывание академика Петра Леонидовича Капицы о том, что «наука должна быть веселой, увлекательной и простой и таковыми же должны быть и ученые», в полной мере относится к Вадиму Евгеньевичу. Сущность сложных математических моделей и физических явлений он мог объяснить простым, всем понятным языком и часто повторял, что «ученый, который не может объяснить девятикласснику суть своих научных исследований, очевидно, шарлатан». Выступая на заседаниях диссертационных советов, он часто доходчиво объяснял новизну и значимость работы не только членам совета, но и самому соискателю.

Список опубликованных научных работ В.Е. Мизонова включает 700 наименований: монографий, учебных пособий, статей в журналах и сборниках, патентов. Под его руководством подготовлено 5 докторов и 22 кандидата наук. Значительная часть диссертаций выполнена под совместным руководством с зарубежными профессорами, некоторые из этих работ защищены в университетах Франции и США.

Огромный вклад профессора Мизонова в установление культурного и научного обмена между учеными не только России, но и других стран. Вадим Евгеньевич являлся руководителем ряда международных проектов в сфере научно-технического сотрудничества ИГЭУ с иностранными коллегами из Израиля, Бразилии, США, Польши, Франции, Германии. Он читал лекции в Королевском технологическом институте г. Стокгольма (Швеция, 1991/92 уч. год), в Техническом университете г. Брауншвейг (Германия, 1992 г.), в Технологическом университете г. Компьень (Франция, 2005 г.), в Горном институте г. Сан-Этьен (Франция, 2005 г.), в Горном институте г. Алби (Франция, 2000, 2003, 2005 гг.).

В.Е. Мизонов – член трех диссертационных советов по присуждению докторских степеней. Работал в составе жюри по присуждению ученых степеней и выступал оппонентом в зарубежных вузах (Франции,

Швеции). Являлся членом редколлегии журналов «Вестник ИГЭУ», «Известия высших учебных заведений» (серии «Химия и химическая технология» и «Экономика, финансы и управление производством»), «Современные наукоемкие технологии», «Промышленные процессы и технологии».

Вадим Евгеньевич Мизонов пользовался огромным уважением и любовью у всех, с кем сводила его судьба. В наших сердцах навсегда останется этот умный,

интеллигентный и невероятно интересный человек с потрясающим чувством юмора.

Одним из моральных и нравственных принципов профессора Мизонова, которым он руководствовался в работе и в жизни, было правило – *не поступать с другими так, как не хочешь, чтобы поступали с тобой*. Этот принцип является в некотором роде заповедью для его учеников и коллег, желающих не только сохранить память о нем, но и продолжить реализацию его идей и замыслов.

***Кафедра прикладной математики ИГЭУ,
друзья, коллеги.***

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ В ЖУРНАЛЕ «ВЕСТНИК ИВАНОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА»

В журнал принимаются рукописи в электронном виде. Средний объем статьи – 6 страниц. Статьи сопровождаются двумя рецензиями – кафедральной (с места работы автора с указанием даты обсуждения и номера протокола) и внешней.

Правила оформления статьи.

Обязательно указывается УДК.

Фамилия, имя, отчество авторов полностью, место работы, должность, звание, ученая степень, страна и город, контактная информация (на русском и английском языках) располагаются по ширине страницы.

Название статьи (на русском и английском языках), *авторское резюме* (на русском и английском языках), ключевые слова (на русском и английском языках) располагаются по ширине страницы.

Основной текст располагается **в две колонки**, используется шрифт **Arial**, размер шрифта – **11**.

Графики и рисунки должны быть выполнены на компьютере, желательно в программах векторной графики либо в Word. Надписей на рисунках (кроме основополагающих понятий) быть не должно, они обозначаются цифрами и далее расшифровываются, а все расшифровки выносятся под рисунок, размер шрифта – 10 (шрифт **Arial**). Рисунки, так же, как и графики, должны быть **только черными**, любые другие цвета недопустимы.

Формулы набираются в редакторе формул Math Type (шрифт **Arial**), размер шрифта – **11**, располагаются в тексте в одну колонку.

В конце статьи размещаются пристатейные библиографические списки (на русском языке и References).

Примеры оформления авторского резюме и библиографических списков см. на сайте:

<http://vestnik.ispu.ru/ru/node/14>

Редакционно-издательский отдел оставляет за собой право на редактирование статей.

ВЕСТНИК ИВАНОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Выпуск 2

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-82616 от 18.01.22 г.

Подписано в печать 14.04.2022. Выход в свет 30.04.2022. Формат 60х84 ¹/₈.
Усл. печ. л. 8,37. Уч.-изд. л. 9,21. Тираж 100 экз. Цена свободная. Заказ

Адрес редакции и издательства: Ивановский государственный энергетический университет,
153003, Ивановская область, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.
Типография ООО «ПресСто», 153025, Ивановская обл., г. Иваново, ул. Дзержинского, 39, оф. 307.