

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕДИНЕНИЙ СНГ

ЭНЕРГЕТИКА

Том 65, № 6
2022

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1958 ГОДА

Учредитель

Министерство образования Республики Беларусь

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

22 декабря – День энергетика

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

- Доброго К. В., Козначеев И. А.** Универсальная имитационная модель деградации аккумуляторных батарей с оптимизацией параметров по генетическому алгоритму 481
- Калечиц В. Н.** Особенности моделирования режимов работы линий наружного освещения 499

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

- Янчук В. В., Романюк В. Н.** Повышение эффективности действующих тепловых электрических станций в современных условиях 511
- Седнин В. А., Игнатович Р. С.** Анализ эффективности технологий извлечения диоксида углерода из продуктов сгорания 524
- Кулаков Г. Т., Кулаков А. Т., Воюш Н. В.** Синтез инвариантных систем автоматического регулирования с внутренней моделью 539
- Bashtovoi V. G., Reks A. G., Zahadskaya A. A.** Features of the Behavior of a Plane Axisymmetric Magnetic Fluid Drop in a Nonmagnetic Solvent and a Uniform Magnetic Field
- (Баштовой В. Г., Рекс А. Г., Загадская А. А.** Особенности поведения плоской осесимметричной капли магнитной жидкости в немагнитном растворителе в однородном магнитном поле) 551
- Филимонова А. А., Чичиров А. А., Чичирова Н. Д., Камалиева Р. Ф.** Интеграция высокотемпературного топливного элемента с системой улавливания CO₂ в энергетический цикл тепловой электрической станции 562
- Перечень статей, опубликованных в журнале «Энергетика» в 2022 г.**
- I. Тематический указатель** 572
- II. Именной указатель** 575

Главный редактор Федор Алексеевич Романюк

Редакционная коллегия

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

Ведущий стилистический редактор В. Н. Гурьянчик

**Издание зарегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 28 февраля 2019 г.
Регистрационный номер 1257**

Набор и верстка выполнены в редакции журналов «Энергетика» и «Наука и техника»

Подписано к печати 30.11.2022. Формат бумаги 60×84¹/₈. Бумага мелованная.
Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 12,5. Уч.-изд. л. 8,75. Тираж 100 экз.
Дата выхода в свет . 2022. Заказ .

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

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 02330/74 от 03.03.2014.
220013, г. Минск, пр. Независимости, 65

© Белорусский национальный технический университет, 2022

PROCEEDINGS OF THE CIS
HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS
AND POWER ENGINEERING ASSOCIATIONS

ENERGETIKA

V. 65, No 6
2022

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL
PUBLISHED FROM JANUARY, 1958

Founder

Ministry of Education of the Republic of Belarus

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

22nd December – Day of Power Engineer

CONTENTS

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

Dobrego K. V., Koznacheev I. A. Universal Simulation Model of Battery Degradation with Optimization of Parameters by Genetic Algorithm	481
Kalechyts V. N. Features of Modeling the Operating Modes of Outdoor Lighting Lines	499

HEAT POWER ENGINEERING

Yanchuk V. V., Romaniuk V. N. Operating Thermal Power Plants Efficiency Improvement under Current Conditions	511
Sednin V. A., Ignatovich R. S. Analysis of the Efficiency of Technologies for Extraction Carbon Dioxide from Combustion Products	524
Kulakov G. T., Kulakov A. T., Voyush N. V. Synthesis of an Invariant Automatic Control Systems with an Internal Model	539
Bashtovoi V. G., Reks A. G., Zahadskaya A. A. Features of the Behavior of a Plane Axisymmetric Magnetic Fluid Drop in a Nonmagnetic Solvent and a Uniform Magnetic Field	551
Filimonova A. A., Chichirov A. A., Chichirova N. D., Kamaliev R. F. Integrating a High Temperature Fuel Cell with CO ₂ Capture System into Thermal Power Plant Energy Cycle	562

List of Papers Published in “Energetika” Journal, 2022

I. Thematic index	572
II. Name index	575

Editor-in-Chief Fiodar A. Romaniuk

Editorial Board

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

Leading Style Editor V. N. Guryanchyk

**Publication is registered in the Ministry of Information of the Republic of Belarus in 2019, February, 28th
Reg. No 1257**

Typesetting and makeup are made in editorial office
of Journals “Energetika” and “Science and Technique”

Passed for printing 30.11.2022. Dimension of paper 60×84¹/₈. Coated paper.
Digital printing. Type face Times. Conventional printed sheet 12,5.
An edition of 100 copies. Date of publishing 2022. Order list .

ADDRESS

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

Printed in BNTU. License LP No 02330/74 from 03.03.2014.
220013, Minsk, 65, Nezavisimosty Ave.

© Belarusian National Technical University, 2022

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-481-498>

УДК 621.355.004.94

Универсальная имитационная модель деградации аккумуляторных батарей с оптимизацией параметров по генетическому алгоритму

К. В. Доброго¹⁾, И. А. Козначев²⁾

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

²⁾Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси
(Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. Моделирование аккумуляторных батарей необходимо для управления режимом их работы и диагностики состояния. Важное значение имеет моделирование жизненного цикла – деградации базовых параметров в течение длительного срока эксплуатации. Это обусловлено тем, что стоимость буферизации электроэнергии аккумуляторными батареями связана с их ресурсом циклирования, который можно увеличить, оптимизировав режим работы накопителя в энергетической системе. Для существующих моделей деградации аккумуляторов характерны специфичность, ограниченность работы по стандартизированным циклам зарядки-разрядки, математическая громоздкость. В статье предложен универсальный подход, лишенный вышеуказанных недостатков. Используется концепция непрерывного износа батареи в течение срока эксплуатации. Представлена простая эмпирическая модель, не рассматривающая детально характеристики состояния аккумуляторных батарей на протяжении отдельного цикла зарядки-разрядки, не включающая вольтаические перемены. Модель рассматривает интенсивность текущего износа аккумуляторной батареи как функцию состояния заряда батареи, температуры, силы тока внешней цепи и тока саморазряда, полного заряда, протекшего через батарею с начала ее эксплуатации. При этом величина износа (деградации) определяется интегралом функции интенсивности текущего износа по времени эксплуатации батареи. Для оптимизации параметров модели используется метод случайного поиска в сочетании с генетическим алгоритмом отбора. Построена соответствующая модель деградации параметров для свинцово-кислотной аккумуляторной батареи Delta GEL-12-55, где использованы данные о деградации емкости, приведенные в техническом описании от производителя. Показаны работоспособность алгоритма оптимизации параметров и адекватность полученной модели. Разработанная модель может использоваться для технико-экономических расчетов систем генератор – накопитель – потребитель, гибридных систем накопления электроэнергии, компактного представления больших объемов экспериментальных данных о деградации конкретных аккумуляторов.

Ключевые слова: электрохимический аккумулятор, деградация аккумуляторных батарей, жизненный цикл аккумуляторов, ресурс аккумулятора, моделирование аккумуляторных батарей, генетический алгоритм, непрерывный износ аккумулятора

Для цитирования: Доброго, К. В. Универсальная имитационная модель деградации аккумуляторных батарей с оптимизацией параметров по генетическому алгоритму / К. В. Доброго, И. А. Козначев // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 6. С. 481–498. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-481-498>

Адрес для переписки

Доброго Кирилл Викторович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/13,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-92-16
dobrego@bntu.by

Address for correspondence

Dobrego Kirill V.
Belarusian National Technical University
65/13, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-92-16
dobrego@bntu.by

Universal Simulation Model of Battery Degradation with Optimization of Parameters by Genetic Algorithm

К. В. Добрего¹⁾, И. А. Козначеев²⁾

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

²⁾A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Modeling of batteries is necessary to control their operating mode and diagnose their condition. It is important to model the life cycle, i. e. degradation of basic parameters over a long service life. This is due to the fact that the cost of buffering electricity by batteries is associated with their cycling resource, which can be increased by optimizing the mode of operation of the drive in the energy system. The existing models of battery degradation are characterized by specificity, limited work on standardized charge-discharge cycles, and mathematical cumbersomeness. The article proposes a universal approach devoid of the above disadvantages. The concept of continuous battery wear during the service life is used. A simple empirical model is presented that does not consider in detail the characteristics of the state of batteries during a separate charge-discharge cycle, and does not include voltaic variables. The model considers the intensity of the current wear of the battery as a function of the state of its charge, temperature, the current of the external circuit and the current of self-discharge, the full charge that has flowed through the battery since the beginning of its operation. In this case, the amount of wear (degradation) is determined by the integral of the function of the intensity of current wear over the battery life. To optimize the parameters of the model, a random search method is used in combination with a genetic selection algorithm. The corresponding model of degradation of parameters for the Delta GEL-12-55 lead-acid battery has been constructed, in which the data on degradation of capacity given in the technical description from the manufacturer are used. The efficiency of the parameter optimization algorithm and the adequacy of the resulting model are shown. The model developed by the authors can be used for technical and economic calculations of generator – storage – consumer systems, hybrid power storage systems, and compact representation of large volumes of experimental data on the degradation of specific batteries.

Keywords: electrochemical battery, degradation of batteries, battery life cycle, battery service life, battery simulation, genetic algorithm, continuous battery wear

For citation: Dobrego K. V., Koznacheev I. A. (2022) Universal Simulation Model of Battery Degradation with Optimization of Parameters by Genetic Algorithm. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 65 (6), 481–498. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-481-498> (in Russian)

Введение

Создание систем накопления электроэнергии, прежде всего электрохимических аккумуляторных батарей (АКБ), и совершенствование их технико-экономических показателей – актуальная техническая задача, о чем свидетельствуют большое количество публикаций по этому вопросу и быстрый рост рынка АКБ (20–30 % в год) [1]. Основными факторами, определяющими востребованность соответствующих разработок в последние десятилетия, являются развитие электрического транспорта и повышение доли зеленой энергетики, требующей буферизации электроэнергии.

С расширением применения АКБ возникает необходимость моделирования их работы. Это направление развивается достаточно давно [2, 3],

причем характер моделей меняется в соответствии с особенностями решаемых технических задач. В 2000-е гг. активно изучались и моделировались литий-ионные АКБ в совокупности с оптимизацией их работы, контролем состояния, построением сложных накопительных систем. Вопросы моделирования состояния батарей, в частности связи состояния заряда (*SOC*) с напряжением, током, напряжением холостого хода, посвящено большинство статей по литий-ионным [3–5], свинцово-кислотным [6–8] и другим АКБ. Используется как прямое физико-математическое моделирование, так и моделирование при помощи электрических схем замещения [9, 10]. Проводится также физико-химическое моделирование электрохимических ячеек [11]. Поскольку технико-экономические показатели энергетических систем, использующих АКБ, непосредственно связаны с их эксплуатационным ресурсом (ресурсом циклирования), важнейшее значение приобретает моделирование деградации параметров АКБ в течение длительного срока эксплуатации [6, 7, 12].

В работе датских исследователей [7] подробно обсуждается моделирование жизненного цикла свинцовых АКБ. Авторы указывают на два основных вида долгосрочного моделирования: *post-processing models* (не рассматривает характеристики текущей работы АКБ) и *performance degradation models* (одновременно моделирует текущую работу и деградацию рабочих параметров батареи). Первый вид моделей использует в качестве независимой переменной пропущенный заряд (*ah-throughput counting*) либо количество циклов зарядки-разрядки (*cycle counting*). Модель деградации в [7] строится с учетом факторов коррозии положительного электрода, сульфатации, осыпания электродов, потери воды, деградации активной массы электродов, стратификации электролита. Такое рассмотрение существенно усложняет модель и вряд ли может считаться обоснованным, учитывая статистический характер факторов деградации и процесса в целом.

Большинство моделей деградации АКБ в качестве независимой переменной используют количество циклов зарядки-разрядки [13–15], что обусловлено проведением экспериментальных исследований в рамках стандартизированных циклов зарядки-разрядки.

Значительное число публикаций посвящено решению задачи оценивания состояния работоспособности (*SOH*), окончания разряда (*EoD*), других характеристик АКБ на основе измерений их параметров. С этой целью разрабатываются алгоритмы, использующие фильтрацию Калмана, многочастичные фильтры, нейронные сети и т. п. [16, 17]. Такие модели направлены на решение технических задач управления работой сборок АКБ, прогнозирования выхода из строя ячеек. Их следует отличать от прямого моделирования жизненного цикла, определяющего среднестатистические параметры АКБ без использования данных промежуточных измерений параметров.

В программной среде графического имитационного моделирования MATLAB-Simulink [18], позволяющей при помощи блок-диаграмм строить динамические модели сложных систем, имеется модуль, в который включены

блоки моделирования деградации параметров АКБ при циклировании. В качестве примера приведены разрядные характеристики литий-ионной батареи новой и после 2000 циклов зарядки-разрядки.

В штатном примере MATLAB-Simulink [13] представлена модель деградации параметров литий-ионной АКБ, отличительная особенность которой заключается в более точном определении значения *SOC*, учитывающего уменьшение емкости батареи от цикла к циклу. Данный параметр находят исходя из известных токов, напряжения и температуры АКБ с использованием ансамблевого фильтра Калмана [19]. Физическое обоснование модели содержится в [14], она достаточно сложна и применяется в стандартизированных циклах зарядки-разрядки. Имеются и другие примеры моделирования старения АКБ [20].

Исследователями из Университета Огайо [15] разработана полуэмпирическая модель жизненного цикла специфической литий-ионной АКБ (на основе смешанной шпинели с многослойным оксидным положительным электродом), базирующаяся на экспериментальных данных по деградации батареи. Изучено влияние таких факторов, как дозарядка АКБ, ее истощение, минимальное значение *SOC*, величина токов заряда, температура. Модель выражает уменьшение емкости и повышение внутреннего сопротивления батареи как функцию вышеуказанных факторов и пропущенного через нее полного заряда, позиционируется как основа для разработки алгоритмов мониторинга состояния АКБ, оптимального управления электро-мобилем для увеличения срока службы батареи.

В [21] предложена полуэмпирическая модель деградации литий-ионной АКБ при заданном профиле нагрузки, сформулированная на основе фундаментальных принципов работы и износа батареи, а также экспериментов по деградации параметров. Авторы утверждают, что модель может быть адаптирована под различные типы литий-ионных АКБ, и предлагают методы настройки. Обоснован метод подсчета эквивалентных циклов, соответствующих нерегулярным нагрузочным циклам, что расширяет применимость модели. В факторы старения включены не только внешние показатели (ток, температура), но и состояние износа АКБ, разделяются понятия календарного старения и старения из-за циклирования. С точки зрения физики такое разграничение не вполне обосновано, поскольку календарное старение может трактоваться как износ при токах утечки, вместе с тем влияние состояния АКБ на темп ее деградации очевидно.

В [22] для литий-никель-марганец-кобальт-оксидного аккумулятора устанавливается связь между деградацией параметров и техническими особенностями определения *SOC* системой управления батареей, фиксирующей ток, напряжение и температуру ячеек. Эксперименты проводились на восьми элементах, половина из которых были новыми, а другая половина – бывшими в употреблении с *SOH* = 0,9. Найдено, что время установления стабильного напряжения, необходимого для корректного определения соотношения между напряжением и *SOC*, в худшем случае составило 20 мин как для новых, так и для изношенных АКБ. По данным [22], функция зависимости *SOC* от U_{pd} существенно не меняется при изменении

температуры от 23 до 45 °С для всех исследованных батарей. Полученные экспериментальные данные могут быть использованы для тестирования и настройки моделей и систем управления АКБ, однако не дают значимого результата по определению состояния износа *SOH*.

Основательный обзор механизмов и особенностей деградации литий-ионных АКБ, используемых в электромобилях, представлен в [23]. Приведено большое количество ссылок на исследования по старению АКБ, описаны литий-ионные батареи различных химических схем. Рассмотрены особенности износа АКБ в трех режимах работы в электромобилях (заряд, простой и нагрузка), охарактеризовано влияние различных условий. Отдельно обсуждаются механизмы деградации катода, анода и электролита. Проведен систематический анализ механизма старения АКБ при эксплуатации в электромобилях, позволяющий сформулировать рекомендации по продлению срока их службы.

Таким образом, описанные в литературе модели деградации специфичны для заданного типа АКБ, строятся для predetermined режимов циклирования, где износ параметризуется номером цикла, и имеют достаточно громоздкие формулировки. Их трудно использовать для технико-экономических расчетов по применению тех или иных батарей в различных энергетических системах. Поэтому построение универсальных моделей износа АКБ, работающих при произвольных графиках нагрузки, представляется актуальной задачей.

В данной статье предложен подход к моделированию долгосрочной деградации рабочих параметров АКБ, использующий концепцию непрерывного износа. Универсальность модели заключается в ее применимости к произвольным (нерегулярным) режимам работы и различным типам батарей. При этом модель абстрагируется от информации о текущих зарядно-разрядных характеристиках, пренебрегает зависимостью эффективной емкости АКБ от силы тока, принимает другие упрощения, которые, однако, не влияют на адекватность результатов моделирования долгосрочной работы. В качестве текущей переменной в модели выступает физическое время работы АКБ. Дискретизация по времени при расчете может быть порядка одной минуты, что, по сути, соответствует учету текущей, непрерывной во времени деградации. Моделируется деградация основного параметра – емкости АКБ. Предполагается, что все прочие параметры могут быть вычислены независимым методом с использованием величины деградации емкости.

Для настройки модели требуется массив экспериментальных данных по износу заданного типа АКБ. Принципиальной задачей при этом является выбор параметров, наилучшим образом аппроксимирующих экспериментальные данные, т. е. оптимизация. При значительном количестве варьируемых параметров (десять и более) задача практически не решается классическими методами. Тогда в некоторых случаях устанавливаются функциональные связи между параметрами, используется оптимизация по независимым группам параметров, другие приемы. В данной работе для

оптимизации применяется метод случайного поиска в сочетании с генетическим алгоритмом.

Построение модели продемонстрировано на примере батареи Delta GEL-12-55 при минимальном объеме данных по деградации, взятых из технического описания производителя [24]. Показана работоспособность модели и алгоритма оптимизации параметров.

Модель непрерывного износа АКБ

Рассматривая процесс старения АКБ с общих позиций, предполагаем непрерывность процесса износа, темп которого в каждый момент времени определяется функцией износа φ , зависящей от текущего состояния заряда АКБ, величины протекающего тока, температуры и иных параметров: $\varphi = \varphi(SOC(t), I(t), T(t), \dots)$. При таком подходе величина износа (деградации) R_{deg} является безразмерной функцией времени эксплуатации АКБ и зависит от всей истории ее работы

$$R_{deg}(\tau) = \frac{1}{\tau_0} \int_{t=0}^{\tau} \varphi(t) dt, \quad (1)$$

где τ_0 – характерное время деградации АКБ.

Величина деградации однозначно связывается с номинальной (C_N) и действительной емкостью АКБ: $C(\tau) = C_N(1 - R_{deg}(\tau))$.

Расчеты деградации АКБ в рамках такой модели могут быть относительно трудоемкими ввиду малого шага интегрирования, однако при этом достигаются ее универсальность и логическая строгость. Общая форма функции износа может быть предложена исходя из известных качественных закономерностей деградации АКБ, а значения параметров должны быть получены решением соответствующей задачи оптимизации.

При конструировании функции износа предполагаем, что основным фактором деградации является протекание тока (в том числе тока утечки), при этом текущее состояние АКБ (SOC , температура) влияет на силу действия этого основного фактора. Экспериментальные данные свидетельствуют о наличии фазы тренировки в начале жизненного цикла АКБ, когда ее параметры несколько улучшаются. Характерным является также ускорение деградации после стадии тренировки при неизменных условиях эксплуатации (рис. 1). Для отражения указанных закономерностей функция износа должна содержать слагаемое, непосредственно связанное с величиной протекающего тока, обеспечивающее линейный износ, и слагаемое, обуславливающее нелинейный тренд тренировки – ускоряющийся износ. Функция износа может иметь достаточно общий вид и включать любое количество параметров, например:

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= f_1(t)f_2(t)f_3(t) - f_4(t); \\ f_1(t) &= \left(\tilde{i}_0 + |\tilde{I}(t)| \right)^\alpha; \end{aligned} \quad (2)$$

$$f_2(t) = 1 + b_1 |SOC(t) - SOC_{opt}| + b_2 |SOC(t) - SOC_{opt}|^2 + \dots;$$

$$f_3(t) = 1 + c_1 |T(t) - T_{opt}| + c_2 |T(t) - T_{opt}|^2 + \dots;$$

$$f_4(t) = \varphi_0 |\tilde{I}(t)|^\beta - d_1 \tilde{Q}(t) |SOC(t) - SOC_{opt}|^\gamma,$$

где $\tilde{I}(t)$, \tilde{i}_0 – безразмерный ток заряда-разряда и модельный ток саморазря-

да (обезразмеривание по масштабу $I_0 = C_N / 1$ ч); $\tilde{Q}(t) = \frac{1}{C_N} \int_0^t |I(\tau) + i_0| d\tau$ –

общий заряд, прошедший через АКБ за все время службы, обезразмеренный по масштабу C_N ; $T(t)$ – температура АКБ; $SOC(t)$ – текущее значение состояния зарядки.

Влияние протекающего тока в (2) корректируется отклонением от оптимальных (наиболее благоприятных) значений SOC_{opt} (функция $f_2(SOC(t))$) и рабочей температуры T_{opt} (функция $f_3(T(t))$).

Для моделирования стадии тренировки АКБ и тренда ускорения деградации в функцию износа введено слагаемое $f_4(t)$, которое имеет отрицательное значение в момент начала эксплуатации батареи и растет со временем. Выбор $f_1(t)$, $f_4(t)$ в виде показательных функций в (2) обусловлен тем, что короткий степенной ряд не может качественно аппроксимировать нелинейную монотонно растущую функцию. Кроме того, коэффициенты ряда могут быть знакопеременными, что не всегда удобно при оптимизации. Поскольку в процессе эксплуатации АКБ реализуются всевозможные токовые режимы, определим $SOC(t)$ на основе номинальной C_N , а не действительной емкости, варьирующейся в зависимости от силы тока разряда.

$$SOC(t) = \frac{\int_0^t I(\tau) d\tau - i_0 t}{C_N (1 - R_{deg})}. \quad (3)$$

Таким образом, функция моментального износа может иметь вид

$$\begin{aligned} \varphi(t) = & \left(|\tilde{I}| + \tilde{i}_0 \right)^\alpha \left(1 + b_1 |SOC - SOC_{opt}| + b_2 |SOC - SOC_{opt}|^2 \right) \times \\ & \times \left(1 + c_1 |T - T_{opt}| \right) - \varphi_0 |\tilde{I}|^\beta + d_1 \tilde{Q} |SOC - SOC_{opt}|^\gamma \left(1 + c_1 |T - T_{opt}| \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Для краткости функции $\tilde{I}(t)$, $SOC(t)$, $T(t)$, $\tilde{Q}(t)$ в (4) записаны без аргументов. Интенсивность тренировки АКБ в модели связана с силой тока заряда-разряда, поскольку в отсутствие тока тренировка не осуществляется, этим предотвращается нефизичная тренировка АКБ при простое. Зависимость износа от состояния SOC для линейной и нелинейной частей определена различными функциями с целью увеличения гибкости моде-

ли. Таким образом, модель (4) характеризуется набором параметров $\{\tilde{i}_0, SOC_{opt}, b_1, b_2, T_{opt}, c_1, \tau_0, \varphi_0, d, \alpha, \beta, \gamma\}$, которые следует определить исходя из экспериментальных или иных достоверных данных. Параметры $\alpha, \beta, \gamma, SOC_{opt}, b_1, b_2, d, \tilde{i}_0, \varphi_0$ безразмерные; T_{opt} имеет размерность температуры; разность $T - T_{opt}$ определяется в градусах; параметр c_1 имеет размерность, обратную температуре $1/^\circ\text{C}$; τ_0 – размерность времени, определяется в часах.

Предполагается, что износ АКБ не зависит от направления тока, влияние факторов температуры и SOC мультипликативно, не учитывается зависимость действительной емкости от силы тока разряда, упрощенно учитывается гальванический КПД аккумулятора, зависимости представлены в форме простейших функций. Однако если учитывать цели моделирования и характер исходных данных, сделанные допущения представляются оправданными и, как будет показано ниже, позволяют адекватно воспроизводить характер старения АКБ.

Генетический алгоритм оптимизации модели текущего износа АКБ

Методология генетического алгоритма оптимизации широко представлена в литературе [25]. Генетический алгоритм успешно использовался для восстановления параметров кинетики термического разложения твердых топлив органического происхождения при интерпретации дериватографических данных [26], поиска параметров адаптивной системы управления роботехнических систем, решения экономических и других задач. Специфика его применения определяется конкретной задачей.

Несмотря на простую структуру модели текущего износа, большое количество определяющих ее параметров делает невозможным прямое применение классических методов оптимизации. Воспользуемся методом случайного поиска в сочетании с генетическим алгоритмом. Его реализация в рассматриваемой задаче сводится к следующему: строится вычислительная процедура для расчета износа АКБ при заданных значениях параметров модели (1)–(4). При этом зависимость силы тока от времени $I(t)$ является заданной и соответствует некоторому режиму работы АКБ. В результате вычислительной процедуры получается зависимость $C(t)$, которая сравнивается с соответствующими экспериментальными данными $C_{exp}(t_i)$ в некоторые моменты времени t_i . По результатам сравнения вычисляется среднеквадратичное отклонение

$$\sigma = \frac{1}{C_N} \sqrt{\frac{\sum_j \sum_i (C_j(t_{i,j}) - C_{exp,j}(t_{i,j}))^2}{\sum_j n_j}},$$

где n_j – число экспериментальных (реперных) точек для j -го режима циклирования.

Для того чтобы при расчете избежать отрицательного $C(t)$, используются начальные значения параметров, заведомо занижающие скорость износа. После выбора параметров, обеспечивающих расчет всех необходимых режимов износа, запускается оптимизационный алгоритм, который формирует коллекцию наборов параметров, дающих наименьшее значение среднеквадратичного отклонения. Работа оптимизационного алгоритма состоит в последовательном запуске процедуры случайного поиска, генетического алгоритма и сортировки коллекции.

Случайный поиск заключается в модификации одного из лучших имеющихся наборов случайными приращениями, последующем расчете среднеквадратичного отклонения для него и размещении нового варианта в коллекции, если полученное для него значение среднеквадратичного отклонения меньше, чем для худшего набора из коллекции.

В ходе генетического алгоритма из коллекции случайным образом выбираются два набора параметров и вычисляется величина

$$P = \frac{(\sigma_1 - \sigma_{best})(\sigma_2 - \sigma_{best})}{(\sigma_{worse} - \sigma_{best})^2},$$

где σ_1, σ_2 – среднеквадратичные отклонения для выбранных случайным образом наборов параметров; $\sigma_{best}, \sigma_{worse}$ – то же для наилучшего и наихудшего наборов коллекции.

После этого генерируется случайное число от 0 до 1, и если оно оказывается больше P , то из двух выбранных наборов параметров формируется новый скрещенный. При такой процедуре преимущество в скрещивании получают наборы с более низким значением σ . Скрещенный набор параметров может быть средним арифметическим выбранных наборов либо их линейной комбинацией со случайным весом каждого из наборов. Далее для скрещенного набора производится расчет среднеквадратичного отклонения, и если оно меньше, чем для худшего набора коллекции, скрещенный набор добавляется в коллекцию.

При сортировке из коллекции удаляются худшие результаты. Предельный нижний размер коллекции не играет существенной роли в большинстве задач, но тем не менее он не должен быть слишком малым. Для данной задачи использовалась коллекция порядка 1000 наборов параметров.

Важный момент реализации общей процедуры оптимизации – определение возможного диапазона значений параметров при случайном поиске. Такой диапазон достаточно легко устанавливается, если параметры модели имеют определенный физический смысл. Величина случайной флуктуации параметров максимальна в начале процедуры оптимизации и затем уменьшается, когда случайный поиск перестает приводить к улучшению коллекции. Верхнее ограничение случайной флуктуации обусловлено риском физически неадекватных вариантов решения. Расчет проводится до тех пор, пока среднеквадратичное отклонение для лучших наборов в коллекции не стабилизируется.

Экспериментальные данные для оптимизации параметров

Известную трудность при построении модели может представлять получение систематических экспериментальных данных по деградации определенного типа АКБ. Такие исследования являются дорогостоящими, данные компаний-производителей составляют коммерческую тайну, а сведения, приводимые в технических паспортах изделий, схематичны и неполны. В открытом доступе имеется ряд исследовательских баз данных о деградации АКБ, в частности Oxford Battery Degradation Dataset [27], CALCE [28, 29], NASA Prognostics Data Repository [30, 31]. Имеются базы в Sandia National Lab и других центрах [32]. База данных [27] содержит сведения о напряжении, токе и температуре для ряда литий-ионных АКБ с первого цикла зарядки-разрядки через каждые 100 стандартизированных циклов. Методика измерений и информация о базовых моделях представлены в [33].

Для данной статьи используем сведения о деградации емкости из технического описания свинцово-кислотной батареи Delta GEL-12-55 [24] при нормальной температуре (рис. 1, 2).

Несмотря на существенную разницу в количестве рабочих циклов при различной глубине разрядки, интерпретация данных (рис. 1) показывает, что общее количество пропущенного через АКБ заряда (суммарно зарядного и разрядного тока) изменяется не столь значительно (рис. 3).

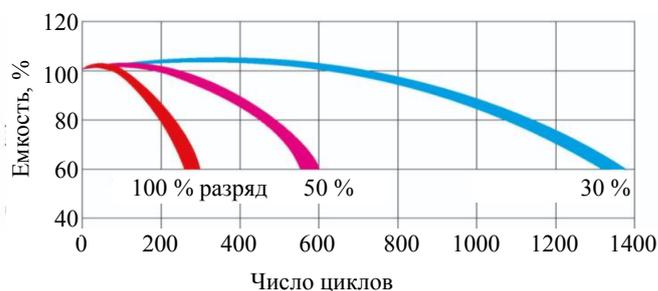


Рис. 1. Деградация емкости батареи Delta GEL-12-55 при циклировании в токовом режиме 0,1C [24]

Fig. 1. Delta GEL-12-55 battery capacity degradation while cycling at 0.1C current regime [24]

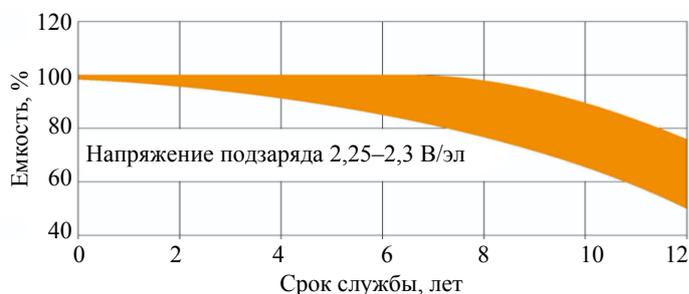


Рис. 2. Деградация емкости батареи Delta GEL-12-55 в буферном режиме работы [24]

Fig. 2. Delta GEL-12-55 battery capacity degradation under a standby mode of operation [24]

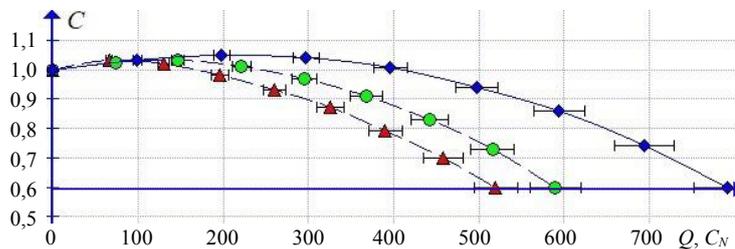


Рис. 3. Зависимость емкости от величины общего пропущенного заряда в единицах номинальной емкости C_N при различной глубине разрядки: 1 – $DOD = 30\%$; 2 – 50; 3 – 100%; погрешность по оси абсцисс 5%

Fig. 3. Actual capacity of a battery as a function of total current throughput expressed in nominal capacity units C_N : 1 – $DOD = 30\%$; 2 – 50; 3 – 100%; error by abscissa axis is 5%

Найдем достаточное количество реперных точек, приближение к которым является целью оптимизации (оно должно существенно превышать число определяемых параметров), и представим их в виде табл. 1–3. Реперные точки могут быть сгущены на участках, требующих лучшей аппроксимации. Количество и точность экспериментальных данных определяют надежность полученной на их основе модели. Очевидно, что при отсутствии экспериментальных данных по температурной зависимости деградации параметров АКБ или зависимости от силы тока отсутствует возможность определения параметров, входящих в соответствующий множитель в модели деградации, количество искомых параметров при этом уменьшается.

Таблица 1

Реперные точки для оптимизации модели деградации батареи Delta GEL-12-55 (рис. 1): $I = 0,1C$; $SOC_{fin} = 0$ [24]

Reference points for optimizing the degradation model of the Delta GEL-12-55 battery (Fig. 1): $I = 0.1C$; $SOC_{fin} = 0$ [24]

Номер цикла N	0	33	65	98	130	163	195	229	260
Пропущенный заряд Q, C_N	0	66	130	196	260	326	390	458	520
Фактическая емкость C/C_0	1	1,025	1,02	0,98	0,93	0,87	0,79	0,70	0,60

Таблица 2

Реперные точки для оптимизации модели деградации батареи: $I = 0,1C$; $SOC_{fin} = 0,5$

Reference points for optimizing the battery degradation model: $I = 0.1C$; $SOC_{fin} = 0.5$

Номер цикла N	0	73	147	221	295	368	442	516	590
Пропущенный заряд Q, C_N	0	73	147	221	295	368	442	516	590
Фактическая емкость C/C_0	1	1,025	1,03	1,01	0,97	0,91	0,83	0,73	0,6

Таблица 3

Реперные точки для оптимизации модели деградации батареи: $I = 0,1C$; $SOC_{fin} = 0,7$

Reference points for optimizing the battery degradation model: $I = 0.1C$; $SOC_{fin} = 0.7$

Номер цикла N	0	165	330	495	660	830	990	1156	1320
Пропущенный заряд Q, C_N	0	99	198	297	396	498	594	694	792
Фактическая емкость C/C_0	1	1,03	1,05	1,04	1,00	0,94	0,86	0,74	0,60

Функция токовой нагрузки АКБ, соответствующая данным циклирования (рис. 2), определяется следующим образом: разряд током $0,1C$ от состояния $SOC = 1,0$ до $SOC_{fin} = 0,7$, $SOC_{fin} = 0,5$ или $SOC_{fin} = 0$; последующий заряд током $0,1C$ до $SOC = 1,0$. Температура окружающей среды $T_a = 20^\circ C$, температура АКБ соответствует T_a . Функция токовой нагрузки (начальное состояние $SOC = 1,0$)

$$I(t) = \begin{cases} -0,1C, & N\tau_1 < t < N\tau_1 + \tau_D; \\ 0,1C, & N\tau_1 + \tau_D < t < (N+1)\tau_1, \end{cases} \quad (5)$$

где $N = \text{Int}(t/\tau_1)$ – текущий номер цикла; τ_1 , τ_C , τ_D – период цикла разрядки-зарядки, время заряда и разряда соответственно, определяемые токовым режимом и гальванической эффективностью цикла зарядки-разрядки η , ч:

$$\tau_D = \frac{(1 - SOC_{fin})C}{0,1C}; \quad (6)$$

$$\tau_C = \frac{(1 - SOC_{fin})C}{0,1C\eta}; \quad (7)$$

$$\tau_1 = \tau_D + \tau_C.$$

В расчетах стандартного циклирования с заданным SOC_{fin} принято $\eta = 1$.

Реперные точки деградации АКБ в буферном режиме в соответствии с рис. 3 представлены в табл. 4.

Таблица 4

Реперные точки по деградации батарей в буферном режиме работы
Reference points for battery degradation under a standby mode of operation

Время работы t , ч	0	25000	50000	75000	100000
Фактическая емкость C/C_0	1,00	1,05	0,96	0,84	0,68

Нагрузка АКБ в буферном режиме определялась следующей моделью: разряд: $0C$ (учитывается только сила тока саморазряда i_0) в течение 500 ч, далее $0,1C$ (работа) в течение 3 ч, затем заряд с силой тока $0,05C$ в течение 7 ч. Взятое с запасом время заряда позволяет избежать постепенного разряда АКБ за счет тока саморазряда.

Во всех режимах при достижении полного разряда или заряда АКБ до окончания соответствующего цикла зарядки-разрядки прекращается, сила тока принимается равной нулю. При этом продолжительность периода не меняется.

Алгоритм оптимизации, описанный выше, реализован в Wolfram Mathematica и включал в себя вычислительную процедуру для расчета износа АКБ при заданных параметрах модели деградации, а также реализацию оптимизационного алгоритма для подбора наиболее благоприятных параметров модели. Шаг по времени для интегрирования системы обыкновенных дифференциальных уравнений составлял порядка 1 ч. Расчет проводился с уменьшением диапазона случайного разброса параметров от 15 до 0,1 % величины соответствующего параметра, при этом стандартное отклонение, достигнутое в конце расчета, около 2 %. Время оптимизации 10–20 мин на компьютере с процессором Intel i5. Очевидно, время расчета будет расти обратно пропорционально выбранному кванту времени для интегрирования и увеличиваться при возрастании количества искомым параметров.

На рис. 4 представлены кривые деградации АКБ, соответствующие полученным в результате оптимизации значениям параметров модели, совмещенные с кривыми рис. 2, 3 (значками обозначены реперные точки для оптимизации параметров модели; заштрихованные области соответствуют данным о деградации емкости от производителя).

Анализ результатов показывает, что представленная модель деградации емкости АКБ адекватно воспроизводит экспериментальные данные и основные качественные и количественные тренды. Среднеквадратичное отклонение модельной кривой от равномерно распределенных реперных точек около 2 %, что существенно меньше характерной дисперсии соответствующих экспериментальных данных. Несмотря на то что качество представляемой в кратком техническом описании производителя информации [24] может быть поставлено под сомнение, сама модель и общий метод оптимизации параметров на данном примере продемонстрировали работоспособность. Предложенный метод оптимизации позволяет в течение разумного времени расчета (в нашем случае несколько десятков минут) оптимизировать десять параметров имитационной модели, при этом их количество может быть увеличено.

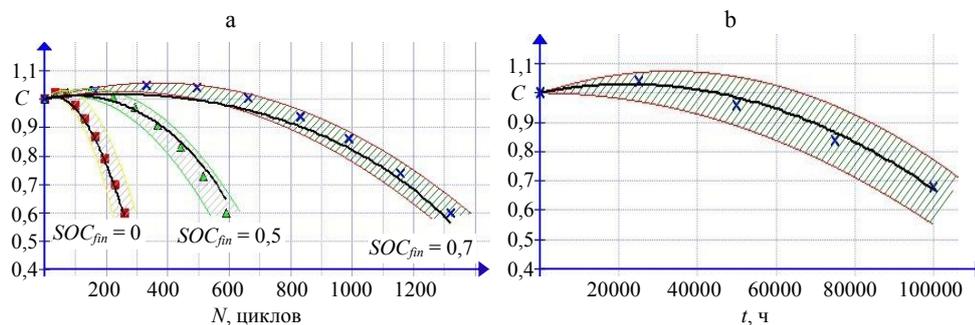


Рис. 4. Расчетные кривые деградации емкости батареи: а – режимы с постоянным SOC_{fm} : 1 – $SOC_{fm} = 0$; 2 – 0,5; 3 – 0,7; б – буферный режим

Fig. 4. Computed battery capacity degradation curves: а – regimes with fixed final SOC_{fm} : 1 – $SOC_{fm} = 0$; 2 – 0.5; 3 – 0.7; б – standby operation mode

Поскольку ряду параметров модели может быть приписан физический смысл, их анализ позволяет делать физически значимые выводы. Время жизни АКБ, соответствующее линейной деградации ($\tau_0 = 1,5 \cdot 10^6$ ч), оказывается значительно выше действительного срока службы АКБ, следовательно, именно нелинейное самоускорение деградации ограничивает его ресурс. Значение оптимального состояния заряженности свинцового АКБ в модели $SOC_{opt} = 0,95$, что хорошо согласуется с опытными данными. Малое значение модельного тока утечки $i_0 = 6 \cdot 10^{-5} C$ говорит о том, что данный параметр практически не влияет на износ в случае интенсивной работы АКБ и начинает проявляться только при крайне малоинтенсивной работе АКБ в буферном или дежурном режиме. При этом его наличие делает модель физически более адекватной.

ВЫВОДЫ

1. Предложен универсальный подход к прямому моделированию деградации емкости аккумуляторной батареи, основанный на концепции ее непрерывного износа в течение срока эксплуатации. Сформулирована эмпирическая модель, не рассматривающая детально характеристики состояния аккумуляторной батареи на протяжении отдельного цикла зарядки-разрядки. Износ батареи при отсутствии внешней нагрузки интерпретируется как деградация за счет тока внутренней утечки. Для оптимизации параметров модели применяется метод случайного поиска в сочетании с генетическим алгоритмом отбора.

2. Построена модель деградации емкости свинцово-кислотной батареи Delta GEL-12-55 на основе предложенного подхода с использованием данных о ее износе в стандартных циклах зарядки-разрядки и при буферном режиме работы, приведенных в техническом описании от производителя. Показаны работоспособность алгоритма оптимизации параметров и адекватность полученной модели. Несмотря на ее эмпирический характер, применяемые функциональные зависимости основаны на физических закономерностях работы и износа АКБ. Ввиду данного обстоятельства найденные параметры модели приобретают физический смысл и могут использоваться как характеристики конкретного типа АКБ. Так, оптимальное состояние заряженности для моделируемого типа АКБ $SOC_{opt} = 0,95$, характерное время линейного износа $\tau_0 = 1,5 \cdot 10^6$ ч.

3. Разработан метод оптимизации параметров, который может применяться для настройки других эмпирических моделей деградации АКБ при соответствующих экспериментальных данных. При наличии подобных моделей деградации для различных типов АКБ возможны моделирование их совместной работы и выявление синергетических эффектов в тех или иных условиях эксплуатации, оптимизация стоимости буферизации электроэнергии.

4. Дальнейшее развитие данного подхода к моделированию деградации АКБ должно заключаться, прежде всего, в настройке и уточнении функции

износа для АКБ различных типов при разных температурах и токовых режимах. При положительных результатах тестирования и определенном распространении подобных моделей возможно их использование для универсального представления больших массивов экспериментальных данных по износу конкретных видов АКБ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мировой рынок накопителей энергии [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://nangs.org/news/renewables/eksperty-mirovoy-gynok-nakopiteley-energii-do-2030-goda-budet-rastina-23-v-god>. Дата доступа: 20.05.2022.
2. Manwell, J. F. Lead Acid Battery Storage Model for Hybrid Energy Systems / J. F. Manwell, J. G. McGowan // *Solar Energy*. 1993. Vol. 50, Iss. 5. P. 399–405. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(93\)90060-2](https://doi.org/10.1016/0038-092X(93)90060-2).
3. Борисевич, А. В. Моделирование литий-ионных аккумуляторов для систем управления батареями: обзор текущего состояния [Электронный ресурс] / А. В. Борисевич // *Современная техника и технологии*. 2014. № 5. Режим доступа: <https://technology.snauka.ru/2014/05/3542>.
4. Ceraolo, M. Experimentally Determined Models for High-Power Lithium Batteries / M. Ceraolo, G. Lutzemberger, T. Huria // *SAE International*. 2011. <https://doi.org/10.4271/2011-01-1365>.
5. Huria, T. Simplified Extended Kalman Filter Observer for SOC Estimation of Commercial Power-Oriented LFP Lithium Battery Cells / T. Huria [et al.] // *SAE 2013 World Congress & Exhibition*. <https://doi.org/10.4271/2013-01-1544>.
6. Barsali, T. Dynamic Models of Lead Acid Batteries: Implementation Issues / T. Barsali, M. Ceraolo // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2002. Vol. 17, Iss. 1. P. 16–23. <https://doi.org/10.1109/60.986432>.
7. Bindner, H. Lifetime Modelling of Lead Acid Batteries / H. Bindner [et al.]. Denmark. Forskningscenter Risoe. Risoe-R No. 1515 (EN), 2005.
8. Mkahl, R. Modeling Charging Stations Batteries for Electric Vehicles / R. Mkahl, A. Nait Sidi Moh // *Journal of Aisan Electric Vehicles*. 2013. Vol. 11, No 2. P. 1667–1675. <https://doi.org/10.4130/jaev.11.1667>.
9. Доброго, К. В. Моделирование аккумуляторных батарей и их сборок с учетом деградации параметров / К. В. Доброго, Ю. В. Бладыко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 1. С. 27–39. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-27-39>.
10. Доброго, К. В. Моделирование сборок аккумуляторных батарей в электронной лаборатории / К. В. Доброго, Ю. В. Бладыко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 5. С. 381–392. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-5-381-392>.
11. Klein, R. State Estimation of a Reduced Electrochemical Model of a Lithium-Ion Battery / R. Klein [et al.] // *Proceedings of the 2010 American Control Conference*, 2010. P. 6618–6623. <https://doi.org/10.1109/ACC.2010.5531378>.
12. Chen, M. Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and IV Performance / M. Chen, G. A. Rincon-Mora // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2006. Vol. 21, Iss. 2. P. 504–511. <https://doi.org/10.1109/TEC.2006.874229>.
13. Nonlinear State Estimation of a Degrading Battery System [Electronic Resource]. Mode of access: <https://www.mathworks.com/help/control/ug/nonlinear-state-estimation-of-a-degrading-battery-system.html>. Date of access: 10.03.2022.
14. Huria, T. High Fidelity Electrical Model with Thermal Dependence for Characterization and Simulation of High Power Lithium Battery Cells / T. Huria [et al.] // *2012 IEEE International Electric Vehicle Conference*. 4–8 March 2012, Greenville. <https://doi.org/10.1109/IEVC.2012.6183271>.

15. Cordoba-Arenas, A. Capacity and Power Fade Cycle-Life Model for Plug-in Hybrid Electric Vehicle Lithium-Ion Battery Cells Containing Blended Spinel and Layered-Oxide Positive Electrodes / A. Cordoba-Arenas [et al.] // *Journal of Power Sources*. 2015. Vol. 278. P. 473–483. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.12.047>.
16. Li, L. Battery Remaining Useful Life Prediction with Inheritance Particle Filtering / L. Li [et al.] // *Energies*. 2019. Vol. 12, Iss. 14. 2784. <https://doi.org/10.3390/en12142784>.
17. Unagar, A. Learning to Calibrate Battery Models in Real-Time with Deep Reinforcement Learning / A. Unagar [et al.] // *Energies*. 2021. Vol. 14, Iss. 5. 1361. <https://doi.org/10.3390/en14051361>.
18. Simulink [Electronic Resource]. Mode of access: <https://www.mathworks.com/products/simulink.html>. Date of access: 10.06.2022.
19. Wan, E. A. The Unscented Kalman Filter for Nonlinear Estimation / E. A. Wan, R. Van Der Merwe // *Proceedings of the IEEE 2000 Adaptive Systems for Signal Processing, Communications, and Control Symposium (Cat. No 00EX373)*. 4 October 2000, Lake Louise. <https://doi.org/10.1109/ASSPCC.2000.882463>.
20. Lithium-Ion Battery Aging Model [Electronic Resource]. Mode of access: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ug/12-8-v-40-ah-lithium-ion-lifepo4-battery-aging-model-1000-h-simulation.html>. Date of access: 10.06.2022.
21. Xu, B. Modeling of Lithium-Ion Battery Degradation for Cell Life Assessment / B. Xu [et al.] // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2016. Vol. 9, Iss. 2. P. 1131–1140. <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2578950>.
22. Thingvad, M. Characterization of NMC Lithium-Ion Battery Degradation for Improved Online State Estimation / M. Thingvad [et al.] // *Proceedings of 55th International Universities Power Engineering Conference*. 1–4 September 2020, Turin. <https://doi.org/10.1109/UPEC49904.2020.9209879>.
23. Guo, J. Lithium-Ion Battery Operation, Degradation, and Aging Mechanism in Electric Vehicles: An Overview / J. Guo [et al.] // *Energies*. 2021, Vol. 14, Iss. 17. 5220. <https://doi.org/10.3390/en14175220>.
24. Аккумуляторная батарея Delta GEL 12-55 (12V / 55Ah) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.delta-battery.ru/catalog/delta-gel/delta-gel-12-55/>. Дата доступа: 10.06.2022.
25. Гладков, Л. А. Генетические алгоритмы / Л. А. Гладков, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик. М.: Физматлит, 2010. 368 с.
26. Доброго, К. В. Определение параметров кинетики термического разложения твердых топлив из данных термогравиметрического анализа / К. В. Доброго, А. А. Шевель, И. А. Козначеев // *Тепло- и массоперенос – 2012*. Минск: ИТМО им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, 2013. С. 296–299.
27. Oxford Battery Degradation Dataset [Electronic Resource]. Mode of access: <https://ora.ox.ac.uk/objects/uuid:03ba4b01-cfed-46d3-9b1a-7d4a7bdf6fac>. Date of access: 15.03.2022.
28. Battery Research Group [Electronic Resource] // University of Maryland. A. James Clark School of Engineering. Center for Advanced Life Cycle Engineering. Mode of access: <https://calce.umd.edu/battery-research-group>. Date of access: 15.03.2022.
29. Yu, H. Life-Cycle Parameter Identification Method of an Electrochemical Model for Lithium-Ion Battery Pack / H. Yu [et al.] // *Journal of Energy Storage*. 2022. Vol. 47. P. 103591. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103591>.
30. Saha, B. Battery Data Set / B. Saha, K. Goebel // *NASA Ames Prognostics Data Repository*, NASA Ames Research Centre, Moffett Field, CA, USA. 2007. Mode of access: <https://www.nasa.gov/content/prognostics-center-of-excellence-data-set-repository>. Date of access: 10.06.2022.
31. Prognostics for Batteries Aging Experiments and Modeling / A. Saxena [et al.] // *NASA Ames Research Center, NASA Battery Workshop*. 2012. Mode of access: https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/prog_batt_aging_exp_model_asaxena.pdf. Date of access: 10.06.2022.
32. BatteryArchive.org [Electronic Resource]. Mode of access: https://www.batteryarchive.org/study_summaries.html. Date of access: 11.05.2022.
33. Birkl, C. R. Diagnosis and Prognosis of Degradation in Lithium-Ion Batteries / C. R. Birkl, University of Oxford. 2017.

REFERENCES

1. *The World Market of Energy Storage Devices*. Available at: <https://nangs.org/news/renewables/eksperty-mirovoy-rynok-nakopiteley-energii-do-2030-goda-budet-rasti-na-23-v-god> (accessed 20 May 2022) (in Russian).
2. Manwell J. F., McGowan J. G. (1993) Lead Acid Battery Storage Model for Hybrid Energy Systems. *Solar Energy*, 50 (5), 399–405. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(93\)90060-2](https://doi.org/10.1016/0038-092X(93)90060-2).
3. Borisevich A. V. (2014) Modeling of Lithium-Ion Batteries for Battery Management Systems: the Survey of Current State. *Sovremennaya Tekhnika i Tekhnologii = Modern Technics and technologies*, (5). Available at: <https://technology.snauka.ru/2014/05/3542> (accessed 13 September 2022) (in Russian).
4. Ceraolo M., Lutzemberger G., Huria T. (2011) Experimentally Determined Models for High-Power Lithium Batteries. *SAE International*. <https://doi.org/10.4271/2011-01-1365>.
5. Huria T., Ceraolo M., Gazzarri J., Jackey R. (2013) Simplified Extended Kalman Filter Observer for SOC Estimation of Commercial Power-Oriented LFP Lithium Battery Cells. *SAE 2013 World Congress & Exhibition*. <https://doi.org/10.4271/2013-01-1544>.
6. Barsali T., Ceraolo M. (2002) Dynamic Models of Lead Acid Batteries: Implementation Issues. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 17 (1), 16–23. <https://doi.org/10.1109/60.986432>.
7. Bindner H., Cronin T., Lundsager P., Manwell J. F., Abdulwahid U., Baring-Gould I. (2005). *Lifetime Modelling of Lead Acid Batteries*. Denmark. Forskningscenter Risoe. Risoe-R No 1515 (EN).
8. Mkahl R., Nait Sidi Moh A. (2013) Modeling Charging Stations Batteries for Electric Vehicles. *Journal of Aisan Electric Vehicles*, 11 (2), 1667–1675. <https://doi.org/10.4130/jaev.11.1667>.
9. Dobrego K. V., Bladyko V. V. (2021) Modeling of Batteries and their Assemblies Taking into Account the Degradation of Parameters. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (1), 27–39. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-27-39> (in Russian).
10. Dobrego K. V., Bladyko Y. V. (2021) Modeling Battery Connections in the Electronic Lab. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (5), 381–392. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-5-381-392> (in Russian).
11. Klein R., Chaturvedi N. A., Christensen J., Ahmed J., Findeisen R., Kojic A. (2010) State Estimation of a Reduced Electrochemical Model of a Lithium-Ion Battery. *Proceedings of the 2010 American Control Conference*, 6618–6623. <https://doi.org/10.1109/ACC.2010.5531378>.
12. Chen M., Rincon-Mora G. A. (2006) Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and IV Performance. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 21 (2), 504–511. <https://doi.org/10.1109/TEC.2006.874229>.
13. *Nonlinear State Estimation of a Degrading Battery System*. Available at: <https://www.mathworks.com/help/control/ug/nonlinear-state-estimation-of-a-degrading-battery-system.html> (accessed 10 March 2022).
14. Huria T., Ceraolo M., Gazzarri J., Jackey R. (2012) High Fidelity Electrical Model with Thermal Dependence for Characterization and Simulation of High Power Lithium Battery Cells. *2012 IEEE International Electric Vehicle Conference*. 4–8 March 2012, Greenville, 1–8. <https://doi.org/10.1109/IEVC.2012.6183271>.
15. Cordoba-Arenas A., Onori S., Guezennec Y., Rizzoni G. (2015) Capacity and Power Fade Cycle-Life Model for Plug-in Hybrid Electric Vehicle Lithium-Ion Battery Cells Containing Blended Spinel and Layered-Oxide Positive Electrodes. *Journal of Power Sources*, 278, 473–483. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.12.047>.
16. Li L., Saldivar A. A., Bai Y., Li Y. (2019) Battery Remaining Useful Life Prediction with Inheritance Particle Filtering. *Energies*, 12 (14), 2784. <https://doi.org/10.3390/en12142784>.
17. Unagar A., Tian Y., Chao M. A., Fink O. (2021) Learning to Calibrate Battery Models in Real-Time with Deep Reinforcement Learning. *Energies*, 14 (5), 1361. <https://doi.org/10.3390/en14051361>.
18. *Simulink*. Available at: <https://www.mathworks.com/products/simulink.html> (accessed 10 June 2022).

19. Wan E. A., Van Der Merwe R. (2000) The Unscented Kalman Filter for Nonlinear Estimation. *Proceedings of the IEEE 2000 Adaptive Systems for Signal Processing, Communications, and Control Symposium* (Cat. No 00EX373). 4 October 2000, Lake Louise, 153–158. <https://doi.org/10.1109/ASSPCC.2000.882463>.
20. *Lithium-Ion Battery Aging Model*. Available at: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ug/12-8-v-40-ah-lithium-ion-lifepo4-battery-aging-model-1000-h-simulation.html> (accessed 10 June 2022).
21. Xu B., Oudalov A., Ublig A., Andersson G., Kirschen D. S. (2016) Modeling of Lithium-Ion Battery Degradation for Cell Life Assessment. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9 (2), 1131–1140. <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2578950>.
22. Thingvad M., Calearo L., Thingvad A., Viskinde R., Marinell M. (2020) Characterization of NMC Lithium-Ion Battery Degradation for Improved Online State Estimation. *Proceedings of 55th International Universities Power Engineering Conference*. 1–4 September 2020, Turin, 1–6. <https://doi.org/10.1109/UPEC49904.2020.9209879>.
23. Guo J., Li Y., Pedersen K., Stroe D.-I. (2021) Lithium-Ion Battery Operation, Degradation, and Aging Mechanism in Electric Vehicles: An Overview. *Energies*, 14 (17), 5220. <https://doi.org/10.3390/en14175220>.
24. *Delta GEL 12-55 Rechargeable Battery (12V/55Ah)*. Available at: <https://www.delta-battery.ru/catalog/delta-gel/delta-gel-12-55/> (accessed 10 June 2022) (in Russian).
25. Gladkov L. A., Kureichik V. V., Kureichik V. M. (2010) *Genetic Algorithms*. Moscow, Fizmatlit Publ. 368 (in Russian).
26. Dobrego K. V., Shevel' A. A., Koznacheev I. A. (2013) Determination of Kinetics Parameters of Thermal Decomposition of Solid Fuels from Thermogravimetric Analysis Data. *Teplo- i Massoperenos – 2012* [Heat and Mass Transfer – 2012]. Minsk, ITMT named after A.V. Lykov of the National Academy of Sciences of Belarus, 296–299 (in Russian).
27. *Oxford Battery Degradation Dataset*. Available at: <https://ora.ox.ac.uk/objects/uuid:03ba4b01-cfed-46d3-9b1a-7d4a7bdf6fac> (accessed 15 March 2022).
28. Battery Research Group. *University of Maryland. A. James Clark School of Engineering. Center for Advanced Life Cycle Engineering*. Available at: <https://calce.umd.edu/battery-research-group> (accessed 15 March 2022).
29. Yu H., Li J., Ji Y., Pecht M. (2022) Life-Cycle Parameter Identification Method of an Electrochemical Model for Lithium-Ion Battery Pack. *Journal of Energy Storage*, 47, 103591. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103591>.
30. Saha B., Goebel K. (2007) Battery Data Set. *NASA Ames Prognostics Data Repository, NASA Ames Research Centre, Moffett Field, CA, USA*. Available at: <https://www.nasa.gov/content/prognostics-center-of-excellence-data-set-repository> (accessed 10 June 2022).
31. Saxena A., Bole B., Daigle M., Goebel K. (2012) *Prognostics for Batteries. Aging Experiments and Modeling*. Presented at NASA Battery Workshop 2012. Available at: https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/prog_batt_aging_exp_model_asaxena.pdf (accessed 10 June 2022).
32. *BatteryArchive.org*. Available at: https://www.batteryarchive.org/study_summaries.html (accessed 11 May 2022).
33. Birkl C. (2017) *Diagnosis and Prognosis of Degradation in Lithium-Ion Batteries*. University of Oxford.

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-499-510>

УДК 621.32

Особенности моделирования режимов работы линий наружного освещения

В. Н. Калечиц¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. Обоснована необходимость моделирования режимов работы линий наружного освещения напряжением 0,23/0,4 кВ. Выбор оптимальной конфигурации осветительной линии при обеспечении нормируемых значений освещенности и яркости на рабочей поверхности рекомендуется осуществлять, сравнивая несколько вариантов с разными расположениями опор, типами кривых сил света, количеством и мощностью светильников. Результаты светотехнического расчета являются основой для моделирования электрических режимов работы линий наружного освещения, позволяющего определить режимные параметры (напряжение узлов, активную и реактивную мощность, ток, падение напряжения, потери активной и реактивной мощности на отдельных участках). Полученные данные можно использовать для выбора площади сечения жил проводников и прогноза электропотребления наружного освещения с учетом особенностей регулирования светового потока (диммирования). Как правило, линии наружного освещения подключены к одному пункту питания. Предложено применение линий наружного освещения с двусторонним питанием для магистральных улиц и кольцевых дорог относительно большой протяженности, что позволит не только повысить надежность электроснабжения осветительных установок, но и использовать проводники с меньшей площадью сечения жил. Электрическая нагрузка источников света принимается на основе статических характеристик. Моделирование электрических режимов сети наружного освещения осуществляется с учетом высших гармоник тока и напряжения. Рациональный режим работы линии наружного освещения определяется величиной отклонения напряжения от номинального значения, показателями несинусоидальности и несимметрии напряжения в пункте питания. Дополнительные возможности моделирования режимов работы осветительных линий заключаются в поиске повреждений (выявлении коротких замыканий, определении наличия неисправных светильников).

Ключевые слова: наружное освещение, осветительная линия, светильник, моделирование режима

Для цитирования: Калечиц, В. Н. Особенности моделирования режимов работы линий наружного освещения / В. Н. Калечиц // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 6. С. 499–510. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-499-510>

Адрес для переписки

Калечиц Вячеслав Николаевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-65-52
kalechyts@bntu.by

Address for correspondence

Kalechyts Viachaslau N.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-65-52
kalechyts@bntu.by

Features of Modeling the Operating Modes of Outdoor Lighting Lines

V. N. Kalechyts¹⁾

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

Abstract. The necessity of modeling the operating modes of outdoor lighting lines with a voltage of 0.23/0.4 kV is substantiated. The choice of the optimal configuration of the lighting line while ensuring the standardized values of illumination and brightness on the working surface is recommended to be carried out by comparing several variants with different positions of pillars, types of light intensity curves, the number and power of luminaires. The results of the lighting calculation are the basis for modeling the electrical operation modes of outdoor lighting lines, which allows determining the operating parameters (node voltage, active and reactive power, current, voltage drop, loss of active and reactive power in individual sections). The obtained data can be used to select the cross-sectional area of conductor cores and forecast the power consumption of outdoor lighting, taking into account the specific features of light flux regulation (dimming). As a rule, outdoor lighting lines are connected to one power point. The use of outdoor lighting lines with bilateral supply for main streets and circular roads of relatively long length is proposed which will not only make it possible to increase the reliability of power supply of lighting installations, but also to use conductors with a smaller cross-section area of the cores. The electrical load of light sources is assumed on the basis of static characteristics. Modeling of the electrical modes of the outdoor lighting network is carried out taking into account the higher harmonics of current and voltage. The rational operation mode of the outdoor lighting line is determined by the magnitude of the voltage deviation from the nominal value, the indicators of non-sinusoidality and voltage asymmetry at the power supply point. Additional possibilities for modeling the modes of operation of lighting lines are to search for damage (detection of short circuits, determination of the presence of faulty lamps).

Keywords: outdoor lightning, lighting line, luminaire, modeling of a mode

For citation: Kalechyts V. N. (2022) Features of Modeling the Operating Modes of Outdoor Lighting Lines. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 65 (6), 499–510. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-499-510> (in Russian)

Введение

Система наружного освещения имеет сложную структуру, представляет собой множество отдельных, технически локальных осветительных систем как конечных элементов электроэнергетической системы [1] (рис. 1).

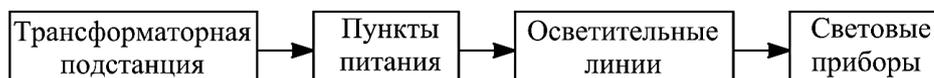


Рис. 1. Структурная упрощенная схема системы наружного освещения

Fig. 1. Structural simplified scheme of the outdoor lighting system

Моделирование режимов работы конкретных осветительных линий напряжением 0,23/0,4 кВ целесообразно осуществлять для принятия решений на стадии проектирования и при модернизации систем наружно-

го освещения. Рациональность условий их эксплуатации при обеспечении необходимого качества освещения можно оценить по расходу электроэнергии, сроку службы источников света, затратам на обслуживание и др.

Проектирование осветительных установок наружного освещения, в результате которого осуществляется выбор количества, типа и мощности используемых световых приборов, расположения опор, схемы питания, площади сечения жил проводников осветительной линии, – многокритериальная задача. В настоящее время при проектировании, как правило, пользуются рядом упрощений:

- выбор площади сечения жил проводников по условию допустимой потери напряжения осуществляется без учета индуктивного сопротивления;
- расчетная мощность световых приборов принимается равной номинальной (независимо от реальной величины напряжения на их зажимах);
- не учитывается влияние несинусоидальности токов и напряжений, несимметрии напряжений, а также возможные варианты работы осветительных линий (вечерний и ночной режимы).

Для математического моделирования режимов работы линии наружного освещения требуется наличие полной информации о светильниках, конфигурации линии, способах управления и возможностях регулирования. В качестве исходной информации используют результаты светотехнического расчета (расположение, количество, тип и мощность световых приборов). Далее осуществляют электрический расчет линии наружного освещения с односторонним (двусторонним) питанием при различных вариантах работы (вечерний, ночной и др.).

Особенности светотехнического расчета наружного освещения

Светотехнические расчеты определяют расположение опор, количество, мощность, высоту установки и угол наклона светильников на опоре. Конфигурация осветительной линии зависит от назначения освещаемого объекта, для которого нормируются средняя яркость покрытия $L_{\text{ср}}$ и средняя горизонтальная освещенность $E_{\text{ср}}$ в соответствии с СН 2.04.03–2020 [2].

Современные нормы наружного освещения содержат значения не только средней яркости дорожного покрытия, но и ее равномерности (полную и продольную), приращения пороговой разности яркостей, коэффициент периферийного освещения [3]. Также могут использоваться новые способы расчета видимости объектов дорожного движения на основе статистического подхода к описанию обнаружения и опознавания объектов зрительной системой человека [4], рассмотрение на стадии проектирования нескольких углов наблюдения, для которых определяется яркость [5]. Обеспечение нормируемых показателей зависит от правильности выбора способа расположения опор, шага между осветительными опорами, коли-

чества и типа световых приборов на опоре, угла наклона световых приборов по отношению к рабочей поверхности.

В качестве примера в функциональной программе для проектирования освещения DIALux осуществлен сравнительный светотехнический расчет для магистральной дороги общегородского назначения категории А с интенсивностью движения транспортных средств в обоих направлениях свыше 500 и до 1000 ед./ч. Нормируемые величины для такой дороги: средняя яркость покрытия $L_{cp} = 0,8$ кд/м², средняя горизонтальная освещенность покрытия $E_{cp} = 15$ лк [2]. Расчет уровней освещенности и яркости на проезжей части выполнен для светильников производства GALAD [6] типов ЖКУ02-100-003 «Пегас», ЖКУ02-150-003 «Пегас» и ЖКУ02-250-003 «Пегас» и (с номинальной мощностью ламп 100, 150 и 250 Вт соответственно) на основании следующих исходных данных: ширина проезжей части с четырьмя полосами движения $d = 16$ м; высота установки светильника 8 м; вылет светильника от края проезжей части 0,5 м; одностороннее расположение опор; расстояние между опорами $H = 25$ м, от края проезжей части дороги до опоры 1 м; на опоре один светильник с углом наклона к горизонту 15°; коэффициент запаса 1,5; КПД светильника 70 %; кривая силы света светильников типа «Д» (косинусная) [6].

С помощью программы DIALux получены уровни и распределение освещенности в фиктивных цветах, средняя яркость дорожного покрытия для трех наиболее распространенных на практике способов расположения осветительных опор:

- по одну сторону проезжей части;
- по обе стороны проезжей части друг напротив друга;
- по обе стороны проезжей части со сдвигом (шахматное расположение).

Результаты этих расчетов представлены на рис. 2 и в табл. 1. В первой строке табл. 1 рассчитаны параметры при шаге $H = 25$ м, во второй строке – при минимальном шаге H_{min} , обеспечивающем среднюю яркость покрытия не менее 0,8 кд/м² и среднюю горизонтальную освещенность покрытия не менее 15 лк (т. е. минимально допустимые требования к качеству освещения). Также указаны значения минимальной и максимальной освещенности (E_{min} и E_{max}), показывающие ее неравномерность на дорожном покрытии. На основе представленных данных можно сделать вывод, что оптимальным способом размещения опор для обеспечения лучшей равномерности освещенности на рабочей поверхности является расположение по обе стороны со сдвигом, при котором отсутствуют темные полосы, характерные для размещения опор друг напротив друга или по одну сторону. Поэтому для варианта расположения светильников по обе стороны дороги со сдвигом можно применить больший шаг между опорами, что позволит минимизировать капиталовложения в осветительную линию.

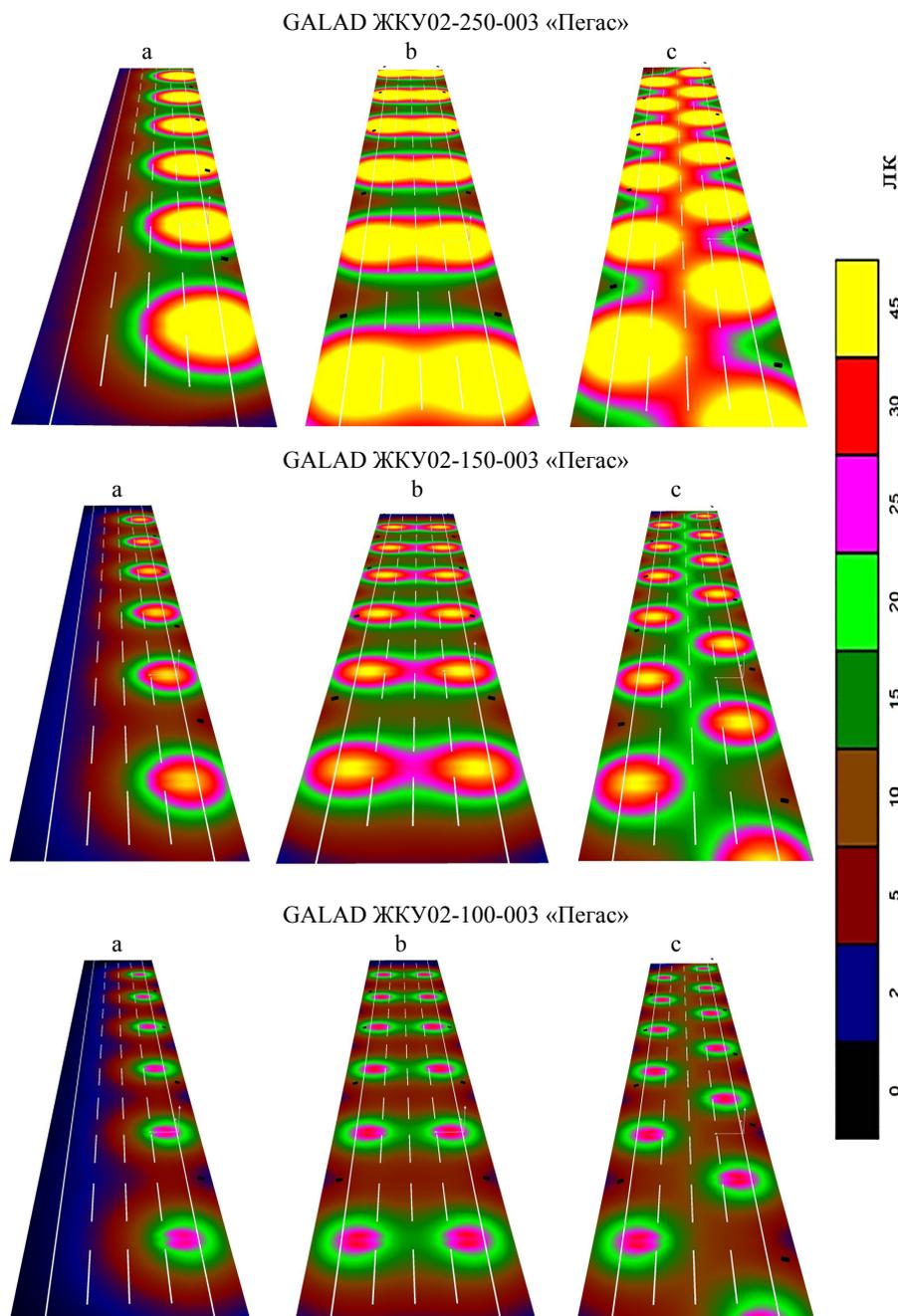


Рис. 2. Уровни освещенности (в фиктивных цветах) дорожного покрытия при применении светильников производства GALAD разной мощности с расположением: а – по одну сторону дороги; б – по обе стороны дороги друг напротив друга; с – по обе стороны дороги со сдвигом

Fig. 2. Illumination levels (in fictitious colors) of the road surface when using GALAD luminaires of different power and location: а – on one side of the road; б – on both sides of the road opposite each other; с – on both sides of the road with a shift

Таблица 1

**Результаты сравнительных светотехнических расчетов дорожного освещения
с разным расположением и мощностью светильников**

**Results of comparative lighting calculations of road lighting
with different location and power of luminaires**

Расположение светильников	Тип светильника производства GALAD	Шаг между опорами H , м	Средняя яркость $L_{\text{ср}}$, кд/м ²	Освещенность, лк		
				средняя $E_{\text{ср}}$	минимальная E_{min}	максимальная E_{max}
По одну сторону дороги	ЖКУ02-100-003 «Пегас»	25	0,31	7	2	27
		10	0,80	16	4	37
	ЖКУ02-150-003 «Пегас»	25	0,50	11	3	41
		16	0,80	17	4	46
	ЖКУ02-250-003 «Пегас»	25	0,97	23	5	80
		30	0,80	18	3	78
По обе стороны дороги друг напротив друга	ЖКУ02-100-003 «Пегас»	25	0,66	13	7	29
		20	0,82	17	11	31
	ЖКУ02-150-003 «Пегас»	25	1,05	22	11	44
		30	0,80	15	4	42
	ЖКУ02-250-003 «Пегас»	25	1,67	36	9	83
		60	0,83	18	1	82
По обе стороны дороги со сдвигом	ЖКУ02-100-003 «Пегас»	25	0,66	13	7	29
		20	0,82	17	11	31
	ЖКУ02-150-003 «Пегас»	25	1,05	22	11	44
		30	0,87	18	7	41
	ЖКУ02-250-003 «Пегас»	25	2,00	43	19	84
		60	0,83	18	4	78

Примечание. В первой строке (голубой цвет) рассчитаны параметры при шаге $H = 25$ м, во второй строке (зеленый цвет) – при минимальном шаге H_{min} , обеспечивающем среднюю яркость покрытия $L_{\text{ср}}$ не менее $0,8$ кд/м² и среднюю горизонтальную освещенность покрытия $E_{\text{ср}}$ не менее 15 лк.

Особенности выбора типа кривой силы света рассмотрены на примере светильников производства GALAD [6] ЖКУ02-150-003 «Пегас» и ЖКУ21-150-002 «Гелиос» с кривыми силами света типа «Д» (косинусная) и «Ш» (широкая) соответственно (табл. 2). На основании светотехнического расчета уровней освещенности E и яркости L с помощью программы DIALux (рис. 3, табл. 2) для рассмотренного примера с односторонним расположением опор целесообразно применять светильники с кривой силы света типа «Ш» (широкой) по причине более равномерного распределения освещенности на рабочей поверхности.

Таблица 2

Результаты сравнительных светотехнических расчетов дорожного освещения с разными кривыми силы света светильников при одностороннем расположении опор

The results of comparative lighting calculations of road lighting with different luminous intensity curves of luminaires when the latter have one side location

Тип кривой силы света светильника	Тип светильника производства GALAD	Шаг между опорами H , м	Средняя яркость $L_{\text{ср}}$, кд/м ²	Освещенность, лк		
				средняя $E_{\text{ср}}$	минимальная E_{min}	максимальная E_{max}
Ш	ЖКУ21-150-002 «Гелиос»	25	1,65	23	8	46
Д	ЖКУ02-150-003 «Пегас»	25	0,80	17	7	41

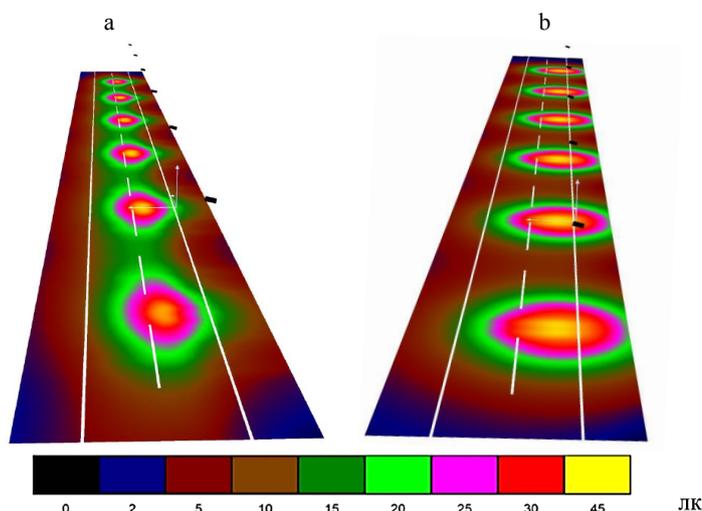


Рис. 3. Уровни освещенности (в фиктивных цветах) дорожного покрытия при применении светильников GALAD типа: а – ЖКУ21-150-002 «Гелиос»; б – ЖКУ02-150-003 «Пегас»

Fig. 3. Illumination levels (in fictitious colors) of the road surface when using luminaires GALAD of the type: а – ЖКУ [yellow cantilever street luminaire] 21-150-002 Helios; б – ЖКУ02-150-003 Pegasus

При проведении светотехнических расчетов необходимо учитывать возможность применения таких мероприятий по экономии электроэнергии, как отключение части светильников, диммирование (регулирование светового потока источников света), использование автоматических систем с регулированием светового потока источников света в зависимости от наличия движения транспорта, пешеходов и др.

Моделирование режимов работы линий наружного освещения

Режимные параметры (напряжение узлов, активная и реактивная мощность, ток, падение напряжения, потери активной и реактивной мощности

на отдельных участках линии), полученные при моделировании конкретных условий работы осветительных линий, необходимы для решения следующих задач:

- выбора площади сечения жил проводников, схемы питания;
- анализа способов управления и регулирования (диммирования);
- прогноза электропотребления;
- улучшения параметров качества электроэнергии;
- осуществления поиска неисправностей (выявление коротких замыканий, повреждений световых приборов).

Практическое решение перечисленных задач позволяет обеспечить рациональные режимы работы систем наружного освещения.

Расчет параметров электрической сети наружного освещения имеет особенности, касающиеся исходной информации, которая рассматривается по отношению к существующим и проектируемым линиям. Линии наружного освещения характеризуются значительной протяженностью и использованием большого количества источников света мощностью 100–400 Вт. В таких условиях для определения и поддержания рациональных режимов работы необходимо правильно выбрать площадь сечения жил проводников линии. Выбранное сечение должно обеспечивать требуемые уровни напряжения на источниках света во всех режимах, но при этом не быть завышенным, чтобы не увеличивать стоимость электрической сети. Кроме того, следует учитывать индуктивное сопротивление проводников, зависимость активной и реактивной мощности светильника от уровня напряжения на нем, наличие высших гармоник тока и напряжения [7].

Линии наружного освещения, как правило, подключаются к одному пункту питания, а в зависимости от категории надежности электроприемников для них может предусматриваться возможность переключения на второй источник питания. В реальных условиях эксплуатации, например в г. Минске, нет осветительных линий, получающих питание в нормальном режиме от двух пунктов.

В [8, 9] рассмотрен вариант повышения надежности электроснабжения осветительных установок путем применения линий с двусторонним питанием. При оценке возможности его применения следует производить расчеты при разных режимах работы линии (нормальная эксплуатация; с отклонениями напряжений в пунктах питания от номинальных значений; с односторонним питанием; с наличием несимметричности параметров линии; при возможных режимах экономии электроэнергии в ночное время).

Моделирование режимов работы (рис. 4) ориентировано на более точное определение параметров линий с учетом изменения активной и реактивной мощности светильников в зависимости от уровня напряжения в конкретных точках схемы.

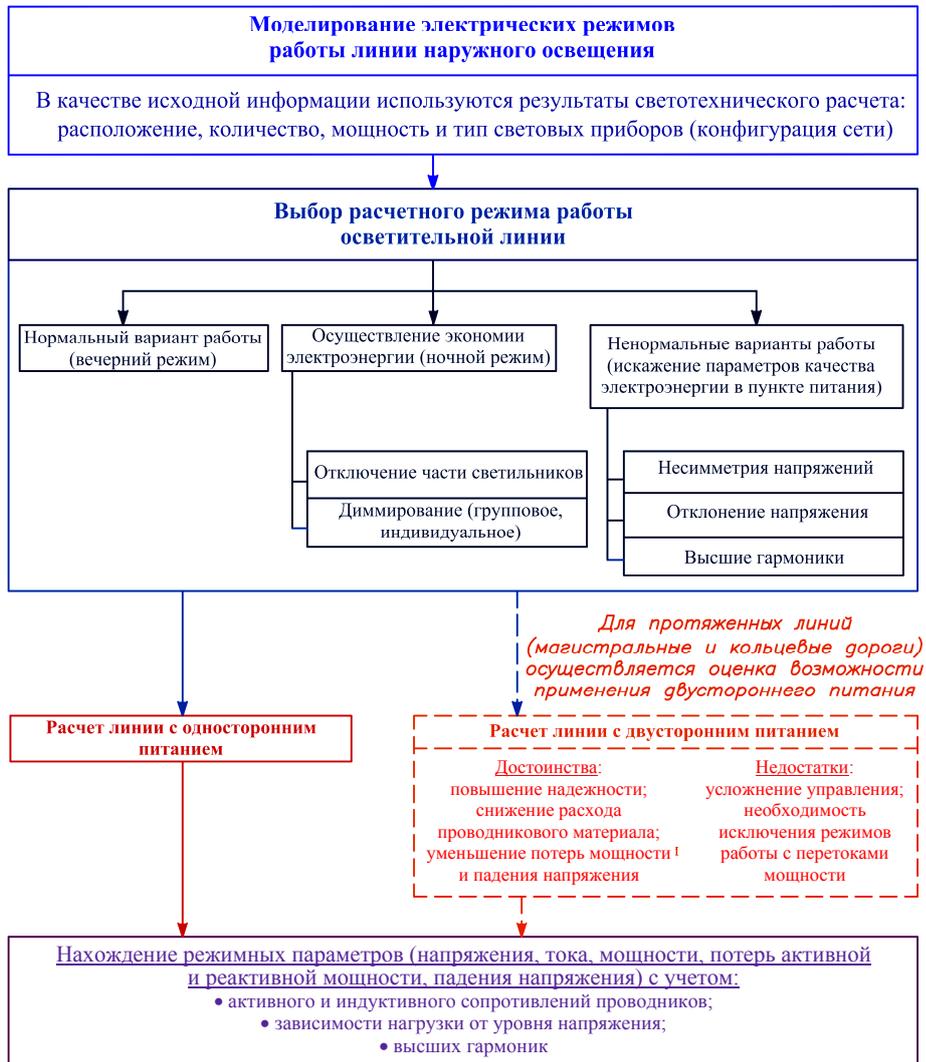


Рис. 4. Структурная схема моделирования режимов работы линий наружного освещения

Fig. 4. Structural diagram of modeling the operation modes of outdoor lighting lines

Предложено [8, 10] задавать электрическую нагрузку источников света на основе статических характеристик $P(U)$ и $I(U)$. Реализованные в среде Mathcad программы для линий с одно- и двусторонним питанием [8, 10, 11] позволяют смоделировать необходимую конфигурацию линии наружного освещения, используя в качестве исходных данных следующую информацию:

- расстояние от ТП 10/0,4 кВ до пункта питания;
- комплексное значение полной мощности светильников $S^{\text{Л}}$ (на основании зависимостей тока I и активной мощности P от величины напряжения U);
- расстояние от пункта питания до ближайшей опоры, шаг между опорами;

- количество опор, число светильников на опоре, распределение светильников по фазам;
- удельные активное и индуктивное сопротивления проводников в зависимости от площади сечения жилы;
- напряжения в фазах пункта питания $U_{\text{п}}$.

С помощью математических моделей [8, 10], реализованных в среде Mathcad, определяются режимные параметры для каждой фазы осветительной линии (с одно- и двусторонним питанием): активную, реактивную и полную мощность, ток, потери активной и реактивной мощности и падение напряжения на всех участках линии, напряжения в точках схемы, расход электроэнергии в зависимости от варианта работы линии (вечерний и ночной режимы, диммирование) и др.

Результаты моделирования режимов работы осветительных линий можно использовать для поиска повреждений:

- выявления коротких замыканий, при которых не происходит срабатывание защитных аппаратов; несрабатывание аппарата защиты возможно при коротком замыкании в конце протяженной линии (сопротивление значительное);
- определения наличия неисправных светильников в линии, что позволит минимизировать расходы на объезд по выявлению неисправных источников света.

Обнаружение указанных повреждений основывается на сравнении величины токов в начале линии при известном уровне напряжения в пункте питания с учетом возможных режимов работы. Относительная протяженность линии наружного освещения может приводить к несрабатыванию защитных аппаратов. Ток короткого замыкания в этом случае сопоставим с током при работе линии без повреждения, поэтому следует применять дополнительную установку защитных аппаратов (деление на части).

При рассмотрении варианта без установки дополнительных защитных аппаратов необходимо реализовывать следующий алгоритм действий:

- 1) первоначально в разработанных программах [8, 10] рассчитываются параметры линии с разным уровнем напряжения в пункте питания с учетом наличия (отсутствия) возможности экономии электроэнергии на конкретной линии, т. е. моделируются возможные варианты работы линии;
- 2) в условиях эксплуатации в режиме реального времени в диспетчерском пункте периодически осуществляется автоматическое сравнение расчетных величин с реальными;
- 3) при значительном расхождении реальных величин с расчетными производится выявление его причин.

Важно учитывать уровень напряжения в пункте питания, величину тока, коэффициент мощности в начале линии и режим работы линии (ночной, вечерний, несимметрия напряжения и др.). Если сравнение производить без учета уровня напряжения в пункте питания, то возможно совпадение реальной величины тока короткого замыкания и расчетного тока при работе без короткого замыкания. В целом возможность такого совпадения можно оценить, рассчитав токи коротких замыканий на основе реальной информации.

При выходе из строя газоразрядной лампы высокого давления в ряде случаев в эксплуатации остается пускорегулирующая аппаратура светильника, что может привести к перекомпенсации реактивной мощности для рассматриваемой линии. Чтобы этого избежать, рекомендуется использовать системы с индивидуальным управлением каждым светильником. Следует учитывать, что это дорогостоящее решение со значительным усложнением системы управления и алгоритма сбора информации.

ВЫВОДЫ

1. Выбор оптимальной конфигурации осветительной линии при обеспечении нормируемых значений освещенности и яркости на рабочей поверхности необходимо осуществлять на основе сравнения нескольких вариантов с разными расположениями опор, типами кривых сил света, количеством и мощностью световых приборов.

2. С помощью разработанных в среде Mathcad программ [8, 10, 11] можно смоделировать линию наружного освещения необходимой конфигурации с одно- или двусторонним питанием и рассчитать режимные параметры для возможных вариантов работы (вечерний, ночной, диммирование).

3. Результаты моделирования режимов работы можно использовать для оценки электропотребления наружного освещения, а также при осуществлении мероприятий по обеспечению рациональных режимов работы линий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шевкоплясов, П. М. Основы управления качеством городских осветительных систем / П. М. Шевкоплясов. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. 152 с.
2. Естественное и искусственное освещение: СН 2.04.03–2020. Введ. 24.03.2021. Минск: Мин-во арх. и строит. Респ. Беларусь, 2021. 86 с.
3. Светотехнические критерии оценки дорожного освещения (обзор) / М. Викари [и др.] // Светотехника. 2012. № 5. С. 51–59.
4. Боос, Г. В. Новый подход к определению качественных характеристик установок наружного освещения / Г. В. Боос, А. А. Григорьев // Светотехника. 2015. № 6. С. 21–26.
5. Штокмар, А. Расширение яркостного подхода к оценке дорожного и тоннельного освещения / А. Штокмар // Светотехника. 2015. № 5. С. 33–35.
6. Уличные светильники [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://galad.ru/catalog/outdoor/street>. Дата доступа: 22.09.2022.
7. Козловская, В. Б. Учет влияния высших гармоник при выборе сечений проводников линий наружного освещения / В. Б. Козловская, В. Н. Калечиц // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 6. С. 544–557. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-6-544-557>.
8. Козловская, В. Б. Расчет режимных параметров линии наружного освещения с двусторонним питанием. Ч. 1 / В. Б. Козловская, В. Н. Калечиц // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 6. С. 549–562. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-6-549-562>.
9. Козловская, В. Б. Расчет режимных параметров линии наружного освещения с двусторонним питанием. Ч. 2 / В. Б. Козловская, В. Н. Калечиц // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 1. С. 30–40. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-1-30-40>.

10. Козловская, В. Б. Влияние величины напряжения на режим работы сети наружного освещения / В. Б. Козловская, В. Н. Калечиц // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2013. № 3. С. 18–25.
11. Козловская, В. Б. Несимметричные режимы работы линий наружного освещения / В. Б. Козловская, В. Н. Калечиц // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 3. С. 232–245. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-232-246>.

Поступила 04.07.2022 Подписана в печать 14.09.2022 Опубликована онлайн 30.11.2022

REFERENCES

1. Shevkopyasov P. M. (1986) *Fundamentals of Quality Management of Urban Lighting Systems*. Leningrad, Energoatomizdat Publ. 152 (in Russian).
2. Building Regulations SN 2.04.03–2020. *Natural and Artificial Lighting*. Minsk, Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2021. 86 (in Russian).
3. Vikari M., Piinen A.-M., Kufeoglu S., Luo V., Puolaka M., Halonen L. (2012) Criteria for Evaluating Road Lighting Lighting (Review). *Svetotekhnika = Light & Engineering*, (5), 51–59 (in Russian).
4. Boos G. V., Grigoriev A. A. (2015) A New Approach to Determining the Qualitative Characteristics of Outdoor Lighting Installations. *Svetotekhnika = Light & Engineering*, (6), 21–26 (in Russian).
5. Shtokmar A. (2015) Expansion of the Brightness Approach to the Assessment of Road and Tunnel Lighting. *Svetotekhnika = Light & Engineering*, (5), 33–35 (in Russian).
6. Street Lights. Available at: <https://galad.ru/catalog/outdoor/street> (accessed 22 September 2022) (in Russian).
7. Kozlovskaya V. B., Kalechyts V. N. (2017) Consideration of the Impact of High Harmonics when Selecting the Conductor Cross-Sections of Lines of Outdoor Lighting. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (6), 544–557. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-6-544-557> (in Russian).
8. Kozlovskaya V. B., Kalechyts V. N. (2016) Calculation of Operation Mode of Outdoor Lighting Line with Bilateral Supply. Part 1. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 59 (6), 549–562. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-6-549-562> (in Russian).
9. Kozlovskaya V. B., Kalechyts V. N. (2017) Calculation of Operation Mode of Outdoor Lighting Line with Bilateral Supply. Part 2. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (1), 30–40. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-1-30-40> (in Russian).
10. Kozlovskaya V. B., Kalechits V. N. (2013) Influence of Voltage Value on Operational Mode of Outdoor Lighting Grid Network. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (3), 18–25 (in Russian).
11. Kozlovskaya V. B., Kalechyts V. N. (2019) Asymmetrical Modes of Outdoor Lighting Lines. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (3), 232–246. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-232-246> (in Russian).

Received: 4 July 2022 Accepted: 14 September 2022 Published online: 30 November 2022

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-511-523>

УДК 621.311.22:005.93+620.97

Повышение эффективности действующих тепловых электрических станций в современных условиях

В. В. Янчук¹⁾, В. Н. Романюк¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. В современных условиях вопрос энергосбережения приобретает все большую остроту и перманентную актуальность. Данная ситуация обусловлена резким скачком цен на первичные энергоресурсы и необходимостью снижения удельного веса природного газа в приходной части энергобаланса Беларуси. Согласно имеющимся статистическим данным, с вводом в эксплуатацию Белорусской АЭС удельный вес природного газа в приходной части энергобаланса снизится с 97 до 59 %. В хозяйственном комплексе доля этого первичного энергоресурса прогнозируется на уровне 70 %. Наиболее рационально и с наименьшими инвестициями задача энергосбережения решается лишь за счет повышения эффективности использования природного газа, тем более что в связи с вводом Белорусской АЭС остро стоит вопрос сохранения возможности применения централизованных теплофикационных мощностей. Необходимо повысить термодинамическую эффективность циклов паротурбинных установок, как теплофикационных, так и конденсационных, составляющих основу генерации энергосистемы Беларуси, для восстановления энергетических характеристик энергосистемы, несколько снизившихся с вводом в строй АЭС. В пределе следует снизить удельный вес природного газа в приходной части энергобаланса до значений, не превышающих 50 %, в соответствии с требованиями энергетической безопасности. В статье рассмотрены примеры утилизации низкотемпературных вторичных энергетических потоков, имеющих место на тепловых электрических станциях: теплоты процессов охлаждения генератора, систем смазки, конденсации отработанного пара турбины и более глубокого охлаждения уходящих дымовых газов. На основе указанного анализа определяются перспективные направления соответствующих исследований применительно к энергосистеме Беларуси.

Ключевые слова: низкопотенциальные тепловые потоки, тепловая электростанция, паротурбинная установка, тепловой насос, абсорбционный тепловой насос, пароконденсационный тепловой насос, регенерация

Для цитирования: Янчук, В. В. Повышение эффективности действующих тепловых электрических станций в современных условиях / В. В. Янчук, В. Н. Романюк // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 6. С. 511–523. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-511-523>

Адрес для переписки

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

Address for correspondence

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

Operating Thermal Power Plants Efficiency Improvement under Current Conditions

V. V. Yanchuk¹⁾, V. N. Romaniuk¹⁾

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

Abstract. In the present-day conditions, the issue of energy saving is becoming increasingly acute and permanently relevant. This situation is caused by rapid growth in prices for primary energy resources and by the need to reduce the share of natural gas in the incoming part of the energy balance of Belarus. According to available statistics, with the commissioning of the Belarusian NPP, the share of natural gas in the incoming part of the energy balance decreases from 97 to 59 %. In the economic complex, the share of this primary energy resource is projected at 70 %. The problem of energy saving is solved most rationally and with the least investment only by increasing the efficiency of natural gas use, especially due to the commissioning of the Belarusian NPP, the issue of preserving the possibility of using centralized heating facilities is acute. It is necessary to increase the thermodynamic efficiency of the cycles of steam turbine plants, both heating and condensing, which form the basis of the generation of the Belarusian power system, in order to restore the energy characteristics of the power system, which have somewhat decreased with the commissioning of the NPP. In the limit, the share of natural gas in the incoming part of the energy balance should be reduced to values not exceeding 50 %, in accordance with the requirements of energy security. The article considers examples of utilization of low-temperature secondary energy flows occurring at thermal power plants: the heat of the cooling processes of the generator, lubrication systems, as well as the heat of condensation of turbine exhaust steam and deeper cooling of flue gases. On the basis of this review, it is expected to identify promising areas of relevant research in relation to the energy system of Belarus.

Keywords: low-potential heat flows, thermal power station, steam turbine plant, heat pump, absorption heat pump, vapor compression heat pump, regeneration

For citation: Yanchuk V. V., Romaniuk V. N. (2022) Operating Thermal Power Plants Efficiency Improvement under Current Conditions. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 65 (6), 511–523. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-511-523> (in Russian)

Введение

Уровень энергопотребления во всем мире продолжает неизменно расти, что связано не только с увеличением количества населения и расширением электрификации, но и с большим потреблением на душу населения (рис. 1). Лишь в 2020 г. наблюдался спад, обусловленный снижением социальной активности и производственных мощностей.

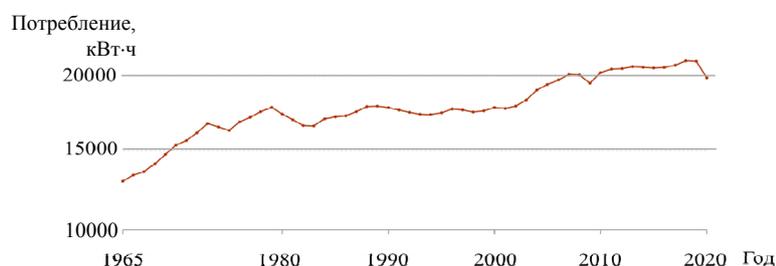


Рис. 1. Годовое потребление энергии на душу населения в мире [1]

Fig. 1. Annual energy consumption per capita in the world [1]

За последние 20 лет потребление электроэнергии на душу населения в мире выросло на 11,6 %. Такой тренд характерен и для Республики Беларусь (рост на 13,8 %) [2]. Это отражает закономерность, отмеченную еще П. П. Капицей: количество потребления энергии на душу населения зависит от уровня развития страны.

На рис. 2 представлено распределение первичных источников в производстве электроэнергии в мире. Основной прирост связан с увеличением использования органических видов топлива (уголь, природный газ). При этом доли угля и нефтепродуктов в последние годы снижались и в 2020 г. составили соответственно 33,8 и 4,4 %, тогда как доля природного газа остается стабильной и в том же году была на уровне 22,8 %. Таким образом, органическое топливо занимало 61 % в общем балансе производства электроэнергии в мире в 2020 г.

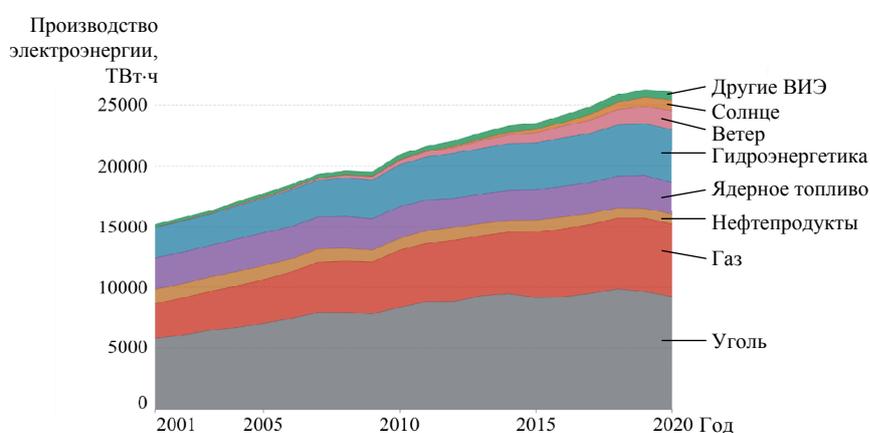


Рис. 2. Производство электроэнергии в мире с разбивкой по источникам [3]

Fig. 2. World electricity generation according to Ref. [3]

Рост общего производства электроэнергии в Беларуси можно оценить по рис. 3. В 2020 г. выработано 36,05 ТВт·ч, т. е. производство за последние 20 лет увеличилось до 53 %. При этом доля природного газа была 97 % до ввода Белорусской АЭС (рис. 4). Вывод атомной станции на полную мощность позволит снизить долю природного газа в энергобалансе до 59 %, что тем не менее потребует дальнейшей работы по повышению эффективности его использования.

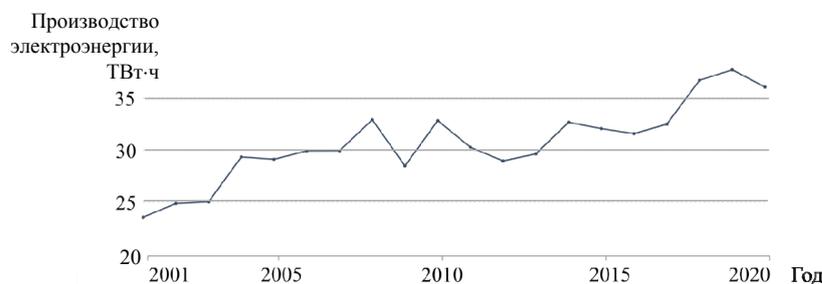


Рис. 3. Годовое производство электроэнергии в Беларуси [2]

Fig. 3. Electricity generation in Belarus [2]



Рис. 4. Баланс производства электрической энергии в Беларуси за 2020 г., % [4]

Fig. 4. Electricity generation balance in Belarus in 2020, % [4]

Из всей электроэнергии, вырабатываемой за счет сжигания органического топлива, 46,7 % произведено на конденсационных электростанциях (КЭС), 42,2 % – на теплоэлектроцентралях (ТЭЦ) (рис. 5) [4].

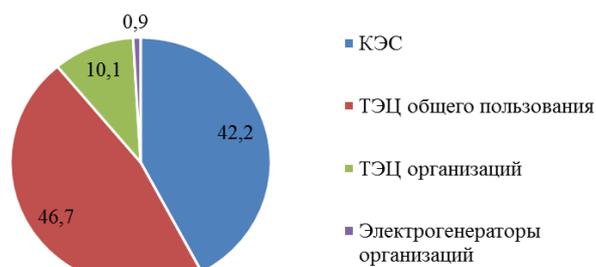


Рис. 5. Структура производства электрической энергии за счет сжигания топлива в Беларуси в 2020 г., %

Fig. 5. Structure of electric power generation based on fossil fuel combustion in Belarus in 2020, %

Удельный расход условного топлива на 1 кВт·ч электроэнергии, отпущенной объединенной энергосистемой Республики Беларусь в 2020 г., составил 238,5 г. [5], что показывает средний КПД отпуска по стране 51,6 %. Эта величина, заслуживающая внимания сама по себе, отражает большую работу энергосистемы по повышению эффективности генерации преобразованных энергопотоков. Вместе с тем практически половина энергии первичных ресурсов в процессе преобразования загрязняет тепловыми выбросами окружающую среду, а наносимый вред пропорционален величине их эксергии.

Термодинамическую эффективность систем преобразования энергии предлагается повышать с помощью эксергетического КПД. Для белорусской энергосистемы его величина определена на уровне 33,6 % [6]. В [7] утверждается, что в настоящее время эксергетический КПД взаимодействующих тепловых потоков в химико-технологических процессах колеблется в широком интервале (от 20 до 80 %), а технологическую схему можно считать удовлетворяющей современным требованиям при эксерге-

тическом КПД 80 % и выше. Следует отметить, что данное обобщение спорно: для ряда теплотехнологий, например при крашении тканей [8], КПД объективно оказывается существенно ниже. Вместе с тем очевидно, что необходимо дальнейшее совершенствование систем преобразования энергии, к которым относятся паротурбинные установки.

В первую очередь стоит блокировать сброс теплоты в окружающую среду. К числу ее основных источников на тепловых электростанциях (ТЭС) относятся: оборотная вода охлаждения конденсатора, отходящие продукты сгорания, а также некоторые контуры охлаждения технологических потоков. В случае сжигания твердого топлива еще одним потоком является утилизируемая зола, имеющая высокую температуру. Данные потери обуславливают стоимость конечного продукта и уровень воздействия на окружающую среду. Так, тепловое загрязнение воздушного и водного пространства приводит к локальным изменениям климата, нарушению привычных для конкретного региона флоры и фауны [9]. Дымовые газы, сбрасываемые в атмосферу, содержат парниковые газы, а также продукты неполного сгорания топлива, оказывающие глобальное влияние на атмосферу Земли. Поскольку в себестоимости вырабатываемой энергии преобладает стоимость топлива, очевидно, что при повышении эффективности его использования будет снижаться и стоимость произведенной электроэнергии.

Вопрос утилизации низкотемпературных тепловых потоков ТЭС в некоторой степени проработан зарубежными [10–29] и отечественными авторами [30–38]. Для условий Беларуси актуальны решения, не связанные с увеличением генерации электрической энергии, и в этом контексте повышается значимость повторного использования побочных низкотемпературных потоков ТЭС. Их теплоту можно применять для нагрева потоков с более высокой температурой, например, с помощью тепловых машин обратного цикла – тепловых насосов (ТН). Разными авторами предлагается установка парокомпрессионных тепловых насосов (ПКТН) [14, 21–23, 28] или абсорбционных тепловых насосов (АБТН) [10–13, 24, 25, 30–34].

В [38] исследована утилизация указанных потоков для нагрева сетевой воды ТЭЦ, но обойдено внимание направление регенерации низкотемпературных тепловых потоков для нагрева конденсата на КЭС и ТЭЦ. В литературе известно успешное использование данного направления на блоках турбин К-300 [26].

Кроме турбин К-300, установленных на Лукомльской ГРЭС и ТЭЦ-5, можно анализировать парогазовые блоки Березовской ГРЭС. В контексте ТЭЦ, помимо нагрева потоков конденсата, следует рассматривать утилизацию теплоты для нагрева сырой воды, необходимой для компенсации невозврата конденсата. В ряде случаев величина последних существенна и составляет до 60 % (Гродненская ТЭЦ) или даже 100 % (Новополоцкая ТЭЦ). Отдельно можно упомянуть Светлогорскую ТЭЦ, где имеется период с вынужденным повышенным пропуском пара в конденсатор, что обусловлено необходимостью использовать попутный газ от Белорусского газоперерабатывающего завода.

Далее рассмотрим существующие решения по повышению эффективности использования топлива на ТЭС в нашей стране и за рубежом.

Основная часть

Работы по оценке возможности утилизации потоков низкопотенциальной теплоты на объектах энергетики ведутся в Беларуси [30–38], странах – участницах СНГ [17–29] и дальнем зарубежье [10–16].

Внедрение АБТН в теплофикационный контур угольной ТЭЦ позволяет повысить эффективность станции на 1,39–2,27 % в зависимости от нагрузки, так как часть пара, ранее направляемого на подогрев сетевой воды, после модернизации экономится и продолжает расширяться в турбине [10]. Другая часть потока служит приводом АБТН, в качестве низкопотенциального источника используется теплота конденсации отработавшего пара.

В [11] проанализирован вариант применения многоступенчатых АБТН для подогрева сетевой воды на ТЭЦ. По предложенному варианту, обратная сетевая вода нагревается в ТН, затем догревается паром теплофикационного отбора. При температуре обратной сетевой воды 50 °С двух- и трехступенчатый АБТН дают снижение потребления энергии на нужды отопления на 8,5 и 15 % соответственно по сравнению с одноступенчатым АБТН.

Установка АБТН на тепловых пунктах позволяет снижать температуру сетевой воды в первичной обратной магистрали и увеличивать тепловую мощность сетей без их замены, а также более полно использовать теплоту отопительного отбора ТЭЦ за счет более низкой температуры подачи нагреваемого теплоносителя. Снижение температуры обратной сетевой воды до 30 °С ведет к уменьшению количества пара в теплофикационном отборе на 41,4 %. Согласно опыту эксплуатации ТЭЦ в Китае, срок возврата инвестиций в данный проект составляет порядка двух лет, при этом эксергетическая эффективность системы теплоснабжения возрастает на 10,41 % [12, 13].

В [14] приведена методика расчета эксергетической эффективности ТЭЦ с установленным ПКТН для приготовления сетевой воды за счет использования низкопотенциальной тепловой энергии конденсации отработавшего в турбине пара. Эксергетическая эффективность такой системы в 1,5–2,5 раза выше, чем у классических ТЭЦ. Эксергетическая эффективность классических ТЭЦ с турбинами номинальной мощностью 50–250 МВт составляет 0,12–0,15, для станций с турбинами 250–500 МВт – 0,18–0,20.

Капитальные вложения в абсорбционные тепловые насосы окупаются в обоснованные сроки при их работе не менее 3000 ч в год для промышленных потребителей, а для остальных типов потребителей – и при меньшем числе часов работы. Парокомпрессионные тепловые насосы окупаются для всех типов потребителей при работе более 4000 ч в год [15]. Опыт использования ТН на угольной ТЭЦ в Китае для подогрева сетевой воды в первой ступени показывает простой срок окупаемости менее двух лет [16].

В [17] приведены особенности работы ПКТН при переменных режимах и показано, что для достижения сроков окупаемости не более трех лет отопительный коэффициент ТН должен быть не ниже 4,2.

Согласно [20], при установке ТН для утилизации низкопотенциальной теплоты конденсации отработавшего в турбине пара и возврата ее обратно в цикл повысить теоретический КПД тепловой электростанции можно до 90 %. Предлагается включение ТН в тепловую схему ТЭС на контур

циркуляционной воды охлаждения конденсатора либо путем встраивания дополнительного трубного пучка в конденсатор паровой турбины. При работе ТН на систему теплофикации положительный эффект проявляется не только в уменьшении расхода топлива на подогрев сетевой воды, но и в увеличении вакуума в конденсаторе турбины, что повышает выработку электрической энергии при сохранении прочих параметров. На АЭС предлагается использовать ТН для повышения степени сухости пара в последних ступенях турбины, что также дает положительный эффект.

В [21] проанализированы три варианта утилизации низкотемпературного теплового потока охлаждения конденсатора паровой турбины на парогазовой установке (ПГУ) электрической мощностью 300 МВт. Рассмотрено применение ПКТН для нагрева сетевой воды. Как следствие, возможны три сценария: вытеснение отборов паровых турбин с увеличением электрической мощности станции при сохранении расхода топлива; увеличение отпуска тепловой энергии при сохранении электрической мощности и расхода топлива на станцию; снижение расхода топлива при сохранении тепловой и электрической мощности блока ПГУ. Наибольшая экономия топлива достигается при увеличении тепловой мощности станции. В каждом варианте наблюдается снижение удельного расхода топлива на выработку электрической и тепловой энергии, но только в сценарии с увеличением электрической мощности удельный расход топлива на выработку тепловой энергии для зимнего периода остается неизменным, а для летнего возрастает на 0,5 %. Срок окупаемости инвестиций составляет менее двух лет.

На паровых котельных и ТЭС можно использовать ПКТН для подогрева подпиточной воды перед подачей в деаэрактор [22]. В качестве низкопотенциального источника тепловой энергии применяют продувочную воду котла, которая после двух ступеней сепарации подается на испаритель ТН. Такое решение позволяет снизить расход греющего пара на деаэрактор за счет более высокой температуры входящих в него потоков.

Установка ТН на блоках ПГУ дает возможность сохранить мощность станции по отпуску тепловой энергии после ее перевода с паросиловой технологии на парогазовую без установки пиковых котлов [23]. Данное решение позволяет получить систему с меньшим расходом топлива на станцию по сравнению с вариантом с установкой пиковых котлов. КПД станции благодаря ТН увеличивается на 3–5 % и зависит от климатического района размещения, т. е. от температуры наружного воздуха в отопительный период (наибольшая эффективность достигается при размещении в южных регионах). Коэффициент использования топлива при этом возрастает на 15 %. Приемлемые сроки окупаемости мероприятия имеют место при отопительных коэффициентах ПКТН от 2,9 до 3,8 в зависимости от района размещения и местных тарифов на тепловую и электрическую энергию.

При включении АБТН в схему ТЭЦ с ПГУ [24] предлагается установка дополнительной поверхности нагрева в котле-утилизаторе. Полученный поток энергии – источник высокопотенциальной теплоты для привода ТН, используемый для нагрева конденсата перед его последующим нагревом в газовом подогревателе и подачей в деаэрактор. При этом возникает дополнительный положительный эффект – увеличение тепловой мощности газового подогревателя сетевой воды (последняя поверхность нагрева по ходу дымовых газов) на 12–14 % в зависимости от режима.

Для турбоустановки Т-180/210-130 рассматривалось включение АБТН тепловой мощностью 25 МВт в схему с целью снижения температуры обратной циркуляционной воды охлаждения конденсатора и подогрева сетевой воды [25]. В результате получено относительное повышение электрического КПД станции на 2,5–12,3 %.

Внедрение теплового насоса совместно в систему регенеративного подогрева конденсата и систему подогрева сетевой воды исследовано в [23]. Для конденсационного блока ТЭС электрической мощностью 300 МВт включение АБТН в схему позволяет повысить эффективность станции на 0,1–0,9 % в зависимости от коэффициента недовыработки электрической энергии, режима работы электростанции и эффективности преобразования АБТН. Простой срок окупаемости модернизации составляет порядка трех лет. При включении ПКТН в схему ТЭС затраты электрической энергии на собственные нужды (на компрессор теплового насоса) возрастают значительно, чем мощность энергоблока, при неизменном расходе топлива на котел. Следовательно, такое решение неэффективно, снижение фактического КПД станции составляет 0,75–1,4 % для ПТУ К-300-240-2 в зависимости от схемы подключения ТН.

Для турбины К-325-23,5 выполнена оценка влияния установки АБТН и ПКТН на эффективность цикла при их работе в системе регенеративного подогрева конденсата [27]. При нагреве конденсата до 70 °С в ПКТН абсолютный электрический КПД цикла повысится на 0,7 %. В варианте с АБТН нагрев конденсата возможно осуществить до 90 °С, в качестве источника высокопотенциальной теплоты выбран пар из производственного отбора. Такое решение показало повышение абсолютного электрического КПД ПТУ на 2,6 %. В обоих вариантах в результате модернизации происходит увеличение электрической мощности станции.

Подогрев добавочной цикловой воды в ПКТН эффективен лишь при условии, что затраты электроэнергии на привод ПКТН не превышают выработку электроэнергии на потоке пара, традиционно используемого для нагрева указанного потока воды. Согласно расчетам, в зимний период данное соотношение составляет 1,8, в летний – 3,5 [28]. При подборе ПКТН следует обращать внимание на соотношение стоимости тепловой и электрической энергии и исходя из этого задавать минимальные экономически оправданные коэффициенты преобразования. Наибольшая эффективность ПКТН наблюдается при относительно невысокой температуре отпускаемой теплоты (50–70 °С) для варианта его использования для подогрева сетевой воды, а в качестве низкопотенциального источника тепловой энергии выбрана циркуляционная вода охлаждения конденсатора [29].

На Мозырской ТЭЦ предлагается установить четыре АБТН суммарной номинальной тепловой мощностью 36,2 Гкал/ч, применяемые для частичного нагрева сетевой воды и подогрева потока подпиточной химически очищенной воды [30]. Электрическая мощность станции 205 МВт, тепловая – 617 МВт. В качестве источника низкопотенциальной тепловой энергии для АБТН используется циркуляционная вода охлаждения конденсатора турбины, высокопотенциальной – пар с давлением 5 ата. Внедрение позволит снизить расход условного топлива на выработку электрической энергии на 27 г/(кВт·ч) при сохранении тепловой нагрузки и расхода топлива на станцию.

Также предложено использование АБТН для утилизации теплоты конденсации водяных паров, содержащихся в дымовых газах [31, 32]. В таком

варианте источником низкопотенциальной теплоты является контактный теплообменник или конденсационный поверхностный теплообменник охлаждения дымовых газов ниже температуры точки росы, в качестве греющего теплоносителя предлагается использовать: природный газ – на отопительных котельных, водяной пар – на производственных, горячую воду от котла-утилизатора – на мини-ТЭЦ. Таким образом увеличивается тепловая мощность энергоисточника и эффективность использования топлива.

При интеграции АБТН в схему ТЭЦ для увеличения отпускаемой тепловой мощности станции ее электрический КПД возрастает на 6–10 %, КПД использования топлива – на 5,7–7,7 %, эксергетическая эффективность – на 0,2–1,1 % в зависимости от тепловой нагрузки ТЭЦ [33].

В [34] предложен вариант внедрения АБТН в тепловую схему ТЭЦ с турбогенератором ПТ-60 при работе в теплофикационном режиме. Предполагается, что обратная сетевая вода нагревается в АБТН до 55 или 79 °С в зависимости от режима, а затем догревается до требуемой температуры паром теплофикационного отбора. В качестве привода теплового насоса используется пар из отбора с давлением 5,3 ата, отопительный коэффициент машины 1,7. При этом снижается мощность выработки электрической энергии при сохранении тепловой нагрузки за счет снижения расхода пара в отбор и, соответственно, в голову турбины. Простой срок окупаемости для прочих различных условий составляет от 2,3 до 4,9 года.

В [35] приведено сравнение эффективности применения двух типов тепловых насосов, утилизирующих низкопотенциальную энергию охлаждения конденсатора и генератора ПТ-60, с целью нагрева сетевой воды – абсорбционного и парокompрессионного ТН. Отопительные коэффициенты для принятых условий соответственно равны 1,7 и 2,8. Установлено, что положительный эффект внедрения достигается только в варианте с АБТН. Причем чем ниже удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии, тем больше получаемая системная экономия топлива.

Исследование параметров АБТН для внедрения в тепловую схему ТЭЦ с турбинами ПТ-60-130 для получения дополнительного потока на подогрев сетевой воды показало, что экономически эффективна установка машины с отопительным коэффициентом не ниже 1,7 при условии обеспечения простого срока окупаемости не более четырех лет [36]. Данное решение также обеспечивает повышение эффективности работы энергосистемы и снижает нагрузку на пиковые источники тепловой энергии, т. е. имеет положительный системный эффект. Более того, внедрение АБТН на ТЭЦ позволяет регулировать электрическую мощность станции в сторону как увеличения, так и уменьшения при неизменной тепловой мощности [37].

ВЫВОДЫ

1. Использование значительного потенциала низкотемпературных тепловых потоков на тепловых электрических станциях актуально и перспективно, а их утилизация целесообразна лишь с применением теплонасосных установок.

2. При структурно-параметрической оптимизации схем по критерию термодинамической эффективности (для паротурбинной установки), а также возможного изменения состава теплообменников котлоагрегата важное значение имеют вопросы выбора: температуры нагрева конденсата при заданных температурах потоков утилизации, обеспечивающей наибольшее значение

отопительного коэффициента теплонасосной установки, интегрируемой в состав блока; теплоносителя и его параметров для привода теплонасосных установок (паровой теплоноситель; горячая вода соответствующей температуры; дымовые газы непосредственно котлоагрегатов с температурой, обеспечивающей решение сопряженных задач; прямое сжигание природного газа для привода абсорбционных бромисто-литиевых тепловых насосов).

3. Решение данной задачи, в первую очередь, актуально для тех ТЭЦ объединенной энергосистемы Республики Беларусь, где невозврат конденсата составляет 30–100 % и доминируют турбины ПТ-60, ПТ-65, ПТ-70, ПТ-80, например для Гродненской, Мозырской и Новополоцкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Energy Use per Person [Electronic Resource] // Our World in Data. Mode of access: https://ourworldindata.org/grapher/per-capita-energy-use?tab=chart&country=~OWID_WRL. Date of access: 14.02.2022.
2. Ritchie, H. Belarus: Energy Country Profile [Electronic Resource] / H. Ritchie, M. Roser // Our World in Data. Mode of access: <https://ourworldindata.org/energy/country/belarus?country=~BLR>. Date of access: 4.06.2022.
3. Ritchie, H. Electricity Mix [Electronic Resource] / H. Ritchie, M. Roser // Our World in Data. Mode of access: <https://ourworldindata.org/electricity-mix#fossil-fuels-what-share-of-electricity-comes-from-fossil-fuels>. Date of access: 14.02.2022.
4. Годовые данные [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/realny-sector-ekonomiki/energeticheskaya-statistika/anual-dannye/>. Дата доступа: 14.02.2022.
5. Производство электрической энергии [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://belenergo.by/content/deyatelnost-obedineniya/proizvodstvo-elektricheskoy-energii/>. Дата доступа: 14.02.2022.
6. Воронов, Е. О. К вопросу оценки термодинамической эффективности Белорусской энергосистемы / Е. О. Воронов, В. Н. Романюк, В. А. Седнин // Энергия и менеджмент. 2016. № 3. С. 2–7.
7. Казаков, В. Г. Эксергетические методы оценки эффективности теплотехнических установок / В. Г. Казаков. СПб., 2013. 93 с.
8. Муслина, Д. Б. Научно-методическое обеспечение модернизации теплоэнергетических систем текстильных и трикотажных предприятий легкой промышленности: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14 / Д. Б. Муслина. Минск, 2016. 172 с.
9. Маслеева, О. В. Тепловое загрязнение окружающей среды объектами малой энергетики / О. В. Маслеева, А. Г. Воеводин, Г. В. Пачурин // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. № 5–1. С. 26–30.
10. Zhang, H. S. Performance Analysis of the Coal-Fired Power Plant with Combined Heat and Power (CHP) Based on Absorption Heat Pumps / H. S. Zhang, H. B. Zhao, Z. L. Li // Journal of the Energy Institute. 2016. Vol. 89, No 1. P. 70–80. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2015.01.009>.
11. Tianle, Hu. Simulation Research on a Variable-Lift Absorption Cycle and its Application in Waste Heat Recovery of Combined Heat and Power System / Tianle Hu, Xiaoyun Xie, Yi Jiang // Energy. 2017. Vol. 140. P. 912–921. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.09.002>.
12. A New Waste Heat District Heating System Combined Heat and Power (CHP) Based on Ejector Heat Exchangers and Absorption Heat Pumps / Fangtian Sun [et al.] // Energy. 2014. Vol. 69. P. 516–524. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.03.044>.
13. New Waste Heat District Heating System with Combined Heat and Power Based on Absorption Heat Exchange Cycle in China / Fangtian Sun [et al.] // Energy. 2012. Vol. 37. P. 136–144. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.11.007>.
14. Pashka, B. Exergy Method in Combined System of Heat Supply Thermal Power Station with District's Heat Pump / B. Pashka // International Forum on Strategic Technology, IFOST. 2013. Vol. 2. P. 485–487. <https://doi.org/10.1109/ifost.2013.6616923>.
15. Industrial Waste Heat Recovery Technologies: An Economic Analysis of Heat Transformation Technologies / S. Brückner [et al.] // Applied Energy. 2015. Vol. 151. P. 157–167. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.147>.
16. Altai Sh. Alimgazin. Heat Pump in a New Modular Configuration to Recover Low-Grade Heat Emissions at Enterprises / Altai Sh. Alimgazin, Saule G. Alimgazina, Mikhail G. Zhumagulov // E35 Web of Conferences. 2020. Vol. 178. P. 1–5. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017801003>.

17. Дуванов, С. А. Исследование работы тепловых насосов на режимах, отличных от номинального, при сохранении выходных параметров: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14 / С. А. Дуванов. Астрахань, 2006. 196 л.
18. Артёмченко, К. И. Структурно-параметрическая оптимизация системы автоматического управления мощностью энергоблоков 300 МВт в широком диапазоне изменения нагрузок / К. И. Артёмченко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 5. С. 469–481. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-469-481>.
19. Кулаков, Г. Т. Системный анализ научно-технической информации по системам автоматического управления мощностью энергоблоков / Г. Т. Кулаков, К. И. Артёмченко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 5. С. 446–458. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-5-446-458>.
20. Анализ использования тепловых насосов на тепловых и атомных электростанциях / Н. Н. Ефимов [и др.] // Известия ВУЗов. Северо-кавказский регион. Серия: Технические науки. 2010. № 4. С. 35–39.
21. Тепловые насосы в схемах деаэрации подпиточной воды ТЭЦ / И. Д. Аникина [и др.] // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2016. Вып. 243, № 2. С. 24–33. <https://doi.org/10.5862/jest.243.3>.
22. Плевако, А. П. Возможность использования тепловых насосов на ТЭС и котельных / А. П. Плевако, Г. Б. Чернетченко // Наука и техника Казахстана. 2008. № 1. С. 61–64.
23. Олейникова, Е. Н. Исследование и оптимизация теплонасосных установок в структуре схем ПГУ-ТЭЦ: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14 / Е. Н. Олейникова. М., 2015. 158 л.
24. Повышение эффективности парогазовой установки с котлом-утилизатором за счет включения в схему абсорбционного преобразователя теплоты / Р. Н. Валиев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19, № 11–12. С. 101–111.
25. Шидловская, Д. К. Применение абсорбционных тепловых насосов в тепловой схеме турбоустановки Т-180/210-130 / Д. К. Шидловская, Г. Д. Седельников // Международный студенческий научный вестник. 2016. № 3, Ч. 2. С. 270–271.
26. Янченко, И. В. Влияние абсорбционного теплового насоса на тепловую экономичность ТЭС и АЭС: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14 / И. В. Янченко. Новочеркасск, 2015. 180 л.
27. Курнакова, Н. Ю. О возможности повышения энергоэффективности тепловой схемы ТЭС с применением теплового насоса / Н. Ю. Курнакова, А. В. Нуждин, А. А. Волохонский // Вестник ИрГТУ. 2018. Вып. 22, № 7. С. 114–122. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-7-114-122>.
28. Шаталов, И. К. Подогрев добавочной цикловой воды с помощью ТНУ / И. К. Шаталов, Ю. А. Антипов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2004. № 1. С. 60–65.
29. Чепурной, М. Н. Применение парокompрессионных теплонасосных установок для утилизации сбросной теплоты конденсаторов паровых турбин / М. Н. Чепурной, Н. В. Резидент // Навукові праці ВНТУ. 2013. № 4. С. 1–7.
30. Романюк, В. Н. Абсорбционные тепловые насосы на ТЭЦ Белорусской ОЭС на примере Мозырской ТЭЦ / В. Н. Романюк, А. А. Бобич // Энергия и менеджмент. 2015. № 1. С. 4–11.
31. Седнин, В. А. К вопросу о повышении эффективности отопительных котельных и мини-ТЭЦ / В. А. Седнин, Д. М. Райко, В. М. Левин // Энергия и менеджмент. 2015. № 1. С. 12–17.
32. Романюк, В. Н. Развитие энергосбережения на котельных за счет утилизации низкотемпературных тепловых потоков охлаждения уходящих дымовых газов / В. Н. Романюк, А. А. Бобич // Энергоэффективность. 2020. № 8. С. 7–14.
33. Романюк, В. Н. Численное исследование тепловых схем ТЭЦ с помощью их топологических моделей / В. Н. Романюк, А. А. Бобич // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2016. Т. 59, № 4. С. 376–390. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-4-376-390>.
34. Абсорбционные тепловые насосы в тепловой схеме ТЭЦ для повышения ее энергетической эффективности / В. Н. Романюк [и др.] // Энергия и менеджмент. 2013. № 1. С. 14–19.
35. Романюк, В. Н. Абсорбционные или парокompрессионные тепловые насосы в схемах ТЭЦ / В. Н. Романюк, А. А. Бобич, С. В. Мальков // Энергия и менеджмент. 2013. № 4. С. 18–21.
36. Романюк, В. Н. Обоснование параметров АБТН для утилизации ВЭР на ТЭЦ с помощью пассивного эксперимента и определение соответствующих изменений различных оценок работы энергосистемы / В. Н. Романюк, А. А. Бобич // Энергия и менеджмент. 2016. № 1. С. 14–23.
37. Романюк, В. Н. Время применения абсорбционных бромисто-литиевых тепловых насосов на ТЭЦ Беларуси / В. Н. Романюк, А. А. Бобич // Энергия и менеджмент. 2017. № 2. С. 2–5.

38. Бобич, А. А. Комплекс энергосберегающих мероприятий на ТЭЦ при адаптации к условиям работы энергосистемы с вводом Белорусской АЭС: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14 / А. А. Бобич. Минск, 2018. 224 л.

Поступила 27.06.2022 Подписана в печать 30.08.2022 Опубликовано онлайн 30.11.2022

REFERENCES

1. Energy Use per Person. *Our World in Data*. Available at: https://ourworldindata.org/grapher/per-capita-energy-use?tab=chart&country=~OWID_WRL (accessed 14 February 2022).
2. Ritchie H., Roser M. (2020) Belarus: Energy Country Profile. *Our World in Data*. Available at: <https://ourworldindata.org/energy/country/belarus?country=~BLR> (accessed 4 July 2022).
3. Ritchie H., Roser M. (2020) Electricity Mix. *Our World in Data*. Available at: <https://ourworldindata.org/electricity-mix#fossil-fuels-what-share-of-electricity-comes-from-fossil-fuels> (accessed 14 February 2022).
4. *Annual Data*. Available at: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/realny-sector-ekonomiki/energeticheskaya-statistika/annual-dannye> (accessed 14 February 2022) (in Russian).
5. Production of Electrical Energy [Electronic Resource]. Mode of access: <https://belenergo.by/content/deyatelnost-obedineniya/proizvodstvo-elektricheskoy-energii> (accessed 14 February 2022) (in Russian).
6. Voronov E. O., Romanyuk V. N., Sednin V. A. (2016) On the Issue of Assessing the Thermodynamic Efficiency of the Belarusian Energy System. *Energiya i Menedzhment* [Energy and Management], (3), 2–7 (in Russian).
7. Kazakov V. G. (2013) *Exergetic Methods for Evaluating the Efficiency of Heat Engineering Installations*. Saint-Petersburg. 93 (in Russian).
8. Muslina D. B. (2016) *Scientific and Methodological Support for the Modernization of Thermal Power Systems of Textile and Knitwear Enterprises of Light Industry*. Minsk. 172 (in Russian).
9. Masleeva O. V., Voevodin A. G., Pachurin G. V. (2014) Thermal Pollution of the Environment by Small-Scale Energy Facilities. *Mezhdunarodnyy Zhurnal Prikladnykh i Fundamentalnykh Issledovaniy* [International Journal of Applied and Fundamental Research], (5–1), 26–30 (in Russian).
10. Zhang H. S., Zhao H. B., Li Z. L. (2016) Performance Analysis of the Coal-Fired Power Plant with Combined Heat and Power (CHP) Based on Absorption Heat Pumps. *Journal of the Energy Institute*, 89 (1), 70–80. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2015.01.009>.
11. Hu T., Xie X., Jiang Y. (2017) Simulation Research on a Variable-Lift Absorption Cycle and its Application in Waste Heat Recovery of Combined Heat and Power System. *Energy*, 140, 912–921. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.09.002>.
12. Sun F., Fu L., Sun J., Zhang S. (2014) A New Waste Heat District Heating System with Combined Heat and Power (CHP) Based on Ejector Heat Exchangers and Absorption Heat Pumps. *Energy*, 69, 516–524. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.03.044>.
13. Sun F., Fu L., Zhang S., Sun J. (2012) New Waste Heat District Heating System with Combined Heat and Power Based on Absorption Heat Exchange Cycle in China. *Applied Thermal Engineering*, 37, 136–144. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.11.007>.
14. Pashka B. (2013) Exergy Method in Combined System of Heat Supply Thermal Power Station with District's Heat Pump. *International Forum on Strategic Technology, IFOST*, 2, 485–487. <https://doi.org/10.1109/ifost.2013.6616923>.
15. Brückner S., Liu S., Miró L., Radspieler M., Cabeza L. F., Lävemann E. (2015) Industrial Waste Heat Recovery Technologies: An Economic Analysis of Heat Transformation Technologies. *Applied Energy*, 151, 157–167. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.147>.
16. Alimgazin A. Sh., Alimgazina S. G., Zhumagulov M. G. (2020) Heat Pump in a New Modular Configuration to Recover Low-Grade Heat Emissions at Enterprises. *E3S Web of Conferences*, 178, 01003. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017801003>.
17. Duvanov S. A. (2006) *Investigation of the Operation of Heat Pumps in Modes Other Than Nominal While Maintaining Output Parameters*. Astrakhan. 196 (in Russian).
18. Artsiomenka K. I. (2019) Structural-and-Parametric Optimization of Automatic Control System for Power Units of 300 MW in Wide Range of Load Variations. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (5) 469–481. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-5-469-481> (in Russian).
19. Kulakov G. T., Artsiomenka K. I. (2017) System Analysis of Scientific-and-Technical Information in Automatic Control System of Power Units Wattage. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (5), 446–458. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-5-446-458> (in Russian).

20. Efimov N. N., Papin V. V., Malyshev P. A., Bezuglov R. V. (2010) Analysis of the Use of Heat Pumps in Thermal and Nuclear Power Plants. *Izvestiya Vuzov. Severo-Kavkazskii Region. Seriya: Tekhnicheskie Nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Technical Sciences*, (4), 35–39 (in Russian).
21. Anikina I. D., Sergeev V. V., Amosov N. T., Luchko M. G. (2016) Heat Pumps in Schemes of Make-Up Water Deaeration in a Thermal Power Plant. *Nauchno-Tekhnicheskie Vedomosti Sankt-Peterburgskogo Gosudarstvennogo Politehnicheskogo Universiteta = St. Petersburg State Polytechnical University Journal*, 243 (2), 24–33. <https://doi.org/10.5862/jest.243.3> (in Russian).
22. Plevako A. P., Chernetchenko G. B. (2008) The Possibility of Using Heat Pumps at Thermal Power Plants and Boiler Houses. *Nauka i Tekhnika Kazakhstana = Science and Technology of Kazakhstan*, (1), 61–64 (in Russian).
23. Oleynikova E. N. (2015) *Research and Optimization of Heat Pump Installations in the Structure of CCGT-CHP Schemes*. Moscow. 158 (in Russian).
24. Valiev R. N., Ziganshin S. G., Vankov U. V., Garipov R. R. (2017) Improving the Efficiency of the Combined Cycle Plant with Heatrecovery Boiler due to the Inclusion in the Scheme of Absorption. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Problemy Energetiki = Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, 19 (11–12), 101–111 (in Russian).
25. Shidlovskaya D. K., Sedel'nikov G. D. (2016) Application of Absorption Heat Pumps in the Thermal Scheme of the T-180/210-130 Turbine Unit. *Mezhdunarodnyi Studencheskii Nauchnyi Vestnik [International Student Research Bulletin]*, (3, Part 2), 270–271 (in Russian).
26. Yanchenko I. V. (2015) *The Influence of an Absorption Heat Pump on the Thermal Efficiency of Thermal Power Plants and Nuclear Power Plants*. Novocherkassk. 180 (in Russian).
27. Kurnakova N. Yu., Nuzhdin A. V., Volokhonsky A. A. (2018) On the Possibility to Improve the Energy Efficiency of the CHP Heat Balance Diagram Using a Heat Pump. *Vestnik Irkutskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 22 (7), 114–122. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-7-114-122> (in Russian).
28. Shatalov I.K., Antipov Yu. A. (2004) Heating of Additional Cyclic Water with the Help of Heat Pump Installations. *Vestnik Rossiiskogo Universiteta Druzhby Narodov. Seriya: Inzhenernyye Issledovaniya = RUDN Journal of Engineering Research*, (1), 60–65 (in Russian).
29. Chepyrniy M. N., Rezydent N. V. (2013) Application of Steam Compression Thermal Pumping Plants for Utilization of the Discharged Heat of Steam Turbines Condensers. *Scientific Works of Vinnytsia National Technical University*, (4), 1–7.
30. Romaniuk V. N., Bobich A. A. (2015) Absorption Heat Pumps at the CHPP of the Belarusian Unified Energy System on the Example of the Mozyr CHPP. *Energiya i Menedzhment [Energy and Management]*, (1), 4–11 (in Russian).
31. Sednin V. A., Raiko D. M., Levin V. M. (2015) On the Issue of Improving the Efficiency of Heating Boilers and Mini-CHP. *Energiya i Menedzhment [Energy and Management]*, (1), 12–17 (in Russian).
32. Romaniuk V. N., Bobich A. A. (2020) Development of Energy Saving in Boiler Houses Due to Utilization of Low-Temperature Heat Flows of Cooling of Outgoing Flue Gases. *Energoeffektivnost' [Energy Efficiency]*, (8), 7–14 (in Russian).
33. Romaniuk V. N., Bobich A. A. (2016) Numerical Study of Thermal Schemes of Thermal Power Plants Fulfilled with the Aid of Their Topological Models. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 59 (4), 376–390. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-4-376-390> (in Russian).
34. Romanyuk V. N., Muslina D. B., Bobich A. A., Kolomytskaya N. A., Bubyr' T. V., Mal'kov S. V. (2013) Absorption Heat Pumps in the Thermal Scheme of a Thermal Power Plant to Increase its Energy Efficiency. *Energiya i Menedzhment [Energy and Management]*, (1), 14–19 (in Russian).
35. Romaniuk V. N., Bobich A. A., Mal'kov S. V. (2013) Absorption or Vapor Compression Heat Pumps in CHP Circuits. *Energiya i Menedzhment [Energy and Management]*, (4), 18–21 (in Russian).
36. Romaniuk V. N., Bobich A. A. (2016) Substantiation of the Absorption Bromide Lithium Heat Pump Parameters for the Utilization of PWR at a Thermal Power Plant Using a Passive Experiment and Determination of the Corresponding Changes in Various Estimates of the Operation of the Power System. *Energiya i Menedzhment [Energy and Management]*, (1), 14–23 (in Russian).
37. Romaniuk V. N., Bobich A. A. (2017) The Time of Application of Absorption Bromide Lithium Heat Pumps at the CHP of Belarus. *Energiya i Menedzhment [Energy and Management]*, (2), 2–5 (in Russian).
38. Bobich A. A. (2018) *The Complex of Energy-Saving Measures at the CHP Plant when Adapting to the Operating Conditions of the Power System with the Commissioning of the Belarusian NPP*. Minsk. 224 (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-524-538>

УДК 620.97

Анализ эффективности технологий извлечения диоксида углерода из продуктов сгорания

В. А. Седнин¹⁾, Р. С. Игнатович¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. Основная цель статьи – сравнение и анализ существующих технологий извлечения диоксида углерода из продуктов сгорания мини-ТЭЦ, работающих на местных видах топлива. Представлен краткий обзор основных технических особенностей реализации технологий извлечения углекислоты из газовых смесей. Показаны особенности и ограничения применения каждого из методов. На базе программных пакетов Aspen Hysys и Aspen Adsorption выполнено математическое моделирование технологических процессов адсорбции, физической и химической абсорбции. При моделировании адсорбционных процессов рассматривался состав продуктов сгорания, характерный для реальных условий работы энергоисточника на древесной щепе, а при моделировании адсорбционного процесса состав продуктов сгорания имитировался бинарной смесью из диоксида углерода и азота с мольным содержанием 11 и 89 % соответственно. Полученные результаты численного исследования показали, что наибольшая степень извлечения диоксида углерода из продуктов сгорания составляет 97 % и достигается в оптимальном режиме реализации технологии химической абсорбции. При этом же методе наблюдается наибольшая степень чистоты полученного диоксида углерода: 86 % с учетом паров воды и 99 % сухого. Наименее эффективной технологией извлечения углекислоты оказался метод физической абсорбции, при котором степень чистоты полученного сухого диоксида углерода составила 79 %. Следовательно, для получения диоксида углерода с незначительным содержанием примесей необходимо применять метод химической абсорбции. Технология физической абсорбции в неподвижном слое может использоваться для снижения выбросов энергоисточника или в случаях, когда степень чистоты углекислоты не имеет значения.

Ключевые слова: улавливание диоксида углерода, физическая абсорбция, химическая абсорбция, адсорбция, математическая модель, Aspen Hysys, Aspen Adsorption, местные виды топлива, экология, моноэтаноламин, адсорбция при переменной температуре, энерготехнологическая установка

Для цитирования: Седнин, В. А. Анализ эффективности технологий извлечения диоксида углерода из продуктов сгорания / В. А. Седнин, Р. С. Игнатович // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 6. С. 524–538. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-524-538>

Analysis of the Efficiency of Technologies for Extraction Carbon Dioxide from Combustion Products

V. A. Sednin¹⁾, R. S. Ignatovich¹⁾

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

Abstract. The main purpose of the article is to compare and analyze existing technologies for extracting carbon dioxide from combustion products in relation to mini-CHP plants operating

Адрес для переписки

Седнин Владимир Александрович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-92-16
pte@bntu.by

Address for correspondence

Sednin Vladimir A.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-92-16
pte@bntu.by

on local fuels. The article presents a brief overview of the main technical features of the implementation of carbon dioxide extraction technologies from gas mixtures. The specific features and limitations for each of the methods are shown. Mathematical modeling of technological processes of adsorption, physical and chemical absorption is carried out on the basis of Aspen Hysys and Aspen Adsorption software packages. When modeling absorption processes, the composition of combustion products characteristic of the actual operating conditions of an energy source on wood chips was considered, while for the adsorption process, the composition of combustion products was simulated by a binary mixture of carbon dioxide and nitrogen with a molar content of 11 and 89 %, respectively. The results of numerical research that were obtained have shown that the highest degree of carbon dioxide extraction from combustion products is 97 %, and it is achieved in the optimal mode of implementation of chemical absorption technology. With the same method, the highest degree of purity of the resulting carbon dioxide is observed, viz. 86 % taking into account water vapor and 99 % if it is dry. The least effective technology for extracting carbon dioxide was the method of physical absorption in a fixed bed, in which the degree of purity of the resulting dry carbon dioxide was 79 %. Therefore, for practical use in the deep utilization of combustion products of mini-CHP plants operating on local fuels, to obtain carbon dioxide with a low content of impurities, it is necessary to apply the method of chemical absorption. The use of physical absorption technology in a fixed bed can be used to reduce energy source emissions or in cases where the degree of purity of carbon dioxide does not matter.

Keywords: carbon dioxide capture, physical absorption, chemical absorption, adsorption, mathematical model, Aspen Hysys, Aspen Adsorption, local fuels, ecology, monoethanolamine, temperature swing adsorption, energy-and-technology installation

For citation: Sednin V. A., Ignatovich R. S. (2022) Analysis of the Efficiency of Technologies for Extraction Carbon Dioxide from Combustion Products. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 65 (6), 524–538. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-524-538> (in Russian)

Введение

В рамках расширения использования потенциала местных видов топлива (МВТ) [1] и снижения выбросов парниковых газов в атмосферу [2–4] целесообразно предусматривать применение на теплоисточниках технологий по глубокой утилизации продуктов сгорания с извлечением диоксида углерода для дальнейшего его использования в промышленных приложениях или для производства синтетического природного газа.

Наиболее распространены три промышленных метода извлечения углекислоты из продуктов сгорания: физический (в частности, метод водной абсорбции), химический (метод абсорбции водным раствором моноэтаноламина (МЭА) или диэтаноламина (ДЭА)) и адсорбционный [5, 6]. Существуют и другие технологии извлечения CO_2 [7, 8], но они не нашли широкого промышленного применения, поэтому в данном исследовании не рассматриваются.

Цель статьи – сравнение и анализ эффективности применения сорбционных методов извлечения CO_2 из продуктов сгорания МВТ на основе расчетных моделей, построенных в программных комплексах Aspen Hysys и Aspen Adsorption.

Основная часть

В разработанных моделях с применением технологий физической и химической абсорбции использован один и тот же набор исходных данных: дымовые газы (ДГ), полученные в результате сжигания древесной щепы по данным реального энергоисточника, технологическая схема которого включает в качестве основного оборудования два котла с топкой кипящего слоя, паротурбинную установку, работающую на органическом цикле Ренкина, и подогреватель сетевой воды. Параметры потока ДГ представлены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные параметры потока дымовых газов перед извлечением CO₂
при теплотворной способности топлива $Q_{н}^p = 7,95$ МДж/кг (1900 ккал/кг)

Initial flue gases flow parameters before CO₂ extraction
when calorific value of fuel $Q_{н}^p = 7.95$ MJ/kg (1900 kcal/kg)

Тепловая мощность топки котла, МВт	Массовый расход дымовых газов, т/ч	Температура уходящих газов, °С	Давление, бар	Состав дымовых газов при расчете абсорбции, мол. %				
				N ₂	CO ₂	H ₂ O	O ₂	SO ₂
5,1	1,99	110	1,3	70,57	11,15	13,90	4,33	0,05

В адсорбционном процессе для упрощения модели состав дымовых газов принят бинарным – из диоксида углерода и азота с мольным содержанием 89 и 11 % соответственно.

Принципиальная схема мини-ТЭЦ, работающей на МВт, с дополнительным блоком извлечения CO₂ представлена на рис. 1.

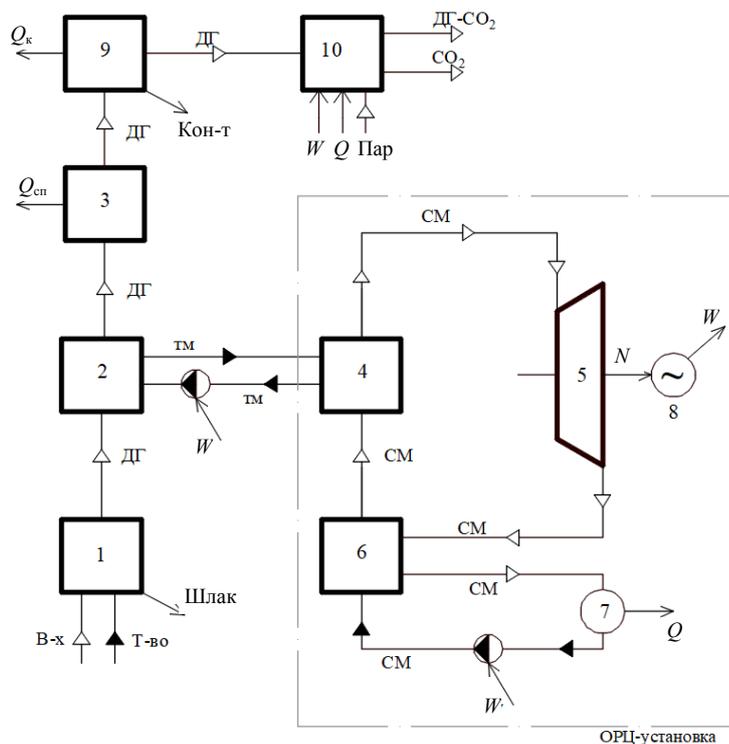


Рис. 1. Принципиальная схема энергоисточника с блоком извлечения CO₂:
1 – топка котла; 2 – подогреватель термомасла; 3 – водяной подогреватель; 4 – испаритель;
5 – паровая турбина; 6 – регенеративный подогреватель; 7 – сетевой подогреватель;
8 – генератор; 9 – конденсационный экономайзер; 10 – блок извлечения CO₂;

Fig. 1. Schematic diagram of an energy source with a CO₂ extraction unit:
1 – boiler furnace; 2 – thermal oil heater; 3 – water heater; 4 – vaporizer; 5 – steam turbine;
6 – regenerative heater; 7 – network water heater; 8 – generator;
9 – condensing economizer; 10 – CO₂ extraction unit

На рис. 1 приняты следующие обозначения: В-х – воздух; Т-во – топливо;
 Q – мощность тепловая потока, отводимого от сетевого теплообменника;

$Q_{\text{сп}}$ – то же, отводимого от водяного теплообменника; $Q_{\text{к}}$ – то же, отводимого от конденсационного экономайзера; Кон-т – конденсат; W – мощность подводимой (отводимой) электроэнергии; СМ – рабочее тело паросиловой установки; N – мощность механической энергии; ТМ – термомасло.

Физический метод извлечения CO_2 из продуктов сгорания

Принципиальная схема простейшей системы извлечения углекислоты из ДГ водой достаточно проста [9]. Дымовые газы с помощью струйного аппарата поступают в контур с абсорбентом (водой высокого давления). Образовавшаяся смесь направляется в абсорбер (насадочный скруббер), в котором процесс абсорбции ведут при 1,6–3,0 МПа [9–11]. Поскольку оптимальным признано давление абсорбции 3,0 МПа [11], данная величина в дальнейшем использовалась в численном эксперименте. В абсорбере часть газов растворяется в воде и отправляется далее, нерастворенные газы выбрасываются в атмосферу. В результате абсорбции в воде растворяется не только углекислота, но и другие составляющие продуктов сгорания, но их доля в смеси несопоставимо меньше. Сама же углекислота находится преимущественно в свободном состоянии, а невысокая температура снижает воздействие коррозии от повышенной кислотности среды.

Для оценки необходимости охлаждения ДГ перед стадией извлечения диоксида углерода [9] определяют расход воды, требуемый для извлечения заданного количества углекислоты, и из теплового баланса оценивают температуру смеси ДГ и воды. Если эта величина выше 30–50 °С, то ДГ дополнительно охлаждают. В таком случае целесообразна установка конденсационного экономайзера для охлаждения ДГ до температуры ниже точки росы. В предложенной модели температура ДГ снижается в экономайзере до 35 °С. Для десорбции CO_2 из воды ее давление понижают до 0,1 МПа: сначала для этого поток воды, насыщенный углекислым газом, пропускают через водяную турбину, образующуюся при этом энергию используют для привода насоса, тем самым рекуперируется часть энергии, затрачиваемой на создание давления в струйном аппарате.

Следует отметить, что количество производителей гидротурбинного оборудования малой мощности ограничено, а его стоимость достигает 1500–2000 дол./кВт [12]. В связи с этим экономическая эффективность установки гидротурбины уменьшается. Альтернативой может быть использование в качестве гидротурбин относительно недорогих серийно выпускаемых насосов, что обеспечит более быструю окупаемость при работе блока извлечения CO_2 из продуктов сгорания [13].

Для предотвращения явлений кавитации при выделении растворенного углекислого газа степень понижения давления в турбине ограничена, что снижает эффективность рекуперации. В модели давление за турбиной принимали равным 0,7 МПа. После турбины давление снижается до атмосферного в сепараторе, в результате чего выделяется растворенный в воде газ. Степень чистоты полученного углекислого газа варьируется, а помимо CO_2 в смеси присутствует незначительное количество азота, паров воды и оксидов серы.

На рис. 2 представлена модель водной абсорбции углекислоты, полученная в Aspen Hysys v10 (математический пакет свойств Sour PR). Поскольку в стандартных элементах программы отсутствует эжектор, он заменен набором элементов (выделены прямоугольником).

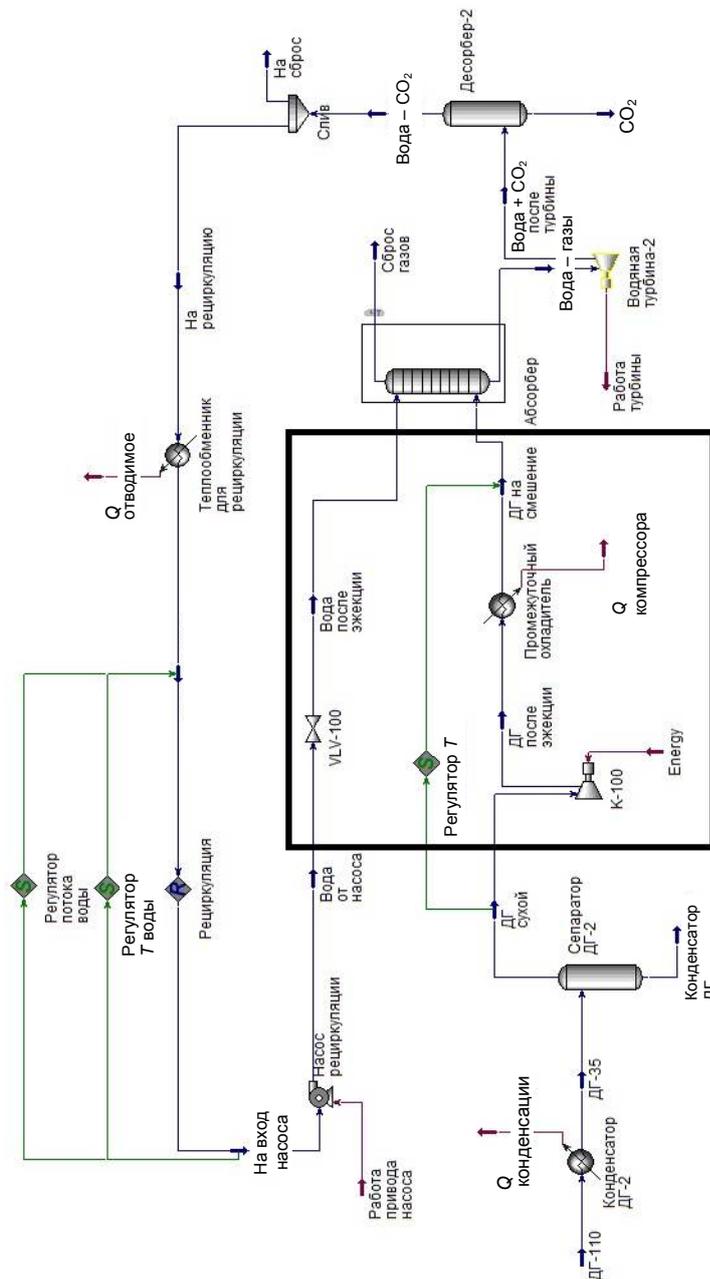


Рис. 2. Схема модели водной абсорбции CO_2 в Aspen Hysys
 Fig. 2. Scheme of the CO_2 water absorption model in Aspen Hysys

В модели поток дымовых газов (ДГ-110) поступает в конденсатор, где их температура снижается ниже точки росы (ДГ-35) 35°C , для отделения образовавшейся капельной жидкости установлен сепаратор в виде аппарата идеального разделения жидкости и газа. Осушенный поток ДГ после сепаратора (ДГ сухой) направляется в компрессор (К-100), предназначенный для повышения давления в струйном аппарате до требуемого давления. Для охлаждения потока после компрессора предусмотрен холодильник (промежуточный охладитель), температура газов за которым устанавливается регулятором (регулятор T) на уровне температуры за сепаратором. Далее

поток ДГ высокого давления (ДГ на смешение) направляется в абсорбер, в котором извлекается углекислый газ, а поток нерастворившихся газов (сброс газов) сбрасывается в атмосферу.

Для имитации понижения давления воды после эжектора с 3,0 до 2,8 МПа на линии подачи после насоса рециркуляции устанавливается регулятор давления (VLV-100). Поток воды с растворенными газами направляется в водяную турбину (водяная турбина – 2), полученный после нее поток (вода + CO₂ после турбины) следует в сепаратор атмосферного давления (десорбер-2). После десорбера поток воды (вода – CO₂) направляется на рециркуляцию в насос. Для осуществления регенерации в программе Aspen Hysys предусмотрен специальный элемент – рециркуляция. Принцип его работы основан на том, что термодинамические параметры на его входе и выходе (температура, давление, расход) должны быть одинаковыми, а компонентный состав на выходе из элемента – соответствовать компонентному составу на входе. Для выполнения данных ограничений устанавливается разделитель (слив), позволяющий контролировать массовый расход перед рециркуляцией, а также теплообменник (теплообменник для рециркуляции), регулирующий температуру потока. На рис. 3 представлены графики зависимостей, полученных в расчетной модели водной абсорбции CO₂ из продуктов сгорания.

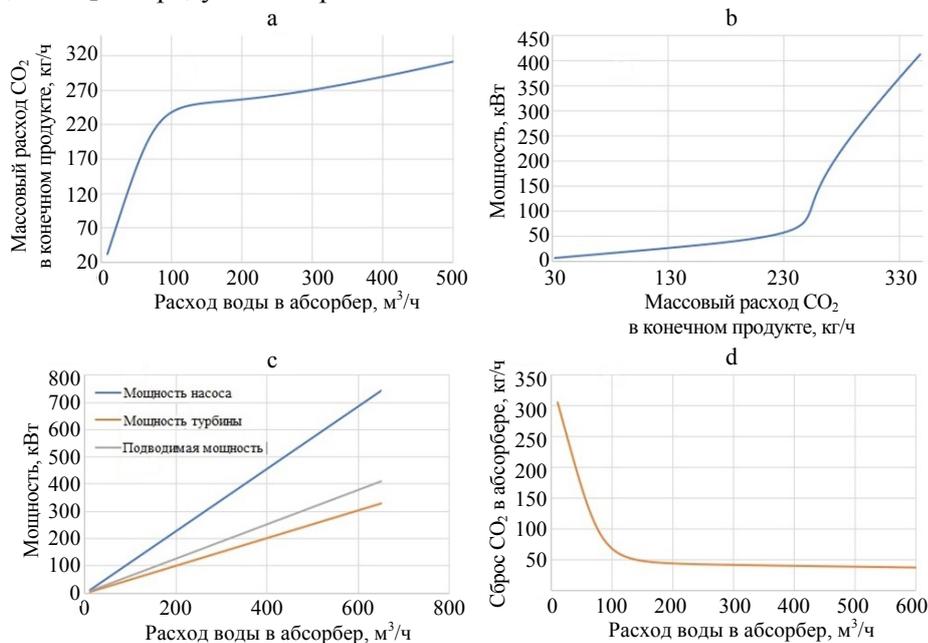


Рис. 3. Аналитические зависимости при водной абсорбции CO₂:

- a – массового расхода CO₂ в конечном продукте от расхода воды в абсорбере;
- b – подводимой работы от массового расхода CO₂ в конечном продукте;
- c – затрачиваемой работы от расхода воды в абсорбере;
- d – сброса CO₂ в абсорбере от расхода воды

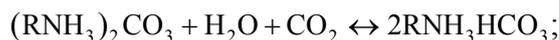
Fig. 3. Analytical dependences for water absorption of CO₂:

- a – mass flow rate of CO₂ in the final product on the flow rate of water in the absorber;
- b – input work on the mass flow of CO₂ in the final product;
- c – input work on the water flow in the absorber;
- d – CO₂ discharge in the absorber on the water flow

Анализ результатов показывает, что оптимальная зона производства CO_2 в заданных условиях по критерию энергетических затрат лежит в пределах от 30 до 230 кг/ч (зона линейного роста затрачиваемой работы на привод насоса). Характер зависимости связан с абсорбционной способностью воды при заданном в модели давлении, так как само по себе увеличение затрачиваемой работы на привод насоса от количества воды имеет линейный характер.

Химический метод извлечения CO_2 из продуктов сгорания

Абсорбция CO_2 из ДГ химическим методом основана на протекании химической реакции. Молекулы газа вступают в реакцию с активным веществом МЭА при низкой температуре, и происходит их абсорбция. Для извлечения из раствора амина газов осуществляется его нагрев, в результате чего происходит десорбция. Данная реакция имеет вид [11]:



Принципиальная схема химической абсорбции МЭА может быть представлена следующим образом [10]. Дымовые газы после экономайзера котла направляются в холодильник (в случае химической абсорбции раствором МЭА применяются контактный холодильник), до и после которого чаще всего устанавливают скрубберы для очистки газа от твердых частиц. Температура ДГ в холодильнике может опускаться ниже точки росы. После очистки и охлаждения ДГ направляются в абсорбер. Температура газов на входе в абсорбер не должна превышать 60–70 °С, поскольку данный диапазон является граничным между процессами адсорбции – десорбции при атмосферном давлении. Колебание температуры ДГ на входе от 30 до 60 °С существенно не влияет на абсорбцию, но на практике стремятся использовать как можно более низкую температуру [10], так как при ее возрастании увеличиваются потери МЭА. Если давление перед абсорбером ниже атмосферного (наиболее распространенный случай), для его повышения устанавливается вентилятор. На практике абсорберы выполняются в виде насадочных колонн. Дымовые газы поступают в них снизу и поднимаются вверх. Холодный раствор амина подается и разбрызгивается в верхней части абсорбера навстречу дымовым газам, при этом происходят приведенные выше реакции поглощения CO_2 из ДГ. На практике применяют растворы концентрацией МЭА по массе от 8 до 13 %, для продуктов сгорания твердого и жидкого топлива – 13 % [10]. Соотношение раствора и дымовых газов на входе в абсорбер составляет 6–14 л/м³.

Обогащенный раствор амина насосом подается в десорбер, состоящий из двух частей: подогревателя и дефлегматора. Греющим теплоносителем

(чаще всего используют водяной пар) осуществляется нагрев раствора амина, в результате чего извлекаются растворенные в нем газы, а также пары воды и амина. Оптимальными параметрами проведения процесса десорбции по энергетической эффективности с учетом ограничений химических свойств амина и степени извлечения газов считаются давление 170–230 кПа и температура 115–123 °С [10]. Извлеченные в десорбере газы сепарируются и охлаждаются. Обедненный горячий раствор охлаждается, а затем направляется на рециркуляцию в абсорбер. Для охлаждения потока обедненного раствора амина и экономии теплоты, подводимой для десорбции, используют промежуточный теплообменник (регенератор), в котором теплота потока после десорбера передается обогащенному раствору, идущему в него.

На рис. 4 представлена принципиальная схема модели химической абсорбции раствором МЭА, созданной в программе Aspen Hysys (использован пакет Acid Gas). Свойства всех потоков приняты в соответствии с описанными выше требованиями.

Как и в схеме с водной абсорбцией, поток ДГ (flue gas) поступает в экономайзер (E-101), где осуществляется его охлаждение до температуры ниже точки росы, а получающийся в результате конденсат отделяется от потока в сепараторе (V-100). Охлажденные ДГ (flue gas to contactor) направляются в абсорбер (T-100), куда также подается обедненный раствор МЭА (MEA to contactor). Происходит процесс абсорбции CO_2 из ДГ раствором МЭА. Очищенные ДГ (flue gas – CO_2) направляются в атмосферу, а обогащенный раствор МЭА (rich MEA) насосом (P-100) подается в десорбер, представляющий собой в модели ректификационную колонну (T-101), нагреваясь до этого в регенераторе (E-101) за счет использования теплоты обедненного раствора МЭА (poor MEA to regen). Извлеченные в десорбере газы (acid gas) отправляются на дальнейшее использование, а обедненный раствор МЭА поступает на рециркуляцию в абсорбер. Для реализации рециркуляции раствора МЭА установлены следующие элементы: смеситель (Mix-100) для пополнения испаряющегося абсорбента, охладитель (E-102) для охлаждения обедненного раствора перед абсорбером и регулятор давления (VLV-100) для установления давления на входе в абсорбер.

В ходе моделирования массовую концентрацию раствора МЭА принимали равной 13 %, абсолютное давление в абсорбере 1,2 бара, температуру раствора на входе в десорбер (rich MEA to desorb) 80 °С, давление в десорбере 1,8 бара. В ходе численного эксперимента в качестве управляемой переменной использовали расход МЭА, диапазон изменения которого был определен предварительно по методике [10] и составлял 13,5–28,5 т/ч (14–28 м³/ч).

На рис. 5 представлены зависимости изменения расхода поглощаемого из продуктов сгорания CO_2 в абсорбере и расхода выхода CO_2 из десорбера от расхода циркулирующего раствора МЭА.

Применяя технологию химической абсорбции CO_2 из продуктов сгорания раствором МЭА, можно получить максимальный расход углекислоты,

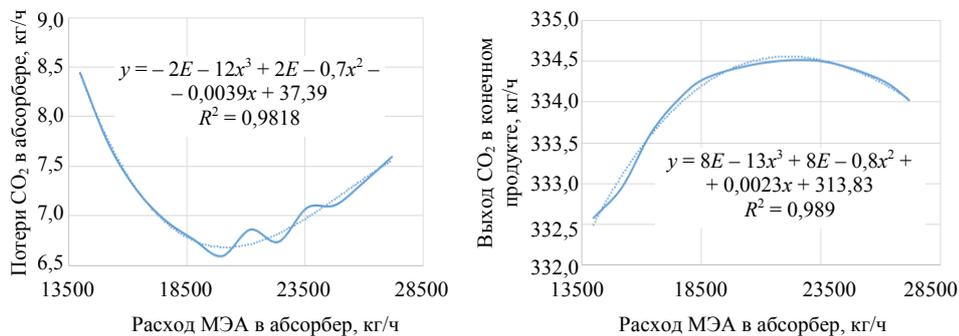


Рис. 5. Полученные в модели Aspen Hysys зависимости для расхода:

- a – не поглощенного CO_2 в абсорбере от циркулирующего расхода моноэтаноламина;
 b – выхода CO_2 из десорбера от расхода циркулирующего моноэтаноламина

Fig. 5. The dependences obtained in the Aspen Hysys model for:

- a – the flow rate of unabsorbed CO_2 in the absorber from the circulating monoethanolamine flow;
 b – the CO_2 output in the final product from the circulating monoethanolamine flow

Адсорбционный метод извлечения CO_2 из продуктов сгорания

Для адсорбции CO_2 с разной эффективностью могут использоваться активированный уголь, силикагель, цеолиты или металлоорганические каркасы [14–16]. Разрабатываются различные модификации поверхностей указанных адсорбентов для повышения их поглотительной способности.

Наиболее эффективными адсорбентами для поглощения двуокиси углерода являются цеолиты, например CaA, CaX, NaX [17]. В [14] отмечается, что при $20\text{ }^\circ\text{C}$ и парциальном давлении 50 мм рт. ст. поглощение CO_2 цеолитовым молекулярным ситом примерно в 4,5 раза больше, чем активированным углем, а при повышении температуры их поглотительная способность уменьшается меньше, чем у активированного угля. Тем не менее, в данной статье рассмотрена адсорбция именно на активированном угле в связи с его дешевизной, доступностью, высокой термостойкостью и низкой чувствительности к влаге. Так как эффективность адсорбции [5] снижается при повышении температуры процесса, ДГ перед адсорбером направляется в конденсационный экономайзер.

Рассмотрим схему термической адсорбции в неподвижном слое адсорбента из трех параллельно включенных аппаратов, в каждом из которых последовательно проводятся процессы адсорбции, десорбции и охлаждения, сдвинутые по фазе во времени. Десорбция осуществляется водяным паром, охлаждение – инертным теплоносителем. Принципиальная диаграмма процесса извлечения CO_2 повышением температуры представлена на рис. 6.

Моделирование процесса извлечения CO_2 адсорбционным методом осуществлялось в программе Aspen Adsorption (рис. 7), позволяющей моделировать адсорбцию газов в слое адсорбента, свойства которого взяты из экспериментальных данных [18–22].

Цикл адсорбции CO_2 моделируется в Aspen как одномерная динамическая колонна по принципам, описанным в [23]. В качестве очищаемых продуктов сгорания в модели использована имитирующая ДГ бинарная смесь CO_2 и N_2 .

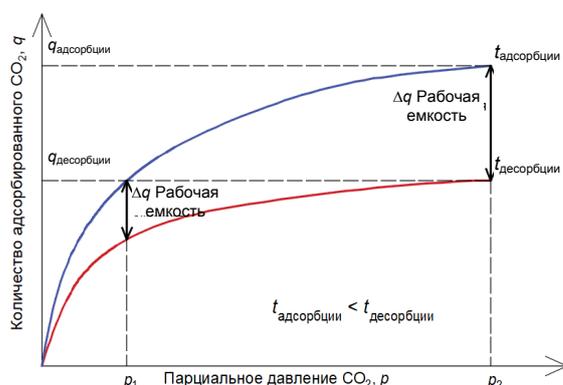


Рис. 6. Диаграмма процесса термической адсорбции в стационарном слое [19]

Fig. 6. Diagram of temperature swing adsorption in the fixed bed [19]

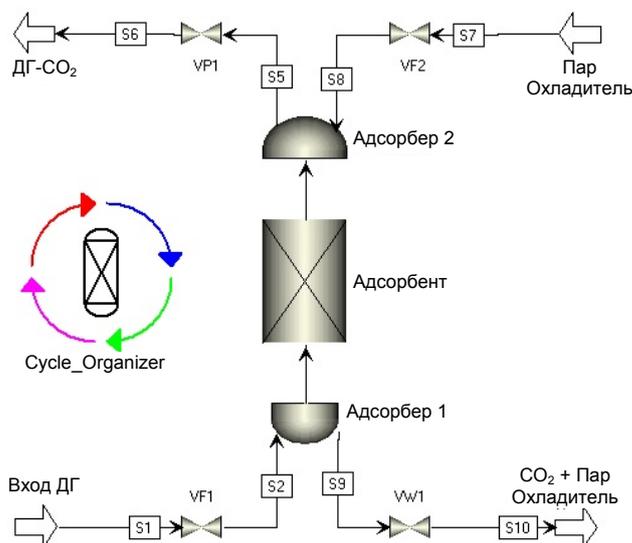


Рис. 7. Принципиальная схема установки для адсорбции CO₂ в Aspen Adsorption [23]

Fig. 7. Schematic diagram of a CO₂ adsorption plant in Aspen Adsorption [23]

В табл. 2 представлены основные свойства и характеристики адсорбента.

Таблица 2

Основные свойства и характеристики адсорбента [18, 20, 24, 25]
The main properties and characteristics of the adsorbent [18, 20, 24, 25]

Удельная площадь поверхности, м ² /г	800	Коэффициент массопередачи для N ₂ , 1/с	0,3
Плотность, кг/м ³	2100	Постоянная теплота адсорбции CO ₂ , МДж/кмоль	-25,8
Объем пор, %	32	Постоянная теплота адсорбции N ₂ , МДж/кмоль	-15,5
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	1230	Температура поступающих в адсорбер дымовых газов, °С	35
Радиус частицы, мм	1	Время протекания процесса адсорбции, с	110

Окончание табл. 2

Удельная площадь поверхности, м ² /г	800	Коэффициент массопередачи для N ₂ , 1/с	0,3
Высота колонны, м	1,3	Температура десорбции, °С	150
Внутренний диаметр колонны, м	1	Время протекания процесса десорбции, с	250
Размер пор, нм	25	Температура протекания процесса охлаждения, °С	105
Коэффициент массопередачи для CO ₂ , 1/с	0,5	Время протекания процесса охлаждения, с	400

Основные результаты

Описанные методы извлечения CO₂ из продуктов сгорания МВТ имеют свои преимущества и недостатки (табл. 3). Общим требованием при их применении является то, что продукты сгорания перед извлечением CO₂ должны быть глубоко очищены от твердых частиц. Требуемая степень очистки достигается установкой центробежных тонкой очистки, рукавных, электростатических фильтров или их комбинацией. Выбор типа фильтра зависит от температуры уходящих ДГ, параметров образующихся твердых частиц и типа топочного устройства.

Таблица 3

Сводная таблица полученных результатов

Summary table of the obtained results

Воздействие	Метод извлечения CO ₂ из продуктов сгорания		
	Физический	Химический	Адсорбционный
Чувствительность к твердым примесям	Высокая	Высокая	Высокая
Влияние температуры на процесс извлечения CO ₂	Низкое	Высокое	Высокое
Влияние SO _x и NO _x на процесс извлечения CO ₂	Низкое	Очень высокое	Высокое
Влияние водяного пара в продуктах сгорания на процесс извлечения CO ₂	Низкое	Низкое	Высокое
Движущая сила процесса, подводимая извне	Электроэнергия	Раствор амина; электроэнергия; тепловая энергия	Тепловая энергия
Удельные энергозатраты электрической энергии на 1 кг CO ₂ , кВт·ч/(кг·CO ₂)	0,254	0,002	–
Удельные затраты тепловой энергии на 1 кг CO ₂ , МДж/(кг·CO ₂)	–	18,08	3,40
Удельные потери МЭА на 1 кг CO ₂ , мг/(кг·CO ₂)	–	81,00	–
Количество CO ₂ , полученного в оптимальном режиме работы, кг/ч	233	335	252
Содержание H ₂ S в конечном продукте, мол. %	0,28	0,39	–
Степень чистоты газа от примесей, %	76	86	–
Степень чистоты сухого газа, %	79	99	–
Степень извлечения CO ₂ в оптимальном режиме, %	68	97	77

Кроме того, во всех технологиях следует контролировать температуру ДГ на входе в блок по извлечению углекислого газа. В случае адсорбционного метода и метода химической абсорбции раствором МЭА обязательна установка экономайзера, причем на практике чаще всего применяются экономайзеры с непосредственным контактом газов и охлаждающей воды. Благодаря такому охлаждению параллельно идет частичная очистка ДГ от оксидов серы и азота. В случае физической абсорбции углекислоты охлаждение ДГ необходимо производить, только если ДГ при смешении с водой в абсорбере будут нагреваться до температуры, при которой значительно снижается сорбционная способность воды и увеличивается коррозионное воздействие на элементы системы.

ВЫВОДЫ

1. Для повышения эффективности мини-ТЭЦ на местных видах топлива рассмотрен вопрос утилизации CO_2 из продуктов сгорания. Проанализированы три технологии: водная абсорбция, химическая абсорбция раствором моноэтаноламина, адсорбция. Исследование показало, что химическая абсорбция позволяет обеспечить извлечения CO_2 на уровне 97 % и самую высокую степень чистоты полученного газа от примесей. Физическая абсорбция обеспечивает степень извлечения углекислоты, равную 68 %, и самую низкую степень чистоты от примесей сухого продукта. Адсорбционный метод является промежуточным между двумя видами абсорбции. Так, с использованием доступного, но не самого эффективного адсорбента, получена степень извлечения CO_2 , равная 77 %.

2. Выбор конкретной технологии зависит от того, как полученный CO_2 будет использоваться в дальнейшем. Если углекислота будет являться продуктом для внешнего использования или для производства сухого льда, то химическая абсорбция МЭА является наилучшим вариантом. При использовании CO_2 в целях производства синтетического природного газа выбор метода извлечения зависит от технологии метанирования. Так, для химико-каталитических реакторов лучше использовать химическую абсорбцию или адсорбцию на цеолитах из-за высокого влияния примесей, таких как SO_x и NO_x , на никелевый катализатор. Для биокаталитических реакторов может применяться физический метод абсорбции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Об утверждении Концепции энергетической безопасности Республики Беларусь [Электронный ресурс]: пост. Совета Министров Респ. Беларусь, 23 дек. 2015 г., № 1084. Режим доступа: <https://etalonline.by/document/?regnum=c21501084>.
2. Экология промышленных технологий [Электронный ресурс] / О. Ф. Краецкая, И. Н. Прокопья. Минск: БНТУ, 2014. Режим доступа: <https://rep.bntu.by/handle/data/10557>.
3. Pysmenna, U. Ye. Maintaining the Sustainable Energy Systems: Turning from Cost to Value / U. Ye. Pysmenna, G. S. Grypolska // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 1. С. 14–29. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-14-29>.
4. Овсянник, А. В. Турбодетандерная установка на диоксиде углерода с производством жидкой и газообразной углекислоты / А. В. Овсянник // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 1. С. 77–87. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-77-87>.
5. Post Combustion Carbon Dioxide Capture / R. Y. D. Hansa [et al.] // Journal of Research Technology and Engineering. 2020. Vol. 1, Iss. 4. P. 21–31.

6. Yu, C.-H. A Review of CO₂ Capture by Absorption and Adsorption / C.-H. Yu, C.-H. Huang, C.-S. Tan // *Aerosol Air Qual. Res.* 2012. Vol. 12, Iss. 5. P. 745–769. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2012.05.0132>.
7. Ахметова, В. Р. Улавливание и хранение диоксида углерода – проблемы и перспективы / В. Р. Ахметова, О. В. Смирнов // *Башкирский химический журнал.* 2020. Т. 27, № 3. С. 103–115.
8. Игнатович, Р. С. Минитеплоэлектроцентраль на местных видах топлива с опцией производства синтетического природного газа [Электронный ресурс] / Р. С. Игнатович // *Актуальные проблемы энергетики: материалы 76-й науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: секция «Теплоэнергетика»* / сост. Т. Е. Жуковская. Минск: БНТУ, 2020. Режим доступа: <https://rep.bntu.by/handle/data/75706>.
9. Рамм, В. М. Абсорбция газов / В. М. Рамм. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Химия, 1976. 655 с.
10. Пименова, Т. Ф. Производство и применение сухого льда, жидкого и газообразного диоксида углерода / Т. Ф. Пименова. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. 208 с.
11. Очистка технологических газов / под ред. Т. А. Семеновой. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Химия, 1977. 488 с.
12. Дедков, В. Н. Применение серийных насосов в качестве гидротурбин для малой энергетики / В. Н. Дедков // *Проблемы машиностроения.* 2011. Т. 14, № 4. С. 24–30.
13. Степанов, А. И. Центробежные и осевые насосы / А. И. Степанов. М.: Машгиз, 1960. 464 с.
14. Серпионова, Е. Н. Промышленная адсорбция газов и паров / Е. Н. Серпионова. Изд. 2-е перераб. и доп. М.: Высш. школа, 1969. 414 с.
15. Sayari, A. Flue Gas Treatment Via CO₂ Adsorption / A. Sayari, Y. Belmabkhout, R. Serna-Guerrero // *Chemical Engineering Journal.* 2011. Vol. 171, Iss. 3. P. 760–774. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.02.007>.
16. Choi, S. Adsorbent Materials for Carbon Dioxide Capture from Large Anthropogenic Point Sources / S. Choi, J. H. Drese, C. W. Jones // *ChemSusChem.* 2009. Vol. 2, Iss. 9. P. 796–854. <https://doi.org/10.1002/cssc.200900036>.
17. Кельцев, Н. В. Основы адсорбционной техники / Н. В. Кельцев. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Химия, 1984. 592 с.
18. CO₂ Adsorption Process Simulation in ASPEN Hysys / C. Dinca [et al.] // *2017 International Conference on Energy and Environment (CIEM).* IEEE. 2017. P. 505–509. <https://doi.org/10.1109/ciem.2017.8120808>.
19. Performance Analysis of Temperature Swing Adsorption for CO₂ Capture Using Thermodynamic Properties of Adsorbed Phase / R. Zhao [et al.] // *Applied Thermal Engineering.* Vol. 123. P. 205–215. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.042>.
20. Thomas, W. J. Adsorption Technology and Design / W. J. Thomas, B. Crittenden. Elsevier, 1998. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-1959-2.X5001-0>.
21. Synthesis and Characterization of Activated Carbon from Biomass Date Seeds for Carbon Dioxide Adsorption / A. E. Ogungbenro [et al.] // *Journal of Environmental Chemical Engineering.* 2020. Vol. 8, Iss. 5. 104257. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104257>.
22. Temperature Swing Adsorption for Postcombustion CO₂ Capture: Single- and Multicolumn Experiments and Simulations / D. Marx [et al.] // *Industrial & Engineering Chemistry Research.* 2016. Vol. 55, Iss. 5. P. 1401–1412. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b03727>.
23. Wood, K. R. Design, Simulation and Optimization of Adsorptive and Chromatographic Separations: A Hands-On Approach / K. R. Wood, Y. A. Liu, Y. Yu. Weinheim: Wiley-VCH, 2018. 432 p.
24. Evaluating Isotherm Models for the Prediction of Flue Gas Adsorption Equilibrium and Dynamics / Kang R. H. [et al.] // *Korean Journal of Chemical Engineering.* 2018. Vol. 35, Iss. 3. P. 734–743. <https://doi.org/10.1007/s11814-017-0353-1>.
25. CO₂ Capture by Temperature Swing Adsorption: Use of Hot CO₂-Rich Gas for Regeneration / A. Ntiamoah [et al.] // *Industrial & Engineering Chemistry Research.* 2016. Vol. 55, Iss. 3. P. 703–713. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b01384>.

Получена 23.08.2022 Подписана в печать 25.10.2022 Опубликована онлайн 30.11.2022

REFERENCES

1. On the Approval of the Concept of Energy Security of the Republic of Belarus: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus, 23 Dec. 2015, No 1084. Available at: <https://etalonline.by/document/?regnum=c21501084> (in Russian).
2. Kraetskaya O. F., Prokopenya I. N. (Compiled) (2014) *Ecology of Industrial Technologies.* Minsk, BNTU. Available at: <https://rep.bntu.by/handle/data/10557> (in Russian).
3. Pysmenna U. Ye., Trypolska G. S. (2020) Maintaining the Sustainable Energy Systems: Turning from Cost to Value. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions*

- and Power Engineering Associations, 63 (1), 14–29. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-14-29> (in Russian).
4. Ovsyannik A. V. (2019) Carbon Dioxide Turbine Expander Plant Producing Liquid and Gaseous Carbon Dioxide. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (1), 77–87. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-77-87> (in Russian).
 5. Hansa R. Y. D., Devasurendra J. W., Maduwantha M. I. P., Madhuwantha G. A. L., Ranaraja D. M. C. O. (2020) Post Combustion Carbon Dioxide Capture. *Journal of Research Technology and Engineering*, 1 (4), 21–31.
 6. Yu C.-H., Huang C.-H., Tan C.-S. (2012) A Review of CO₂ Capture by Absorption and Adsorption. *Aerosol Air Quality Research*, 12 (5), 745–769. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2012.05.0132>.
 7. Akhmetova V. R., Smirnov O. V. (2020) Carbon Dioxide Capture and Storage – Problems and Perspectives. *Bashkirskii Khimicheskii Zhurnal = Bashkir Chemistry Journal*, 27 (3), 103–115 (in Russian).
 8. Ignatovich R. S. (2020) Thermoelectric Mini Power Plant on Local Fuels with the Option of Producing Synthetic Natural Gas. *Aktual'nye Problemy Energetiki: Materialy 76-i Nauch.-Tekhn. Konf. Studentov i Aspirantov: Sektsiya «Teploenergetika»* [Actual Problems of Energy: Materials of the 76th Scientific and Technical Conference of Students and Postgraduates: Section “Thermal Power Engineering”]. Minsk, BNTU. Available at: <https://rep.bntu.by/handle/data/75706> (in Russian).
 9. Ramm V. M. (1976) *Absorption of Gases*. 2nd ed. Moscow, Khimya Publ. 655 (in Russian).
 10. Pimenova T. F. (1982) *Production and Application of Dry Ice, Liquid and Gaseous Carbon Dioxide*. Moscow, Legkaya i Pishchevaya Promyshlennost' Publ. 208 (in Russian).
 11. Semenova T. A. (1977) *Purification of Process Gases*. 2nd ed. Moscow, Khimya Publ. 488 (in Russian).
 12. Dedkov V. N. (2011) Serial Pump Application as Hydroturbine in Low Energetic. *Problemy Mashinostroeniya = Journal of Mechanical Engineering*, 14 (4), 24–30 (in Russian).
 13. Stepanov A. I. (1960) *Centrifugal and Axial Pumps*. Moscow, Mashgiz Publ. 464 (in Russian).
 14. Serpionova E. N. (1969) *Industrial Adsorption of Gases and Vapors*. 2nd ed. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 414 (in Russian).
 15. Sayari A., Belmabkhout Y., Serna-Guerrero R. (2011) Flue Gas Treatment via CO₂ Adsorption. *Chemical Engineering Journal*, 171 (3), 760–774. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.02.007>.
 16. Choi S., Drese J. H., Jones C. W. (2009). Adsorbent Materials for Carbon Dioxide Capture from Large Anthropogenic Point Sources. *ChemSusChem*, 2 (9), 796–854. <https://doi.org/10.1002/cssc.200900036>.
 17. Keltsev N. V. (1984) *Fundamentals of Adsorption Technology*. 2nd ed. Moscow, Khimya Publ. 592 (in Russian).
 18. Dinca C., Slavu N., Badea A. (2017) CO₂ Adsorption Process Simulation in ASPEN Hysys. *2017 International Conference on Energy and Environment (CIEM)*. IEEE, 505–509. <https://doi.org/10.1109/ciem.2017.8120808>.
 19. Zhao R., Deng S., Zhao L., Li S., Zhang Y., Liu B. (2017). Performance Analysis of Temperature Swing Adsorption for CO₂ Capture Using Thermodynamic Properties of Adsorbed Phase. *Applied Thermal Engineering*, 123, 205–215. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.042>.
 20. Thomas W. J., Crittenden B. (1998) *Adsorption Technology and Design*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-1959-2.X5001-0>.
 21. Ogungbenro A. E., Quang D. V., Al-Ali K. A., Vega L. F., Abu-Zahra M. R. M. (2020). Synthesis and Characterization of Activated Carbon from Biomass Date Seeds for Carbon Dioxide Adsorption. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8 (5), 104257. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104257>.
 22. Marx D., Joss L., Hefli M., Mazzotti M. (2016). Temperature Swing Adsorption for Postcombustion CO₂ Capture: Single- and Multicolumn Experiments and Simulations. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 55 (5), 1401–1412. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b03727>.
 23. Wood K. R., Liu Y. A., Yu Y. (2018) *Design, Simulation and Optimization of Adsorptive and Chromatographic Separations: A Hands-On Approach*. Weinheim, Wiley-VCH. 432.
 24. Kang R. H., Park J., Kang D., Lee J. W. (2018) Evaluating Isotherm Models for the Prediction of Flue Gas Adsorption Equilibrium and Dynamics. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 35 (3), 734–743. <https://doi.org/10.1007/s11814-017-0353-1>.
 25. Ntiamoah A., Ling J., Xiao P., Webley P. A. (2016) CO₂ Capture by Temperature Swing Adsorption: Use of Hot CO₂-Rich Gas for Regeneration. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 55 (3), 703–713. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b01384>.

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-539-550>

УДК 681.51

Синтез инвариантных систем автоматического регулирования с внутренней моделью

Г. Т. Кулаков¹⁾, А. Т. Кулаков¹⁾, Н. В. Воюш¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. Статья посвящена модернизации типовых каскадных систем автоматического регулирования со стабилизирующим и корректирующим ПИ-регуляторами. Такие системы автоматического регулирования кроме основного сигнала (регулируемой величины) используют дополнительный опережающий сигнал, который реагирует на возмущение быстрее, чем основной. Опережающий сигнал достаточно эффективно компенсирует возникающие в системе внутренние возмущения за счет настройки стабилизирующего регулятора. Примером может служить система регулирования температуры перегретого пара котельных агрегатов тепловых электрических станций. Задача определения параметров настройки таких двухконтурных систем довольно сложна. При относительно малой инерционности внутреннего контура быстродействие стабилизирующего регулятора достаточно высоко, и переходные процессы в нем не оказывают влияния на качество регулирования во внешнем контуре с корректирующим регулятором. Это позволяет рассчитывать оптимальные параметры настройки последнего только по динамическим характеристикам инерционного участка обычными методами, разрабатываемыми для одноконтурных систем. Главный недостаток таких систем автоматического регулирования состоит в том, что они не позволяют при близких инерционностях контуров существенно улучшить качество отработки основных воздействий при скачке задания, внутреннего и внешнего возмущения. Для устранения этого недостатка предложена инвариантная каскадная система автоматического регулирования с внутренней моделью, учитывающей при выборе структуры и настройке корректирующего регулятора динамику как внутреннего, так и внешнего контура с инерционным участком объекта. При этом внутренняя модель используется для полной компенсации главной обратной связи системы при отработке сигнала задания, а также выделения эквивалентного внешнего возмущения, для компенсации которого применяется дифференциатор инвариантности. Инвариантная каскадная система автоматического регулирования позволяет существенно повысить быстродействие и точность по сравнению с типовой.

Ключевые слова: каскадная система автоматического регулирования, инвариантность, повышение быстродействия и точности, синтез оптимальных систем

Для цитирования: Кулаков, Г. Т. Синтез инвариантных систем автоматического регулирования с внутренней моделью / Г. Т. Кулаков, А. Т. Кулаков, Н. В. Воюш // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 6. С. 539–550. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-539-550>

Адрес для переписки

Кулаков Геннадий Тихонович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-91-45
tes@bntu.by

Address for correspondence

Kulakov Gennady T.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-91-45
tes@bntu.by

Synthesis of an Invariant Automatic Control Systems with an Internal Model

G. T. Kulakov¹⁾, A. T. Kulakov¹⁾, N. V. Voyush¹⁾

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

Abstract. The article is devoted to the modernization of typical cascade automatic control systems with stabilizing and corrective PI controllers. Such automatic control systems, in addition to the main signal (of adjustable value), use an additional leading signal that reacts to the disturbance faster than the main one. The leading signal effectively compensates for internal disturbances arising in the system by adjusting the stabilizing controller. The temperature control system of superheated steam boiler units of thermal power plants may be taken as an example. The task of determining the configuration parameters of such dual-circuit systems is quite difficult. With a relatively low inertia of the internal circuit, the speed of the stabilizing controller is quite high, and transients in it do not affect the quality of regulation in the external circuit with a corrective controller. This makes it possible to calculate the optimal settings of the latter only by the dynamic characteristics of the inertial section using conventional methods developed for single-circuit systems. The main disadvantage of such automatic control systems is that they do not allow, with close inertia of the contours, to significantly improve the quality of working out the main impacts during the jump of the task, internal and external disturbances. To eliminate this drawback, an invariant cascade automatic control system with an internal model is proposed that takes into account the dynamics of both the internal and external contours with an inertial section of the object when choosing the structure and setting up the corrective controller. In this case, the internal model is used to fully compensate for the main feedback of the system when working out the task signal, as well as to isolate an equivalent external disturbance, for which an invariance differentiator is used to compensate. The invariant cascade automatic control system makes it possible to significantly increase the speed and accuracy compared to the standard one.

Keywords: cascade automatic control system, invariance, increase in speed and accuracy, synthesis of optimal systems

For citation: Kulakov G. T., Kulakov A. T., Voyush N. V. (2022) Synthesis of an Invariant Automatic Control Systems with an Internal Model. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 65 (6), 539–550. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-539-550> (in Russian)

Введение

Новые условия функционирования электроэнергетики обусловлены планируемым вводом в эксплуатацию второго энергоблока Белорусской АЭС, суммарная мощность которой 2400 МВт. Оба энергоблока будут работать в базовой части графика электрических нагрузок. В связи с этим приобретает актуальность повышение энергоэффективности теплоэнергетического оборудования на органическом топливе в широком диапазоне изменения нагрузок. Одним из основных показателей решения указанной проблемы является создание систем автоматического управления, обладающих высоким быстродействием и точностью в рабочем диапазоне изменения нагрузок. Этому вопросу посвящено значительное количество публикаций [1–16], из анализа которых следует, что в настоящее время большинство систем автоматического регулирования (САР) теплоэнергетических процессов реализовано на базе двухконтурных САР (каскадных систем с корректирующими и стабилизирующими регуляторами и систем с опережающим скоростным сигналом) [1, 2]. В обычных САР используются типовые линейные законы регулирования. Широкое распространение в теплоэнергетике получили методы расчета настройки типовых регулято-

ров [2–10]. Вместе с тем во всех двухконтурных САР невозможно достичь полной ликвидации отклонений регулируемой величины от ее заданного значения. Это связано с тем, что, например, стабилизирующий регулятор каскадной САР входит в замкнутый внутренний контур передачи воздействий, а попытка увеличить его коэффициент передачи с целью повышения быстродействия и точности системы приводит к ухудшению или потере устойчивости системы. Введение промежуточной регулируемой величины повышает точность работы системы, но, как правило, не может полностью устранить ошибку регулирования.

С этой точки зрения значительным преимуществом обладают инвариантные САР с компенсацией как внутренних, так и внешних возмущений [2, 10]. В [11, 12] изложены основы методов структурно-параметрической оптимизации теплоэнергетических процессов, которые позволяют существенно повысить быстродействие и точность регулирования за счет использования вместо типовых линейных законов управления регулятора, основанные на принципе динамической компенсации динамики объекта. Это дает точное решение задачи синтеза регулятора при отработке скачка задания. В [13] для повышения быстродействия и точности предложено использовать аналитические самонастраивающиеся системы с эталонными методами. Для сохранения хорошего качества регулирования в широком диапазоне изменения нагрузок в [14] предложено добавить устройство коррекции параметров динамической настройки регулятора и дифференциатора типовой САР с опережающим скоростным сигналом в функции от расхода перегретого пара котла. Однако в этом случае существенного повышения быстродействия и точности во всем диапазоне изменения нагрузок достигнуть не удастся без использования инвариантных САР. В [15, 16] на базе аналитических экспресс-методов параметрической оптимизации динамических систем разработана высококачественная система автоматического управления мощностью энергоблока 300 МВт в режиме постоянного и переменного давления пара перед турбиной.

Цель статьи – поиск путей существенного повышения качества работы комбинированных систем регулирования при основных воздействиях за счет использования передаточных функций оптимальных регуляторов с применением внутренних моделей и выделением эквивалентного внешнего возмущения и его компенсации, а также автоматической коррекции параметров динамической настройки регулирующих устройств и внутренних моделей в функции нагрузки паровых котлов.

Структурная схема и математическая модель инвариантной системы автоматического регулирования с внутренней моделью

Возможности существенного повышения качества регулирования технологических параметров теплоэнергетических процессов с использованием аналитических экспресс-методов структурно-параметрической оптимизации покажем на примере синтеза инвариантной каскадной системы автоматического регулирования (ИКСАР) с внутренней моделью эквивалентной передаточной функции объекта с запаздыванием, учитывающей динамику внутреннего контура со стабилизирующим регулятором

при выборе структуры корректирующего регулятора. Схема моделирования ИКСАР и типовой каскадной САР (ТКСАР) в пакете Simulink приведена на рис. 1.

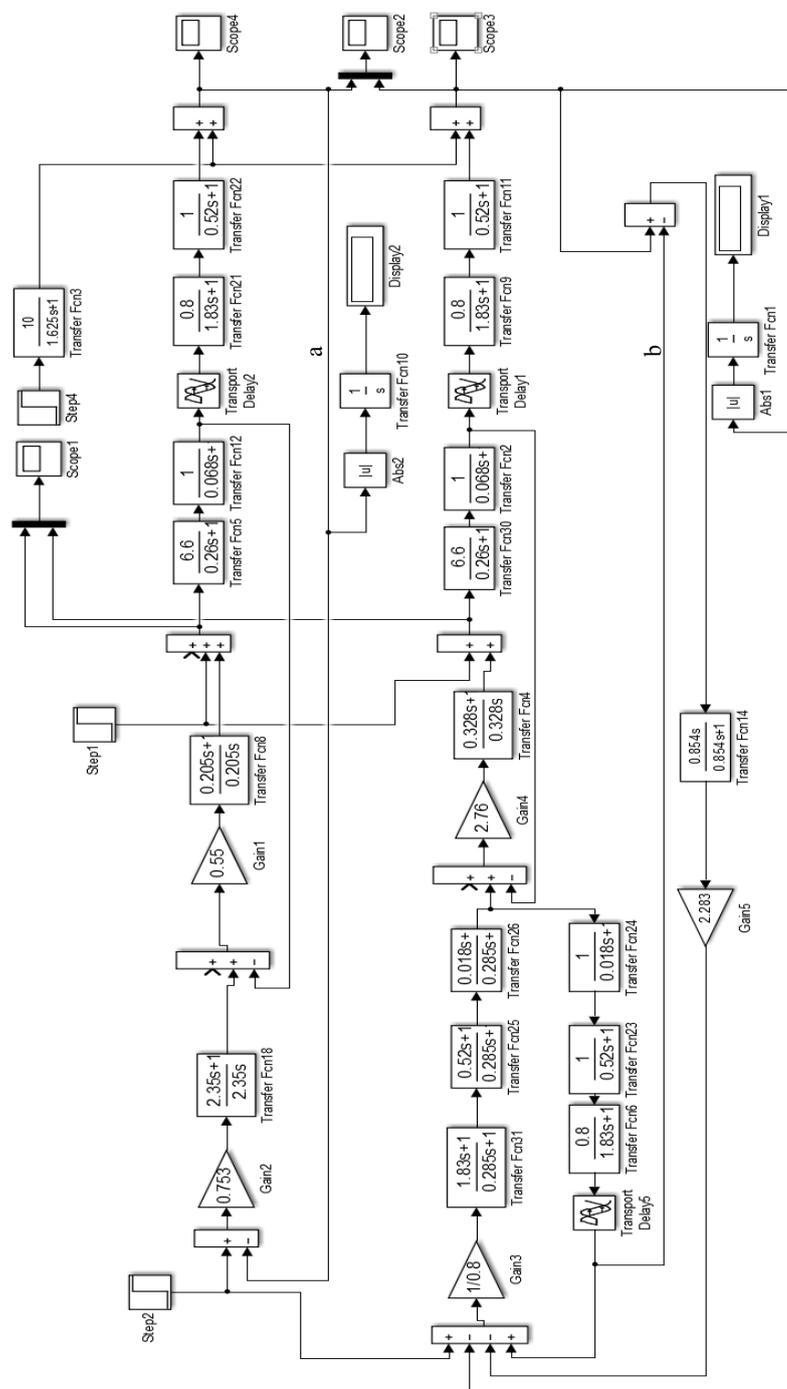


Рис. 1. Схема моделирования каскадной системы автоматического регулирования в пакете Simulink:
 а – типовой; б – инвариантной с внутренней моделью
 Fig. 1. The simulation scheme of cascade automatic control system with the use of the Simulink package:
 а – the standard one; б – the invariant one with an internal model

Динамика опережающего участка объекта представлена передаточной функцией инерционного звена второго порядка

$$W_{\text{оп}}(s) = \frac{k_{\text{оп}}}{(T_{\text{оп}}s + 1)(\sigma_{\text{оп}}s + 1)}, \quad (1)$$

где $k_{\text{оп}}$ – коэффициент передачи опережающего участка объекта, °C/(т/ч); $T_{\text{оп}}$, $\sigma_{\text{оп}}$ – соответственно большая и меньшая постоянные времени, мин.

Структуру стабилизирующего регулятора определим на основе передаточной функции оптимального регулятора с динамической компенсацией для объекта без запаздывания [3]

$$W_{\text{pl}}^{\text{opt}}(s) = [W_{\text{оп}}^*(s)]^{-1} W_{\text{зд1}}^{\text{PC}(n=1)}(s), \quad (2)$$

где $W_{\text{оп}}^*(s)$ – расчетная передаточная функция опережающего участка, определяется как

$$W_{\text{оп}}^*(s) = \frac{k_{\text{оп}}}{T_{\text{оп}}^*s + 1}, \quad (3)$$

$T_{\text{оп}}^*$ – постоянная времени, равная сумме постоянных времени знаменателя передаточной функции (1),

$$T_{\text{оп}}^* = T_{\text{оп}} + \sigma_{\text{оп}}. \quad (4)$$

При этом заданная передаточная функция разомкнутой системы представляет собой идеальное интегрирующее звено [13]

$$W_{\text{зд1}}^{\text{PC}(n=1)}(s) = \frac{1}{T_{\text{зд1}}s}, \quad (5)$$

где $T_{\text{зд1}}$ – единственный расчетный параметр динамической настройки стабилизирующего регулятора, численное значение которого рассчитывают по формуле

$$T_{\text{зд1}} = \gamma_1 T_{\text{оп}}^*, \quad (6)$$

где $\gamma_1 \in [0,618; 0,382; 0,236; \dots; 0,09; 0,056]$ – весовой коэффициент из ряда чисел пропорции золотого сечения, где за целое принято численное значение $T_{\text{оп}}^*$ [13].

Подставив в передаточную функцию стабилизирующего регулятора (2) передаточные функции (3) и (5), получим

$$W_{зд1}^{opt}(s) = \frac{k_{p1}(T_{и1}s + 1)}{T_{и1}s}, \quad (7)$$

где $T_{и1}$ – время интегрирования, $T_{и1} = T_{оп}^* = 0,328$ мин; k_{p1} – коэффициент передачи стабилизирующего регулятора, $k_{p1} = \frac{T_{оп}^*}{k_{оп}T_{зд1}}$, т/ч/°С.

При $\gamma_1 = 0,056$, исходя из максимально допустимой величины регулируемого воздействия при обработке скачка задания, численное значение коэффициента передачи стабилизирующего регулятора $k_{p1} = 2,76$ т/ч/°С. В результате чего внутренний контур системы со стабилизирующим регулятором может быть заменен на передаточную функцию инерционного звена первого порядка:

$$W_{зд1}(s) = \frac{1}{T_{зд1}s + 1}; \quad (8)$$

$$T_{зд1} = \gamma_1 T_{оп}^* = 0,018 \text{ мин.} \quad (9)$$

Динамика инерционного участка объекта представлена инерционным звеном второго порядка с условным запаздыванием по каналу регулирующего воздействия [13]:

$$W_{ин}(s) = \frac{k_{ин}e^{-\tau_y s}}{(T_{ин}s + 1)(\sigma_{ин}s + 1)}, \quad (10)$$

где $k_{ин}$ – коэффициент передачи инерционного участка объекта; $T_{ин}$, $\sigma_{ин}$ – соответственно большая и меньшая постоянные времени, мин; τ_y – условное запаздывание, мин.

С учетом (8) и (10) эквивалентная передаточная функция объекта для формирования структуры корректирующего регулятора примет вид

$$W_{экр}(s) = W_{зд1}(s)W_{ин}(s) = \frac{k_{ин}e^{-\tau_y s}}{(T_{ин}s + 1)(\sigma_{ин}s + 1)(T_{зд1}s + 1)}. \quad (11)$$

Для устранения технического противоречия между быстродействием и устойчивостью системы выход корректирующего регулятора подключаем с плюсом к его входу с использованием полной модели эквивалентного объекта

$$W_{экр}^{мод}(s) = \frac{k_{ин}e^{-\tau_y s}}{(T_{ин}s + 1)(\sigma_{ин}s + 1)(T_{зд1}s + 1)}. \quad (12)$$

В результате полная модель при обработке задания корректирующим регулятором целиком компенсирует сигнал главной обратной связи за-

мкнутой системы. При этом замкнутая система превращается в разомкнуто-замкнутую: замкнутую по промежуточной регулируемой величине на выходе опережающего участка и разомкнутую по основной регулируемой величине. Это позволяет на корректирующий регулятор возложить функцию компенсатора той части передаточной функции полной модели (12), которая не содержит запаздывания:

$$W_{\text{КР}}^{\text{opt}}(s) = W_{\text{р2}}^{\text{opt}}(s) = \frac{1}{W_{\text{ЭКВ}}^{\text{o}}(s)}. \quad (13)$$

Для физической реализации корректирующего регулятора передаточную функцию (13) умножаем на заданную передаточную функцию

$$W_{\text{зд}}^{\text{o}}(s) = \frac{1}{(T_{\text{зд2}}s + 1)^3}, \quad (14)$$

где $T_{\text{зд2}} = \gamma_2 \tau_y = 0,146 \cdot 1,95 = 0,285$ мин, так как за целое в данном случае принята величина условного запаздывания τ_y [13].

С учетом (12), (13) и (14) передаточная функция корректирующего регулятора примет вид

$$W_{\text{р2}}^{\text{opt}}(s) = \frac{(T_{\text{ин}}s + 1)(\sigma_{\text{ин}}s + 1)(T_{\text{зд1}}s + 1)}{k_{\text{ин}}(T_{\text{зд2}}s + 1)^3}. \quad (15)$$

Для существенного улучшения качества отработки внешнего возмущения второй выход полной эквивалентной модели объекта с минусом подключаем к входу дополнительного элемента сравнения (ЭС), на второй вход которого подаем сигнал основной регулируемой величины, а выход ЭС подаем на вход устройства компенсации (УК) внешнего возмущения. При этом выход УК с минусом подаем на вход корректирующего регулятора, а УК реализуем в виде реального дифференциатора с передаточной функцией

$$W_{\text{УК}}^{f_2}(s) = \frac{k_{\text{д}} T_{\text{д}} s}{T_{\text{д}} s + 1}, \quad (16)$$

где $k_{\text{д}}$ – коэффициент передачи дифференциатора инвариантности; $T_{\text{д}}$ – время дифференцирования, мин.

Структура передаточной функции устройства компенсации внешнего возмущения получена следующим образом. Так как при отработке скачка задания корректирующего регулятора структурная схема инвариантной САР (рис. 1б) становится разомкнуто-замкнутой, то передаточная функция основной регулируемой величины примет вид

$$W_{y, x_{\text{зд2}}}(s) = W_{\text{зд2}}(s) = \frac{e^{-\tau_y s}}{(T_{\text{зд2}}s + 1)^3}. \quad (17)$$

С учетом передаточной функции (17) условие инвариантности основной регулируемой величины при отработке скачка внешнего возмущения будет соответствовать равенству

$$W_{\text{УК}}^{f_2}(s)W_{\text{ЗЛ2}}(s) = 1. \quad (18)$$

Если в одном канале со звеном с запаздыванием последовательно включено инерционное звено первого порядка с намного большей постоянной времени, то звено с запаздыванием приближенно можно заменить инерционным звеном первого порядка, а так как на начальном участке переходная характеристика звена с большей инерционностью напоминает интегрирующее звено, то передаточную функцию инерционного звена можно заменить на идеальное интегрирующее звено [11]. С учетом этих факторов, возведя знаменатель передаточной функции (17) в куб и ограничившись первой и второй производной, заданную передаточную функцию $W_{\text{ЗЛ2}}(s)$ можно представить в виде реального интегрирующего звена

$$W_{\text{ЗЛ2}}(s) = \frac{1}{\tau_y s (3T_{\text{ЗЛ2}}s + 1)}, \quad (19)$$

где $T_{\text{ЗЛ2}} = \gamma_2 \tau_y$ согласно (14).

Подставив (19) в (18), находим передаточную функцию устройства компенсации внешнего возмущения

$$W_{\text{УК}}^{f_2}(s) = \frac{1}{W_{\text{ЗЛ2}}(s)} = \tau_y s (3T_{\text{ЗЛ2}}s + 1). \quad (20)$$

Для физической реализуемости передаточную функцию (20) умножим на передаточную функцию инерционного звена второго порядка

$$W_{\text{УК}}^{f_2}(s) = \frac{1}{(T_{\text{ЗЛ2}}s + 1)^2} \quad (21)$$

и получим приближенную передаточную функцию устройства компенсации

$$W_{\text{УК}}^{f_2}(s) = \frac{\tau_y s}{T_{\text{ЗЛ3}}s + 1} \frac{3T_{\text{ЗЛ2}}s + 1}{T_{\text{ЗЛ3}}s + 1}. \quad (22)$$

Приняв $T_{\text{ЗЛ3}} = 3T_{\text{ЗЛ2}}$, окончательно получим с учетом (16) упрощенную передаточную функцию устройства компенсации эквивалентного внешнего возмущения в виде передаточной функции реального дифференциатора

$$W_{\text{УК}}^{f_2}(s) = \frac{\tau_y s}{3T_{\text{ЗЛ2}}s + 1} = \frac{k_d T_d s}{T_d s + 1}, \quad (23)$$

где $T_d = 3T_{\text{ЗЛ2}} = 3\gamma_2 \tau_y$; $k_d = \frac{\tau_y}{3T_{\text{ЗЛ2}}} = \frac{\tau_y}{3\gamma_2 \tau_y} = \frac{1}{3\gamma_2}$.

Переходные процессы типовой и инвариантной КСАР при обработке основных воздействий

Графики переходных процессов типовой и инвариантной КСАР при основных воздействиях приведены на рис. 2, где $\Delta y/y$ – относительное значение основной регулируемой величины.

При обработке скачка задания (рис. 2а) время регулирования ИКСАР (пунктирная линия) в 3,7 раза меньше, чем ТКСАР (сплошная линия). При этом максимальная величина перерегулирования ТКСАР составляет 12,5 %, а у ИКСАР она отсутствует. При обработке внутреннего возмущения (рис. 2б) максимальная динамическая ошибка регулирования ИКСАР в 3,6 раза меньше, чем у ТКСАР. Причем время регулирования уменьшается в 1,6 раза, а площадь модуля ошибки регулирования сокращается в 3,2 раза. При обработке внешнего возмущения (рис. 2с) быстродействие ИКСАР повысилось в 2,1 раза по сравнению с ТКСАР, а площадь модуля ошибки регулирования уменьшилась в 1,8 раза.

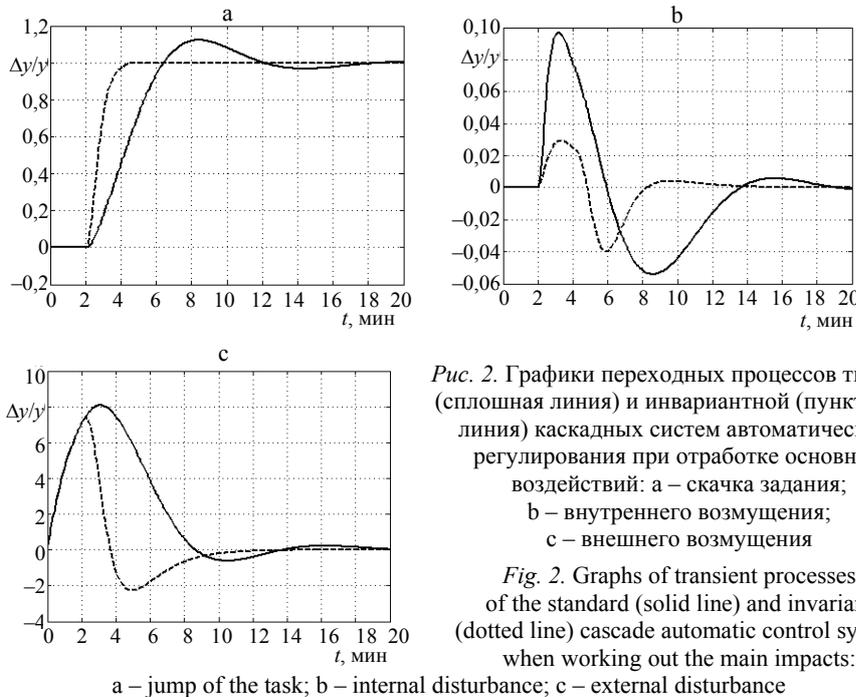


Рис. 2. Графики переходных процессов типовой (сплошная линия) и инвариантной (пунктирная линия) каскадных систем автоматического регулирования при обработке основных воздействий: а – скачка задания; б – внутреннего возмущения; с – внешнего возмущения

Fig. 2. Graphs of transient processes of the standard (solid line) and invariant (dotted line) cascade automatic control system when working out the main impacts:

a – jump of the task; b – internal disturbance; c – external disturbance

Докажем, что компенсатор динамики модели эквивалентного объекта регулирования ИКСАР, охваченный положительной обратной связью внутренней модели, представляет собой в модифицированном виде классический оптимальный регулятор с передаточной функцией вида [13]

$$W_p^{opt}(s) = W_\phi(s) \frac{1}{1 - W_{зд}(s)}, \quad (24)$$

где $W_\phi(s)$ – передаточная функция фильтра; $W_{зд}(s)$ – заданная передаточная функция САР при обработке скачка задания.

Здесь передаточная функция фильтра представляет собой последовательное соединение обратной передаточной функции эквивалентного объекта (11) и заданной передаточной функции САР при обработке скачка задания:

$$W_{\phi}(s) = \frac{W_{зд}(s)}{W_{экр}(s)}. \quad (25)$$

Запишем с учетом (11) и (25) передаточную функцию корректирующего регулятора, охваченного положительной обратной связью (рис. 1b):

$$W_p(s) = \frac{W_{\phi}(s)}{1 - W_{\phi}(s)W_{экр}(s)}. \quad (26)$$

Подставив передаточную функцию фильтра (25) в (26), окончательно получим $W_p(s) = W_{\phi}(s) \frac{1}{1 - \frac{W_{зд}(s)}{W_{экр}(s)}W_{экр}(s)} = \frac{W_{\phi}(s)}{1 - W_{зд}(s)}$, которая адекватна

передаточной функции оптимального регулятора (24).

ВЫВОДЫ

1. Вместо традиционных методов параметрической оптимизации типовых каскадных систем автоматического регулирования для повышения быстродействия и точности при основных воздействиях предложено использовать принцип динамической компенсации, в соответствии с которым в результате решения задачи синтеза регуляторов определяют как их структуру, так и параметры динамической настройки. При этом задача синтеза регуляторов разделена на два этапа: нахождение передаточных функций обоих контуров каскадной системы и расчет параметров динамической настройки регуляторов с использованием внутренней модели для реализации корректирующего регулятора.

2. Структура заданных передаточных функций контуров каскадных систем автоматического регулирования должна полностью соответствовать структуре передаточных функций объектов или эквивалентных объектов регулирования, выполняя функции критериев оптимальной отработки задания. При этом для объектов с запаздыванием необходимо запаздывание заданий передаточной функции критерия оптимальности принимать равным запаздыванию объекта по каналу регулирующего воздействия.

3. Вместо классической формы передаточной функции оптимального корректирующего регулятора предложено использовать модифицированный вариант, представляющий собой компенсатор динамики объекта, учитывающий динамику внутреннего контура, охваченный положительной обратной связью внутренней модели эквивалентного объекта, который используется также для выделения эквивалентного внешнего возмущения. Это позволяет упростить техническую реализацию инвариантной каскадной системы автоматического регулирования и устройство компенсации

эквивалентного внешнего возмущения, а также расчет численных значений параметров системы. При этом инвариантная каскадная система автоматического регулирования имеет всего два расчетных параметра оптимальной динамической настройки, численные значения которых определяют как произведение одного из ряда чисел пропорции золотого сечения, принимая за целые во внутреннем контуре постоянную времени расчетной передаточной функции опережающего участка, а во внешнем – условное запаздывание по каналу регулирующего воздействия с учетом максимально допустимой величины регулирующего воздействия.

4. Результаты моделирования переходных процессов показали, что инвариантная каскадная система автоматического регулирования с внутренней моделью позволяет существенно повысить быстродействие и точность при обработке основных воздействий по сравнению с типовой и может быть рекомендована для широкого внедрения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Клюев, А. С. Наладка систем автоматического регулирования паровых котлов / А. С. Клюев, А. Т. Лебедев, С. И. Новоселов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 280 с.
2. Стефани, Е. П. Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов / Е. П. Стефани. 2-е изд. перераб. М.: Энергия, 1972. 376 с.
3. Солодовников, В. В. Расчет и проектирование аналитических самонастраивающихся систем с эталонными моделями / В. В. Солодовников, Л. С. Шрамко. М.: Машиностроение, 1972. 270 с.
4. Ротач, В. Я. Теория автоматического управления / В. Я. Ротач. М.: МЭИ, 2004. 396 с.
5. Широкий, Д. К. Расчет настроек промышленных систем регулирования / Д. К. Широкий, О. Д. Куриленко. Киев: Техника, 1972. 232 с.
6. Рубашкин, А. С. Методы определения параметров настройки регуляторов топлива прямоточных котлов / А. С. Рубашкин. М. – Л.: Энергия, 1964. 112 с.
7. Aidan, O'Dwyer. Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules / O'Dwyer Aidan. 3rd ed. Dublin: Institute of Technology; Ireland, Imperial College Press, 2006. 599 p. <https://doi.org/10.1142/p424>.
8. Кулаков, Г. Т. Инженерные экспресс-методы расчета промышленных систем регулирования: справ. пособие / Г. Т. Кулаков. Минск: Выш. шк., 1984. 192 с.
9. Кулаков, Г. Т. Теоретические основы экспресс-методов структурно-параметрической оптимизации систем автоматического управления для повышения эффективности использования теплоэлектростанций в переменных режимах: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.13.07 и 05.14.14. Киев: КПИ, 1992. 36 с.
10. Кузьмицкий, И. Ф. Теория автоматического управления / И. Ф. Кузьмицкий, Г. Т. Кулаков. Минск: БГТУ, 2010. 574 с.
11. Фрер, Ф. Введение в электронную технику регулирования / Ф. Фрер, Ф. Ортгенбургер; пер. с нем. М.: Энергия, 1973. 192 с.
12. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами / Г. Т. Кулаков [и др.]; под ред. Г. Т. Кулакова. Минск: Выш. шк., 2017. 238 с.
13. Кулаков, Г. Т. Теория автоматического управления / Г. Т. Кулаков. Минск: БНТУ, 2017. 135 с.
14. Хутский, Г. И. Система автоматического регулирования температуры перегретого пара с устройством коррекции параметров динамической настройки / Г. И. Хутский, Г. Т. Кулаков // Теплоэнергетика. 1968. № 3. С. 64–67.
15. Кулаков, Г. Т. Параметрическая оптимизация системы автоматического управления мощностью энергоблоков 300 МВт в режиме постоянного давления пара перед турбиной / Г. Т. Кулаков, А. Т. Кулаков, К. И. Артёмов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 5. С. 451–462. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-5-451-462>.

16. Кулаков, Г. Т. Параметрическая оптимизация системы автоматического управления мощностью энергоблоков 300 МВт в режиме переменного давления пара перед турбиной / Г. Т. Кулаков, А. Т. Кулаков, К. И. Артёменко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 6. С. 539–551. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-539-551>.

Поступила 08.06.2022 Подписана в печать 12.09.2022 Опубликовано онлайн 30.11.2022

REFERENCES

- Klyuev A. S., Lebedev A. T., Novoselov S. I. (1985) *Adjustment of Automatic Control Systems of Steam Boilers*. Moscow, Ergoatomizdat Publ. 280 (in Russian).
- Stefani E. P. (1972) *Fundamentals of Calculating the Settings of Controllers of Heat and Power Processes*. 2nd ed. Moscow, Energiya Publ. 376 (in Russian).
- Solodovnikov V. V., Shramko L. S. (1972) *Calculation and Design of Analytical Self-Adjusting Systems with Reference Models*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 270 (in Russian).
- Rotach V. Ya. (2004) *Theory of Automatic Control*. Moscow, MEI. 396 (in Russian).
- Shirokii D. K., Kurilenko O. D. (1972) *Calculation of Settings of Industrial Control Systems*. Kyiv, Tekhnika Publ. 232 (in Russian).
- Rubashkin A. S. (1964) *Methods for Determining the Settings of Fuel Controllers of Direct-Flow Boilers*. Moscow – Leningrad, Energiya Publ. 112 (in Russian).
- O'Dwyer A. (2006) *Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules*. 3rd ed. Dublin: Institute of Technology; Ireland, Imperial College Press. 599. <https://doi.org/10.1142/p424>.
- Kulakov G. T. (1984) *Engineering Express Methods of Calculation of Industrial Control Systems: Reference Manual*. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ. 192 (in Russian).
- Kulakov G. T. (1992) *Theoretical Foundations of Express Methods of Structural-Parametric Optimization of Automatic Control Systems to Improve the Efficiency of the Use of Thermal Power Plants in Variable Modes*. Kiev, KPI. 36 (in Russian).
- Kuz'mitskii I. F., Kulakov G. T. (2010) *Theory of Automatic Control*. Minsk, BSTU. 574 (in Russian).
- Fröhr F., Orttunburger F. (1970) *Einführung in die Elektronische Regelungstechnik*. Berlin – München, Siemens A.G. (in German).
- Kulakov G. T., Kulakov A. T., Kukhorenko A. N., Kravchenko V. V. (2017) *Theory of Automatic Control of Thermal Power Processes*. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ. 238 (in Russian).
- Kulakov G. T., Kulakov A. T., Kukhorenko A. N., Kravchenko V. V. (2017) *The Theory of Automatic Control*. Minsk, BNTU. 135 (in Russian).
- Khutskii G. I., Kulakov G. T. (1968) The System of Automatic Regulation of the Temperature of Superheated Steam with a Device for Correcting the Parameters of Dynamic Tuning. *Teploenergetika = Thermal Engineering*, (3), 64–67 (in Russian).
- Kulakov G. T., Kulakov A. T., Artsiomenka K. I. (2018) Parametric Optimization for Automatic Control System of 300 MW Power Units at a Constant Steam Pressure Upstream of the Turbine. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (5), 451–462. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-5-451-462> (in Russian).
- Kulakov G. T., Kulakov A. T., Artsiomenka K. I. (2018) Parametric Optimization for Automatic Control System of Power Units of 300 MW for the Mode of Variable Pressure of Turbine Inlet Steam. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (6), 539–551. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-539-551> (in Russian).

Received: 8 June 2022 Accepted: 12 September 2022 Published online: 30 November 2022

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-551-561>

UDC 538.4

Features of the Behavior of a Plane Axisymmetric Magnetic Fluid Drop in a Nonmagnetic Solvent and a Uniform Magnetic Field

V. G. Bashtovoi¹⁾, A. G. Reks¹⁾, A. A. Zahadskaya¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Abstract. The work is devoted to an experimental study of the process of dissolution of a magnetic fluid in a nonmagnetic solvent under the action of a uniform magnetic field. It is experimentally established that in a volume of magnetic fluid surrounded by a miscible solvent fluid, under the action of a uniform magnetic field, a mechanical movement arises, triggering deformation of this volume. Initially, the axisymmetric volume of the fluid takes an ellipsoidal shape, lengthening along the magnetic field direction. The main reason for this movement is the pressure differences in the magnetic fluid, caused by jumps and nonuniformities of the magnetic field at the interface between magnetic and nonmagnetic media. Simultaneously with the mechanical motion, the diffusion dissolution of the magnetic fluid occurs, which is also accompanied by the motion of the diffusion front at the interface between the fluids. The concentration gradients of magnetic particles that arise in this case cause gradients of the magnetization of the fluid and, as a consequence, gradients of the magnetic field intensity. Together, this triggers the appearance of a bulk magnetic force in the magnetic fluid, and the pressure gradients associated with it. The main regularities of this process have been established, viz. the dependence of change of the geometric characteristics of the volume and its deformation rate on time. It is shown that at the initial stage of the process, the rates of mechanical movement of the boundaries of the magnetic fluid volume are much higher than the rates of movement of the diffusion front. Thus, the initial rate of mechanical elongation of the droplet under the experimental conditions is 0.25 mm/min, and the diffusion front rate is 0.08 mm/min. Over time, these processes slow down and stop when the volume of the magnetic fluid is completely dissolved. Herewith, the mechanical elongation of the drop is the first to stop and, in the case under consideration, takes about ten minutes.

Keywords: magnetic fluid, nonmagnetic solvent, diffusion, droplet dissolution, uniform magnetic field, magnetic pressure drop, droplet deformation

For citation: Bashtovoi V. G., Reks A. G., Zahadskaya A. A. (2022) Features of the Behavior of a Plane Axisymmetric Magnetic Fluid Drop in a Nonmagnetic Solvent and a Uniform Magnetic Field. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 65 (6), 551–561. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-551-561>

Адрес для переписки

Баштовой Виктор Григорьевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 237-33-03
bashv@rambler.ru

Address for correspondence

Bashtovoi Viktor G.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 237-33-03
bashv@rambler.ru

Особенности поведения плоской осесимметричной капли магнитной жидкости в немагнитном растворителе в однородном магнитном поле

В. Г. Баштовой¹⁾, А. Г. Рекс¹⁾, А. А. Загадская¹⁾

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

Реферат. Работа посвящена экспериментальному исследованию процесса растворения магнитной жидкости в немагнитном растворителе под действием однородного магнитного поля. Экспериментально установлено, что в объеме магнитной жидкости, окруженной смешивающейся с ней жидкостью-растворителем, под действием однородного магнитного поля возникает механическое движение, приводящее к деформации этого объема. Первоначально осесимметричный объем жидкости принимает эллипсоидальную форму и удлиняется вдоль направления магнитного поля. Основной причиной этого движения являются перепады давления в магнитной жидкости, вызванные скачками и неравномерностями магнитного поля на границе раздела магнитных и немагнитных сред. Одновременно с механическим движением происходит диффузионное растворение магнитной жидкости, которое также сопровождается движением диффузионного фронта на границе раздела жидкостей. Возникающие при этом градиенты концентрации магнитных частиц вызывают градиенты намагниченности жидкости и, как следствие, градиенты напряженности магнитного поля. В совокупности это приводит к возникновению объемной магнитной силы в магнитной жидкости и связанных с ней градиентах давления. Установлены основные закономерности этого процесса: зависимость изменения геометрических характеристик объема и скорости его деформации от времени. Показано, что на начальном этапе процесса скорость механического движения границ объема магнитной жидкости значительно превышает скорость движения диффузионного фронта. Так, начальная скорость механического удлинения капли в условиях эксперимента составляет 0,25 мм/мин, а скорость распространения диффузионного фронта 0,08 мм/мин. Со временем эти процессы замедляются и прекращаются, когда объем магнитной жидкости полностью растворяется. При этом механическое удлинение капли прекращается первым и в рассматриваемом случае занимает порядка десятка минут.

Ключевые слова: магнитная жидкость, немагнитный растворитель, диффузия, растворение капли, однородное магнитное поле, магнитный скачок давления, деформация капли

Для цитирования: Баштовой, В. Г. Особенности поведения плоской осесимметричной капли магнитной жидкости в немагнитном растворителе в однородном магнитном поле / В. Г. Баштовой, А. Г. Рекс, А. А. Загадская // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 6. С. 551–561. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-551-561>

Introduction

In connection with the development of technologies that use magnetic fluids [1–4] for heat transfer, chemical, and medical applications for water purification from harmful impurities [5–6], and many other purposes, the relevant issues are the interaction of limited free volumes of a magnetic fluid with a nonmagnetic fluid or gaseous environment. This becomes especially important when creating magnetic fluid emulsions and gas-liquid systems.

To date, the bulk of the work in this direction is associated with the study of the behavior of magnetic fluid droplets placed in a nonmagnetic fluid that is immiscible with them, when surface tension forces act on their interface.

The most interesting in this case is that under the action of an applied uniform magnetic field, the droplets are deformed, which is expressed in their elongation along the field. This fact was first noted based on theoretical calculations in [7] and experimentally observed in [8, 9]. Such change in the shape of an initially spherical droplet of magnetic fluid is due to the fact that its presence distorts the applied uniform magnetic field and causes the appearance of forces that tend to change the shape of the droplet in such a way as to minimize these distortions and the associated increase in the energy of the system. This minimization is ensured by elongation of the droplet along the direction of the magnetic field with a corresponding decrease in that part of the drop surface that is perpendicular to the field intensity vector and on which field jumps occur. Thus, a magnetic fluid droplet tends to form its surface so that the magnetic field is on the maximum possible area tangent to it, where, as is known from electrodynamics, the field intensity is continuous when passing through the interface between magnetic and nonmagnetic media.

The most impressive results of numerical simulation of this process in terms of accuracy are presented in a recent paper [10], where the authors achieved a detailed description of the process.

Such a deformation of magnetic fluid droplet volumes creates effective control mechanisms for multicomponent magnetic fluid systems for heat exchange technologies, including those accompanied by boiling [11, 12], bubbling [13], and magnetic fluid droplet impacts with the surface of its large volume [14], in lubrication systems [15].

A large number of works are devoted to the study of magnetic fluid droplet volumes of various geometries, including semi-bounded and flat droplets [16, 17].

Another large class of problems is associated with the situation when a magnetic fluid droplet is surrounded by a nonmagnetic fluid that mixes with it and dissolves it. In this case, the surface tension disappears at the interface between these media, but the processes of diffusion dissolution of the magnetic fluid come into play. At the moment, the most interesting investigated effects accompanying this situation are the instability of the boundary of the diffusion layer in a uniform magnetic field [18], as well as the labyrinth instability of a flat drop in a magnetic field normal to its plane [19]. In addition, as shown in [20], an alternating uniform magnetic field can create mechanism for mixing of fluids.

However, the existing viewpoints allow us to expect that in this case, in a constant uniform external magnetic field, mechanical motion can occur in the volume of the droplet, which provides an additional mechanism for its mixing.

The present work is devoted to the experimental study of the processes occurring in a plane axisymmetric magnetic fluid droplet surrounded by a nonmagnetic miscible fluid-solvent in a uniform magnetic field \vec{H} parallel to the plane of the droplet, as shown in Fig. 1.

Consider the physical prerequisites for the expected results of this study. As it is known, at the interface between magnetic and nonmagnetic fluids, a magnetic pressure jump Δp arises, which is proportional to the square of the fluid magnetization component normal to the boundary M_n : $\Delta p = (1/2)\mu_0 M_n^2$, ($\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$ H/m is the magnetic permeability of the vacuum) [1].

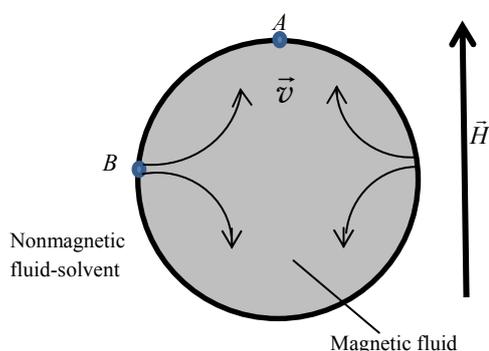


Fig. 1. Geometry of the problem

By this value, the pressure in the magnetic fluid is less than the pressure in the surrounding nonmagnetic fluid. At those points where the magnetic field is tangent to the interface, such a pressure jump does not occur and the pressure in the magnetic fluid is equal to the pressure in the nonmagnetic fluid. With regard to the situation considered in Fig. 1, the above means that when a magnetic field is applied, the pressure p_A at the top of the droplet at point A will be less by the value of this jump than the pressure p_B at the side point B . Under the action of this pressure difference in the droplet, the fluid will begin to flow from the area with a higher pressure to the area with a lower pressure, that is, from the side points to the peaks. The result of such fluid overflow will be the elongation of the fluid droplet along the vector of magnetic field intensity. The droplet from spherical will turn into ellipsoidal. As mentioned earlier, for a droplet of magnetic fluid surrounded by an immiscible nonmagnetic fluid, this process has been studied in sufficient detail both experimentally and theoretically. In this case, when the droplet is elongated, the curvature of its surface changes at the top and side points considered above, as a result of which different capillary pressure jumps arise at these points, triggering corresponding pressure differences in the fluid, which compensate for the pressure differences caused by magnetic pressure jumps. Because of this, the droplet takes some stable stationary shape.

In the situation considered in this paper, when the magnetic fluid and its nonmagnetic environment are miscible fluids and there is no surface tension between them, such a compensating action for the magnetic pressure jump does not occur and the elongation of the droplet cannot reach a stationary value. However, in this case, the diffusion dissolution of the magnetic fluid into the surrounding solvent and the corresponding blurring of the interface between the fluids will necessarily take place. It will turn into some kind of diffusion boundary layer with a smoothly changing concentration of the magnetic fluid and an increase in thickness with time. The magnetic fluid concentration gradient is accompanied by the appearance of a magnetization gradient ∇M and, in its turn, causes a magnetic field intensity gradient ∇H . Thus, over time, pressure differences in the magnetic fluid caused by the magnetic pressure jumps are transformed into pressure gradients caused by the volume magnetic force $\mu_0 M \nabla H$ in

a nonuniform magnetic field, which will provide a further elongation of the droplet. However, over time, as the droplet dissolves, the diffusion rate decreases, the thickness of the diffusion boundary layer increases, and the gradients of concentration, magnetization, and magnetic field intensity decrease. Accordingly, the process of elongation of the droplet will slow down and stop when the droplet is completely dissolved.

Thus, in the case under consideration, the mixing of a magnetic fluid droplet with a nonmagnetic surrounding solvent will be provided by two mechanisms: diffusion dissolution and mechanical motion due to pressure differences associated with jumps and gradients of its magnetization.

Experimental studies

In the experiments performed, a cylindrical droplet of magnetic fluid is formed in a thin layer between the glass plates of the Hele-Shaw cell and placed in a uniform magnetic field parallel to the plane of the plates. The remaining volume between the plates is filled with a transparent nonmagnetic fluid, into which the droplet dissolves. The small thickness of the layer makes it possible to carry out optical observation of the ongoing processes and the distribution of the magnetic fluid concentration over time, as well as their photography and filming. In the experiments carried out, magnetic fluids based on transformer oil were used, with magnetite as a dispersed phase of various concentrations and oleic acid as a stabilizer. Characteristics of magnetic fluids samples are given in Tab. 1.

Table 1

The main properties of used magnetic fluids

Type of the fluid	Magnetization of saturation, kA/m	Density, kg/m ³	Volume concentration of magnetite, %	Viscosity, P·c
MMT-32	32.1	1313	0.105	0.0395
MMT-8	7.90	988	0.025	0.0248
Transformer oil	0	886	0	0.0210

The fluid that is the basis of the magnetic fluid, i. e. pure transformer oil, was used as the solvent surrounding the droplet. The thickness of the studied droplets was 0.14 mm, and their radius was 4.5 mm. A uniform magnetic field was generated by Helmholtz coils with a working zone diameter of 200 mm. The experiments were carried out at a magnetic field intensity of 12.6 kA/m and in its absence. During the experiment, photography and filming were carried out with subsequent image processing using Photoshop. Visual typical results of the experiment are presented in Fig. 2.

As expected, in the absence of a magnetic field, the initially cylindrical droplet of magnetic fluid with radius $r_0 = 4.5$ mm retained axial symmetry and monotonically increased its radius due to diffusion dissolution into the environment, Fig. 2a, b, c. When a uniform magnetic field is applied, the photographs in Fig. 2d, e, f demonstrate an obvious violation of the axial symmetry

of the droplet and its elongation along the field, which also corresponds to the above physical concepts of the diffusion and mechanical processes which take place in it.

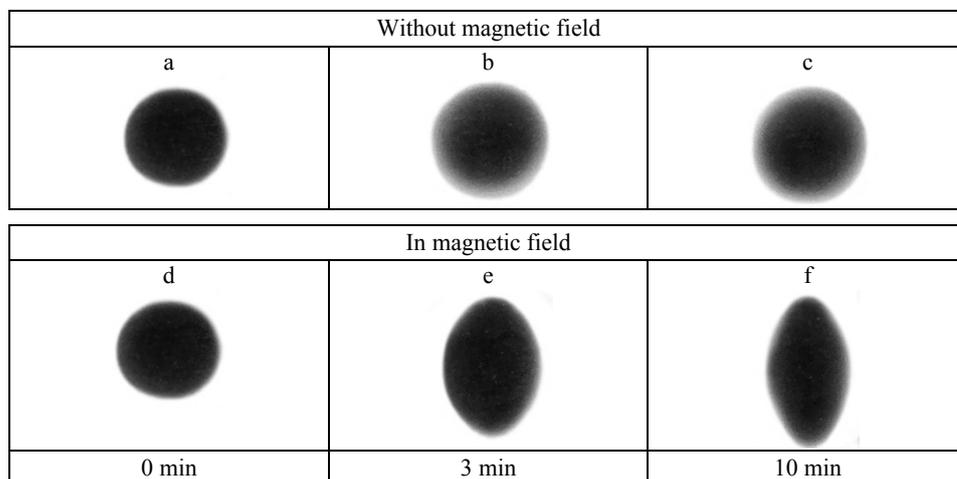


Fig. 2. Photos of droplets of magnetic fluid MMT-32 in a nonmagnetic solvent: in the absence of magnetic field: a – the initial moment; b – after 3 min; c – after 10 min; in a uniform magnetic field: d – the initial moment; e – after 3 min; f – after 10 min

Fig. 3 shows the results of processing images of droplets in the absence of a magnetic field from Fig. 2a, b, c at different moments of time with the help of Photoshop.

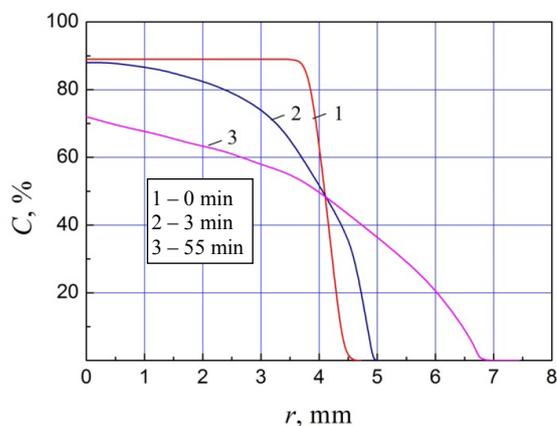


Fig. 3. Distribution of the darkness level of magnetic fluid droplet images at different moments of time during its diffusion dissolution in the absence of a magnetic field: 1 – initial moment of time; 2 – after 3 min; 3 – after 55 min

The distribution of the darkness level C of these images at different moments of time gives a clear picture of the distribution of the concentration of the magnetic particles in magnetic fluid at these moments and the dynamics of its change.

Since the magnetic fluid has a dark color and its environment is transparent, at the initial moment of time the boundary between them is quite clear. As the

magnetic fluid dissolves, this boundary becomes fuzzy and is characterized by varying darkness levels in black and white images. Naturally, the darker areas correspond to a higher concentration of the magnetic fluid in the solution. The correspondence between the concentration of the magnetic fluid and the darkness level on the obtained photographic images in the first approximation can be established based on the Bouguer – Lambert – Beer law, although, due to the complex molecular composition of the magnetic fluid, its use cannot provide sufficient adequacy.

The boundaries of a magnetic fluid droplet at each moment of time were defined as the boundaries of the region in which the darkness level of the image differs by more than 1 % upwards from the darkness level of the environment. Since pure transformer oil is a transparent fluid, the darkness level corresponding to it in the presented photographs is 0. The results presented in this paper correspond to the condition that the dimensions of the magnetic fluid droplet are smaller than the longitudinal dimensions of the cavity, in which the studies were carried out, and its boundaries do not affect the process.

As can be seen from curve 1 in Fig. 3, at the initial moment of time, there is a sharp interface between the droplet of magnetic fluid and the surrounding solvent. Within the droplet, the concentration of the magnetic fluid is constant and sharply drops to zero at the boundary. With time, this interface becomes fuzzy and the thickness of the diffusion boundary layer increases. In the absence of a magnetic field, Fig. 2a, b, c, the droplet radius $r(t)$ increases only due to the diffusional dissolution of the droplet while maintaining its axial symmetry. The dimensions of the region with a nonzero concentration of the magnetic fluid are determined by the rate of movement of a diffusion front v_r , which equals approximately 0.08 mm/min at the initial moment of time.

When a magnetic field is applied, the change in the size and shape of the droplet is provided by two mechanisms: diffusion dissolution and the above-described mechanical motion inside the drop. The droplet elongates along the field direction, taking a shape close to ellipsoidal with the major semi-axis $a(t)$ and the minor semi-axis $b(t)$. At the same time, knowledge of the behavior of a droplet of the same fluid and the same size in the absence of a magnetic field and its presence makes it possible to determine the characteristics of the mechanical deformation of the droplet.

Let us pay attention to the fact that the action of these mechanisms (diffusion and mechanical) can have a multidirectional character. Whereas diffusive dissolution triggers an increase in the size of the droplet in all directions, the mechanical motion triggers an increase in the longitudinal (along the field) and a decrease in the transverse size of the droplet.

As it can be seen from the graphs in Fig. 4 for a droplet of magnetic fluid MMT-32, the total action of these mechanisms over a 12-minute time interval ultimately triggers an increase in the relative longitudinal size a/r_0 by 60 % (curve 1) and a decrease in the relative transverse size b/r_0 (curve 3) size

by 18 %. In this case, the relative increase in the droplet radius r/r_0 only due to diffusion dissolution in the absence of a magnetic field is about 10 % (curve 2).

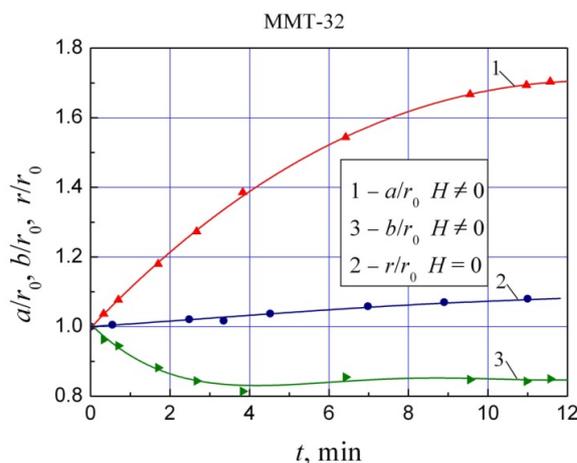


Fig. 4. Time dependence of the relative linear dimensions a/r_0 , b/r_0 , r/r_0 of the droplet of magnetic fluid MMT-32

The mechanical deformation of a magnetic fluid droplet in the processes under consideration is of the greatest interest, connected specifically with the magnetic properties of the fluid and the influence of a magnetic field. For a visual representation of the role of only the mechanical mechanism of droplet deformation, it is advisable to present the results of Fig. 4 without the diffusion expansion of the droplet $\Delta r = r - r_0$, namely $(a - \Delta r)/r_0$ and $(b - \Delta r)/r_0$ versus time. The results of this are shown in Fig. 5 and indicate elongation of the drop along the field direction and narrowing in the transverse direction. Moreover, in the concentrated fluid MMT-32, these processes occur more intensively than in the diluted one – MMT-8.

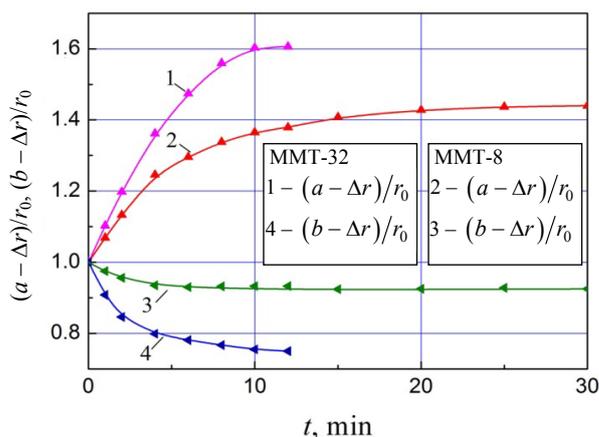


Fig. 5. Time dependence of relative linear dimensions $(a - \Delta r)/r_0$ and $(b - \Delta r)/r_0$ of droplets of concentrated MMT-32 and diluted MMT-8 magnetic fluids due to mechanical movement of its boundary

The change in the linear dimensions of the droplets of both fluids due to mechanical motion occurs most intensively in the initial time interval of about 12 min and practically stops after that.

Let us determine the rate of change in the linear dimensions of the drop as follows: $v_a = da//dt$ – the rate of change in the half-length of the drop (the rate of movement of point A in Fig. 1); $v_b = db//dt$ – the rate of change in the half-width of the drop (the rate of movement of point B in Fig. 1); $v_r = dr/dt$ – the rate of movement of the diffusion front. A positive value of the velocity indicates an increase in the corresponding sizes a and r of the drop, and a negative value indicates a decrease in the size b . Naturally, a total change in the linear dimensions of the drop in these directions occurs with a double value of these rates.

As follows from Fig. 6 at the initial moment of time, the rate of elongation of the drop v_a in a magnetic field is about 0.5 mm/min and exceeds the rate of its narrowing $v_b \approx 0.25$ mm/min, and the rate of the diffusion front $v_r \approx 0.08$ mm/min in the absence of a magnetic field.

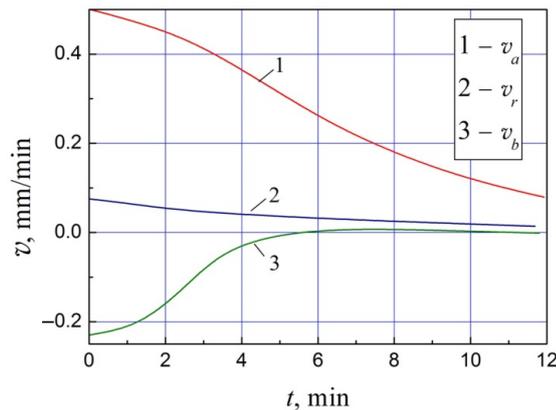


Fig. 6. Time dependence of the rate of change in the linear dimensions of a drop of magnetic fluid MMT-32 during diffusion and mechanical displacement of its boundary

For determining exclusively mechanical movement of the droplet boundaries, we present the results shown in Fig. 6, without the diffusion expansion of the droplet, namely: $v_{am} = v_a - v_r$, $v_{bm} = v_b - v_r$.

As can be seen from Fig. 7 at the initial moment of time, the rate of mechanical elongation of the droplet is approximately 0.5 mm/min for the MMT-32 fluid and 0.3 mm/min for the MMT-8 fluid, while the rates of narrowing of these droplets are 0.4 mm/min and 0.1 mm/min, respectively. Over time, the mechanical rates of the droplet boundaries drop to almost zero due to the action of viscous friction forces and a decrease in pressure gradients caused by magnetization and magnetic field intensity gradients as the diffusion boundary layer expands. The subsequent increase in the area occupied by the magnetic fluid is determined solely by its diffusion dissolution in the surrounding fluid.

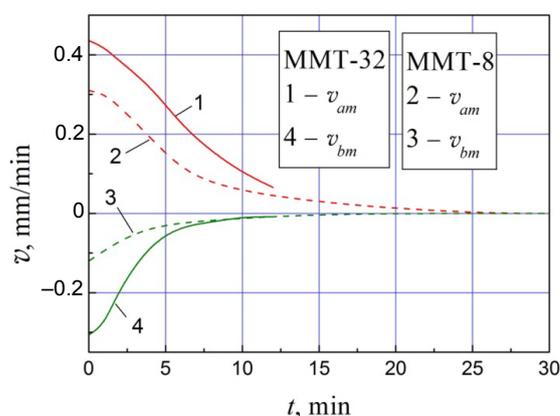


Fig. 7. Time dependence of the rates v_{am} , v_{bm} of the change in the linear dimensions of a magnetic fluid droplet due to the mechanical movement of its boundaries in a magnetic field

The results presented in Fig. 7 also indicate that large pressure gradients arising in a more concentrated magnetic fluid MMT-32 with a higher magnetization cause more intense movement than in a less concentrated fluid MMT-8 with a lower magnetization. On the other hand, the fluid MMT-32 with a higher magnetization has a higher viscosity. Therefore, the motion in the fluid MMT-32 monotonically decays faster (in about 12 min) than in the fluid MMT-8 (in about 30 min).

CONCLUSIONS

1. Thus, it has been experimentally established that a droplet of magnetic fluid surrounded by a nonmagnetic fluid-solvent that mixes with it in a uniform magnetic field changes its configuration and dimensions due to two mechanisms – diffusion dissolution and mechanical movement of the boundaries under the action of pressure differences inside it, caused by magnetic forces. The latter is due to magnetic pressure jumps at the boundaries, as well as gradients of the fluid magnetization and, accordingly, the magnetic field intensity associated with the inhomogeneous distribution of the concentration of magnetic particles in the fluid, which are a consequence of diffusion processes.

2. Magnetic forces cause the elongation of the droplet in the direction of the magnetic field. In this case, the greater the magnetization of the fluid, the greater the initial values – of the rates of the mechanical motion of the boundaries and the faster this motion monotonically decays.

REFERENCES

1. Rosensweig R. E. (1985) *Ferrohydrodynamics*. Cambridge, Cambridge University Press Publ. 344.
2. Blums E., Cebers A., Maiorov M. (1997) *Magnetic Fluids*. Berlin, Walter de Gruyter Publ. 416. <https://doi.org/10.1515/9783110807356>.

3. Bashtovoi V. G., Berkovsky B. M., Vislovich A. N. (1988) *Introduction to Thermomechanics Magnetic Fluids*. New York, Hemisphere Publ. Corp. 216.
4. Berkovsky B., Bashtovoi V. (ed.) (1996) *Magnetic Fluids and Applications Handbook*. New York, Begell House Inc. Publ. 851.
5. Magnet C., Kuzhir P., Bossis G., Meunier A., Nave S., Zubarev A., Lomenech C., Bashtovoi V. (2014) Behavior of Nanoparticle Clouds around a Magnetized Microsphere under Magnetic and Flow Fields. *Physical Review E*, 89 (3), 032310. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.89.032310>.
6. Rymasheuskaia K. D. (2017) The Improvement of Low-Waste Technologies of Working Body of Water Preparation at Thermal and Nuclear Power Plants. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (4), 367–379. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-4-367-379> (in Russian).
7. Tarapov I. E. (1974) Hydrodynamics of Magnetizable and Polarizable Media. *Fluid Dynamics*, 9 (5), 806–810. <https://doi.org/10.1007/BF01017431>.
8. Arkhipenko V. I., Barkov Iu. D., Bashtovoi V. G. (1979) Shape of a Drop of Magnetized Fluid in a Homogeneous Magnetic Field. *Magnetohydrodynamics*, 14 (3), 373–375.
9. Bacri J. C., Salin D. (1982) Instability of Ferrofluid Magnetic Drops under Magnetic Field. *Journal de Physique Lettres*, 43 (17), L649–L654. <https://doi.org/10.1051/jphyslet:019820043017064900>.
10. Langins A. A., Stikutsa A. P., Cebers A. (2022) A Three-Dimensional Boundary Element Method Algorithm for Simulations of Magnetic Fluid Droplet Dynamics. *Physics of Fluids*, 34 (61), 062105. <https://doi.org/10.1063/5.0092532>.
11. Gogosov V., Simonovskii A. Yu., Smolkin R. D. (1990) Quenching and Separation in Magnetic Fluids. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 85 (1–3), 227–232. [https://doi.org/10.1016/0304-8853\(90\)90057-W](https://doi.org/10.1016/0304-8853(90)90057-W).
12. Bashtovoi V. G., Challant G., Volkova O. Yu. (1993) Boiling Heat Transfer in Magnetic Fluids. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 122 (1–3), 305–308. [https://doi.org/10.1016/0304-8853\(93\)91097-Q](https://doi.org/10.1016/0304-8853(93)91097-Q).
13. Bashtovoi V., Kovalev M., Reks A. (2005) Instabilities of Bubbles and Droplets Flows in Magnetic Fluids. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 289, 350–352. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2004.11.099>.
14. Bashtovoi V., Kuzhir P., Reks A. (2002) Impact Between a Magnetic Fluid Drop and a Magnetic Fluid Surface. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 252, 280–282. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(02\)00601-7](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(02)00601-7).
15. Labkovich O. N. (2017) Reduction of Friction Losses due to the Vortex Flow of the Magnetic Fluid Caused by the Additives of Carbon Nanotubes. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (3), 265–275. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-3-265-275> (in Russian).
16. Berkovsky B., Bashtovoi V. (1980) Instabilities of Magnetic Fluids Leading to a Rupture of Continuity. *IEEE Transactions on Magnetic*, 16 (2), 288–297. <https://doi.org/10.1109/TMAG.1980.1060613>.
17. Bashtovoi V., Pogiritskaya S., Reks A. (1999) Dynamics of Deformation of Magnetic Fluid Flat Drops in a Longitudinal Magnetic Field. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 201 (1–3), 300–302. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(99\)00144-4](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(99)00144-4).
18. Derec C., Boltenhagen P., Neveu S., Bacri J.-C. (2008) Magnetic Instability between Miscible Fluids in a Hele-Shaw Cell. *Magnetohydrodynamics*, 44 (2), 135–142. <https://doi.org/10.22364/mhd.44.2.6>.
19. Huanhao Li, Chun-Yi Kao, Chih-Yung Wen. (2018) Labyrinthine and Secondary Wave Instabilities of a Miscible Magnetic Fluid Drop in a Hele-Shaw Cell. *Journal of Fluid Mechanics*, 836 (2), 374–396. <https://doi.org/10.1017/jfm.2017.739>.
20. Shyam S., Mondal P. K., Mehta B. (2021) Magnetofluidic Mixing of a Ferrofluid Droplet under the Influence of a Time-Dependent External Field. *Journal of Fluid Mechanics*, 917 (2), A15. <https://doi.org/10.1017/jfm.2021.245>.

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-562-571>

УДК 621.352

Интеграция высокотемпературного топливного элемента с системой улавливания CO₂ в энергетический цикл тепловой электрической станции

А. А. Филимонова¹⁾, А. А. Чичиров¹⁾, Н. Д. Чичирова¹⁾, Р. Ф. Камалиева¹⁾

¹⁾Казанский государственный энергетический университет (Казань, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2022
Belarusian National Technical University, 2022

Реферат. Топливный элемент на расплавленных карбонатах позволяет улавливать, сепарировать и концентрировать углекислый газ во время перехода его через расплав карбонатов от катодной стороны к анодной, одновременно генерируя электричество и теплоту. В статье представлены технология и технологическая схема системы улавливания CO₂ из дымовых газов тепловой электрической станции в высокотемпературном топливном элементе на расплавленных карбонатах с последующей конверсией и утилизацией газообразных горючих продуктов в энергетическом цикле тепловой электрической станции. Топливный элемент работает на природном газе с внутренним риформингом. После топливного элемента выходящий с анода газ направляется в блок конверсии, где в реакции с углеродом при высоких температурах образуются горючие газы, пригодные для повторного сжигания в турбине. Для энергетических установок, системы улавливания и конверсии углекислого газа проводились термодинамические, технико-экономические расчеты. Коэффициент полезного действия высокотемпературного топливного элемента 42 %. В базовом сценарии чистая энергоэффективность станции 61 % при степени улавливания CO₂ 80–85 %. Возврат топливных газов после конверсии CO₂ с учетом их теплотворной способности позволяет дополнительно увеличить электрическую мощность тепловой электрической станции до 20 %. При удельной стоимости топливного элемента 1300 евро/кВт и цене на природный газ 0,04 евро/кВт полная стоимость электроэнергии установки составляет 0,074 евро/кВт. Результаты показывают, что предложенная система привлекательна для производства электроэнергии на природном газе с улавливанием углекислого газа.

Ключевые слова: топливный элемент на расплавленных карбонатах, декарбонизация энергопроизводства, тепловые электрические станции, гибридная энергоустановка

Для цитирования: Интеграция высокотемпературного топливного элемента с системой улавливания CO₂ в энергетический цикл тепловой электрической станции / А. А. Филимонова [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 6. С. 562–571. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-562-571>

Адрес для переписки

Филимонова Антонина Андреевна
Казанский государственный
энергетический университет
ул. Красносельская, 51,
420066, г. Казань, Российская Федерация
Тел.: +7 843 519-42-20
aachichirova@mail.ru

Address for correspondence

Filimonova Antonina A.
Kazan State Power
Engineering University
51, Krasnoselskaya str.,
420066, Kazan, Russian Federation
Tel.: +7 843 519-42-20
aachichirova@mail.ru

Integrating a High Temperature Fuel Cell with CO₂ Capture System into Thermal Power Plant Energy Cycle

A. A. Filimonova¹⁾, A. A. Chichirov¹⁾, N. D. Chichirova¹⁾, R. F. Kamaliev¹⁾

¹⁾Kazan State Power Engineering University (Kazan, Russian Federation)

Abstract. The molten carbonate fuel cell allows for capturing, separating and concentrating CO₂ as it passes through the carbonate melt from the cathode side to the anode side, while simultaneously generating electricity and heat. The article presents the technology and flow diagram of a system for capturing CO₂ from flue gases of a thermal power plant in a high-temperature fuel cell on molten carbonates with subsequent conversion and utilization of gaseous combustible products in the energy cycle of a thermal power plant. The fuel cell runs on natural gas with internal reforming. After the fuel cell, the gas leaving the anode is sent to the conversion unit where, in reaction with carbon at high temperatures, combustible gases are formed that are suitable for re-combustion in the turbine. For power plants and a system for capturing and converting carbon dioxide, thermodynamic, technical and economic calculations were carried out. The efficiency of a high-temperature fuel cell is 42 %. In the baseline scenario, the net energy efficiency of the plant is 61 % while a CO₂ capture ration is 80–85 %. The return of fuel gases after the conversion of carbon dioxide, taking into account their calorific value, makes it possible to additionally increase the electric power of the thermal power plant up to 20 %. With a unit cost of a fuel cell of 1300 EUR/kW and a price of natural gas of 0.04 EUR/kW, the total electricity cost of the plant is 0.074 EUR/kW. The results show that the proposed system is attractive for natural gas power generation with CO₂ capture.

Keywords: fuel cell on molten carbonates, decarbonization of energy production, thermal power plants, hybrid power plant

For citation: Filimonova A. A., Chichirov A. A., Chichirova N. D., Kamaliev R. F. (2022) Integrating a High Temperature Fuel Cell with CO₂ Capture System into Thermal Power Plant Energy Cycle. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 65 (6), 562–571. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-562-571> (in Russian)

Введение

Улавливание и захоронение углекислого газа – одна из стратегий по сокращению выбросов CO₂ в атмосферу от сжигания ископаемого топлива [1]. Затраты на ее реализацию могут составлять до 35 % от стоимости производства электроэнергии [2]. В этой связи актуальна разработка новых стратегий улавливания CO₂ с последующей утилизацией для снижения экономических затрат и повышения эффективности выработки электроэнергии [3]. Анализ потоков промышленных отходов позволяет определить наиболее значимые для горения компоненты, состав дымовых газов и их влияние на загрязнение окружающей среды [4, 5].

Топливные элементы способны преобразовывать химическую энергию топлива в электричество чистым и высокоэффективным способом. Преимуществами высокотемпературных топливных элементов (твердооксидных и на расплавленных карбонатах с рабочей температурой 650–1000 °С) являются возможность использования недорогих катализаторов и высокий КПД [6]. Кроме того, их можно объединить с энергетическими установками (с паровой, газовой, микротурбиной и др.) для повышения эффективности выработки электроэнергии в системе [7, 8].

Топливный элемент на расплавленных карбонатах (ТЭРК) кроме O_2 требует подачи CO_2 на катод, где CO_2 реагирует с O_2 , формируя CO_3^{2-} . Углекислый газ, подаваемый на катод, может представлять собой рециркулированный анодный выхлоп или дымовой газ электростанций (энергетических установок), содержащий O_2 и CO_2 [9]. При этом электролит топливного элемента играет роль мембраны для разделения CO_2 из дымового газа, следовательно, модули ТЭРК могут применяться в качестве сепараторов-концентраторов (рис. 1).

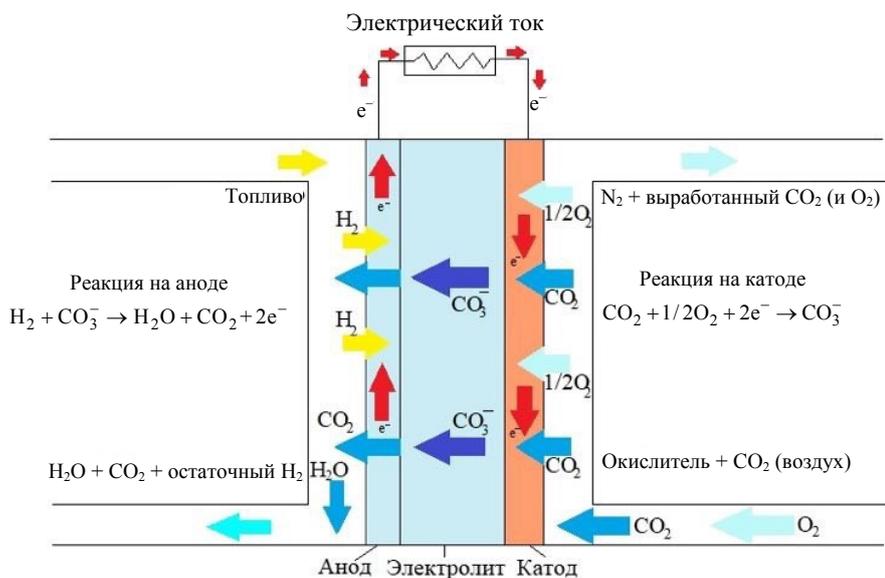


Рис. 1. Принципиальная схема работы топливного элемента на расплавленных карбонатах

Fig. 1. Schematic diagram of a fuel cell on molten carbonates operation

При использовании ТЭРК в качестве сепаратора для улавливания CO_2 в комбинированном цикле энергетической установки, работающей на природном газе, обнаружено, что в зависимости от конфигурации ТЭРК могут улавливать 70–85 % CO_2 с незначительными потерями общей энергоэффективности [10]. Сравнительный анализ технологий улавливания углекислого газа показал более высокую производительность ТЭРК, чем у процессов очистки CO_2 аминами [11]. В [12] продемонстрировано использование ТЭРК для разделения CO_2 из дымовых газов угольной электростанции. Показано, что предлагаемая система обеспечивает улавливание CO_2 на уровне более 90 % с общим увеличением стоимости электроэнергии не более чем на 35 %. В [13] проведено сравнение четырех различных технологий улавливания углекислого газа из дымовых газов электростанций, работающих на природном газе. В результате установлено, что наиболее привлекательной технологией с точки зрения экономии и энергоэффективности является цикл, комбинированный с ТЭРК в качестве сепаратора-концентратора.

Таким образом, ТЭРК могут выступать в качестве эффективной альтернативы сорбентам и аминам в улавливании CO_2 из дымовых газов электро-

станций. Преимущество данной технологии перед химическим связыванием заключается в возможности выделения углекислого газа с анода в чистом виде с последующей утилизацией, например для добычи углеводородов в осложненных условиях вытеснением нефти путем закачки углекислого газа в пласт [14]. Вместе с тем ее недостатками являются значительная стоимость и недолговечность. Высокие температуры, при которых работают указанные топливные элементы, в сочетании с коррозионно-активным углекислотным электролитом ускоряют разрушение и коррозию материалов, сокращая срок их службы.

Основная цель данной работы – предложить технологию улавливания CO₂ из дымовых газов тепловой электрической станции (ТЭС) в высокотемпературном топливном элементе с последующей конверсией и утилизацией газообразных горючих продуктов в энергетическом цикле ТЭС, а также исследовать целесообразность такой системы с точки зрения экономики.

Основная часть

Предлагаемая система состоит из блоков ТЭРК, восстановления диоксида углерода, рецикла восстановленных продуктов в энергетический цикл ТЭС (рис. 2).

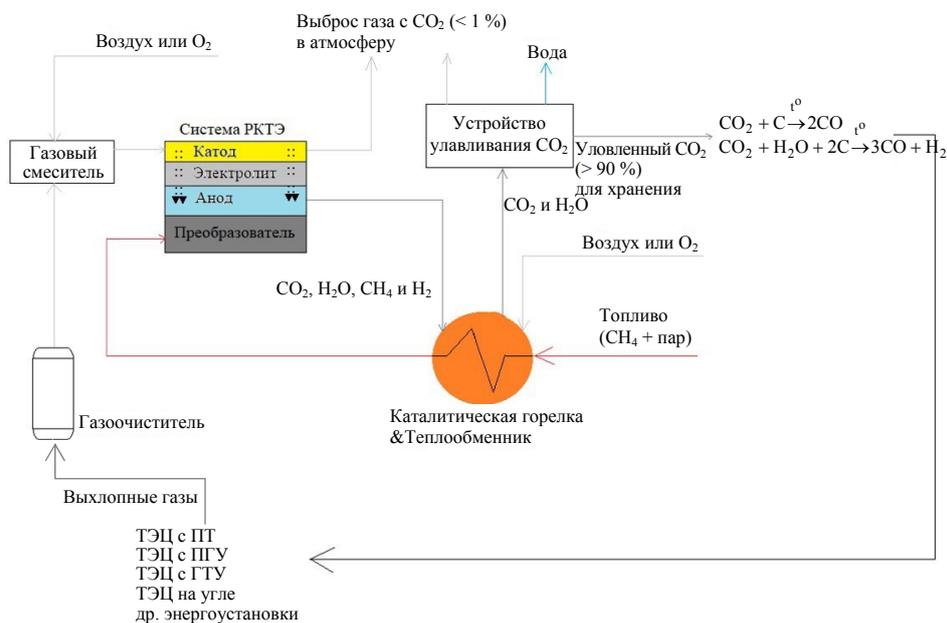


Рис. 2. Система топливного элемента на расплавленных карбонатах с улавливанием CO₂, конверсией и рециклом восстановленного газообразного топлива в энергетический цикл теплоэлектростанции

Fig. 2. The molten carbonate fuel cell system with CO₂ capture, conversion and recycling of recovered gaseous fuel into the thermal power plant power cycle

Для декарбонизации процесса производства электроэнергии разработана технология улавливания углекислого газа из дымовых газов ТЭРК с последующей реакцией восстановления диоксида углерода над раскаленным углем и рециклингом монооксида углерода и водорода в энергетический цикл ТЭС.

Технология предполагает следующие этапы: на катод подается топливный элемент дымовых газов ТЭС с кислородом воздуха, на анод – водородсодержащее топливо (водородсодержащие отходы нефтехимических производств или природного газа). Углекислый газ на катоде соединяется с кислородом, электронами, проходит через мембрану в виде карбоната. Выхлоп с катода содержит оставшиеся дымовые газы и непрореагировавший в топливном элементе CO_2 , их направляют на сброс. Водород на аноде соединяется с карбонатом с образованием электроэнергии, углекислого газа и воды. В стеках ТЭРК электричество и теплота генерируются по мере возникновения электрохимических реакций. Вырабатываемый постоянный ток преобразуется в переменный с помощью DC-AC. Выходящие с анода газы имеют высокую температуру и разделяются на два потока: часть направляется на паровой риформинг метана, а часть используется для нагрева угля. Выходящие с анода углекислый газ и пары воды пропускают через раскаленный уголь при температуре 650–700 °С с образованием монооксида углерода и водорода. Полученные горючие газы направляют в качестве топлива для паровой или газовой турбины ТЭС.

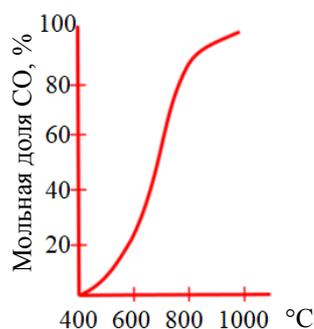


Рис. 3. Температурная зависимость содержания оксида углерода (II) в реакционной смеси

Fig. 3. Temperature dependence of the carbon monoxide content in the reaction mixture

мая: $\text{CO}_2 + \text{C} \leftrightarrow 2\text{CO}$. Влияние температуры на состояние равновесия реакции приведено на графике (рис. 3).

При температуре ниже 400 °С равновесие практически полностью смещено влево, а при температуре выше 1000 °С – вправо (в сторону образования CO). В случае присутствия паров воды кроме оксида углерода (II) в реакционной смеси будет образовываться водород. После конверсии топ-

Система конверсии CO_2 . С анода ТЭРК выходит концентрированный углекислый газ. Если обеспечена полная конверсия топлива, выходной поток газа состоит только из CO_2 и H_2O . После конденсации воды получается практически чистый углекислый газ. Непрогоревшие топливные газы попадают в форсажную камеру и сгорают с остаточным кислородом, выходящим из катода. Суммарный поток углекислого газа (с парами воды и без них в зависимости от условий) направляется в блок конверсии, где происходит реакция восстановления над раскаленным углем при температуре 600–800 °С. Реакция восстановления диоксида углерода обратимая:

ливную смесь направляют повторно в камеру сгорания паровой (газовой) турбины ТЭС.

Для энергетических установок (табл. 1), системы улавливания и конверсии углекислого газа проводились термодинамические, технико-экономические расчеты.

Таблица 1

Параметры и характеристики энергетических установок, использованные в расчетах
 Parameters and characteristics of power plants used in the calculation

Энергетическая установка	Характеристика	Значение
Топливный элемент	Мощность, МВт	60
	Производительность, кВт·ч/кг	5,5
	Рабочая температура, °С	650
	Коэффициент использования топлива	0,75
	Расход топлива, м ³ /ч	14000
Паровая турбина	Мощность, МВт	40
	Скорость подачи природного газа на ТЭС, м ³ /ч	14000
	Механический и электрический КПД, %	98
	Низшая теплотворная способность природного газа, кВт·ч/кг	13,2

Напряжение ячейки ТЭРК $V_{\text{ТЭРК}}$, В:

$$V_{\text{ТЭРК}} = E - j(\eta_{\text{ан}} + \eta_{\text{кат}} + R_{\text{ом}}), \quad (1)$$

где j – средняя плотность тока; $j = I/A$; I – сила тока, А; A – активная область ячейки; $\eta_{\text{ан}}$, $\eta_{\text{кат}}$ – сверхпотенциал анода и катода соответственно, В; $R_{\text{ом}}$ – омический сверхпотенциал; E – напряжение Нернста ТЭРК, В,

$$E = E_0 + \frac{RT}{n_e F} \ln \left(\frac{P_{\text{H}_2, \text{ан}} (P_{\text{H}_2, \text{кат}})^{0,5} P_{\text{CO}_2, \text{кат}}}{P_{\text{H}_2\text{O}, \text{ан}} P_{\text{CO}_2, \text{ан}}} \right), \quad (2)$$

R – универсальная газовая постоянная, $R = 8,31$ Дж/моль·°С; E_0 – идеальный стандартный потенциал, В,

$$E_0 = \frac{-\Delta G}{n_e F}, \quad (3)$$

ΔG – изменение энергии Гиббса; n_e – количество электронов, участвующих в реакции; F – постоянная Фарадея; T – рабочая температура ТЭРК; P_i – парциальное давление i -го компонента на аноде или катоде.

Сверхпотенциал для анода, катода и омический сверхпотенциал [15]:

$$\eta_{\text{ан}} = 2,27 \cdot 10^{-9} \exp\left(\frac{6435}{T}\right) P_{\text{H}_2}^{-0,42} P_{\text{CO}_2}^{-0,17} P_{\text{H}_2\text{O}}^{-1,0}; \quad (4)$$

$$\eta_{\text{кат}} = 7,505 \cdot 10^{-10} \exp\left(\frac{9298}{T}\right) P_{\text{O}_2}^{-0,43} P_{\text{CO}_2}^{-0,09}; \quad (5)$$

$$R_{\text{ом}} = 0,5 \cdot 10^{-4} \exp\left(3016\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{923}\right)\right). \quad (6)$$

Мощность постоянного тока $W_{\text{ТЭРК, DC}}$, Вт, генерируемая ТЭРК:

$$W_{\text{ТЭРК, DC}} = V_{\text{ТЭРК}} I. \quad (7)$$

Мощность постоянного тока перед передачей должна быть преобразована в мощность переменного тока $W_{\text{ТЭРК, AC}}$, Вт:

$$W_{\text{ТЭРК, AC}} = \eta_{\text{инвертор}} W_{\text{ТЭРК, DC}}, \quad (8)$$

где $\eta_{\text{инвертор}}$ – эффективность инвертора DC-AC.

Чистая энергоэффективность ТЭС

$$\eta_e = \frac{W_e}{m_{\text{пг}}} \text{НТС}_{\text{пг}} \cdot 100 \%, \quad (9)$$

где $m_{\text{пг}}$ – скорость подачи природного газа на ТЭС; $\text{НТС}_{\text{пг}}$ – низшая теплотворная способность природного газа; W_e – чистая выходная мощность ТЭС,

$$W_e = W_{\text{ТЭРК, AC}} + W_{\text{т}} - W_{\text{разн}}, \quad (10)$$

где $W_{\text{т}}$ – мощность турбины; $W_{\text{разн}}$ – разная мощность вспомогательного оборудования (компрессоры, насосы и т. д).

Процент захвата CO_2

$$\eta_{\text{CO}_2} = \frac{m_{\text{CO}_2, \text{захв}}}{m_{\text{CO}_2, \text{дым}}} \cdot 100 \%, \quad (11)$$

где $m_{\text{CO}_2, \text{захв}}$ – конечное количество CO_2 , выходящего с анода ТЭРК; $m_{\text{CO}_2, \text{дым}}$ – количество CO_2 в дымовых газах ТЭС.

Полная стоимость электроэнергии, полученной от системы ТЭРК, определяется путем объединения общих капитальных затрат со стоимостью топлива, расходных материалов и операционных затрат:

$$\text{ПСЭ} = \frac{\text{Капитальные затраты} + \text{Операционные затраты} + \text{Стоимость газа за год}}{\text{Количество произведенной электроэнергии в год}}. \quad (12)$$

Полученные результаты эффективности работы энергоустановок сведены в табл. 2.

Таблица 2

Расчитанные параметры работы энергетических установок ТЭС

Calculated parameters of CHP power plants operation

Параметр	Значение
Чистая энергоэффективность ТЭС, %	61
Количество энергии за счет рецикла топливных газов, МВт	20
КПД ТЭРК, %	42
Чистая выходная мощность ТЭС, МВт	87,4
Расход топлива паровой турбины, м ³ /ч	13000
Содержание CO ₂ в дымовых газах ТЭС, тыс. т/год	230
Процент захвата CO ₂ , %	80–85

Возврат топливных газов после конверсии углекислого газа с учетом их теплотворной способности позволяет дополнительно увеличить электрическую мощность ТЭС на 20 %. С учетом производительности турбины и топливного элемента чистая энергоэффективность ТЭС составляет 61 %. Высокотемпературный топливный элемент на расплавленных карбонатах позволяет уловить до 85 % углекислого газа из дымовых газов. Такие результаты хорошо коррелируют с литературными данными [13].

Затраты на внедрение системы с ТЭРК мощностью около 60 МВт складываются из стоимости топливного элемента (1300 евро/кВт), вспомогательного оборудования, капитального строительства, операционных расходов и цены за газ. Приняты следующие параметры: соотношение евро к рублю 1/70, стоимость природного газа 0,04 евро/м³ (3 руб./м³), срок службы установки 10 лет, система работает 80 % времени. По результатам проведенных расчетов полная стоимость электроэнергии, полученной от системы ТЭРК, составляет 0,074 евро/кВт.

ВЫВОДЫ

1. Представлены технология и технико-экономическое обоснование использования системы с топливным элементом на расплавленных карбонатах с последующей конверсией углекислого газа в топливную смесь. Коэффициент полезного действия топливного элемента 42 %. С учетом производительности турбины и топливного элемента чистая энергоэффективность ТЭС 61 %.

2. Технология позволяет улавливать до 85 % углекислого газа с переработкой и возвратом его в производственный цикл в виде полезного продукта. Возврат топливных газов после конверсии углекислого газа позволяет увеличить электрическую мощность ТЭС на 20 %. Капитальные затраты на проведение технологии составляют 0,074 евро/кВт.

ЛИТЕРАТУРА

1. García-Freites, S. The Greenhouse Gas Removal Potential of Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS) to Support the UK's Net-Zero Emission Target / S. García-Freites, C. Gough, M. Röder // *Biomass Bioenergy*. 2021. Vol. 151. 10664. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106164>.
2. Energy Penalty Estimates for CO₂ Capture: Comparison between Fuel Types and Capture-Combustion Modes / S. Vasudevan [et al.] // *Energy*. 2016. Vol. 103. P. 709–714. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.154>.
3. Halliday, C. The Potential of Molten Metal Oxide Sorbents for Carbon Capture at High Temperature: Conceptual Design / C. Halliday, T. A. Hatton // *Applied Energy*. 2020. Vol. 280. 116016. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116016>.
4. Комбинированное сжигание потоков различных промышленных отходов в топках котлов. Ч. 1 / Ю. П. Ярмольчик [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 3. С. 236–252. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-3-236-252>.
5. Комбинированное сжигание потоков различных промышленных отходов в топках котлов. Ч. 2 / Ю. П. Ярмольчик [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 6. С. 526–540. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-526-540>.
6. Microstructure Driven Design of Porous Electrodes for Molten Carbonate Fuel Cell Application: Recent Progress / T. Wejrzanowski [et al.] // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020. Vol. 45, Iss. 47. P. 25719–25732. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.038>.
7. Study on a Novel Pressurized MCFC Hybrid System with CO₂ Capture / L. Duan [et al.] // *Energy*. 2016. Vol. 196. P. 737–750. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.05.074>.
8. Перспективы развития водородной энергетики в Татарстане / А. А. Филимонова [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2020. Т. 22, № 6. С. 79–91. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-6-79-91>.
9. Molten Carbonate Fuel Cell Performance for CO₂ Capture from Natural Gas Combined Cycle Flue Gas / J. Rosen [et al.] // *Journal of The Electrochemical Society*. 2020. Vol. 167, Iss. 6. 064505. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ab7a9f>.
10. Economic Analysis of CO₂ Capture from Natural Gas Combined Cycles Using Molten Carbonate Fuel Cells / S. Campanari [et al.] // *Applied Energy*. 2014. Vol. 130. P. 562–573. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.011>.
11. Assessing the Potential of Molten Carbonate Fuel Cell-Based Schemes for Carbon Capture in Natural Gas-Fired Combined Cycle Power Plants / M. Spinelli [et al.] // *Journal of Power Sources*. 2020. Vol. 448. 227223. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227223>.
12. Novel Application of Carbonate Fuel Cell for Capturing Carbon Dioxide from Flue Gas Streams / S. Jolly [et al.] // *ECS Transactions*. 2015. Vol. 65, No 1. P. 115–127. <https://doi.org/10.1149/06501.0115ecst>.
13. Preliminary Performance and Cost Evaluation of Four Alternative Technologies for Post-Combustion CO₂ Capture in Natural Gas-Fired Power Plants / M. Gatti [et al.] // *Energies*. 2020. Vol. 13, Iss. 3. P. 543. <https://doi.org/10.3390/en13030543>.
14. Трухина, О. С. Опыт применения углекислого газа для повышения нефтеотдачи пластов / О. С. Трухина, И. А. Синцов // *Успехи современного естествознания*. 2016. № 3. С. 205–209.
15. Integration of Molten Carbonate Fuel Cell and Chemical Looping Air Separation for High-Efficient Power Generation and CO₂ Capture / S. Chen [et al.] // *Energy*. 2022. Vol. 254, Part A. 124184. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124184>.

Поступила 08.06.2022 Подписана в печать 10.08.2022 Опубликована онлайн 30.11.2022

REFERENCES

1. García-Freites S., Gough C., Röder M. (2021) The Greenhouse Gas Removal Potential of Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS) to Support the UK's Net-Zero Emission Target. *Biomass Bioenergy*, 151, 10664. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106164>.

2. Vasudevan S., Farooq S., Karimi A. I., Saeys M., Quah M. C. G., Agrawal R. (2016) Energy Penalty Estimates for CO₂ Capture: Comparison between Fuel Types and Capture-Combustion Modes. *Energy*, 103, 709–714. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.154>.
3. Halliday C., Hatton T. A. (2020) The Potential of Molten Metal Oxide Sorbents for Carbon Capture at High Temperature: Conceptual Design. *Applied Energy*, 280, 116016. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116016>.
4. Yarmolchick Yu. P., Schröger R., Habberfelner H., Pichler M., Kostić D., Moroz G. V. (2020) Combined Combustion of Various Industrial Waste Flows in Boiler Furnaces. Part 1. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (3), 236–252. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-3-236-252> (in Russian).
5. Yarmolchick Yu. P., Schröger R., Habberfelner H., Pichler M., Kostić D., Moroz G. V. (2020) Combined Combustion of Various Industrial Waste Flows in Boiler Furnaces. Part 2. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (6), 526–540. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-526-540> (in Russian).
6. Wejrzanowski T., Cwieka K., Skibinski J., Lysik A., Ibrahim S. H., Milewski J., Xing W., Leed C.-G. (2020) Microstructure Driven Design of Porous Electrodes for Molten Carbonate Fuel Cell Application: Recent Progress. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45 (47), 25719–25732. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.038>.
7. Duan L., Yue L., Feng T., Lu H., Bian J. (2016) Study on a Novel Pressurized MCFC Hybrid System with CO₂ Capture. *Energy*, 196, 737–750. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.05.074>.
8. Filimonova A. A., Chichirov A. A., Chichirova N. D., Filimonov A. G., Pechenkin A. V. (2020) Prospects for the Development of Hydrogen Power Engineering in Tatarstan. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, 22 (6), 79–91. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-6-79-91> (in Russian).
9. Rosen J., Geary T., Hilmi A., Blanco-Gutierrez R., Yuh C.-Y., Pereira C. S., Han L., Johnson R. A., Willman C. A., Ghezel-Ayagh H. (2020) Molten Carbonate Fuel Cell Performance for CO₂ Capture from Natural Gas Combined Cycle Flue Gas. *Journal of the Electrochemical Society*, 167 (6), 064505. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ab7a9f>.
10. Campanari S., Chiesa P., Manzolini G., Bedogni S. (2014) Economic Analysis of CO₂ Capture from Natural Gas Combined Cycles Using Molten Carbonate Fuel Cells. *Applied Energy*, 130, 562–573. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.011>.
11. Spinelli M., Bona D. D., Gatti M., Martelli E., Vigan F., Consonni S. (2020) Assessing the Potential of Molten Carbonate Fuel Cell-Based Schemes for Carbon Capture in Natural Gas-Fired Combined Cycle Power Plants. *Journal of Power Sources*, 448, 227223. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227223>.
12. Jolly S., Ghezel-Ayagh H., Willman C., Patel D., DiNitto M., Marina O. A., Pederson L., Steen W. (2015) Novel Application of Carbonate Fuel Cell for Capturing Carbon Dioxide from Flue Gas Streams. *ECS Transactions*, 65 (1), 115–127. <https://doi.org/10.1149/06501.0115ecs>.
13. Gatti M., Martelli E., Di Bona D., Gabba M., Scaccabarozzi R., Spinelli M., Viganò F., Consonni S. (2020) Preliminary Performance and Cost Evaluation of Four Alternative Technologies for Post-Combustion CO₂ Capture in Natural Gas-Fired Power Plants. *Energies*, 13 (3), 543. <https://doi.org/10.3390/en13030543>.
14. Trukhina O. S., Sintsov I. A. (2016) Experience of Carbene Dioxide Usage for Enhanced Oil Recovery. *Usp ekhi Sovremennogo Estestvoznaniya = Advances in Current Natural Sciences*, (3), 205–209 (in Russian).
15. Chen S., Zhou N., Wu M., Chen S., Xiang W. (2022) Integration of Molten Carbonate Fuel Cell and Chemical Looping Air Separation for High-Efficient Power Generation and CO₂ Capture. *Energy*, 254 (Part A), 124184. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124184>.

**ПЕРЕЧЕНЬ СТАТЕЙ,
ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ «ЭНЕРГЕТИКА»
в 2022 г.**

I. ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

ОБЩАЯ ЭНЕРГЕТИКА

- Зорина Т. Г., Панасюк В. В., Прусов С. Г.** Типологизация и анализ значимости рисков и угроз энергетической безопасности Республики Беларусь с учетом интеграции Белорусской АЭС в энергосистему 5

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

- Белоусов А. В., Скурятин Ю. В., Денисевич Н. А.** Двухконверторный силовой активный фильтр с пониженными динамическими потерями: синтез управления и моделирование 5
- Брам А. М., Хальясмаа А. И., Ерошенко С. А., Матренин П. В., Попкова Н. А., Секацкий Д. А.** Оптимизация топологии сети с ВИЭ-генерацией на основе модифицированного адаптированного генетического алгоритма 4
- Доброго К. В., Козначеев И. А.** Симметрично-резонансный механизм компенсации паразитных моментов генератора на постоянных магнитах при стабильной нагрузке. 3
- Доброго К. В.** Симметрично-резонансный механизм компенсации паразитных моментов генератора на постоянных магнитах при трогании и на холостом ходу 1
- Доброго К. В., Козначеев И. А.** Универсальная имитационная модель деградации аккумуляторных батарей с оптимизацией параметров по генетическому алгоритму 6
- Калечиц В. Н.** Особенности моделирования режимов работы линий наружного освещения 6
- Лурье М. С., Лурье О. М., Фролов А. С.** Подавление пульсаций управляемых выпрямителей для питания магнитных систем 4
- Менжинский А. Б., Пантелеев С. В., Малашин А. Н.** Разработка аналитической модели для определения магнитного потока рассеяния через зубцы статора синхронной электрической машины с дробной зубцовой обмоткой. 3
- Обухов С. Г., Давыдов Д. Ю.** Методика оптимизации компоновки ветроэлектростанций морского базирования с учетом затрат на электрическую систему сбора мощности 4
- Опейко О. Ф.** Синтез на основе линеаризации векторного управления скоростью асинхронного электродвигателя без датчика скорости 2
- Плотников С. М.** Определение потерь в стали и оптимизация толщины листов магнитопровода трансформатора 2
- Романюк Ф. А., Румянцев Ю. В., Румянцев В. Ю., Новаш И. В.** Компенсация динамической фазовой погрешности при формировании ортогональных составляющих входных сигналов в микропроцессорных защитах 3
- Романюк Ф. А., Румянцев Ю. В., Румянцев В. Ю.** Формирование ортогональных составляющих входных сигналов в цифровых измерительных органах защит с коррекцией динамических погрешностей 4

Румянцев Ю. В., Романюк Ф. А. Разработка в MATLAB-Simulink искусственной нейронной сети для восстановления искаженной формы вторичного тока. Часть 2	1
Счастный В. П., Жуковский А. И. Электромагнитная совместимость компенсирующих устройств и преобразователей регулируемого электропривода в электрических сетях промышленных предприятий	1
Шашихин В. Н., Горячева Ю. М., Будник С. В. Подавление хаотических колебаний в малых энергетических системах.	4

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Bashtovoi V. G., Reks A. G., Zahadskaya A. A. Features of the Behavior of a Plane Axisymmetric Magnetic Fluid Drop in a Nonmagnetic Solvent and a Uniform Magnetic Field.	
(Баштовой В. Г., Рекс А. Г., Загадская А. А. Особенности поведения плоской осесимметричной капли магнитной жидкости в немагнитном растворителе в однородном магнитном поле)	6
Бежан А. В. Оценка эффективности сооружения ветроэнергетических установок на нужды теплоснабжения	
(Bezhan A. V. Efficiency Estimation of Constructing of Wind Power Plant for the Heat Supply Needs)	4
Василевич С. В., Малько М. В., Дегтерев Д. В., Асадчий А. Н. Моделирование процесса получения жидких продуктов пиролиза растительной биомассы с учетом скорости их охлаждения	4
Володин В. И., Здитовецкая С. В. Приближенный тепловой расчет конденсатора перегретого пара тепловых насосов	3
Кулаков Г. Т., Кулаков А. Т., Воюш Н. В. Синтез инвариантных систем автоматического регулирования с внутренней моделью	6
Любов В. К., Чухчин Д. Г., Попов А. Н. Теплотехнические испытания отопительных котельных при работе на торфяном топливе	5
Марьина З. Г., Верещагин А. Ю., Новожилова А. В. Исследование влияния схемы подключения алюминиевого радиатора марки STI на его теплотехнические характеристики	1
Овсянник А. В., Ключинский В. П. Выбор, расчет и термодинамический анализ турбоустановок на органическом цикле Ренкина	1
Овсянник А. В., Ключинский В. П. Тригенерационные турбоустановки на основе низкокипящих рабочих тел	3
Ольшанский А. И., Жерносек С. В., Гусаров А. М. Исследование тепло-массообмена в процессах тепловой обработки и сушки теплоизоляционных материалов	2
Паневник Д. А. Повышение энергетической эффективности использования нефтяных струйных насосов	2
Петраш В. Д., Хоменко О. И., Басист Д. В., Уйма А. Концепция устройства и энергетический потенциал парокompрессионного теплохладоснабжения на основе бинарного низкотемпературного источника	5
Пехота А. Н., Филатов С. А. Исследование термоаналитическими методами энергетических свойств брикетированного многокомпонентного топлива	2
Романюк В. Н., Нияковский А. М., Чичко А. Н., Яцкевич Ю. В., Рыжова Т. Н. Численный анализ характеристик процесса тепловой обработки многослойных композитных изделий в теплотехнологических установках	1
Sednin A. V., Zherelo A. V. An Approach to Data Processing for the Smart District Heating System	
(Седнин А. В., Жерело А. В. О подходе к обработке данных для интеллектуальных систем централизованного теплоснабжения)	3

Седнин В. А., Иванчиков Е. О., Калий В. А., Мартинчук А. Ю. Энерготехнологическая установка на базе нагревательной печи прокатного стана с опцией производства водорода	2
Седнин В. А., Игнатович Р. С. Анализ эффективности технологий извлечения диоксида углерода из продуктов сгорания	6
Сорокин В. В. Расчет времени пуска пассивного каталитического рекомбинатора водорода локализирующей системы безопасности АЭС с ВВЭР	1
Uzakov G. N., Charvinski V. L., Ibragimov U. Kh., Khamraev S. I., Kamolov B. I. Mathematical Modeling of the Combined Heat Supply System of a Solar House (Узаков Г. Н., Червинский В. Л., Ибрагимов У. Х., Хамраев С. И., Камалов Б. И. Математическое моделирование комбинированной системы теплоснабжения солнечного дома)	5
Филимонова А. А., Чичиров А. А., Чичирова Н. Д., Камалиева Р. Ф. Интеграция высокотемпературного топливного элемента с системой улавливания CO ₂ в энергетический цикл тепловой электрической станции	6
Шенец Е. Л. Оценка энергоэффективности промышленных печей на основе моделирования режимов потребления топлива	2
Янчук В. В., Романюк В. Н. Повышение эффективности действующих тепловых электрических станций в современных условиях	6

ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

Ивашечкин В. В., Богославчик П. М., Веремнюк В. В., Немеровец О. В. Теоретические основы расчета размыва грунтовых плотин при переливе воды через гребень	3
Ивашечкин В. В., Медведева Ю. А. Оптимизация работы водозаборов подземных вод с помощью двухколонных скважин	5

ЭКОНОМИКА ЭНЕРГЕТИКА

Короткевич М. А., Подгайский С. И. О целесообразности прокладки вне населенных пунктов кабельных линий электропередачи напряжением 6–35 кВ вместо воздушных	5
--	---

II. ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ**А**

Асадчий А. Н., 4

Б

Басист Д. В., 5
Баштовой В. Г., 6
Бежан А. В., 4
Белоусов А. В., 5
Богославчик П. М., 3
Брамм А. М., 4
Будник С. В., 4

В

Василевич С. В., 4
Веременик В. В., 3
Верещагин А. Ю., 1
Володин В. И., 3
Воюш Н. В., 6

Г

Горячева Ю. М., 4
Гусаров А. М., 2

Д

Давыдов Д. Ю., 4
Дегтеров Д. В., 4
Денисевич Н. А., 5
Доброго К. В., 1, 3, 6

Е

Ерошенко С. А., 4

Ж

Жерело А. В., 3
Жерносек С. В., 2
Жуковский А. И., 1

З

Загадская А. А., 6
Здитовецкая С. В., 3
Зорина Т. Г., 5

И

Ибрагимов У. Х., 5
Иванчиков Е. О., 2

Ивашечкин В. В., 3, 5
Игнатович Р. С., 6

К

Калечиц В. Н., 6
Калий В. А., 2
Камалов Б. И., 5
Камалиева Р. Ф., 6
Ключинский В. П., 1, 3
Козначеев И. А., 3, 6
Короткевич М. А., 5
Кулаков А. Т., 6
Кулаков Г. Т., 6

Л

Лурье М. С., 4
Лурье О. М., 4
Любов В. К., 5

М

Малашин А. Н., 3
Малько М. В., 4
Мартинчук А. Ю., 2
Марьина З. Г., 1
Матренин П. В., 4
Медведева Ю. А., 5
Менжинский А. Б., 3

Н

Немеровец О. В., 3
Нияковский А. М., 1
Новаш И. В., 3
Новожилова А. В., 1

О

Обухов С. Г., 4
Овсянник А. В., 1, 3
Ольшанский А. И., 2
Опейко О. Ф., 2

П

Панасюк В. В., 5
Паневник Д. А., 2
Пантелеев С. В., 3
Петраш В. Д., 5
Пехота А. Н., 2
Плотников С. М., 2
Подгайский С. И., 5

Попкова Н. А., 4
Попов А. Н., 5
Прусов С. Г., 5

Р

Рекс А. Г., 6
Романюк В. Н., 1, 6
Романюк Ф. А., 1, 3, 4
Румянцев В. Ю., 3, 4
Румянцев Ю. В., 1, 3, 4
Рыжова Т. Н., 1

С

Седнин А. В., 3
Седнин В. А., 2, 6
Секацкий Д. А., 4
Скuryтин Ю. В., 5
Сорокин В. В., 1
Счастный В. П., 1

У

Узаков Г. Н., 5
Уйма А., 5

Ф

Филатов С. А., 2

Филимонова А. А., 6
Фролов А. С., 4

Х

Хальясмаа А. И., 4
Хамраев С. И., 5
Хоменко О. И., 5

Ч

Червинский В. Л., 5
Чичко А. Н., 1
Чухчин Д. Г., 5
Чичиров А. А., 6
Чичирова Н. Д., 6

Ш

Шашихин В. Н., 4
Шенец Е. Л., 2

Я

Янчук В. В., 6
Яцкевич Ю. В., 1