

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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕДИНЕНИЙ СНГ

ЭНЕРГЕТИКА

Том 64, № 1
2021

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

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩАЯ ЭНЕРГЕТИКА

- Михалевич А. А., Рак В. А.** Моделирование работы Белорусской энергосистемы с учетом ввода АЭС 5
- Мирончук В. И., Вельченко А. А.** Повышение коэффициента полезного действия солнечных энергетических установок за счет локализации солнечной энергии 15

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

- Доброго К. В., Бладыко Ю. В.** Моделирование аккумуляторных батарей и их сборок с учетом деградации параметров 27
- Константинова С. В., Капустинский А. Ю., Ярошевич Т. М.** Расчет емкости для работы мини-энергокомплекса на основе асинхронного генератора в автономном режиме 40

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

- Митрофанов А. В., Мизонов В. Е., Василевич С. В., Малько М. В.** Экспериментальное и расчетное исследования пиролиза биомассы в цилиндрическом реакторе 51
- Овсянник А. В., Ключинский В. П.** Турбодетандерные установки на низкотемпературных рабочих телах 65
- Хрусталева В. А., Гаришевский М. В.** Эффективность использования пуско-резервной котельной для получения пиковой выработки паровой турбиной АЭС ... 78

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 (Высшая аттестационная комиссия Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь) (заместитель главного редактора),
И. В. ЖЕЖЕЛЕНКО (Приазовский государственный технический университет, Мариуполь, Украина),
П. В. ЖУКОВСКИ (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. И. КИРИЛЛОВ (Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация),
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),
Е. УШПУРАС (Литовский энергетический институт, Каунас, Литовская Республика),
Б. М. ХРУСТАЛЕВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
Л. В. ШЕНЕЦ (Евразийская экономическая комиссия, Москва, Российская Федерация)

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 29.01.2021. Формат бумаги 60×84¹/₈. Бумага мелованная.
Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 100 экз.
Дата выхода в свет . 2021. Заказ .

Адрес редакции: 220013, г. Минск, Республика Беларусь, пр. Независимости, 65.
Белорусский национальный технический университет, корп. 2, комн. 327.
Тел.: +375 17 292-65-14
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, 2021

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

PROCEEDINGS OF THE CIS
HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS
AND POWER ENGINEERING ASSOCIATIONS

ENERGETIKA

V. 64, No 1
2021

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

CONTENTS

GENERAL POWER ENGINEERING

- Mikhalevich A. A., Rak U. A.** Belarus Power Engineering System Modeling Taking into Account the Nuclear Power Plant Commissioning 5
- Mironchuk V. I., Velchenko A. A.** Increasing the Efficiency Factor of Solar Power Plants Due to Solar Energy Localizing 15

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

- Dobrego K. V., Bladyko Y. V.** Modeling of Batteries and their Assemblies Taking into Account the Degradation of Parameters 27
- Konstantinova S. V., Kapustinskii A. Yu., Yaroshevich T. M.** Calculation of the Capacity for the Operation of a Mini-Energy Complex Based on an Independently Operating Asynchronous Generator 40

HEAT POWER ENGINEERING

- Mitrofanov A. V., Mizonov V. E., Vasilevich S. V., Malko M. V.** Experiments and Computational Research of Biomass Pyrolysis in a Cylindrical Reactor 51
- Ovsyannik A. V., Kliuchinski V. P.** Turbo-Expander Units on Low Boiling Working Fluids 65
- Khrustalev V. A., Gariievskii M. V.** Efficiency of Using the Auxiliary Boiler for Peak Power Generation by a Steam Turbine of NPP 78

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 (Higher Attestation Commission of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus) (Deputy Editor-in-Chief),
I. V. ZHEZHELENKO (Pryazovskyi State Technical University, Mariupol, Ukraine),
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. I. KIRILLOV (Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russian Federation),
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),
E. UŠPURAS (Lithuanian Energy Institute, Kaunas, Republic of Lithuania),
B. M. KHROUSTALEV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
L. V. SHENETS (The Eurasian Economic Commission, Moscow, Russian Federation)

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 29.01.2021. Dimension of paper 60×84¹/₈. Coated paper.
Digital printing. Type face Times. Conventional printed sheet
An edition of 100 copies. Date of publishing 2021. Order list

ADDRESS

Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave., Building 2, Room 327
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-65-14
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, 2021

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-5-14>

УДК 621.3

Моделирование работы Белорусской энергосистемы с учетом ввода АЭС

А. А. Михалевич¹⁾, В. А. Рак¹⁾

¹⁾Институт энергетики НАН Беларуси (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. В статье представлен анализ особенностей моделирования работы энергетических систем с большой долей мощностей АЭС. Изучение условий эксплуатации и характеристик различных энергоблоков показало, что энергетическая система с большой долей АЭС и ТЭЦ требует более детального моделирования режимов работы генерирующего оборудования. Причем с увеличением доли установок, использующих возобновляемые источники энергии, данные требования ужесточаются. Обзор литературы выявил, что чаще всего для моделирования энергетических систем используют кривую продолжительности нагрузки и ее распределения между блоками. Однако поскольку данный метод не отражает хронологическую последовательность, он может применяться только при отсутствии сложностей с обеспечением баланса мощности. Вместе с тем при высокой доле ТЭЦ и АЭС для сохранения баланса мощности необходимо знать параметры и набор включенного оборудования не только в данный момент, но и в предыдущий период, что невозможно сделать, используя кривую продолжительности нагрузки. Для моделирования необходимо использовать почасовую кривую нагрузки и рассчитывать состояние энергетической системы для каждого последующего часа в хронологическом порядке. В ходе сравнительного анализа доступных компьютерных программ выявить подходящую модель среди существующих не удалось. В статье представлена разработанная авторами математическая модель, которая позволяет моделировать работу энергетической системы с большой долей АЭС и ТЭЦ с сохранением баланса мощности для каждого часа прогнозного периода. Верификация предложенной модели показала хорошую точность используемых методов.

Ключевые слова: энергетическая система, атомная электростанция, теплоэлектроцентраль, электродельная, возобновляемые источники энергии, баланс мощности, почасовой график нагрузки, кривая продолжительности нагрузки

Для цитирования: Михалевич, А. А. Моделирование работы Белорусской энергосистемы с учетом ввода АЭС / А. А. Михалевич, В. А. Рак // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 1. С. 5–14. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-5-14>

Belarus Power Engineering System Modeling Taking into Account the Nuclear Power Plant Commissioning

A. A. Mikhalevich¹⁾, U. A. Rak¹⁾

¹⁾Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article presents the analysis of the specific features of modeling the operation of energy systems with a large share of nuclear power plants (NPP). The study of operating conditions

Адрес для переписки

Рак Владимир Александрович
Институт энергетики НАН Беларуси
ул. Академическая, 15/2,
220072, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 294-94-72
uladzimir.rak@gmail.com

Address for correspondence

Rak Uladzimir. A.
Institute of Power Engineering of the NAS of Belarus
15/2, Akademicheskaya str.,
220072, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 294-94-72
uladzimir.rak@gmail.com

and characteristics of different power units showed that a power engineering system with a large share of NPP and CHPP requires more detailed modeling of operating modes of generating equipment. Besides, with an increase in the share of installations using renewable energy sources, these requirements are becoming tougher. A review of the literature revealed that most often the curve of the load duration and its distribution between blocks are used for modeling energy systems. However, since this method does not reflect a chronological sequence, it can only be used if there are no difficulties with ensuring power balance. Along with this, when the share of CHP and nuclear power plants is high, to maintain a balance of power one must know the parameters and a set of powered equipment not only currently but, also, in the previous period. But this is impossible if a curve of load duration is used. For modeling, it is necessary to use an hourly load curve and to calculate the state of the energy system for each subsequent hour in chronological order. In the course of a comparative analysis of available computer programs, it was not possible to identify a suitable model among the existing ones. The article presents a mathematical model developed by the authors, which makes us possible to simulate the operation of a power engineering system with a large share of NPP and CHPP while maintaining the power balance for each hour of the forecast period. Verification of the proposed model showed good accuracy of the methods used.

Keywords: power engineering system, nuclear power plant, combined heat and power plant, electric boiler, renewable energy sources, power balance, hourly load schedule, load duration curve

For citation: Mikhalevich A. A., Rak U. A. (2021) Belarus Power Engineering System Modeling Taking into Account the Nuclear Power Plant Commissioning. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 64 (1), 5–14. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-5-14> (in Russian)

Введение

В Республике Беларусь в 2018 г. было произведено 38927 млн кВт·ч электрической энергии [1], в том числе установками, использующими возобновляемые источники энергии (ВИЭ), 540 млн кВт·ч, ТЭЦ – 22981 млн кВт·ч.

В ближайшее время ожидается существенное изменение структуры генерации в связи с вводом АЭС в эксплуатацию. Ожидаемая выработка на АЭС составит 19245 млн кВт·ч, или 49 % от производства в 2018 г. При использовании низкоманевренных атомных блоков большой мощности и высокой доле ТЭЦ поддерживать баланс мощности становится сложнее. Работа АЭС в базовом режиме на номинальной мощности и ТЭЦ по тепловому графику приведет к тому, что режимы работы балансирующих мощностей (в данном случае конденсационных электростанций (КЭС)) будут резко переменными, возможно, возникнет необходимость более частых остановок. Для обеспечения баланса мощности и поддержания качества электроэнергии на необходимом уровне предполагается сооружение пиково-резервных (газотурбинных) установок мощностью 800 МВт и электрокотлов общей мощностью 1185 МВт [2].

Увеличение доли установок на ВИЭ (ветроэнергостановки (ВЭУ) [3], солнечные электростанции (СЭС) [4]) с переменным и непредсказуемым режимом работы ухудшает режимы работы КЭС. При этом себестоимость генерации электроэнергии на ВИЭ уже сегодня ниже, чем на газе. Нарастание таких установок приведет к тому, что их выработка будет ограничиваться в энергосистеме необходимостью поддержания баланса мощности. Данные ограничения назовем системными. Таким образом, ввод новых

мощностей может привести к сокращению удельной выработки установок на ВИЭ из-за системных ограничений, а это, в свою очередь, к сокращению экономической целесообразности их использования. Это значит, что моделирование работы установок на ВИЭ и их влияние на баланс мощности становится актуальной задачей не только для оперативного и краткосрочного, но и для средне- и долгосрочного планирования. Данные преобразования в энергосистеме требуют изменения подхода к моделированию.

Ранее не существовало потребности в почасовом моделировании спроса и предложения, достаточно было рассчитать наиболее напряженные точки графика нагрузки. Любое изменение нагрузки со стороны потребителей обеспечивалось изменением мощности блоков энергосистемы. Для расчета параметров работы отдельных блоков было достаточно сформировать кривую продолжительности нагрузки [5], показывающую, сколько часов определенная нагрузка будет присутствовать в системе. Данный подход позволяет моделировать работу энергосистемы в наиболее напряженные периоды – пиковой и базовой нагрузки. С помощью моделей такого типа также можно рассчитать объем производства электрической энергии на каждом отдельном блоке.

Требования к модели

Вышеописанный подход не позволяет в полной мере моделировать работу установок на нерегулируемых ВИЭ [6]. Более того, кривая продолжительности нагрузки не содержит хронологических данных о периодах времени между соседними точками. Это не дает возможности определить, каким образом переменный режим установок на ВИЭ влияет на работу других блоков энергосистемы, потому что в общем случае набор включенных блоков в предыдущий период времени неизвестен. Также данный подход не позволяет в необходимой мере моделировать влияние системных ограничений на работу установок на ВИЭ. На основании вышеизложенного, а также учитывая параметры работы энергосистемы и планы по интеграции АЭС в энергосистему Беларуси, можно сформулировать ряд требований к современной модели энергосистемы. Она должна:

- выполнять расчет работы энергосистемы для каждого часа рассматриваемого периода времени, т. е. использовать почасовой график нагрузки;
- описывать работу различных типов блоков: КЭС, АЭС ТЭЦ, нерегулируемых ВИЭ и электротельных;
- оптимизировать распределение нагрузки для каждого часа с учетом ограничений на возможность регулирования мощности блока;
- выполнять оптимизацию ввода новых мощностей.

В [7] приведены ссылки на 39 различных моделей; 14 являются оптимизационными, 6 из них имеют свободное распространение: COMPOSE, EnergyPLAN, LEAP, MESSAGE, OSeMOSYS, WASP (табл. 1).

Таблица 1

Сравнение программных комплексов для моделирования энергосистемы
Comparison of software suites used for power system modeling

Параметр	COMPOSE	EnergyPLAN	LEAP	MESSAGE	OSeMOSYS	WASP
Хронология нагрузки	-	+	-	-	+	-
Моделирование ВИЭ	+	+	-	-	+	-
Оптимизация распределения нагрузки в течение года	+	+	-	+	+	+
Оптимизация ввода новых мощностей	-	-	-	+	-	+

Приведенный в табл. 1 анализ показывает, что доступные модели не соответствуют всем необходимым критериям для моделирования энергосистемы со значительными системными ограничениями на работу установок на ВИЭ. В связи с этим в настоящей статье представлена разработанная авторами модель энергетической системы с набором КЭС, ТЭЦ, АЭС, ВЭУ, СЭС и других блоков с учетом системных ограничений. Модель также учитывает работу электростанций.

Полная себестоимость производства электрической энергии рассчитывается по формуле

$$c_t = c_{var} + c_{fuel} + \left(c_{fix} + \frac{i}{l} \right) \frac{C}{E_y} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где c_{var} – условно-переменные затраты на эксплуатацию, дол./(МВт·ч); c_{fuel} – затраты на топливо, дол./(МВт·ч); c_{fix} – постоянные затраты на производство энергии, дол./МВт/год; i – удельные инвестиции в строительство блока, дол./МВт; l – плановый период эксплуатации блока, лет; C – номинальная мощность блока, МВт; E_y – годовое производство электроэнергии, МВт·ч.

Задача оптимального развития заключается в минимизации общей себестоимости производства электрической энергии.

Постоянные и инвестиционные затраты не зависят от объема производства электрической энергии, они являются константой при любом распределении нагрузки, и при ее оптимизации их можно не учитывать. Оставшиеся переменные эксплуатационные и топливные затраты называются маржинальными затратами на производство энергии. Минимальная себестоимость достигается в системе при максимальной загрузке блоков с низкой маржинальной стоимостью, т. е. более эффективные блоки должны быть расположены в нижней части графика нагрузки, а, значит, загружаться первыми. Таким образом, для оптимального распределения нагрузки можно рассчитать экономический порядок загрузки блоков, который формируется в соответствии с возрастанием маржинальной себестоимости каждого блока.

Порядок загрузки

Первой группой для загрузки определены блоки АЭС. Хотя атомные электростанции можно отнести к конденсационным блокам, они имеют определенные особенности. Для обеспечения максимальной безопасности эксплуатации АЭС рекомендуется использовать режим работы на постоянной мощности [8].

Следом загружаются блоки ТЭЦ. Порядок их загрузки не важен, так как они будут гарантированно иметь спрос со стороны потребителей в рамках графика тепловой нагрузки. При перепроизводстве электроэнергии избыток будет потребляться электродкотлами. При этом объем производства электрической энергии для каждой станции определяется исходя из спроса на тепловую энергию.

Далее загружаются ГЭС, которые имеют ограничения не только по увеличению мощности при наличии спроса, но и по ее снижению, что связано с необходимостью поддержания должного водного режима в реке ниже ГЭС.

Следом загружаются блоки, не связанные требованиями надежности или теплового графика, т. е. КЭС и установки на ВИЭ. Порядок загрузки для каждого блока определяется в соответствии с экономической составляющей.

Моделирование энергоблоков

При моделировании внутренних процессов отдельной ТЭЦ с определенным составом оборудования необходимо учитывать параметры пара на каждом отборе и графики нагрузок потребителей в зависимости от параметров пара. Однако для долгосрочных целей достаточно моделировать производство тепловой энергии в общем виде, при котором вся ТЭЦ представляется как один энергоблок с усредненными параметрами.

Теплофикационные турбины обладают более низким КПД электрического цикла в режиме конденсации ввиду оптимизации под более высокие параметры на выходе из турбины, что ведет к неполному срабатыванию пара и снижению выработки электроэнергии [9]. Поэтому при оптимизации энергосистемы предполагаем, что ТЭЦ работает по тепловому графику: мощность ТЭЦ поддерживается на таком уровне, который позволяет обеспечить спрос на тепловую энергию. Более того, в европейских странах принято рассматривать ТЭЦ именно как поставщика тепловой энергии в системе теплоснабжения [10].

Выработка электроэнергии по теплофикационному циклу связана с графиком не электрической, а тепловой нагрузки. Однако тепловую энергию невозможно передавать на большие расстояния [11], а, значит, для каждой ТЭЦ необходимо задать свой график тепловой нагрузки.

При постоянном составе включенного оборудования соотношение выработки электрической и тепловой энергии изменяется незначительно, и это изменение может не учитываться при долгосрочном моделировании.

Если учесть, что соотношение производства тепловой и электрической энергии имеет фиксированный характер, а относительный (отнесенный

к номинальной мощности) график тепловой нагрузки повторяется из года в год, то для моделирования работы ТЭЦ достаточно задать график электрической мощности для каждой отдельной станции. Такие графики формируются на основании многолетнего сбора данных.

Мощность ТЭЦ для каждого часа моделируемого года рассчитывается по формуле

$$P = p_h \frac{H_y}{H_b} C, \quad (2)$$

где p_h – относительная мощность ТЭЦ для рассматриваемого часа; H_y – годовой спрос на тепловую энергию в моделируемом году, Гкал; H_b – то же в базовом году, Гкал; C – установленная мощность моделируемой ТЭЦ, МВт.

При этом в рамках моделирования необходимо отслеживать, чтобы параметр $p_h \frac{H_y}{H_b}$ не превышал единицу. В противном случае следует моделировать увеличение установленной мощности данной ТЭЦ.

КПД ТЭЦ по производству тепловой энергии определяется по формуле

$$\gamma = \frac{E + H}{F}, \quad (3)$$

где E – объем производства электрической энергии, МВт·ч; H – то же тепловой энергии, МВт·ч; F – объем потребления топлива для производства тепловой и электрической энергии, МВт·ч.

Возобновляемые источники энергии можно разделить на регулируемые (ТЭС на биомассе или биогазовые станции) и нерегулируемые (солнечные и ветряные электростанции). Регулируемые электростанции могут работать по диспетчерскому графику и, следовательно, ведут себя аналогично другим КЭС. Нерегулируемые установки работают в соответствии с погодными условиями и в общем случае не поддаются управлению со стороны диспетчера, кроме ограничения выдачи мощности при ее избытке в энергосистеме. Такой вид энергоисточников моделируется отдельно с помощью почасового графика нагрузки, который получен усреднением почасовых фактических графиков производства электрической энергии для большого количества станций одного типа за продолжительный период.

КЭС производят только электрическую энергию, поэтому работают исключительно по графику электрической нагрузки. При этом электроэнергия в рамках графика нагрузки может производиться на различных электростанциях и энергоблоках. В рамках данной работы моделирование КЭС осуществляется на уровне отдельных блоков, чтобы обеспечить более точную оптимизацию распределения нагрузки. При таком подходе можно учитывать параметры отдельных энергоблоков, а не усредненные показатели по станции. Поблочное моделирование становится важным в связи с тем, что на каждой из КЭС (Лукомльская, Березовская, Минская ТЭЦ-5) имеются как относительно новые парогазовые блоки, так и давно установленные, параметры которых ниже в силу технического и морального износа.

Мощность КЭС в отличие от ТЭЦ не задается в виде почасовых графиков, а рассчитывается исходя из необходимости соблюдения баланса мощности, при этом ее изменение может задаваться в определенном ограниченном промежутке. Мощность КЭС не может опускаться ниже технического минимума.

Для каждого часа каждого блока КЭС в порядке экономической загрузки мощность рассчитывается по формуле

$$P_i = \begin{cases} 0, & L = P_{sys}; \\ L - \sum P_n, & \text{если } C_i > L - \sum P_n, \text{ где } n < i; \\ L - \sum P_n - P_{\min i+1}, & L - \sum P_n - C_i < P_{\min i+1}, \text{ где } n < i; \\ C_i, & L - \sum P_n - C_i > P_{\min i+1}, \text{ где } n < i. \end{cases} \quad (4)$$

Если расчет предыдущих по порядку загрузки блоков обеспечит соблюдение баланса мощности, то мощность данного блока равна нулю.

Если баланс не соблюден, то используют второе условие: когда нераспределенная нагрузка (разница между общей нагрузкой и мощностью загруженных ранее блоков) выше, чем номинальная мощность текущего блока и технический минимум блока, следующего по порядку загрузки, – блок работает на номинальной мощности.

Если после загрузки данного блока нераспределенная мощность становится меньше, чем технический минимум следующего по порядку загрузки, данный блок разгружается до уровня обеспечения следующего блока нагрузкой, равной техническому минимуму (третье условие).

Если нераспределенная нагрузка меньше, чем установленная мощность блока, он получает мощность, равную нераспределенной нагрузке (четвертое условие).

В периоды времени, когда нагрузка опускается ниже мощности ТЭЦ и АЭС, баланс обеспечивается за счет потребления электрической энергии на электродотельных для производства тепловой энергии.

При перепроизводстве электрической энергии частично она будет потребляться электродотлами для производства тепловой энергии, при этом объем выработки тепловой и электрической энергии на ТЭЦ будет сокращаться.

Для моделирования работы электродотлов необходимо рассчитать объем сокращения электрической мощности ТЭЦ при сохранении объемов производства тепловой энергии суммарно на турбине и в электродотлах. Данная зависимость определяется с помощью системы

$$\begin{cases} p - p_b = E_e; \\ k_t p + \eta p_b = E_t, \end{cases} \quad (5)$$

где p – электрическая мощность ТЭЦ; p_b – потребляемая мощность электродотлов; E_e – электрическая нагрузка, МВт·ч; k_t – коэффициент произ-

водства тепловой энергии на единицу электрической; η – КПД электродогревателя; E_t – тепловая нагрузка, МВт·ч.

При решении системы (5) получено уравнение

$$p = \frac{\eta E_e + E_t}{k_t + \eta}. \quad (6)$$

С помощью (6) выполняется корректировка мощности каждой ТЭЦ при перепроизводстве электроэнергии. Расчет электроэнергии, потребляемой электродогревателями, производится по формуле

$$p = E_e - p. \quad (7)$$

Верификация

Для верификации модели выполнено ретроспективное моделирование Белорусской энергосистемы и проведено сравнение с реальными данными 2017 г.

В результате моделирования выработка на ТЭЦ получена на уровне 16,78 млрд кВт·ч при фактической, согласно данным Белстата [1], 17,02 млрд кВт·ч. При моделировании производство на блок-станциях составило 3,47 млрд кВт·ч, а фактически, по данным Белстата, – 3,48 млрд кВт·ч. Производство на КЭС по модели составило 13,51 млрд кВт·ч, в то время как, по данным Белстата, фактическая выработка в 2017 г. была равна 13,18 млрд кВт·ч. Верифицировать работу установок на ВИЭ не представляется возможным, поскольку Белстат не публикует общий объем установленных мощностей и объем выработки на данных мощностях¹. Таким образом, можно констатировать, что модель достаточно точно описывает работу энергосистемы.

На рис. 1 представлено распределение нагрузки для одного дня базового года.

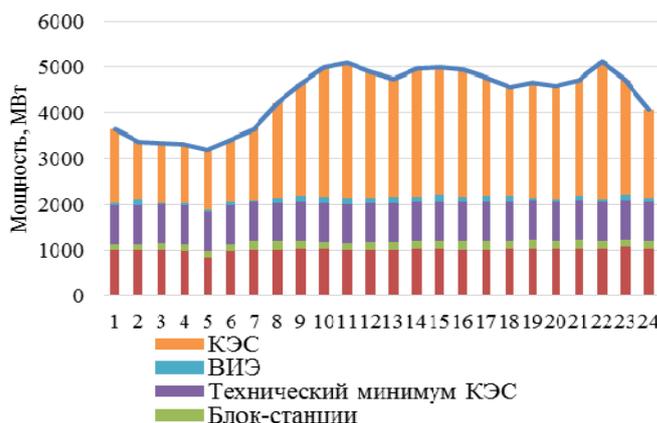


Рис. 1. Распределение нагрузки для типового дня отопительного периода

Fig. 1. Load distribution for a typical day of the heating period

¹ Данные об установленной мощности электрических станций приведены без учета станций, находящихся в собственности субъектов малого предпринимательства.

Из графика видно, что на протяжении всего дня модель хорошо обеспечивает баланс мощности. При тестировании модели аналогичные графики были построены для каждого дня года, и на протяжении всего года баланс мощности соблюдался.

Преимущества и недостатки модели

Преимуществами данной модели в сравнении с существующими являются использование почасовой нагрузки и максимально близкое к реальным моделирование режимов работы энергоблоков. При этом сохраняется возможность расчета параметров энергосистемы на долгосрочную перспективу для широкого перечня типов блоков, включая возобновляемые источники, ТЭЦ и электростанции.

Недостатком (а вместе с тем и направлениями дальнейшего развития) модели является отсутствие учета ограничений на включение и отключение энергоблоков, а также оптимизации режимов остановов блоков на планово-предупредительный ремонт.

ВЫВОДЫ

1. В статье показано, что существующие программные комплексы не отвечают новым требованиям, предъявляемым к моделированию энергетических систем. При большой доле ВИЭ, ТЭЦ и АЭС в структуре генерирующих мощностей необходимо обеспечить поддержание баланса мощности для каждого часа, т. е. работу энергосистемы следует рассчитывать, используя почасовой график нагрузки вместо распространенных методик моделирования по кривой продолжительности нагрузки.

2. Предложена новая модель с почасовым моделированием распределения нагрузки между энергоблоками системы. В ходе апробации проведено моделирование энергетической системы с верификацией результатов по данным Белстата. Определены недостатки и направления дальнейшего развития модели. Модель следует доработать в части моделирования пусков и остановов энергоблоков и разработки графиков планово-предупредительных ремонтов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Энергетический баланс Республики Беларусь: стат. сб. / Белстат. Минск, 2019. 152 с.
2. Об утверждении комплексного плана развития электроэнергетической сферы до 2025 года с учетом ввода Белорусской атомной электростанции [Электронный ресурс]: пост. Совета Министров Респ. Беларусь от 01.03.2016 № 169 // Pravo.by. Режим доступа: <https://www.pravo.by/document/?guid=12551&p0=C21600169&p1=1>.
3. Марончук, И. И. Солнечные элементы: современное состояние и перспективы развития / И. И. Марончук, Д. Д. Санникович, В. И. Мирончук // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 2. С. 105–123. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-105-123>.
4. Петруша, Ю. С. Перспективы развития ветроэнергетики в Республике Беларусь / Ю. С. Петруша, Н. А. Попкова // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 2. С. 124–134. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-124-134>.
5. Uri, Noel D. Forecasting the Load Duration Curve / Noel D. Uri // Applied Mathematical Modelling. 1977. Vol. 1, Iss. 7. P. 405–407. [https://doi.org/10.1016/0307-904X\(77\)90051-8](https://doi.org/10.1016/0307-904X(77)90051-8).

6. Milligan, M. R. *Alternative Wind Power Modeling Methods Using Chronological and Load Duration Curve Production Cost Models* / M. R. Milligan. Colorado, 1996. <https://doi.org/10.2172/219340>.
 7. *Modeling Tools* [Electronic Resource]. Mode of access: <https://www.energycommunity.org/default.asp?action=tools>. Date of access: 05.06.2020.
 8. Дементьев, Б. А. *Кинетика и регулирование ядерных реакторов* / Б. А. Дементьев. М.: Энергоатомиздат, 1986. 272 с.
 9. Лихута, А. В. О режимах работы Мозырской ТЭЦ в энергосистеме после пуска Белорусской АЭС [Электронный ресурс] / А. В. Лихута // Актуальные проблемы энергетики – 2016: материалы науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, Минск, 2017. Минск: БНТУ, 2017. Режим доступа: https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/34979/O_rezhimah_raboty_Mozyrskoj_TEHC_v_energostime_posle_puska_Beloruskoj_AEHS.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
 10. Optimal Operation of Combined Heat and Power System Based on Forecasted Energy Prices in Real-Time Markets / C. Gu [et al.] // *Energies*. 2015. Vol. 8, Iss. 12. P. 14330–14345. <https://doi.org/10.3390/en81212427>.
 11. *Coming in from the Cold. Improving District Heating Policy in Transition Economies* / International Energy Agency. OECD, IEA, 2006. 264 p. <https://doi.org/10.1787/9789264108202-en>.
- Поступила 06.08.2020 Подписана в печать 06.10.2020 Опубликована онлайн 29.01.2021

REFERENCES

1. Belarusian Statistical Committee (2019) *Energy Balance of the Republic of Belarus: Statistical Yearbook*. Minsk. 152 (in Russian).
2. On Approval of the Comprehensive Plan for the Development of the Electric Power Sector until 2025, Taking into Account the Commissioning of the Belarusian Nuclear Power Plant: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus of 01.03.2016 No 169. *Pravo.by*. Available at: <https://www.pravo.by/document/?guid=12551&p0=C21600169&p1=1> (in Russian).
3. Maronchuk I. I., Sanikovich D. D., Mironchuk V. I. (2019) Solar Cells: Current State and Development Prospects. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (2), 105–123. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-105-123> (in Russian).
4. Petrusha Y. S., Papkova N. A. (2019) The Prospects for Wind Energy Development in the Republic of Belarus. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (2), 124–134. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-124-134> (in Russian).
5. Uri Noel D. (1977) Forecasting the Load Duration Curve. *Applied Mathematical Modelling*. 1 (7), 405–407. [https://doi.org/10.1016/0307-904X\(77\)90051-8](https://doi.org/10.1016/0307-904X(77)90051-8).
6. Milligan M. R. (1996) *Alternative Wind Power Modeling Methods Using Chronological and Load Duration Curve Production Cost Models*. Colorado. <https://doi.org/10.2172/219340>.
7. *Modeling Tools*. Available at: <https://www.energycommunity.org/default.asp?action=tools>. (Accessed 5 June 2020).
8. Dement'ev B. A. (1986) *Kinetics and Regulation of Nuclear Reactors*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 272 (in Russian).
9. Likhuta A. V. (2017) On the Operating Modes of the Mozyr CHPP in the Power System after the Launch of the Belarusian NPP. *Aktual'nye Problemy Energetiki – 2016: Materialy Nauch.-Tekhn. Konf. Studentov i Aspirantov, Minsk* [Topical Problems of Power Engineering – 2016. Proceedings of Scientific and Technical Student Conference]. Minsk, BNTU. Available at: https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/34979/O_rezhimah_raboty_Mozyrskoj_TEHC_v_energostime_posle_puska_Beloruskoj_AEHS.pdf?sequence=1&isAllowed=y (in Russian).
10. Gu C., Xie D., Sun J., Wang X., Ai Q. (2015) Optimal Operation of Combined Heat and Power System Based on Forecasted Energy Prices in Real-Time Markets. *Energies*, 8 (12), 14330–14345. <https://doi.org/10.3390/en81212427>.
11. International Energy Agency (2006) *Coming in from the Cold. Improving District Heating Policy in Transition Economies*. OECD, IEA. 264. <https://doi.org/10.1787/9789264108202-en>.

Received: 6 August 2020

Accepted: 6 October 2020

Published online: 29 January 2021

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-15-26>

УДК 620 (075.8)

Повышение коэффициента полезного действия солнечных энергетических установок за счет локализации солнечной энергии

В. И. Мирончук¹⁾, А. А. Вельченко²⁾

¹⁾Белорусский государственный аграрный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. В статье представлен анализ развития солнечной энергетики в странах Европы и Республике Беларусь в 2020 г. Предложен алгоритм повышения коэффициента полезного действия для солнечных энергетических установок (СЭУ) за счет локализации солнечной траектории в зависимости от широты и долготы местности. В частности, с учетом угла положения Солнца над горизонтом и угла азимута Солнца рассчитано повышение КПД СЭУ для Республики Беларусь. На основе данного алгоритма написана программа, позволяющая построить диаграмму солнечной траектории. Проведен анализ степени локализации солнечной энергии для дней солнцестояния в шести белорусских областных центрах. Выявлено, что самая высокая интенсивность солнечного излучения наблюдается в Бресте и Гомеле, средняя – в Гродно, Минске и Могилеве, низкая – в Витебске. Проведен сравнительный анализ солнечных траекторий для Берлина (Германия), Гомеля и Бреста. Разработаны рекомендации для эффективной работы СЭУ в течение года в автономном и комбинированном режимах в областных городах Республики Беларусь. Полученные численные расчеты солнечной траектории позволяют проводить оптимизацию ориентации солнечных панелей для стационарно установленных панелей и автоматизированных систем слежения за Солнцем, а также подбор оптимальной комплектации оборудования энергетической установки для любой географической местности.

Ключевые слова: возобновляемая энергетика, диаграмма солнечной траектории, солнечное склонение, локализация солнечной энергии, дни солнцестояния, азимут Солнца

Для цитирования: Мирончук, В. И. Повышение коэффициента полезного действия солнечных энергетических установок за счет локализации солнечной энергии / В. И. Мирончук, А. А. Вельченко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 1. С. 15–26. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-15-26>

Increasing the Efficiency Factor of Solar Power Plants Due to Solar Energy Localizing

V. I. Mironchuk¹⁾, A. A. Velchenko²⁾

¹⁾Belarusian State Agrarian Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article presents an analysis of the state of development of solar energy in Europe and the Republic of Belarus for 2020. An algorithm for increasing the efficiency factor of solar

Адрес для переписки

Вельченко Анна Александровна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-95-61
anna.velchenko@gmail.com

Address for correspondence

Velchenko Anna A.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-95-61
anna.velchenko@gmail.com

power plants by localizing the solar trajectory depending on the latitude and longitude of the area has been proposed. In particular, taking into account the angle of the Sun position above the horizon and the azimuth angle of the Sun, the increase in the efficiency factor of solar power plants for the Republic of Belarus is calculated. Based on this algorithm, a program has been written that makes it possible to draw a diagram of the solar trajectory. An analysis has been made of the degree of localization of solar energy for solstice days in 6 oblast (regional) centers of the Republic of Belarus; it is found that the highest intensity of solar radiation is observed in Brest and Gomel, the average in Grodno, Minsk and Mogilev, while the lowest one – in the city of Vitebsk. A comparative analysis of the solar trajectory of the city of Berlin (Germany) with the city of Gomel and the city of Brest is carried out. Recommendations have been developed for the effective operation of solar power plants in the oblast (regional) cities of the Republic of Belarus during the year in an autonomous and combined mode of operation. The obtained numerical calculations of the solar trajectory make it possible to optimize the orientation of solar panels for permanently installed panels and for automated solar tracking systems, as well as to select the optimal configuration of the power plant equipment for any geographic area.

Keywords: renewable energy, solar trajectory diagram, solar declination, localization of solar energy, solstice days, azimuth of the Sun

For citation: Mironchuk V. I., Velchenko A. A. (2021) Increasing the Efficiency Factor of Solar Power Plants Due to Solar Energy Localizing. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 64 (1), 15–26. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-15-26> (in Russian)

Введение

В настоящее время возобновляемая энергетика является приоритетным направлением и стремительно развивается во всех странах мира [1–4]. Это обусловлено исчерпаемостью ископаемых природных ресурсов, а также необходимостью сократить химическое и тепловое загрязнение окружающей среды, способное привести к необратимым процессам изменения климата.

Развитие возобновляемой энергетики зависит от климатических условий, в которых находится страна, и оказываемой данному направлению государственной поддержки. В европейских странах с 2010 г. реализуется программа Energy 2020, согласно которой к 2020 г. доля энергии, получаемой из возобновляемых источников, должна составлять: 49 % от общего объема в Швеции, 38 – в Финляндии, 40 – в Латвии, 34 – в Австрии, 30 – в Дании, 23 – во Франции, 18 – в Германии, 16 % – в Болгарии.

В Республике Беларусь активное развитие возобновляемой энергетики началось в 2010 г. с принятием Закона «О возобновляемых источниках энергии» [5]. Государственной программой «Энергосбережение» на 2016–2020 гг. возобновляемая энергетика отнесена к приоритетным направлениям [6]. На данный момент в стране насчитывается свыше 300 действующих установок на основе возобновляемых источников энергии общей мощностью 500 МВт: 98 установок по использованию энергии ветра (110 МВт), 95 – по использованию энергии солнца (более 150 МВт), 29 гидроэнергетических (86,06 МВт), 32 биогазовые установки (41,3 МВт). Согласно Концепции энергетической безопасности Республики Беларусь, соотношение объема производства первичной энергии из возобновляемых источников к валовому потреблению топливно-энергетических ресурсов должно составлять: в 2020 г. – 6 %, в 2030 г. – 8, в 2035 г. – 9 %.

Повышение эффективности электроснабжения потребителей заключается в максимальном использовании нетрадиционных и возобновляемых источников энергии (солнечных батарей, ветроэнергетических установок и др.), что позволит улучшить энергообеспечение и электровооруженность без дополнительной нагрузки на централизованную электрическую сеть.

Перспективной технологией использования солнечной энергии для выработки электричества является фотовольтаика. При расчете и моделировании регенеративных энергетических систем необходимо точное определение локализации количества солнечного излучения в центрах размещения СЭУ.

Большой вклад в развитие теории и практики применения возобновляемых источников энергии для электроснабжения потребителей внесли такие ученые, как Д. С. Стребков, П. П. Безруких, В. И. Виссарионов, О. С. Попель, Е. В. Соломин, Л. А. Саплин, Р. А. Амерханов, С. М. Воронин, С. К. Шерьязов, Б. В. Лукутин и др. [7–11]. Существует много работ, посвященных методикам расчета потенциала возобновляемых энергоресурсов, параметров энергоустановок и совершенствованию технологий производства СЭУ. Однако в научной литературе практически не уделяется внимание решению проблемы повышения КПД СЭУ за счет локализации интенсивности излучения, падающего на поверхность фотопреобразователей, в широком оптическом спектральном диапазоне в зависимости от конкретной локальной области поверхности Земли, которая определяется углом положения Солнца и азимутом Солнца.

Постановка задачи

Интенсивность солнечного излучения на поверхности Земли обычно ниже, чем в открытом космосе, что связано с потерями излучения при прохождении через атмосферу. Для повышения КПД СЭУ большое значение имеют как интенсивность, так и спектральный диапазон солнечного излучения, которое доходит до конкретной точки поверхности Земли и определяется углом положения Солнца над горизонтом и азимутом Солнца. Данная зависимость углов характеризует солнечную траекторию, ее анализ для Республики Беларусь ранее не проводился.

Солнечную траекторию можно рассчитать на основе алгоритма DIN. Более точные результаты при определении высоты Солнца дает симулятор солнечной системы SUNAE, учитывающий влияние преломления солнечного света в атмосфере, но некоторые рассчитываемые области локализации интенсивности света на поверхности Земли получаются с большой погрешностью (60 %).

В данной статье предлагается алгоритм расчета солнечной траектории, разработанный авторами на языке программирования Java на основе алгоритма DIN, для областных центров Республики Беларусь в дни солнцестояния.

$$\alpha_c = \begin{cases} 180^\circ - \arccos \frac{\sin \gamma_c \sin \varphi - \sin \delta}{\cos \gamma_c \cos \varphi} & \text{для } T_{\text{полд}} \leq 12:00; \\ 180^\circ + \arccos \frac{\sin \gamma_c \sin \varphi - \sin \delta}{\cos \gamma_c \cos \varphi} & \text{для } T_{\text{полд}} \geq 12:00, \end{cases} \quad (3)$$

где $T_{\text{полд}}$ – реальное местное время солнечного полдня; ω – часовой угол Солнца, характеризующий угол поворота с момента солнечного полдня.

На основании представленного расчета геометрических параметров положения Солнца (1)–(3) достаточно трудно провести анализ локализации солнечной энергии в течение дня на поверхности Земли с определенными географическими координатами (широта, долгота) [13]. Для этих целей используем диаграмму солнечной траектории, т. е. зависимость угла положения Солнца над горизонтом от азимута Солнца для различных дней солнцестояния (21 декабря, 21 марта, 21 июня, 21 сентября). В качестве дополнительного параметра на графиках указано время суток.

Для построения диаграммы солнечной траектории написана программа на языке Java, с помощью которой рассчитаны значение азимута Солнца и положение Солнца над горизонтом для конкретного дня, широты, долготы и времени суток.

На рис. 2 представлен численный расчет диаграммы солнечной траектории для областных центров Республики Беларусь в день зимнего солнцестояния.

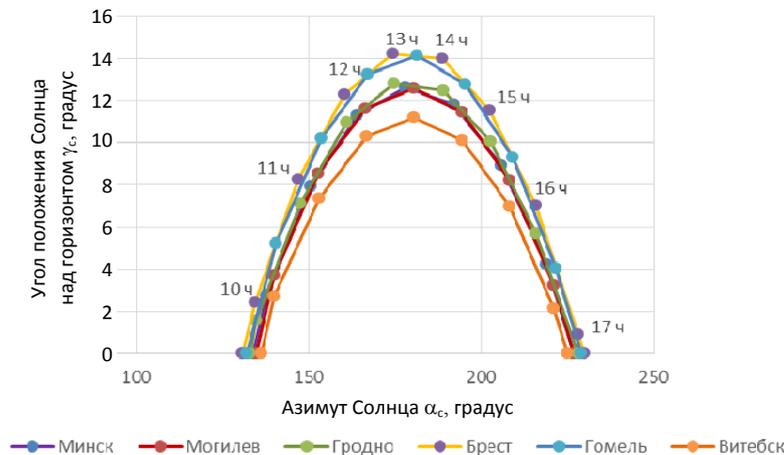


Рис. 2. Диаграмма солнечной траектории для областных центров Республики Беларусь (21 декабря)

Fig. 2. The diagram of the solar trajectory for the oblast (regional) centers of the Republic of Belarus (December, 21)

Как следует из рис. 2, максимальный угол склонения Солнца над горизонтом наблюдается в Бресте и Гомеле. Кривые локализации солнечного излучения (диаграмма солнечной траектории) находятся практически рядом, имеется лишь смещение по времени, например угол положения

Солнца γ_c в 10 часов утра в Бресте практически вдвое меньше, чем в то же самое время в Гомеле.

Для Гродно, Минска и Могилева траектории солнечного излучения находятся очень близко друг к другу, а угол положения Солнца по времени в каждом городе имеет свое значение, например для 11:00 в Минске $\gamma_c \approx 8^\circ$, в Гродно он меньше примерно на 1° , а в Могилеве примерно на 1° больше.

Самая низкая солнечная траектория наблюдается в Витебске, и Витебская область по сравнению с другими регионами Беларуси имеет более низкую интенсивность солнечного излучения. Это объясняется тем, что чем меньше угол положения Солнца над горизонтом, тем больше путь солнечного излучения через атмосферу Земли, следовательно, увеличиваются в атмосфере потери интенсивности в спектре солнечного излучения.

На рис. 3 графически представлено сравнение солнечной траектории для четырех белорусских городов: Бреста, Гомеля, где наблюдаются максимальные значения локализации интенсивности солнечного излучения; Витебска, где указанные значения минимальны; Минска, где диаграмма солнечной траектории схожа с диаграммами для Гродно и Могилева.

Как видно из рис. 3, угол положения Солнца незначительно отличается по времени в Гомеле, Минске, Витебске. В Бресте он существенно больше, чем в других областных центрах в аналогичное время суток.

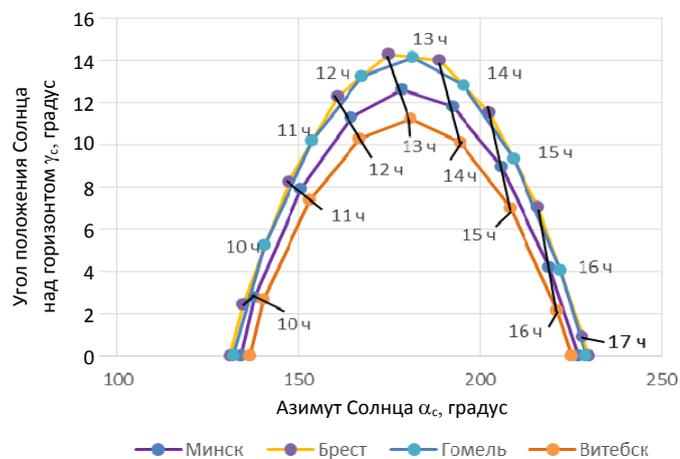


Рис. 3. Диаграмма солнечной траектории для четырех областных центров Республики Беларусь (21 декабря)

Fig.3. The diagram of the solar trajectory for four oblast (regional) centers of the Republic of Belarus (December, 21)

Для сравнения представим диаграмму солнечной траектории для 21 декабря в Берлине (Германия) и белорусских Бресте и Гомеле (рис. 4). Так, диаграммы солнечной траектории Берлина ($\varphi - 52,30$; $\psi - 13,20$) и Гомеля ($\varphi - 53,54$; $\psi - 27,34$) практически совпадают. Единственное отличие на графике – это смещение Солнца по высоте в данных городах: в Берлине оно позже встает, но и позже заходит, чем в Гомеле. Солнечная траектория

Бреста превосходит солнечную траекторию Берлина и по значениям угла положения Солнца над горизонтом, и по продолжительности дня.

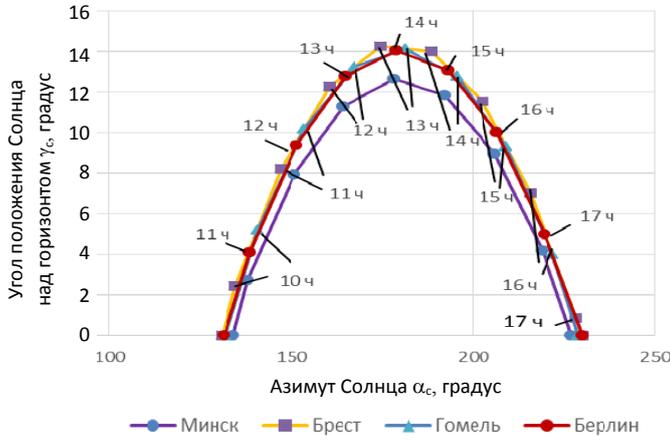


Рис. 4. Диаграмма солнечной траектории для 21 декабря в Берлине, Бресте и Гомеле

Fig. 4. Diagram of the solar trajectory for December, 21, in Berlin, Brest and Gomel

На рис. 5 показана диаграмма для областных центров Республики Беларусь в весенний день солнцестояния (21 марта). Овалом выделены значения угла положения Солнца в определенное время суток. Как видно, по сравнению со значениями на 21 декабря (рис. 2) угол положения Солнца возрос практически в три раза для всех исследуемых городов. Траектории солнечного излучения с 7 до 8 часов утра, а также в вечернее время с 18 до 19 часов по азимуту Солнца практически совпадают, отличаются только по высоте Солнца над горизонтом относительно азимута Солнца и времени суток.

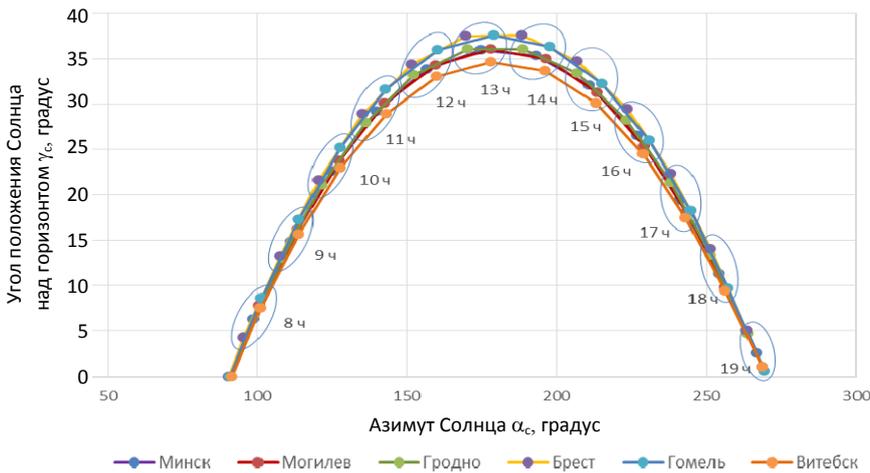


Рис. 5. Диаграмма солнечной траектории для областных центров Республики Беларусь (21 марта)

Fig. 5. The diagram of the solar trajectory for the oblast (regional) centers of the Republic of Belarus (March, 21)

На рис. 6 показана диаграмма солнечной траектории для областных центров в летний день солнцестояния (21 июня). Существенно расширился диапазон значений азимута Солнца. Угол положения Солнца над горизонтом возрос в 1,5 раза для всех исследуемых городов по сравнению с 21 марта. Также отмечается увеличение долготы дня и более быстрое набирание высоты Солнца в течение суток. Так, в весенний день солнцестояния $\gamma_c = 5^\circ$ около 8 часов утра (рис. 5), а в летний – с 5 до 6 часов утра (рис. 6). Солнечные траектории в утреннее время с 5 до 8 часов, а также вечером с 18 до 21 часа по азимуту практически совпадают, отличаясь, как и в весенний день солнцестояния, только по высоте Солнца над горизонтом относительно азимута Солнца и времени суток.

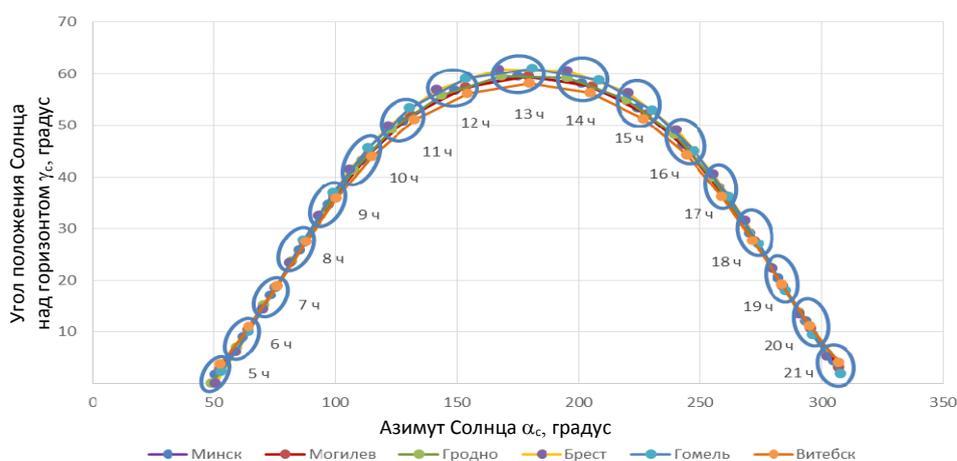


Рис. 6. Диаграмма солнечной траектории для областных центров Республики Беларусь (21 июня)

Fig. 6. The diagram of the solar trajectory for the oblast (regional) centers of the Republic of Belarus (June, 21)

На рис. 7 представлены численные расчеты диаграммы солнечной траектории для осеннего дня солнцестояния (21 сентября). Она схожа с диаграммой для весеннего дня солнцестояния (рис. 5), где близки значения угла положения Солнца над горизонтом и азимута Солнца. Вместе с тем значения угла положения Солнца отличаются в зависимости от времени суток. Например, в изучаемых городах в 7 часов утра 21 марта (рис. 5) Солнце еще не достигло горизонта, а в 19 часов находится над горизонтом. А 21 сентября (рис. 7) в 7 часов утра в Минске, Витебске и Гомеле, а также в 19 часов в Бресте, Гродно и Минске Солнце находится над горизонтом.

Из представленных результатов (рис. 5, 7) следует, что степень локализации интенсивности солнечного излучения максимальна в утренние часы для 21 марта и в вечернее время для 21 сентября.

Таким образом, полученные в ходе исследования численные результаты солнечной траектории (рис. 2–7) позволяют провести анализ пространственно-временной степени локализации солнечной энергии для областных центров Республики Беларусь и дать рекомендации для повышения КПД СЭУ.



Рис. 7. Диаграмма солнечной траектории для областных центров Республики Беларусь (21 сентября)

Fig. 7. The diagram of the solar trajectory for the oblast (regional) centers of the Republic of Belarus (September, 21)

Повышение КПД ($\Delta\eta$) пропорционально углу γ_c , который зависит от азимутального угла α_c , т. е. $\Delta\eta = k\gamma_c$, где $\gamma_c = f(\alpha_c)$, k – характеризует параметр солнечной энергетической установки. Используя формулу для функциональной зависимости $\Delta\eta = f(\gamma_c, \alpha_c)$ с учетом зависимости угла положения Солнца над горизонтом от азимута Солнца (рис. 2–7), вычислим относительное изменение КПД для дней солнцестояния по следующей формуле:

$$P(\%) = \frac{\Delta\eta_i - \Delta\eta_j}{\Delta\eta_i} \cdot 100\% = \frac{\gamma_{ic} - \gamma_{jc}}{\gamma_{ic}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где i, j – значения углов положения Солнца над горизонтом для областных центров Республики Беларусь.

В табл. 1 приведены численные расчеты относительного изменения КПД для максимального угла положения Солнца над горизонтом, соответствующего времени 13.00, в дни солнцестояния в исследуемых городах.

На основании данных, представленных в табл. 1, и численных расчетов солнечных диаграмм (рис. 2–7) можно предложить следующие рекомендации для более эффективной работы СЭУ.

Наименьшее отклонение относительного изменения КПД в зависимости от времени года наблюдается в Бресте и Гомеле, наибольшее – в Витебске. Таким образом, в декабре КПД СЭУ, установленной в Витебске, на 20 % ниже, чем расположенной в Бресте и Гомеле, и в среднем на 10 % ниже, чем находящейся в других городах.

СЭУ в автономном режиме с максимальной эффективностью могут использоваться:

- в течение года в Бресте и Гомеле;
- с марта по сентябрь в Минске, Гродно и Могилеве;
- в летний период в Витебске.

Таблица 1

Относительное изменение коэффициента полезного действия в дни солнцестояния для максимального угла положения Солнца над горизонтом (время 13:00)

Relative change in the efficiency coefficient at the solstice for the maximum angle from the position of the Sun above the horizon (at 13:00)

Название областного центра	Относительное изменение КПД, %			
	21 декабря	21 марта	21 июня	21 сентября
Брест	0	0,43	0,28	0
Витебск	21,36	7,81	4,80	8,00
Гомель	0,91	0	0	0,47
Гродно	10,22	4,23	2,59	3,75
Минск	11,41	4,28	2,57	4,25
Могилев	11,69	4,17	2,54	4,40

Комбинированные энергоустановки более эффективно использовать с октября по февраль в Минске, Гродно и Могилеве; с сентября по май в Витебске.

Для обеспечения максимальной эффективности СЭУ ее принимающую поверхность (фотопреобразователь, гелиоколлектор и др.) необходимо ориентировать перпендикулярно к траектории солнечного луча на протяжении солнечного дня. В частности, максимальный эффект будет достигаться: в Гомеле, Могилеве, Витебске – до полудня; в Бресте, Гродно – после полудня; в Минске – в полдень.

ВЫВОДЫ

1. В статье развит алгоритм расчета солнечной траектории, который реализован на языке программирования Java. Представлены в виде графиков численные результаты зависимости угла положения Солнца над горизонтом от азимута Солнца для различных дней солнцестояния в областных центрах Республики Беларусь. Предложен способ повышения коэффициента полезного действия солнечной энергетической установки путем оптимизации угла наклона принимающей поверхности, подбора оборудования энергоустановки.

2. Проведенный анализ степени локализации солнечной энергии в Республике Беларусь показал, что самая высокая интенсивность солнечного излучения наблюдается в Бресте и Гомеле, средняя инсоляция характерна для Гродно, Минска, Могилева, самая низкая – в Витебске.

3. Сравнительный анализ солнечной траектории показал, что интенсивность солнечного излучения в Бресте больше, чем в Берлине, тогда как показатели для Гомеля и Берлина находятся практически на одном уровне.

4. Разработанный авторами алгоритм расчета солнечной траектории для Республики Беларусь позволит уточнить методику расчета солнечной инсоляции с учетом географических и климатических условий местности [14], что имеет большую значимость при инженерных расчетах и проектировании солнечных энергетических станций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Jeger-Waldau, A. PV Status Report 2017. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2017. 90 p.
2. Марончук, И. И. Солнечные элементы: современное состояние и перспективы развития / И. И. Марончук, Д. Д. Саникович, В. И. Мирончук // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 2. С. 105–123. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-105-123>.
3. Оценка эффективности работы солнечной электростанции на крыше здания в Ханое / Т. Н. Нгуен [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 1. С. 30–41. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-30-41>.
4. Best Research – Cell Efficiencies [Electronic resource]. Mode of access: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Best_Research-Cell_Efficiencies.png. Date of access: 20.02.2018.
5. О возобновляемых источниках энергии [Электронный ресурс]: Закон Респ. Беларусь, 27 декабря 2010 г., № 204-З. Режим доступа: https://kodeksy-by.com/zakon_rb_o_vozobnovlyаемых_istochnikah_energii.htm. Дата доступа: 25.01.2020.
6. Государственная программа «Энергосбережение» на 2016–2020 годы: утв. пост. Совета Министров Респ. Беларусь от 28 марта 2016 г. № 248; в ред. от 31.12.2019 № 972 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://energoeffekt.gov.by/programs/govporgram20162020/2016-2020>. Дата доступа: 02.02.2020.
7. Обухов, С. Г. Повышение эффективности комбинированных автономных систем электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии / С. Г. Обухов. Томск, 2013. 41 с.
8. Шерьязов, С. К. Методология рационального сочетания традиционных и возобновляемых энергоресурсов в системе энергоснабжения сельскохозяйственных потребителей / С. К. Шерьязов. Челябинск, 2011. 398 с.
9. Стребков, Д. С. Солнечные электростанции: концентраторы солнечного излучения / Д. С. Стребков, Э. В. Тверьянович; под ред. Д. С. Стребкова. 2-е изд., испр. М.: Юрайт, 2019. 265 с.
10. Лукутин, Б. В. Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями / Б. В. Лукутин, И. О. Муравлев, И. А. Плотников. Томск: Изд-во Томского политех. ун-та, 2015. 128 с.
11. Солнечная энергетика / В. И. Виссарионов [и др.]; под ред. В. И. Виссарионова. М.: ИД МЭИ, 2008. 317 с.
12. Quaschnig, V. Regenerative Energiesysteme / V. Quaschnig // 10 Aktualisierte und Erweiterte Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2019. 468 p. <https://doi.org/10.3139/9783446461147.fm>.
13. Мирончук, В. И. Алгоритм расчета солнечной траектории в течении дня для нескольких областных центров Республики Беларусь / В. И. Мирончук, А. А. Вельченко, В. М. Андрианов // Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 19–20 декабря 2019 г. Минск: БГАТУ, 2019. С. 105–107.
14. Мирончук, В. И. Методика расчета солнечной энергетической станции с учетом климатических условий местности / В. И. Мирончук, В. М. Андрианов, А. А. Вельченко // Энергосбережение – важнейшее условие инновационного развития АПК: сб. науч. ст. Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 23–24 ноября 2017 г. Минск: БГАТУ, 2017. С. 122–123.

Поступила 29.04.2020 Подписана в печать 26.11.2020 Опубликована онлайн 29.01.2021

REFERENCES

1. Jeger-Waldau A. (2017) *PV Status Report 2017*. Luxembourg, Publications Office of the European Union. 90.
2. Maronchuk I. I., Sanikovich D. D., Mironchuk V. I. (2019) Solar Cells: Current Status and Development Prospects. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions*

- and Power Engineering Associations, 62 (2), 105–123. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-105-123> (in Russian).
3. Nguyen T. N., Sizov V. D., Vu M. P., Cu T. T. H. (2020) Evaluation of Work Efficiency of the Solar Power Plant Installed on the Roof of a House in Hanoi City. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (1), 30–41. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-30-41> (in Russian).
 4. *Best Research – Cell Efficiencies*. Available at: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Best_Research-Cell_Efficiencies.png (Accessed 20 February 2018).
 5. *Renewable Energy Sources. Law of the Republic of Belarus*, December 27, 2010, No 204-3. Available at: https://kodeksy-by.com/zakon_rb_o_vozobnovlyaemyh_istochnikah_energii.htm. (Accessed 25 January 2020) (in Russian).
 6. *State Program “Energy Saving” for 2016–2020 (as Amended by the Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus of December 31, 2019 No 972)*. Available at: <http://energoeffekt.gov.by/programs/govporgram20162020/2016-2020>. (Accessed 2 February 2020) (in Russian).
 7. Obukhov S. G. (2013) *Improving the Effectiveness of Combined Autonomous Renewable Energy Systems Energy*. Tomsk, 41 (in Russian).
 8. Sher'yazov S. K. (2011) *Methodology of Rational Combination of Traditional and Renewable Energy Resources in the Agricultural Consumers Energy Supply System*. Chelyabinsk. 398 (in Russian).
 9. Strebkov D. S., Tver'yanovich E. V. (2019) *Solar Power Plants: Concentrators of Solar Radiation*. 2nd ed. Moscow, Yurayt Publ. 265 (in Russian).
 10. Lukutin B. V., Muravlev I. O., Plotnikov I. A. (2015) *Power Supply Systems with Wind and Solar Power Plants*. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. 128 (in Russian).
 11. Vissarionov V. I., Deryugina G. V., Kuznetsova V. A., Malinin N. K. (2008) *Solar Energy*. Moscow, MPEI Publ. House. 317 (in Russian).
 12. Quaschnig V. (2019) *Regenerative Energiesysteme*. 10 Aktualisierte und Erweiterte Auflage. München: Carl Hanser Verlag. 468. <https://doi.org/10.3139/9783446461147.fm>.
 13. Mironchuk V. I., Vel'chenko A. A., Andrianov V. M. An Algorithm for Calculating the Solar Trajectory during the Day for Several Oblast Centers of the Republic of Belarus. *Energoberezhenie – Vazhneishee Uslovie Innovatsionnogo Razvitiya APK: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., Minsk, 19–20 Dekab. 2019 g.* [Energy Saving as the Most Important Condition for the Innovative Development of Agro-Industrial Complex: Collected Scientific Papers of the International Scientific and Technical Conference. Minsk, Dec. 19–20, 2019]. Minsk, Belarusian State Agrarian Technical University, 105–107 (in Russian).
 14. Mironchuk V. I., Andrianov V. M., Vel'chenko A. A. (2017) Methodology for Calculating the Solar Power Station Taking into Account the Climatic Conditions of the Area. *Energoberezhenie – Vazhneishee Uslovie Innovatsionnogo Razvitiya APK: Sbornik Nauch. Statei Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., Minsk, 23–24 Noyab. 2017 g.* [Energy Saving as the Most Important Condition for the Innovative Development of Agro-Industrial Complex: Collected Scientific Papers of the International Scientific and Technical Conference. Minsk, Nov. 23–24, 2017]. Minsk, Belarusian State Agrarian Technical University, 122–123 (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-27-39>

УДК 621.355.1

Моделирование аккумуляторных батарей и их сборок с учетом деградации параметров

К. В. Доброго¹⁾, Ю. В. Бладыко²⁾

¹⁾Высшая аттестационная комиссия Республики Беларусь (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. В последние годы системы накопления электрической энергии рассматриваются как ключевой элемент технологического развития транспортных средств, возобновляемой энергетики. В статье дано краткое описание методов, приведены некоторые новые подходы и представлены результаты моделирования аккумуляторов в параллельно-последовательных сборках, которые могут использоваться для проектирования накопительных блоков для локальных энергетических систем. Аккумулятор – сложный физико-химический, электротехнический и электротехнический объект, моделирование которого может проводиться на различных уровнях глубины и разными методами. Рассматриваются варианты симулирования аккумуляторов. Представление аккумулятора в виде схем замещения хорошо согласуется с общим подходом графического представления электротехнических систем в таких пакетах, как MatLab-Simulink, Electronics Workbench и подобных. В моделировании аккумуляторных батарей выделяют два направления: представление текущих параметров в течение цикла заряда-разряда; моделирование параметров функционального состояния за длительное время эксплуатации. Указанные направления рассматривают различные характерные периоды времени (часы и сутки в первом случае и сотни суток – во втором), различаются по учитываемым параметрам и являются относительно независимыми. В MatLab-Simulink последних версий имеется встроенная модель с деградацией параметров аккумулятора, однако она достаточно сложна. В частности, при моделировании работы более чем одного аккумулятора значительно возрастает длительность счета. При расчете сборки из большого числа аккумуляторов, соединенных параллельно-последовательно, время в программе практически останавливается, что говорит о невозможности моделировать большие сборки. Вместе с тем свою работоспособность показала электронная лаборатория Electronics Workbench, имеющая при использовании критерия подобия перспективы к усложнению схем, что позволяет анализировать параллельно-последовательные сборки аккумуляторов.

Ключевые слова: аккумулятор, сборка, модель, схема замещения, заряд, разряд, емкость, старение, деградация

Для цитирования: 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>

Modeling of Batteries and their Assemblies Taking into Account the Degradation of Parameters

K. V. Dobrego¹⁾, Y. V. Bladyko²⁾

¹⁾The Higher Certification Commission of the Republic of Belarus (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. In recent years, electric energy storage systems are considered as a key element in the technological development of vehicles, renewable energy. This article provides a brief description

Адрес для переписки

Бладыко Юрий Витальевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел. +375 17 292-71-93
eic@bntu.by

Address for correspondence

Bladyko Yuri V.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Тел. +375 17 292-71-93
eic@bntu.by

of modeling methods, some new approaches and the results of modeling batteries in parallel-to-serial assemblies that can be used to design storage units for local power systems. A battery is a very complex physicochemical, electrochemical and electrotechnical object, the modeling of which can be carried out at various depth levels and by various methods. Battery modeling options are being considered. Presentation of the battery in the form of equivalent circuits is in good agreement with the general approach of graphical representation of electrical systems in such packages as MatLab-Simulink, Electronics Workbench and the like. Two directions of battery modeling can be distinguished, viz. modeling current battery parameters during a charge-discharge cycle and modeling the parameters of the functional state of the batteries over a long period of operation. These directions consider different characteristic time periods (hours and days in the first case and hundreds of days in the second one), differ in the parameters taken into account and are relatively independent. The latest versions of MatLab-Simulink have a built-in model with degradation of battery parameters. The built-in battery model is quite complex and when simulating the operation of more than one battery, the time period of counting increases significantly. When modeling assemblies from a large number of batteries connected in parallel-to-series, the time in the program practically stops, which indicates the impossibility of modeling large assemblies. Nevertheless, the Electronics Workbench electronics lab has shown its performance. When using the similarity criterion, Electronics Workbench has the potential to complicate the circuits, which makes it possible to analyze parallel-serial battery assemblies.

Keywords: battery, assembly, model, equivalent circuit, charge, discharge, capacity, aging, degradation

For citation: Dobrego K. V., Bladyko Y. V. (2021) Modeling of Batteries and their Assemblies Taking into Account the Degradation of Parameters. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 64 (1), 27–39. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-27-39> (in Russian)

Введение

В последние годы системы накопления электрической энергии рассматриваются как ключевой элемент технологического развития транспортных средств, возобновляемой энергетики, робототехнических и автономных электронных систем. Об этом свидетельствуют стремительный рост рынка аккумуляторных батарей (АКБ), а также большое количество исследований, направленных на повышение эффективности традиционных и создание новых типов АКБ. Соответствующие исследования требуют моделирования жизненного цикла отдельных АКБ и их сборок, т. е. представления эксплуатационных параметров АКБ в типичных режимах в течение времени, ограниченного критическим снижением их эксплуатационных характеристик. Несмотря на то что проблема симулирования работы АКБ не нова и имеется обширная литература на эту тему [1–9], в настоящее время появляются задачи, предъявляющие новые требования к такому моделированию. В частности, это касается оптимизации работы больших сборок АКБ с учетом деградации их параметров в зависимости от типа, конструкции, режима заряда-разряда, условий эксплуатации с целью снижения затрат на их реальные долгосрочные испытания. В статье дано краткое описание методов симулирования, приведены некоторые новые подходы и результаты моделирования АКБ в параллельно-последовательных сборках, которые могут быть использованы для проектирования накопительных блоков для локальных энергетических систем.

Математическое моделирование – фундаментальный метод исследования сложных систем. Можно говорить об аналитическом, численном, имитационном и других видах моделирования. В первом случае процессы и характеристики системы записываются в виде математических выраже-

ний, допускающих получение искомым данным аналитическими методами. Численное моделирование использует методы вычислительной математики и позволяет получить приближенные решения соответствующих уравнений для частных наборов параметров системы. Получаемые при этом данные не обладают общностью аналитических решений, требуют верификации, могут быть чувствительны к использованному численному методу. Имитационное моделирование – это, как правило, численное моделирование функционирования исследуемой системы, для которого характерна высокая детализация, сохранение логической структуры и временной последовательности процессов. Оно зачастую обеспечивается наглядным интерфейсом, позволяющим конструировать различные варианты системы, наблюдать эффекты в реальном, ускоренном или замедленном темпе, и в определенном смысле аналогично экспериментальному исследованию реального объекта.

АКБ – сложный физико-химический, электрохимический и электротехнический объект, расчет которого может проводиться различными методами и с разным уровнем детализации. В данной работе не рассматриваются физико-химические, электрохимические процессы в АКБ, вопросы прочности или механики, а ставится задача моделирования функциональных параметров. Схема основных функциональных параметров при моделировании АКБ приведена на рис. 1. Однонаправленными стрелками обозначены параметры, не зависящие от текущего состояния АКБ. Двухнаправленные стрелки указывают на параметры, которые характеризуют состояние и работу и сами могут меняться в процессе функционирования.

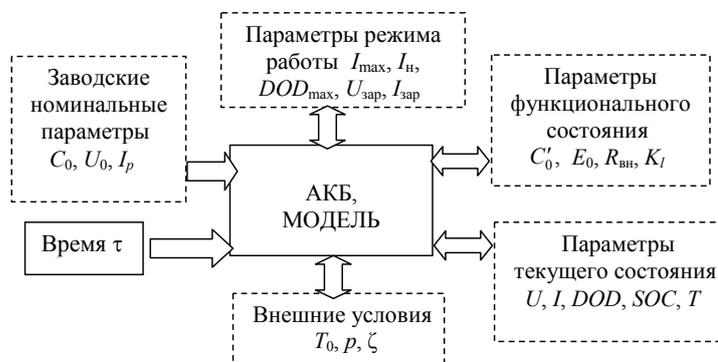


Рис. 1. Параметры моделирования АКБ: C_0, U_0 – номинальные емкость и напряжение; I_p – пиковый ток; I_{\max}, I_n – максимально допустимый и нормальный ток разряда; DOD_{\max} – допустимая глубина разрядки; $U_{\text{зар}}, I_{\text{зар}}$ – рекомендуемые напряжение и ток зарядки; $R_{\text{вн}}, K_l$ – внутреннее активное и поляризационное сопротивление; C'_0 – электрическая емкость; E_0 – напряжение разомкнутой цепи; SOC – степень заряженности; T_0, p, ζ – температура, давление, влажность окружающей среды

Fig. 1. Battery modeling parameters: C_0, U_0 – nominal capacity and voltage; I_p – peak current; I_{\max}, I_n – maximal and normal operational current; DOD_{\max} – permissible depth of discharge; $U_{\text{зар}}, I_{\text{зар}}$ – recommended charging voltage and current; $R_{\text{вн}}, K_l$ – active and polarization resistance; C'_0 – electrical capacity; E_0 – open circuit voltage; SOC – state of charge; T_0, p, ζ – ambient temperature, pressure and humidity

В [4] перечислены основные подходы к моделированию химических батарей. Среди них: решение одномерной электрохимической задачи с ис-

пользованием параметров материалов (пористость электродов, плотность электролита и др.); подбор коэффициентов в модельных уравнениях работы АКБ (например, эмпирическом уравнении Шеферда [1]) по разрядным кривым; составление эквивалентной схемы батареи и подбор зависимости параметров всех ее компонентов от параметров состояния АКБ (например, от степени заряженности). Последний подход более нагляден ввиду знакомства исследователей со стандартными электротехническими компонентами и более прост для первичного воплощения, поскольку модели простых электротехнических компонентов встроены в стандартные пакеты симуляции радиотехнических систем и согласуются с общим подходом графического представления электротехнических систем в пакетах MatLab-Simulink [10, 11], Electronics Workbench [12] и подобных.

По масштабу моделируемого интервала времени можно выделить следующие направления: 1) исследование текущих параметров АКБ в течение одного или нескольких циклов заряда-разряда; 2) воспроизведение параметров функционального состояния АКБ за длительное время эксплуатации (по существу учет деградации параметров). Указанные направления различаются по расчетным параметрам и относительно независимы, однако могут быть объединены в единой модели.

Для экономического обоснования эксплуатации АКБ первостепенный интерес представляет долговременное моделирование и менее важны нюансы кратковременного циклирования. Поэтому модели текущего состояния АКБ в процессе разрядки-зарядки при решении таких задач могут быть приближенными.

Простейшими математическими моделями текущего состояния АКБ являются модели Пуэкерта, Шеферда [1, 2]. Первая связывает время разряда при постоянном токе с его величиной

$$\tau_I = \frac{\text{const}}{I^p},$$

где τ_I – время разряда при токе I , с; I – разрядный ток, А; p – показатель Пуэкерта (зависит от типа АКБ и температуры, табл. 1).

Таблица 1

Показатель Пуэкерта для различных типов АКБ [3]

Peukert's index for various types of batteries [3]

Тип АКБ	p	Тип АКБ	p
Pb	1,27–1,34	Ni-Zn-H	1,09
Ni-Cd	1,14	Ag-Zn	1,05
Ni-Mh	1,10	Na-S	1,10

Модель Шеферда [1, 6] связывает электрохимические свойства АКБ с напряжением и током

$$E_I = E_0 - R_{\text{вн}} I - K_I \frac{f}{1-f},$$

где E_I – напряжение АКБ, В; E_0 – напряжение разомкнутой цепи АКБ при полной зарядке, В; $R_{\text{вн}}$ – внутреннее сопротивление АКБ, Ом; I – разряд-

ный ток, A ; K_I – напряжение поляризации, B ; $f = \int \frac{Idt}{Q}$ – степень заряженности АКБ, или SOC (отношение накопленного заряда к полной емкости); Q – полная емкость АКБ, $A \cdot ч$.

В целом для эмпирических моделей характерна простая функциональная связь внутренних параметров АКБ и значений SOC и DOD .

Схемы замещения являются, по существу, графическим представлением математических моделей электрических устройств. В [4–8] рассматриваются простейшие схемы замещения АКБ, не учитывающие конечной емкости, деградации, особенностей перенапряжения при зарядке, а также модели с конденсатором, имитирующие ограничение скорости заряда. Несколько более сложная схема, называемая моделью Тевенина, имитирующая перенапряжение при зарядке, включает резистор саморазряда. Существуют модели замещения, в которых значения элементов цепи зависят от напряжения или тока. В ряде случаев резисторы цепи перенапряжения и внутреннего сопротивления имитируются нелинейными элементами с различными характеристиками для воспроизведения электрических особенностей режимов разряда и заряда АКБ [9].

Анализируя опыт, можно заключить, что для обеспечения наглядности и универсальности моделирование АКБ целесообразно проводить, используя схемы замещения в стандартных пакетах электротехнического моделирования. Исходя из принципов физической адекватности, модель замещения предпочтительнее составлять без использования источника напряжения, а лишь емкостью и компонентами, ограничивающими минимальное и максимальное напряжение на ней, а также цепями, имитирующими перенапряжение при заряде и другие особенности АКБ.

Программные средства для реализации моделей АКБ

Рассмотрим несколько базовых программ для моделирования систем АКБ.

MatLab-Simulink [5–8, 10, 11] – это графическая среда имитационного моделирования, позволяющая при помощи блок-диаграмм в виде направленных графов строить динамические модели, включая дискретные, непрерывные и гибридные, нелинейные и разрывные системы. Дополнительные пакеты расширения Simulink позволяют решать широкий спектр задач от разработки концепции модели до тестирования, проверки, генерации кода и аппаратной реализации. Simulink интегрирован в среду MatLab, что позволяет использовать встроенные математические алгоритмы, мощные средства обработки данных и научную графику.

Electronics Workbench [12, 13] – программа, которая позволяет моделировать аналоговые, цифровые и цифро-аналоговые схемы высокой сложности. Имеющиеся в ней библиотеки включают в себя большой набор электронных компонентов. Есть возможность создания и подключения новых библиотек компонентов.

Встроенная модель MatLab-Simulink с деградацией параметров

В пакете MatLab-Simulink имеется встроенная модель АКБ с деградацией емкости, с помощью которой возможна симуляция работы свинцово-кислотного, литий-ионного, никель-кадмиевого, никель-металлогидридного аккумуляторов. Схема разряда литий-ионной батареи с использованием соответствующей встроенной модели представлена на рис. 2. Параметры АКБ можно задать вручную либо выбрать из списка в соответствующем блоке меню [11].

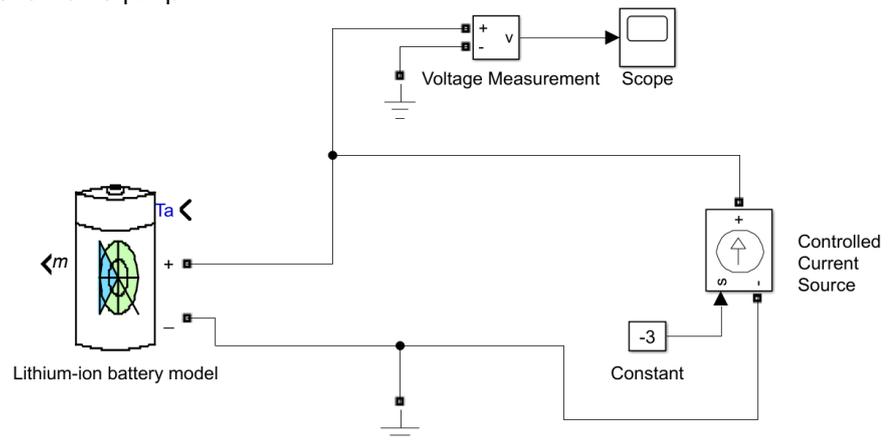


Рис. 2. Схема разряда литий-ионного аккумулятора в MatLab-Simulink

Fig. 2. Lithium-ion battery discharge circuit in MatLab-Simulink

Модель имеет иерархическую структуру (рис. 3). Блок «Internal Resistance» задает внутреннее сопротивление аккумулятора, блок «Current Measurement» измеряет и передает значение тока в модель аккумулятора, «Controlled Voltage Source» – управляемый источник напряжения.

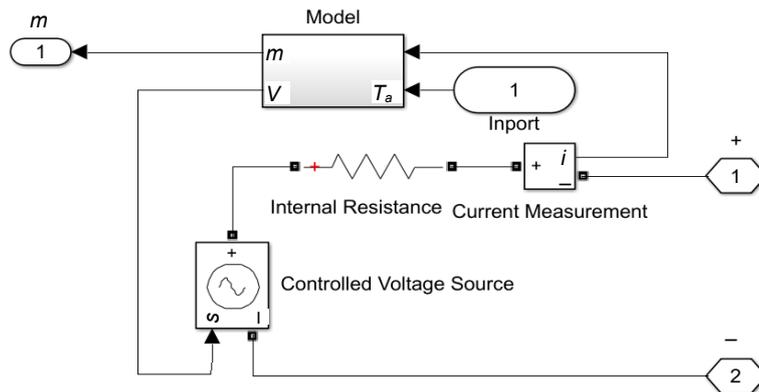


Рис. 3. Иерархическая структура модели литий-ионного аккумулятора:

1, 2 в шестиугольнике – плюсовой и минусовой терминалы АКБ;
 i , T_a – входные параметры тока и температуры; m , V – выходные параметры

Fig. 3. The hierarchical structure of the Lithium-ion battery model:

1, 2 in the hexagon – the positive and negative terminals of the battery;
 i , T_a – input parameters current and temperature; m , V – output parameters

На рис. 4 показана эквивалентная схема аккумулятора, моделируемого блоком. Блок батареи реализует общую динамическую модель.

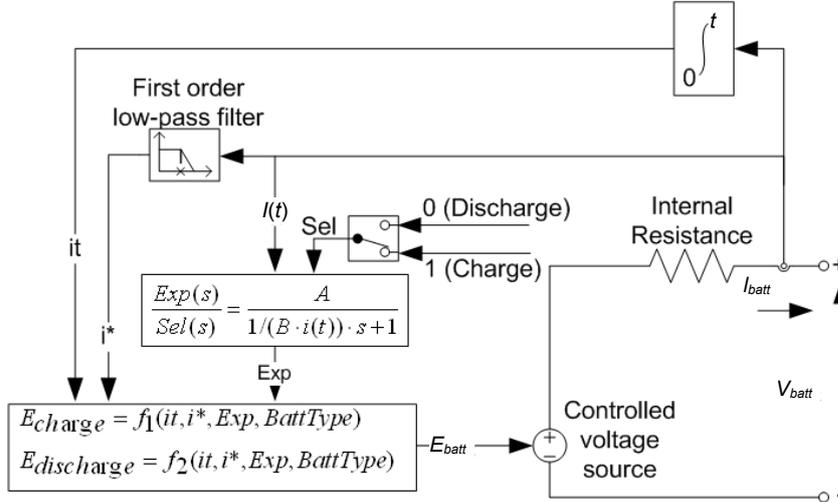


Рис. 4. Эквивалентная схема аккумулятора, моделируемая блоком

Fig. 4. The equivalent battery circuit that the unit models

Встроенная модель использует следующие уравнения, связывающие электрические параметры АКБ:

разряд ($i^* > 0$):

$$u_1(it, i^*, i) = E_0 - Ri - K \frac{Q}{Q - it} i^* - K' \frac{Q}{Q - it} it + A \cdot \exp(-B \cdot it); \quad (1)$$

заряд ($i^* < 0$):

$$u_2(it, i^*, i) = E_0 - Ri - K \frac{Q}{it - 0,1 \cdot Q} i^* - K' \frac{Q}{Q - it} it + A \cdot \exp(-B \cdot it), \quad (2)$$

где E_0 – постоянное напряжение, В; K – поляризационное сопротивление, Ом; K' – постоянная поляризации, В/(А·ч); i^* – ток после фильтра, А; i – ток батареи, А; $it = \int_0^t idt$ – заряд батареи, А·ч; Q – емкость батареи, А·ч; A – амплитуда напряжения, В; B – обратная постоянной времени, (А·ч)⁻¹.

Для литий-ионного аккумулятора эффекты деградации емкости и внутреннего сопротивления представлены следующей моделью [9]:

$$Q(n) = \begin{cases} Q_{BOL} - \varepsilon(n)(Q_{BOL} - Q_{EOL}), & \text{if } k/2 \neq 0; \\ Q(n-1) & \text{otherwise;} \end{cases} \quad (3)$$

$$R(n) = \begin{cases} R_{BOL} - \varepsilon(n)(R_{EOL} - R_{BOL}), & \text{if } k/2 \neq 0; \\ R(n-1) & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (4)$$

где $n = kT_h$ ($k = 1, 2, 3, \dots, \infty$) – параметр времени эксплуатации АКБ; T_h – продолжительность полупериода заряда-разряда, с; Q_{BOL} – максимальная емкость батареи в начале срока службы при номинальной температуре окружающей среды, А·ч; Q_{EOL} – то же в конце срока службы при номинальной температуре окружающей среды, А·ч; R_{BOL} – внутреннее сопротивление батареи в начале срока службы при номинальной температуре окружающей среды, Ом; R_{EOL} – то же в конце срока службы при номинальной температуре окружающей среды, Ом; $\varepsilon(n)$ – фактор старения батареи.

Коэффициент старения равен нулю в начале срока службы и единице в конце, выражается как

$$\varepsilon(n) = \begin{cases} \varepsilon(n-1) + \frac{0,5}{N(n-1)} \left(2 - \frac{DOD(n-2) + DOD(n)}{DOD(n-1)} \right), & \text{if } k/2 \neq 0; \\ \varepsilon(n-1) & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (5)$$

где $DOD(n)$ – глубина разряда батареи по истечении времени полупериода, %; $N(n)$ – максимальное число циклов, рассчитываемое по формуле

$$N(n) = H \left(\frac{DOD(n)}{100} \right)^{-\xi} \exp \left(-\psi \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_a(n)} \right) \right) \left(I_{dis_ave}(n) \right)^{-\gamma_1} \left(I_{ch_ave}(n) \right)^{-\gamma_2}, \quad (6)$$

H – константа; ξ – коэффициент; ψ – постоянная скорости для номера цикла; $I_{dis_ave}(n)$ – средний ток разряда в течение половины цикла, А; $I_{ch_ave}(n)$ – средний ток заряда в течение половины цикла, А; T_{ref} , $T_a(n)$ – номинальная и текущая температуры окружающей среды соответственно, К; γ_1 , γ_2 – показатель степени для тока разряда и заряда соответственно.

Основным параметром деградации является срок службы аккумулятора (количество циклов заряда-разряда, Initial battery age (Equivalent full cycles)). Остальные параметры задаются автоматически в зависимости от типа и параметров аккумулятора, их также можно редактировать.

Эффект деградации свойств АКБ наглядно демонстрируется рис. 5. Как видно из рис. 5а, при подключении к новому аккумулятору нагрузки 3 А в начальный момент времени напряжение снизилось с 4,05 до 3,95 В, затем в процессе разряда (300 с) – до 3,81 В. На использованном аккумуляторе (2000 циклов заряда-разряда, рис. 5б) при подключении той же нагрузки напряжение в начальный момент времени снизилось до 3,77 В, затем в процессе разряда – до 3,61 В.

Недостатком описанной модели является ее относительная сложность, что приводит к увеличению длительности счета и затрудняет исследование сборок АКБ.

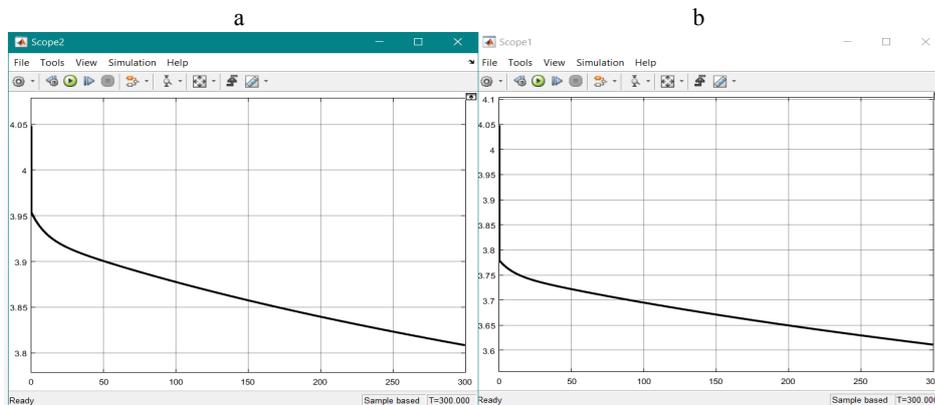


Рис. 5. Разрядная характеристика аккумулятора 3,6 В, 4,5 А·ч током 3 А:
 а – новый аккумулятор; б – аккумулятор после 2000 циклов заряда-разряда
 Fig. 5. The discharge characteristic of the battery is 3,6 V, 4,5 A·h by a current of 3 A:
 а – new battery; б – battery after 2000 charge-discharge cycles

Модель АКБ в электронной лаборатории Electronics Workbench

Для преодоления указанного выше недостатка построена модель ячейки АКБ в Electronics Workbench [12], имитирующей реальное рабочее место исследователя – электронную лабораторию. Программная среда предоставляет виртуальные инструменты: рабочий стол; библиотеку компонентов – аналоговых и цифровых устройств; контрольно-измерительные приборы; набор команд, обеспечивающих выполнение расчетов и выдачу на экран дисплея результатов моделирования в виде таблиц и графиков.

На рис. 6 представлена модель аккумулятора в Electronics Workbench.

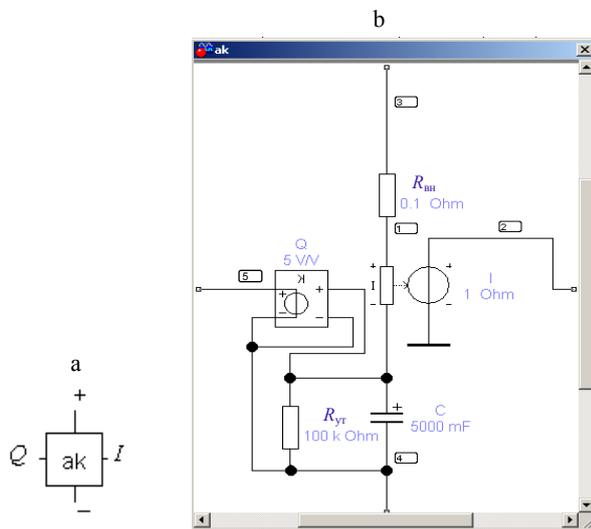


Рис. 6. Модель АКБ: а – аккумулятор в виде подцепи ak; б – подцепь ak: 1 – внутреннее сопротивление; 2 – индикатор тока на основе генератора напряжения, управляемого током; 3 – плюсовая клемма; 4 – минусовая клемма; 5 – индикатор заряда на основе Voltage Gain Block

Fig. 6. Battery model: а – a battery is in the form of subcircuit ak; б – subcircuit ak:
 1 – internal resistance; 2 – current indicator on the basis of the generator voltage controlled current; 3 – positive terminal; 4 – negative terminal; 5 – charge indicator based on Voltage Gain Block

Модель аккумулятора в Electronics Workbench выполнена в виде подцепи ak. Ее основными элементами являются конденсатор C , сопротивление утечки $R_{ут}$, внутреннее сопротивление АКБ $R_{вн}$. Для контроля тока АКБ в модель включен преобразователь тока в напряжение Current-Controlled Voltage Source $I*1\text{ Ohm}$. Для регистрации изменения заряда АКБ используется Voltage Gain Block с коэффициентом усиления напряжения, равным емкости конденсатора $K = C$.

Моделирование параллельно-последовательной сборки

Апробирование модели АКБ выполнено на простой параллельно-последовательной сборке (рис. 7), состоящей из четырех АКБ. Параметры батарей, входящих в сборку, могут отличаться от образцовых вследствие деградации, старения изоляции, разного времени эксплуатации и других причин. Одной из важных задач является исследование параметров работы сборки в условиях, когда параметры отдельных входящих в нее АКБ отклоняются от номинальных значений.

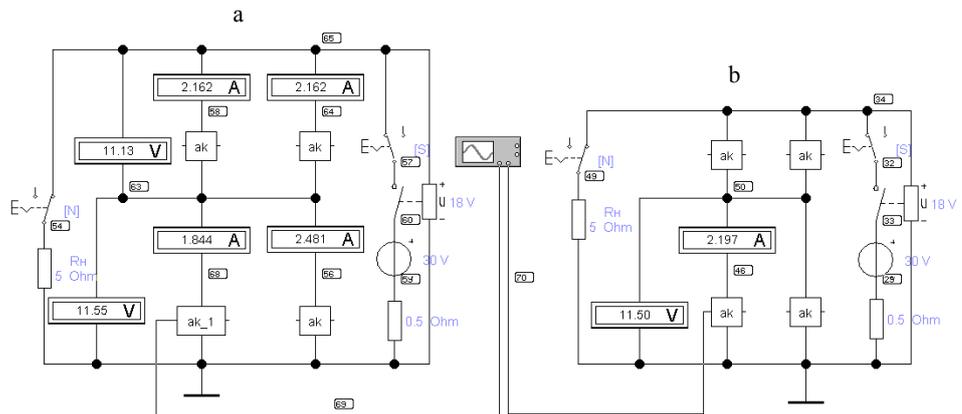


Рис. 7. Параллельно-последовательная сборка четырех АКБ: а – исследуемая сборка; б – эталонная сборка

Fig. 7. Parallel-to-serial assembly of four batteries: a – assembly under study; b – reference assembly

В сборке на рис. 7 параметры одной АКБ (подцепь ak_1) отличаются от параметров остальных (подцепь ak). Для оценки работы сборки с дефектной АКБ параллельно с ней рассматривается работа аналогичной эталонной сборки с идентичными АКБ (рис. 7b). В схему добавлены нагрузка, устройства измерения, источник питания для зарядки АКБ и ключ переключения режима заряда-разряда Voltage-Controlled Switch с заданными порогами включения-выключения источника заряда. Цифры в блоках на рис. 7 показывают значения контрольно-измерительных устройств сразу после запуска схемы в режиме разряда АКБ.

На рис. 8 показаны временные диаграммы изменения напряжения АКБ. При задании реальных параметров АКБ (рис. 8a) расчет занимает очень много времени, поэтому использовалось ускоренное моделирование с уменьшенной

емкостью батарей и соблюдением правил подобия. Так, при уменьшении емкости в 3600 раз на столько же сокращается время расчета (рис. 8b). На виде временных диаграмм это не сказывается, изменяется только масштаб оси абсцисс: секундам при ускоренном моделировании соответствуют часы в реальной диаграмме.

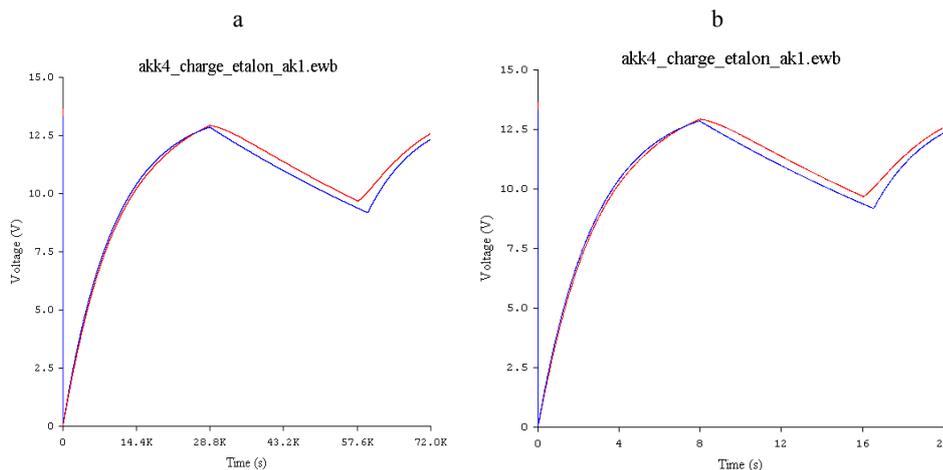


Рис. 8. Результаты моделирования работы параллельно-последовательной сборки АКБ: а – с реальными параметрами; б – с параметрами по критерию подобия

Fig. 8. The results of modeling the work of parallel-to-serial battery assembly: а – with real parameters; б – with parameters according to the similarity criterion

Расчет на разработанной модели показал, что уменьшение емкости дефектной АКБ на 10 % приводит к сокращению времени разряда исследуемой сборки на 2,9 % по сравнению со временем разряда эталонной сборки. При одновременной деградации сопротивления дефектной АКБ (внутреннее сопротивление выросло на 50 %) время разряда исследуемой сборки уменьшается на 3,7 % по сравнению со временем разряда эталонной сборки. Наличие дефектной АКБ в сборке приводит к перераспределению токов и напряжений. Возрастает напряжение на дефектной АКБ и на АКБ, включенной с ней параллельно, на остальных АКБ напряжение понижается. При снижении емкости дефектной АКБ на 10 % напряжение изменяется на 5 %. Большая токовая нагрузка ложится на АКБ, включенную параллельно дефектной.

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены основные методы и направления моделирования жизненного цикла АКБ. Показано, что наглядным и универсальным методом имитационного моделирования отдельных АКБ и их сборок является электротехническое моделирование соответствующих схем замещения в современных программных средах MatLab-Simulink и Electronics Workbench. В первой из них с 2017 г. имеется встроенная модель деградации пара-

метров АКБ. Поскольку она достаточно сложна, исследование работы более чем одного аккумулятора занимает значительное время, а моделирование больших сборок практически невозможно. При этом имеется возможность упростить существующую модель и ускорить вычисления.

2. Электронная лаборатория Electronics Workbench показала свою эффективность при моделировании сборок АКБ. В частности, масштабирование процесса по времени с использованием правил подобия позволяет имитировать как краткосрочную работу сборок, так и долговременное циклирование и деградацию параметров отдельных АКБ и сборки в целом.

3. С помощью разработанной модели выполнен расчет параллельно-последовательной сборки из четырех АКБ. Исследовано влияние дефицита электрической емкости одной АКБ в сборке на работу сборки в целом. Показано, что уменьшение емкости дефектной АКБ на 10 % приводит к сокращению времени разряда исследуемой сборки на 2,9 % по сравнению со временем разряда эталонной сборки. Возрастает напряжение на дефектной АКБ и на АКБ, включенной с ней параллельно, на остальных АКБ напряжение понижается. При этом большая токовая нагрузка ложится на АКБ, включенную параллельно дефектной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Shepherd, C. M. Design of Primary and Secondary Cells. Part 2. An Equation Describing Battery Discharge / C. M. Shepherd // Journal of Electrochemical Society. 1965. Vol. 112, Iss. 7. P. 657–664.
2. Tremblay, O. Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications / O. Tremblay, L.-A. Dessaint // World Electric Vehicle Journal. 2009. Vol. 3, Iss. 2. P. 289–298.
3. Krasucki, J. Projektowanie hybrydowych elektro-hydraulicznych układów napędowych / J. Krasucki, A. Rostowski. Radom, 2010.
4. Фоменко, Н. С. Особенности моделирования свинцово-кислотного аккумулятора / Н. С. Фоменко, А. С. Григорьев, А. С. Динисиллов // Электрохимическая энергетика. 2019. Т. 19, № 2. С. 81–89. <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2019-19-2-81-89>.
5. Пост, С. С. Имитационная электроэнергетическая модель литий-ионной аккумуляторной батареи [Электронный ресурс] / С. С. Пост, В. И. Иванчур // Молодежь и наука: сб. материалов IX Всероссийской науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых с междунар. участием, посвященной 385-летию со дня основания г. Красноярска. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. Режим доступа: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2013>. Дата доступа: 10.07.2019.
6. 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: <http://technology.snauka.ru/2014/05/3542>. Дата доступа: 12.04.2020.
7. Сазанов, А. Б. Математическое моделирование режимов работы аккумуляторных батарей / А. Б. Сазанов // Техника машиностроения. 2007. № 2. С. 27–30.
8. Мартьянов, А. С. Моделирование алгоритмов заряда аккумуляторной батареи / А. С. Мартьянов // Наука ЮУрГУ: материалы 67-й науч. конф. Секции технических наук [Электронный ресурс]. 2015. С. 1165–1171. Режим доступа: <https://dspace.susu.ru/xmlui/bitstream/handle/0001.74/6376/44.pdf?sequence=1>. Дата доступа: 12.04.2020.
9. Гринчик, Н. Н. Об измерении электрического сопротивления жидких электролитов аккумуляторных батарей / Н. Н. Гринчик, К. В. Доброго, М. А. Чумаченко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 6. С. 494–507. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-494-507>.
10. Зализный, Д. И. Модель фотоэлемента для библиотеки SimPowerSystems пакета MatLab/Simulink / Д. И. Зализный // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг.

объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 2. С. 135–145. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-135-145>.

11. Simulink – моделирование и симуляция динамических систем для Simulink [Электронный ресурс] / MatLab и Simulink центр компетенций компании Mathworks. М., 2019. Режим доступа: <https://MatLab.ru/products/simulink>. Дата доступа: 10.07.2019.
12. Карлашук, В. И. Электронная лаборатория на IBM PC. Лабораторный практикум на базе Electronics Workbench и MatLab / В. И. Карлашук. М.: СОЛОН-Пресс, 2004. 800 с.
13. Бладыко, Ю. В. Электроника. Практикум / Ю. В. Бладыко. Минск: ИВЦ Минфина, 2016. 190 с.

Поступила 09.06.2020 Подписана в печать 18.08.2020 Опубликовано онлайн 29.01.2021

REFERENCES

1. Shepherd C. M. (1965) Design of Primary and Secondary Cells. Part 2. An Equation Describing Battery Discharge. *Journal of Electrochemical Society*, 112 (7), 657–664.
2. Tremblay O., Dessaint L.-A. (2009) Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications. *World Electric Vehicle Journal*, 3 (2), 289–298. <https://doi.org/10.3390/wevj3020289>.
3. Krasucki J., Rostowski A. (2010) *Projektowanie Hybrydowych Elektro-Hydraulicznych Układów Napędowych*. Radom.
4. Fomenko N. S., Grigoryev A. S., Dinisilov A. S. (2019) Specific Features of Lead-Acid Battery Modelling. *Electrochemical Energetics*, 19 (2), 81–89. <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2019-19-2-81-89> (in Russian).
5. Post S. S., Ivanchura V. I. (2013) Simulation Electric Power Model of a Lithium-Ion Battery. *Molodezh' i Nauka: Sb. Materialov IX Vserossiiskoi Nauch.-Tekhn. Konf. Studentov, Aspirantov i Molodykh Uchenykh s Mezhdunar. Uchastiem, Posvyashchennoi 385-letiyu so Dnya Osnovaniya g. Krasnoyarska* [Youth and Science: Collection of Materials of the IX All-Russian Scientific and Technical Conference of Undergraduate Students, Postgraduate Students and Young Scientists with International Participation, Dedicated to the 385th Anniversary of Founding of the City of Krasnoyarsk]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University. Available at: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2013/>. (Accessed 10 July 2019) (in Russian).
6. Borisevich A. V. (2014) Modeling of Lithium-Ion Batteries for Battery Management Systems: the Survey of the Current State. *Sovremennaya Tekhnika i Tekhnologii = Modern Techniques and Technologies*, (5). Available at: <http://technology.snauka.ru/2014/05/3542> (Accessed 12 April 2020) (in Russian).
7. Sazanov A. B. (2007) Mathematical Modeling of Battery Operating Conditions. *Tekhnika Mashinostroeniya = Mechanical Engineering Equipment*, (2), 27–30 (in Russian).
8. Mart'yanov A. S. (2015) Modeling of Rechargeable Battery Charge Algorithms. *Nauka YuUrGU: Materialy 67-i Nauch. Konf. Sektsii Tekhnicheskikh Nauk* [SUSU Science: Proceedings of the 67th Scientific Conference. Section of Technical Sciences], 1165–1171. Available at: <https://dSPACE.susu.ru/xmlui/bitstream/handle/0001.74/6376/44.pdf?sequence=1>. (Accessed 12 April 2020) (in Russian).
9. Grinchik N. N., Dobrego K. V., Chumachenko M. A. (2018) On the Measurement of Electric Resistance of Liquid Electrolytes of Accumulator Battery. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (6), 494–507. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-494-507> (in Russian).
10. Zalizny D. I. (2019) Model of a Photovoltaic Cell for the MatLab/Simulink SimPowerSystems Library. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (2), 135–145. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-135-145> (in Russian).
11. *Simulink – Simulation and Simulation of Dynamic Systems for Simulink*. MatLab and Simulink Mathworks Competence Center. Moscow, 2019. <https://MatLab.ru/products/simulink> (Access date 10 July 2019) (in Russian).
12. Karlashchuk V. I. (2004) *Electronic Laboratory in IBM PC. Laboratory Workshop Based on Electronics Workbench and MatLab*. Moscow, SOLON-Press Publ. 800 (in Russian).
13. Bladyko Y. V. (2016) *Electronics. Workshop*. Minsk, Ministry of Finance ICC Publ. 190 (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-40-50>

УДК 621.316

Расчет емкости для работы мини-энергокомплекса на основе асинхронного генератора в автономном режиме

С. В. Константинова¹⁾, А. Ю. Капустинский¹⁾, Т. М. Ярошевич¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. В статье анализируется работа мини-энергокомплекса (МЭК) на базе альтернативных источников энергии. В качестве генерирующего устройства принят асинхронный генератор (АГ). МЭК работает в автономном режиме со стандартными параметрами электроэнергии без использования преобразователя частоты. Для работы в автономном режиме АГ необходим источник реактивного тока возбуждения. На основе проведенных расчетов и результатов, полученных с помощью экспериментальной установки, анализируются условия работы МЭК со стандартными параметрами электроэнергии при изменяющейся нагрузке. Характерной особенностью автономного МЭК является соизмеримость мощностей генерирующего устройства и потребителей. Включение и отключение любого потребителя существенно изменяют параметры локальной электрической системы и влияют на работу самого генератора. В данной статье основное внимание уделено влиянию трехфазной двигательной нагрузки на устойчивую работу АГ. При функционировании МЭК в автономном режиме должны быть обеспечены надежное самовозбуждение асинхронного генератора и запуск потребителей, мощность которых соизмерима с генерирующей установкой. Также необходимо обеспечить поддержку стабильности напряжения, возможность автоматической работы генерирующей установки, сохранение ее целостности в аварийных режимах. Таким образом, для устойчивой работы автономного МЭК на основе асинхронного генератора следует учитывать характер нагрузки, знать параметры локальной сети, точное наличие потребителей и их характеристики, параметры схем замещения асинхронных двигателей. Кроме того, необходим точный расчет емкости при изменении параметров электрической системы, чтобы не потерять самовозбуждение АГ, что равнозначно отключению всей нагрузки генератора и ведет к резкому увеличению скорости. Для решения данных проблем требуется создание быстродействующей системы управления МЭК.

Ключевые слова: мини-энергетика, альтернативные источники энергии, генерирующее устройство, магнитный ток, самовозбуждение асинхронного генератора, трехфазная двигательная нагрузка, схема замещения

Для цитирования: Константинова, С. В. Расчет емкости для работы мини-энергокомплекса на основе асинхронного генератора в автономном режиме / С. В. Константинова, А. Ю. Капустинский, Т. М. Ярошевич // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 1. С. 40–50. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-40-50>

Адрес для переписки

Константинова Светлана Валерьевна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел. +375 17 292-65-52
svkon2000@gmail.com

Address for correspondence

Konstantinova Svetlana V.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel. +375 17 292-65-52
svkon2000@gmail.com

Calculation of the Capacity for the Operation of a Mini-Energy Complex Based on an Independently Operating Asynchronous Generator

S. V. Konstantinova¹⁾, A. Yu. Kapustinskii¹⁾, T. M. Yaroshevich¹⁾

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

Abstract. The article presents the analysis of the operation of the mini-energy complex (MEC) based on alternative energy sources. An asynchronous generator (AG) was taken as energy source. The MEC operates independently with standard power parameters without the use of a frequency converter. To operate independently, AG needs a source of reactive excitation current. Based on the calculations carried out and the results obtained with the use of the experimental facility, the operating conditions of the MEC with standard parameters of electricity under varying load have been analyzed. A characteristic feature of the autonomous MEC is the commensurate capacity of the generating device and consumers. Therefore, any power consumer on/off leads both to significant changes of local electric system parameters and affects the operation of the generator itself. In this article, the main attention is paid to the influence of three-phase motor load on stable AG operation. When the MEC operates independently, reliable self-excitation of the asynchronous generator and the start-up of consumers whose power is commensurate with the generating unit must be ensured. It is also necessary to ensure the maintenance of voltage stability, the possibility of automatic operation of the generating unit, and the preservation of its integrity in emergency modes. Thus, for stable MEC-based AG operation the nature of the load should be taken into account, the parameters of the local grid should be known as well as the exact availability of consumers and their characteristics, and also equivalent circuit parameters of asynchronous motors. In addition, it is necessary to accurately calculate the capacity when changing the parameters of the electrical system, so as not to lose the self-excitation of the asynchronous generator, which is equivalent to disconnecting the entire load of the generator and causes a sharp increase in speed. To solve these problems, it is necessary to create a high-speed MEC control system.

Keywords: mini-energy, alternative energy sources, generating device, magnetic current, self-excitation of an asynchronous generator, three-phase motor load, equivalent circuit

For citation: Konstantinova S. V., Kapustinskii A. Yu., Yaroshevich T. M. (2021) Calculation of the Capacity for the Operation of a Mini-Energy Complex Based on an Independently Operating Asynchronous Generator. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 64 (1), 40–50. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-40-50> (in Russian)

Введение

Асинхронные машины с короткозамкнутым ротором благодаря простоте изготовления, отсутствию скользящих контактов, преимуществам по массогабаритным и стоимостным показателям по сравнению с классическими синхронными генераторами и генераторами постоянного тока не перестают использоваться в качестве генерирующего устройства в мини-энергокомплексах (МЭК).

Как известно, асинхронному генератору (АГ) необходим реактивный намагничивающий ток для создания магнитного потока, в связи с чем асинхронная машина может работать в генераторном режиме или параллельно с сетью, с частотой вращения ротора выше синхронной, либо в автономном режиме с самовозбуждением, получая реактивный ток возбуждения от внешнего источника, например от конденсаторов, подключенных к зажимам АГ [1, 2].

В данной статье в контексте нужд мини-энергетики, в частности автономных МЭК, использующих альтернативные источники энергии в каче-

стве первичных энергоресурсов, рассматривается работа асинхронной машины в генераторном режиме с конденсаторным возбуждением. Основной нагрузкой МЭК являются трехфазные асинхронные двигатели (АД).

Основная часть

На рис. 1 представлена Т-образная схема замещения асинхронного генератора с подключенным к статорной обмотке конденсатором емкостью C .

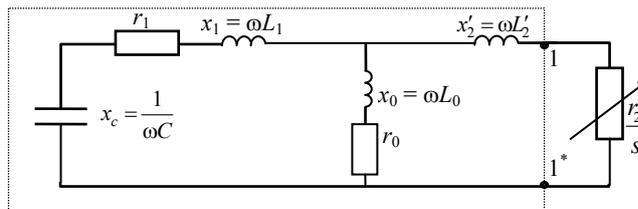


Рис. 1. Т-образная схема замещения асинхронного генератора с подключенным к статорной обмотке конденсатором

Fig. 1. Equivalent T-circuit of an asynchronous generator with capacitor connected to its stator winding

Вопросам самовозбуждения асинхронного генератора в течение длительного времени разными авторами уделяется достаточно пристальное внимание [3–8]. Процессы самовозбуждения асинхронного генератора и генератора постоянного тока во многом аналогичны. Таким образом, автономный асинхронный генератор представляет собой автоколебательную систему, в которой связь между ротором и статором является исключительно электромагнитной. Чтобы энергия первичного двигателя, находящегося на валу ротора, поступала в колебательный контур, необходимо, чтобы скольжение s асинхронной машины было отрицательным: $s = \frac{\omega - \omega_p}{\omega} < 0$, т. е. угловая скорость

ротора ω_p должна быть больше, чем резонансная частота контура, которой соответствует угловая скорость ω : $\omega < \omega_p$.

Для возникновения колебаний система должна находиться в резонансе и входное сопротивление асинхронной машины (двухполюсника) при резонансной частоте полученного контура должно быть чисто активным (рис. 1). Это значит, что векторы тока и напряжения на входе двухполюсника должны совпадать. Сопротивление двухполюсника Z можно рассчитать, свернув Т-образную схему замещения к зажимам 1–1* [3–8]:

$$Z = j\omega L'_2 + \frac{j\omega L_0 \left(r_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C} \right)}{r_1 + j\omega(L_1 + L_0) + \frac{1}{j\omega C}}, \quad (1)$$

где L_0 – индуктивность контура намагничивания Т-образной схемы замещения; L_1 – то же фазы обмотки статора; L'_2 – то же фазы ротора, при-

веденная к статору; r_1 – активное сопротивление фазы статора; C – емкость, подключенная к статору.

Условием резонанса является соблюдение равенства $\text{Im}(Z) = 0$.

Процесс самовозбуждения АГ наиболее наглядно виден из годографа $\text{Im}(Z) = f(\omega)$, где Z – полное сопротивление фазы асинхронной машины из Т-образной схемы замещения (рис. 1), на зажимы которой подключен конденсатор. Годограф представляет собой график зависимости полного сопротивления (при заданной емкости), рассчитанного по формуле (1), при изменении угловой скорости ω от 0 до $+\infty$; строится в действительной и мнимой осях.

Рассчитав и построив годограф, можно наглядно оценить условия процесса самовозбуждения АГ: необходимую величину емкости, угловую скорость, при которой возможно возбуждение, частоту электродвижущей силы (ЭДС). Вид годографа представлен на рис. 2.

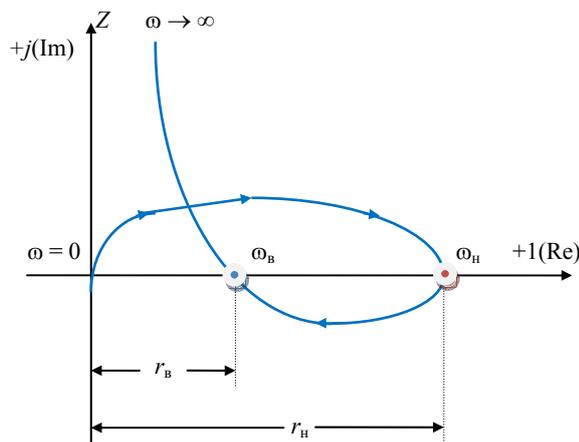


Рис. 2. Годограф $Z(j\omega)$

Fig. 2. The hodograph $Z(j\omega)$

Если годограф $Z(j\omega)$ при изменении угловой скорости пересекает вещественную ось, то в двухполюснике при значениях $\text{Re}(Z) = r_n$, $\text{Re}(Z) = r_b$ наблюдается резонанс токов и резонанс напряжений. Параметры r_n и ω_n соответствуют нижней частоте, при которой в контуре наступает резонанс токов; параметры r_b и ω_b – верхней частоте, при которой в контуре наступает резонанс напряжений. В этом случае действительная часть входного сопротивления двухполюсника численно будет равна $\text{Re}(Z) = -\frac{r'_2}{s}$, на основании чего можно рассчитать значения скольжения АГ, соответствующие резонансу токов и резонансу напряжений: $s_n = -\frac{r'_2}{r_n}$; $s_b = -\frac{r'_2}{r_b}$ [2, 4]. Зона частот, при которых мнимая часть полного сопротивления двухпо-

люсника $\text{Im}[Z(\omega)]$ при заданной емкости будет отрицательна, является зоной устойчивого возбуждения АГ. Таким образом, область самовозбуждения АГ соответствует условию $\omega_b < \omega < \omega_n$ [3–8].

Исходя из вышеизложенного, алгоритм определения емкости батареи конденсаторов для работы АГ в автономном режиме в упрощенной форме можно представить следующим образом. Задается предварительное значение емкости C , затем на основании Т-образной схемы замещения (рис. 1) определяется сопротивление двухполюсника Z относительно зажимов 1–1*:

рассчитывается значение $ZC + Z_1 = ZC_1$, где $ZC = \frac{1}{j\omega C}$; $Z_1 = r_1 + jx_1 =$
 $= r_1 + j\omega L_1$;

определяется сопротивление двухполюсника Z : $Z = \frac{ZC \cdot Z_0}{ZC + Z_0} + Z_2 S$,

где $Z_0 = r_0 + jx_0$; $Z_2 S = jx'_2 = j\omega L'_2$;

для изменяющейся величины ω рассчитываются соответствующие значения $\text{Re}(Z)$ и $\text{Im}(Z)$;

для заданной величины C строится изображение годографа $Z(j\omega)$;

результаты расчета анализируются, определяются условия самовозбуждения генератора при заданной величине емкости; при необходимости значение емкости C корректируется и расчет повторяется до получения требуемого результата.

Для определения параметров Т-образной схемы замещения использован метод, изложенный в [9].

Следует отметить, что при работе в автономном режиме могут наблюдаться два принципиально разных случая работы генераторов: с постоянной и переменной частотой вращения. В первом случае проблема работы МЭЖ с постоянными параметрами электроэнергии решается на стороне первичного двигателя. Во втором – решение этой проблемы переносится на сторону электроэнергии, тогда электрический преобразователь становится сложным и включает в себя электрический генератор, вырабатывающий электроэнергию с переменными параметрами напряжения и частоты, а также статический преобразователь, выдающий стандартные параметры электроэнергии.

В настоящей статье рассматривается работа автономного мини-энергокомплекса со стандартными параметрами электроэнергии на основе асинхронного генератора без использования статического преобразователя.

В соответствии с вышеприведенным алгоритмом были проведены расчеты по выбору необходимой емкости для работы АГ в режиме холостого хода со стандартными параметрами электроэнергии: $U = 1,05U_n$; $f = f_n = 50$ Гц.

Натурные исследования проводились на экспериментальной установке, где в качестве асинхронных генераторов использовались следующие асинхронные двигатели: АД1 серии АОЛ-41–6 ($P_n = 1$ кВт, Δ/Y , $U_n = 220/380$ В, $n_n = 930$ об/мин); АД2 серии 4АА63А4У3 ($P_n = 0,25$ кВт, Δ/Y , $U_n = 220/380$ В,

$n_n = 1400$ об/мин) [4]. Обработка и сравнение результатов, полученных в ходе расчета и исследований на экспериментальной установке, показывают их большое совпадение. Следует отметить, что в случае недостаточной емкости генератор развозбуждается, а если подключается избыточная емкость, АГ начинает работать в режиме перенасыщения с увеличенными потерями. Проведенные эксперименты также показали, что емкость, рассчитанная на основании параметров схемы замещения АГ и обеспечивающая резонанс контура при $f = f_n = 50$ Гц, не является оптимальной для получения номинального режима холостого хода АГ ($U = 1,05U_n, f = f_n = 50$ Гц, $n = 1,005n_1$, где n_1 – синхронная частота вращения). Целесообразнее подключение емкости, при которой полученному резонансному контуру соответствует частота $f = 47–48$ Гц (для асинхронных генераторов экспериментальной установки эта емкость составила: для АГ1 $C_{xx1} = 30$ мкФ; для АГ2 $C_{xx2} = 16$ мкФ). На рис. 3 приведено изображение годографа для АГ2.

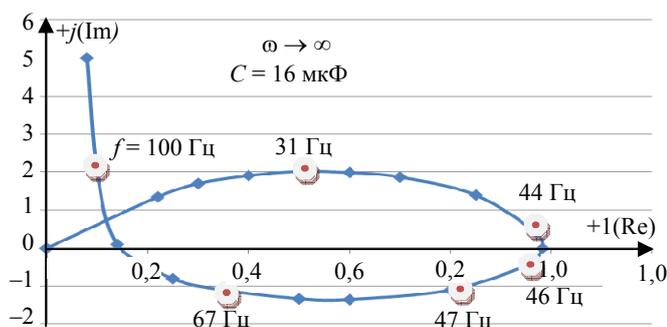


Рис. 3. Годограф асинхронного генератора 0,25 кВт, $C = 16$ мкФ
 Fig. 3. The 0.25 kW asynchronous generator's hodograph, $C = 16$ μ F

Величины рассчитанных емкостей достаточны для самовозбуждения каждого из АГ. При подключении указанных величин емкости асинхронные машины экспериментальной установки начинали работать в генераторном режиме. С увеличением частоты вращения ротора с помощью приводного двигателя установки до $n = 1,005n_1$ частота ЭДС достигала значения $f = 50$ Гц, напряжение генераторов автоматически устанавливалось равным 400 В.

Проведенные расчеты и натурные эксперименты показывают, что знание достоверных параметров схемы замещения является необходимым условием при расчете и выборе конденсаторной батареи для работы автономного АГ.

Следует отметить, что автономный режим работы МЭЖ характеризуется соизмеримостью мощностей нагрузки и генератора. Включение и отключение любого потребителя существенно изменяет параметры локальной электрической системы и соответственно существенно влияет на работу самого генератора. При проведении исследований на экспериментальной установке наброс активной нагрузки, соизмеримой с мощностью АГ,

сопровождался снижением напряжения, частоты вращения первичного двигателя и частоты ЭДС. Увеличивая частоту вращения первичного двигателя АГ, генератор устойчиво приходил к своим номинальным параметрам по напряжению и частоте, набирал активную нагрузку. Таким образом, согласно экспериментам наброс нагрузки должен быть точно рассчитан, а первичный двигатель АГ оснащен быстродействующим регулятором, реагирующим на величину напряжения и частоту ЭДС с учетом возможностей генератора по перегрузке [4, 10, 11].

Наиболее характерной нагрузкой МЭК является двигательная (активно-реактивная). Подключение асинхронного двигателя на шины АГ изменяет параметры резонансного контура, в связи с чем появляется необходимость анализа схемы замещения АГ с подключенной к ней схемой замещения АД (рис. 4).

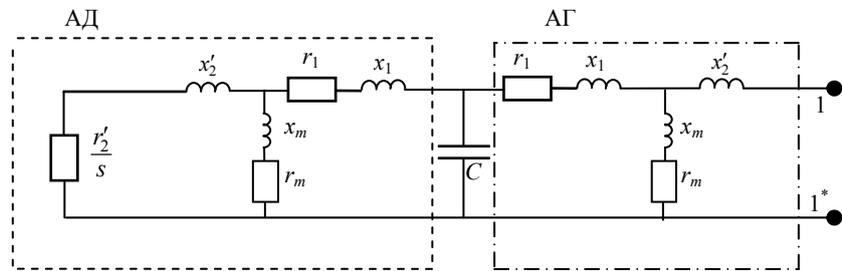
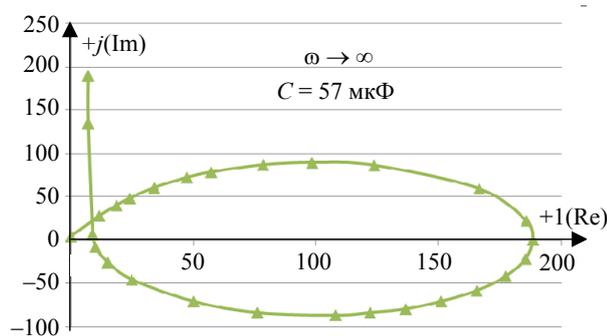


Рис. 4. Схема замещения системы «асинхронный генератор – асинхронный двигатель»
 Fig. 4. The equivalent circuit of the system of “asynchronous generator – asynchronous motor”

В представленной схеме замещения (рис. 4) переменными величинами являются частота ЭДС генератора и нагрузка двигателя $\left(\frac{r'_2}{s}\right)$. Годограф данного контура можно построить, свернув схему к зажимам 1–1*. Это позволяет проанализировать резонансные частоты и величину емкости полученного контура, для чего необходимо знать параметры схем замещения АГ и АД. Нагрузка двигателя учитывается величиной скольжения.

Для выполнения соответствующих расчетов в качестве параметров схемы замещения генератора приняты характеристики АД1, а в качестве параметров схемы замещения двигателя – характеристики АД2. В результате расчетов была определена необходимая величина емкости $C = 60$ мкФ, при которой в представленном контуре (рис. 4) в момент пуска АД ($s = 1$) появляется резонанс токов при частоте $f = 47–48$ Гц. Также была рассчитана необходимая емкость $C = 46$ мкФ для обеспечения номинального режима работы двигателя ($s = 0,05$), при которой в контуре наступает резонанс токов при частоте $f = 47–48$ Гц. Годограф системы «асинхронный генератор – асинхронный двигатель» с подключенной емкостью 57 мкФ приведен на рис. 5.

Эксперименты проводились на опытной установке, состоящей из асинхронного генератора АГ1 серии АОЛ-41–6 ($P_n = 1$ кВт) и асинхронного двигателя АД2 серии 4АА63А4У3 ($P_n = 0,25$ кВт), на вал которого был подсоединен двигатель постоянного тока в качестве нагрузки.



Im(Z)	11,65	24,0	47,3	78,4	166,5	188,4	185,4	177,3	108	50	25	15	10
Re(Z)	28,49	48,6	72,5	86,9	59,6	0,8	-21,0	-41,2	-86	-70	-45	-25	-7
f, Гц	15	26	35	40	47	50	51	52	57	54	55	85	113

Рис. 5. Годограф системы «асинхронный генератор – асинхронный двигатель», $C = 57 \text{ мкФ}$
 Fig. 5. The hodograph of the system of “asynchronous generator – asynchronous motor”, $C = 57 \text{ }\mu\text{F}$

Асинхронный генератор АГ1 с подключенной емкостью $C_{\text{xx1}} = 30 \text{ мкФ}$ (имеющий номинальные параметры холостого хода) уверенно разворачивает АД2, если параллельно обмотке статора АД дополнительно подключается емкость $C_{\text{д}} = 34 \text{ мкФ}$. Далее параметры системы резко изменялись: частота ЭДС полученной системы становилась ниже 45 Гц, напряжение снижалось до 300 В, частота вращения первичного двигателя АГ1 снижалась с 1000 до 826 об/мин. Как показали эксперименты, номинальные параметры системы ($U = 385 \text{ В}$; $f = 50 \text{ Гц}$) восстанавливаются только при отключении части батарей конденсаторов и увеличении частоты вращения первичного двигателя. Для данной системы величина отключенной емкости составила $C = 14 \text{ мкФ}$, частота вращения первичного двигателя была увеличена до $n = 1013 \text{ об/мин}$. Таким образом, проведенные опыты показывают, что величина емкости, необходимая для работы системы «асинхронный генератор – асинхронный двигатель» в установившемся номинальном режиме, численно равна сумме емкостей, требуемых для обеспечения работы на холостом ходу с номинальными параметрами этих асинхронных машин при их работе в генераторном режиме; $C_{\text{АГ-АД}} = C_{\text{xx1}} + C_{\text{xx2}}$ [4].

При нагрузке автономного МЭЖ на основе АГ, состоящей из нескольких (N) приводных асинхронных двигателей, схема замещения полученной системы приобретает вид, представленный на рис. 6.

Соответственно включение в работу любого из N двигателей, а также последовательность их включения изменяет параметры результирующего электрического контура. Подобное изменение происходит и в процессе пуска АД. Поэтому при расчете и уточнении требуемой величины емкости для устойчивой работы АГ необходимо учитывать параметры схем замещения асинхронных машин, значение нагрузки как работающих, так и запускаемого АД. Изменение нагрузки двигателей и их параметров в процессе пуска реализуется с учетом величины скольжения.

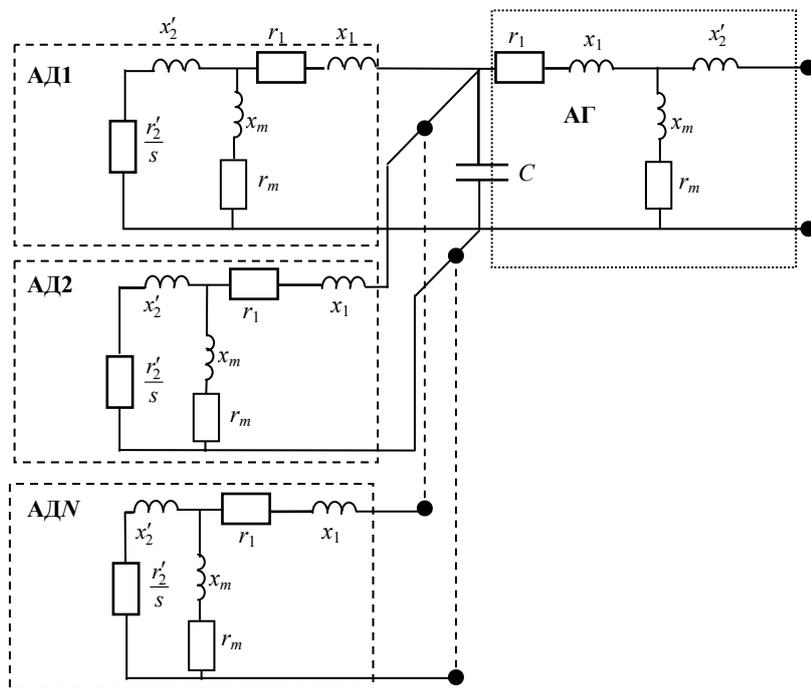


Рис. 6. Схема замещения системы «асинхронный генератор – асинхронные двигатели»
 Fig. 6. The equivalent circuit of the system of “asynchronous generator asynchronous motors”

В настоящее время с развитием МЭК на основе альтернативных источников энергии [12, 13] появляется необходимость решения большого числа вопросов (совместимость потребителя и источника электрической энергии, влияние параметров и мощности потребителя на генерирующее устройство, повышение энергоэффективности комплексов, обеспечение надежного подключения потребителей, мощность которых соизмерима с генерирующей установкой). Также следует обеспечить поддержку стабильности напряжения и частоты ЭДС генератора, возможность автоматической работы генерирующей установки, включая сохранение ее целостности в аварийных режимах.

Для решения данных проблем и обеспечения нормального функционирования МЭК необходимо создать быстродействующую систему управления МЭК [14–16].

ВЫВОДЫ

1. Важнейшее условие надежной и безопасной работы автономного мини-энергокомплекса на основе асинхронного генератора – обеспечение надежного самовозбуждения асинхронного генератора. Для этого необходимо знать количество потребителей и их точные характеристики, параметры схем замещения асинхронных двигателей и образованной электрической сети, учитывать характер нагрузки.

2. Для определения величины емкости, необходимой для нормальной работы асинхронного генератора, требуется оперативный расчет изменяющихся параметров локальной электрической системы и возможность регулирования частоты вращения первичного двигателя асинхронного генератора.

3. Точный расчет емкости требуется при любом изменении параметров электрической системы, чтобы не потерять самовозбуждение асинхронного генератора, что эквивалентно отключению всей нагрузки генератора и ведет к резкому увеличению его скорости. Для предотвращения такой аварийной ситуации необходимо создание быстродействующей и надежной системы управления мини-энергокомплексом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вольдек, А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек. Л.: Энергия, 1978. 832 с.
2. Бояр-Сазонович, С. П. Асинхронный генератор. Свойства и перспективы / С. П. Бояр-Сазонович // Электротехника. 1990. № 10. С. 55–57.
3. Китаев, А. В. О физическом механизме самовозбуждения асинхронной машины / А. В. Китаев, И. Н. Орлов // Электричество. 1978. № 4. С. 47–51.
4. Кунцевич, П. А. Асинхронный генератор как автоперестраиваемая автоколебательная система / П. А. Кунцевич // Электричество. 1988. № 6. С. 38–48.
5. Teissier, M. Auto-Amorçage D'une Génératrice Asynchrone Triphase Autonome En Charge Équilibrée Ou Non. Génie Électrique / M. Teissier. SPI-EE Ade Lyon, 1997.
6. Константинова, С. В. Электромеханические системы в мини-энергетике на основе асинхронного генератора / С. В. Константинова; Бел. гос. политех. акад. Минск, 2000. 21 с.
7. Джендубаев, А.-З. Р. Особенности самовозбуждения автономных генераторов. Ч. 2. Асинхронный генератор / А.-З. Р. Джендубаев // Электричество. 2006. № 12. С. 25–32.
8. Марков, В. С. Обзор и анализ современных гипотез возбуждения автономных асинхронных генераторов / В. С. Марков // Интегровані технології та енергозбереження. 2017. № 1. С. 73–94.
9. Константинова, С. В. Упрощенный метод определения параметров асинхронных машин / С. В. Константинова // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 1998. № 6. С. 24–29.
10. Щетинин, О. В. Система возбуждения и стабилизации напряжения автономного асинхронного генератора / О. В. Щетинин; Нижегородский гос. техн. ун-т. Н. Новгород, 1994. 16 с.
11. Сергиенко, С. А. Метод расчета статических характеристик асинхронного генератора с емкостным возбуждением / С. А. Сергиенко, Ю. В. Зачепа // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2012. № 5. С. 57–66.
12. Etude Statique D'une Génératrice Asynchrone Autonome Alimentant Un Moteur À Induction / M. Ouali [et al.] // International Renewable Energy Congress IREC 2009, Nov. 5–7, 2009. Sousse Tunisia, 2009.
13. Sidki, M. Identification des Paramètres D'une Génératrice Asynchrone Pour Eolienne / M. Sidki // International Journal of Scientific Research and Engineering Technology (IJSET). 2015. Vol. 4. P. 199–204.
14. Кузьмин, М. А. Система управления асинхронным генератором автономной энергоустановки в рабочих и аварийных режимах / М. А. Кузьмин; Нижегородский гос. техн. ун-т. Н. Новгород, 1994. 17 с.
15. Программно-информационное обеспечение комплексов для функциональных испытаний цифровых токовых защит электроустановок в системе динамического моделирования MatLab-Simulink / И. В. Новаш [и др.] // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 4. С. 291–308. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-4-291-308>.

16. Петруша, Ю. С. Перспективы развития ветроэнергетики в Республике Беларусь / Ю. С. Петруша, Н. А. Попкова // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 2. С. 124–134. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-124-134>.

Поступила 14.10.2020 Подписана в печать 15.12.2020 Опубликована онлайн 29.01.2021

REFERENCES

1. Vol'dek A. I. (1978) *Electrical Machinery*. Leningrad, Energiya Publ. 832 (in Russian).
2. Boyar-Sazonovich S. P. (1990) Asynchronous Generator. Properties and Prospects. *Elektrotehnika = Electrical Engineering*, (10), 55–57 (in Russian).
3. Kitaev A. V., Orlov I. N. (1978) On the Physical Mechanism of Self-Excitation of an Asynchronous Machine. *Elektrichestvo*, (4), 47–51 (in Russian).
4. Kuntsevich P. A. (1988) Asynchronous Generator as a Self-Reconfiguring Self-Oscillating System. *Elektrichestvo*, (6), 38–48 (in Russian).
5. Teissier M. (1997) *Auto-Amorçage D'une Génératrice Asynchrone Triphase Autonome En Charge Équilibrée Ou Non*. Génie Électrique. SPI-EE Ade Lyon (in French).
6. Konstantinova S. V. (2000) *Electromechanical Systems in Mini-Power Based on an Asynchronous Generator*. Minsk, Belarusian State Polytechnic Academy. 21 (in Russian).
7. Dzhdubayev A.-Z. R. (2006) Specific Features of Self-Excitation of Autonomous Generators. Part 2. Asynchronous Generator. *Elektrichestvo*, (12), 25–32 (in Russian).
8. Markov V. S. (2017) Overview and Analysis of Modern Hypotheses for the Excitation of Autonomous Asynchronous. *Intehrovani Tekhnologii ta Enerhozberezhennya = Integrated Technologies and Energy Conservation*, (1), 73–94 (in Russian).
9. Konstantinova S. V. (1998) Simplified Method for Determining Simplified method for Determining Parameters of Asynchronous Machines, *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (6), 24–29 (in Russian).
10. Shchetinin O. V. (1994) *System of Excitation and Voltage Stabilization of an Autonomous Asynchronous Generator*. Nizhnii Novgorod, Nizhnii Novgorod State Technical University. 16 (in Russian).
11. Sergienko S. A., Zachepa Yu. V. (2012) Calculation Method for Static Characteristics of Asynchronous Generator with Capacitive Excitation. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (5), 57–66 (in Russian).
12. Ouali M., Bahloul W., Chaabene M., Kamoun M. B. A. (2009) Etude Statique d'une Génératrice Asynchrone Autonome Alimentant Un Moteur À Induction. *International Renewable Energy Congress IREC 2009, Nov. 5–7, 2009. Sousse Tunisia*.
13. Sidki M. (2015) Identification des Parametres D'une Génératrice Asynchrone Pour Eolienne. *International Journal of Scientific Research and Engineering Technology (IJSET)*, 4, 199–204.
14. Kuz'min M. A. (1994) *Control System of an Asynchronous Generator of an Autonomous Power Plant in Operating and Emergency Modes*. Nizhnii Novgorod, Nizhnii Novgorod State Technical University. 17 (in Russian).
15. Novash I. V., Romaniuk F. A., Rumiantsev Yu. V., Rumiantsev V. Yu. (2017) MatLab-Simulink Based Information Support for Digital Overcurrent Protection Test Sets. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (4), 291–308. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-4-291-308> (in Russian).
16. Petrusha U. S., Papkova N. A. (2019) The Prospects for Wind Energy Development in the Republic of Belarus. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (2), 124–134. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-124-134> (in Russian).

Received: 14 October 2020 Accepted: 15 December 2020 Published online: 29 January 2021

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-51-64>

УДК 662.711.4

Экспериментальное и расчетное исследования пиролиза биомассы в цилиндрическом реакторе

А. В. Митрофанов¹⁾, В. Е. Мизонов¹⁾, С. В. Василевич²⁾, М. В. Малько³⁾

¹⁾Ивановский государственный энергетический университет (Иваново, Российская Федерация),

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

³⁾Институт энергетики НАН Беларуси (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. В статье представлено экспериментальное исследование пиролиза термически тонких частиц биомассы (березовая щепа 17×8×6 мм) в лабораторном аппарате периодического действия. Реактор установки имеет вид стального цилиндра с внутренним диаметром 200 мм и высотой 500 мм. Во время эксперимента температура наружной боковой поверхности аппарата поддерживалась постоянной (550 °С) за счет электрического нагрева. Масса начальной загрузки составляла около 4 кг при влагосодержании материала порядка 14 % по массе. В процессе эксперимента фиксировались значения температур материала в двух точках радиальной координаты: у стенки аппарата и на его оси. Предложена и верифицирована одномерная численная модель нестационарного процесса конверсии биомассы (тепло-массообмена, совмещенного с реакционной моделью Аврамы – Ерофеева). Реактор представлен как набор из счетного числа цилиндрических слоев, рассматриваемых как ячейки (представительные мезообъемы) с идеальным перемешиванием свойств внутри. Цилиндрические поверхности, образующие ячейки, считаются изотермическими. Размер ячеек выбран достаточно большим по сравнению с отдельными частицами слоя, что позволяет считать температурное поле внутри объема ячейки монотонным. Эволюция распределения температуры по радиусу цилиндрического реактора определяется на основе разностной аппроксимации процесса нестационарной теплопроводности. Расчетные прогнозы и экспериментальные данные показали хорошее соответствие, что свидетельствует об адекватности разработанной математической модели и позволяет рекомендовать ее для проведения инженерных расчетов пиролиза биомассы. Данная модель может оказаться полезной и в отношении углубления понимания основных физических и химических процессов, протекающих в условиях пиролиза биомассы.

Ключевые слова: пиролиз, древесная биомасса, уравнение Аврамы – Ерофеева, численное моделирование, тепло- и массообмен

Для цитирования: Экспериментальное и расчетное исследования пиролиза биомассы в цилиндрическом реакторе / А. В. Митрофанов [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 1. С. 51–64. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-51-64>

Адрес для переписки

Василевич Сергей Владимирович
Белорусская государственная академия авиации
ул. Уборевича, 77,
220096, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 272-98-22
svasilevich@yandex.ru

Address for correspondence

Vasilevich Siarhei V.
Belarusian State Academy of Aviation
77, Uborevich str.,
220096, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 272-98-22
svasilevich@yandex.ru

Experiments and Computational Research of Biomass Pyrolysis in a Cylindrical Reactor

A. V. Mitrofanov¹⁾, V. E. Mizonov¹⁾, S. V. Vasilevich²⁾, M. V. Malko³⁾

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

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

³⁾Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article features an experimental study of thermally thin biomass samples (beech wood particles 17×8×6 mm) pyrolysis in a laboratory scale batch reactor. The reactor was a cylindrical steel body with internal diameter of 200 mm and height of 500 mm. The temperature of a lateral surface of the cylinder during the experiment was being kept constant (550 °C) due to electrical heating. The initial loading of the apparatus was about 4 kg with moisture content of about 14 % by weight. During the experiment, the temperature values of the material being pyrolyzed were recorded at two points of the radial coordinate, viz. at the wall of the apparatus and on its axis. A one-dimensional numerical model of the nonstationary process of biomass conversion (heat and mass transfer in combination with the Avrami – Erofeev reaction model) has been proposed and verified. The reactor is represented as a set of a countable number of cylindrical layers, considered as cells (representative meso-volumes) with an ideal mixing of the properties inside. The cylindrical surfaces that form cells are considered to be isothermal. The size of the cells is chosen to be sufficiently large in comparison with the individual particles of the layer, which makes it possible to consider the temperature field inside the cell volume as monotonic. The evolution of the temperature distribution over the radius of a cylindrical reactor is determined on the basis of a difference approximation of the process of non-stationary thermal conductivity. The calculated forecasts and experimental data showed a good agreement, which indicates the adequacy of the developed mathematical model of pyrolysis and makes it possible to recommend it for engineering calculations of biomass pyrolysis. This model can also be useful in improving the understanding of the basic physical and chemical processes occurring in the conditions of biomass pyrolysis.

Keywords: pyrolysis, wood biomass, Avrami – Erofeev equation, numerical model, heat and mass transfer

For citation: Mitrofanov A. V., Mizonov V. E., Vasilevich S. V., Malko M. V. (2021) Experiments and Computational Research of Biomass Pyrolysis in a Cylindrical Reactor. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 64 (1), 51–64. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-51-64> (in Russian)

Введение

В настоящее время вектор развития энергетических комплексов ряда стран, в том числе России и Беларуси, направлен на увеличение выработки электроэнергии за счет расширения твердотопливной ниши и вовлечения в оборот различных видов возобновляемого дисперсного топлива [1, 2]. Одним из эффективных процессов термохимической переработки органических соединений является пиролиз, осуществляемый при повышенных температурах без участия кислорода. При этом к числу важнейших направлений исследований в области пиролиза биомассы относится изучение кинетики химических реакций, определяющих протекание данного процесса. Результаты подобного рода исследований с акцентом на различ-

ные виды местного сырья достаточно активно публикуются, что заметно даже на малом интервале наблюдения [3–5].

Очевидно, что практически невозможно учесть все элементарные реакции, поэтому моделирование процесса пиролиза, как правило, ограничивается рассмотрением некоторой эффективной реакции. Такой подход, в частности, был использован в экспериментальном исследовании кинетики пиролиза образцов древесной биомассы (древесина дуба обыкновенного – *Quercus robur*) в изотермических условиях при температурах 673, 773 и 873 К [4]. Установлено, что термическое разложение биомассы соответствует реакционной модели Авраами – Ерофеева с показателем n , изменяющимся от образца к образцу. Согласно данным [4, 5], значение энергии активации, соответствующее одноступенчатому глобальному подходу, изменяется в пределах 57,2–64,9 кДж/моль).

Другим важным направлением в области развития технологии пиролиза биомассы является разработка математической модели, адекватно описывающей основные физические и химические процессы, протекающие в пиролизном реакторе. Как известно, модель брутто-реакции (одноступенчатая реакция) – это основа для начала моделирования технологического процесса, но сама по себе она не дает возможности перейти к расчету конкретного реактора. Материал, подвергаемый термической конверсии в технологическом аппарате, представляет собой гетерогенную среду. Анализ известных моделей процессов с гетерогенными средами показывает, что при моделировании дискуссионными остаются вопросы, не только возникающие на стадии формирования модельных представлений конкретного оформления процесса, но и касающиеся выбора принципиальной методологии исследования, связанные с обоснованием размера представительного объема моделируемого объекта. Если для процессов в однородных средах эту проблему можно считать в известной степени решенной (использование подхода Эйлера), то для процессов с гетерогенными средами выбор приемлемого с теоретической и практической точек зрения уровня декомпозиции моделируемого объекта часто является, на наш взгляд, ключевым.

Гетерогенный характер протекания процессов в системе «газ – твердое тело» приводит к разнообразным подходам к описанию движения и взаимодействия фаз [6, 7]. Это могут быть метод Эйлера, метод Лагранжа или комбинированные методы Эйлера – Лагранжа [6–8]. Подобные подходы практически предельно детализируют структуру гетерогенной среды и в качественном отношении являются, по-видимому, наиболее адекватными реальному процессу. Однако вопросы количественного прогнозирования протекания этих процессов в подобных работах редко ставятся, так как высокая степень детализации явления подразумевает практически невозможный для реализации в полном объеме набор идентификационных процедур. В итоге значения по крайней мере части параметров идентификации

принимаются из некоторых правдоподобных диапазонов, а результаты моделирования позволяют характеризовать процесс только в качественном отношении. В связи с этим ряд авторов [9–15] обращают внимание, что для разработки расчетных моделей процессов актуальным является поиск компромисса между уровнем детализации и доступностью идентификационных и вычислительных процедур для инженерной практики.

Противоположным подходом будет рассмотрение всего ансамбля частиц как объекта с равномерно распределенными по его объему параметрами. Подобные модели обладают физической ясностью, а их неполное соответствие действительности компенсируется многочисленными экспериментальными поправочными коэффициентами, при помощи которых достигается довольно высокая адекватность описания процессов. Недостатком их является то, что расчетные прогнозы при изменении конструкции аппарата, а часто и перерабатываемого дисперсного материала практически равны нулю.

Изложенные крайние позиции при выборе размера представительного объема не исключают поиск компромисса, т. е. перехода к рассмотрению некоторого малого, но конечного мезообъема [10–12]. Компромисс может быть следствием достаточно грубого шага при использовании различных разностных схем. При этом некоторые теоретические подходы априори предполагают мезомасштабный уровень декомпозиции (например, дискретные модели на основе теории цепей Маркова [13, 14], дискретных аналогов уравнения Больцмана [15] и др.). В данной работе при построении математической модели реактора выбор сделан в пользу явной разностной схемы, которая позволяет рассматривать технологическую переработку навески дисперсной древесины как процесс с распределенными параметрами. Результаты расчетов и экспериментов сопоставлялись, что позволило оценить адекватность разработанной модели.

Методы и результаты исследования

Описание теплопереноса в слое частиц. В основу математической модели положено рассмотрение протекания физико-химических и транспортных процессов в цилиндрическом реакторе, заполненном частицами пиролизуемого материала.

Реактор представлен как набор из счетного числа n цилиндрических слоев толщиной Δr каждый. Цилиндрические слои рассматриваются как ячейки (представительные мезообъемы) с идеальным перемешиванием свойств внутри и имеют нумерацию (рис. 1). Цилиндрические поверхности, образующие ячейки, считаются изотермическими. Размер ячеек выбран достаточно большим по сравнению с отдельными частицами слоя, что позволяет считать температурное поле внутри объема ячейки монотонным.

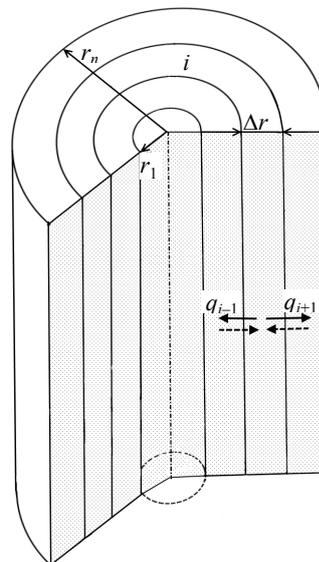


Рис. 1. Расчетная схема моделирования радиального переноса теплоты в цилиндрическом слое

Fig. 1. The calculation scheme of the modeling radial heat transfer in a cylindrical fixed bed

Эволюция распределения температуры по радиусу цилиндрического реактора определяется на основе разностной аппроксимации процесса нестационарной теплопроводности.

Количество теплоты, содержащееся в слоях по ячейкам, организовано в вектор-столбец теплового состояния дисперсного материала $\mathbf{Q} = \{Q_i\}$, который имеет размерность $n \times 1$. Эволюция вектора состояний наблюдается в дискретные моменты времени $t_k = (k - 1)\Delta t$, где Δt – продолжительность временного перехода; k – номер временного перехода (целочисленный аналог времени). Эволюция состояния рассчитывается на основе рекуррентных матричных процедур. При рассмотрении теплового баланса в i -й ячейке учитывается, что она граничит с соседними ячейками с номерами $(i + 1)$ и $(i - 1)$, которые могут обмениваться с ней порциями теплоты q_{i-1} и q_{i+1} :

$$q_{i-1}^k = \left[-\lambda_i^k \frac{(T_i^k - T_{i-1}^k)}{\Delta r} \right] (2\pi r_{i-1} L) \Delta t \text{ для } i = \overline{2, n}; \quad (1)$$

$$q_{i+1}^k = \left[-\lambda_i^k \frac{(T_i^k - T_{i+1}^k)}{\Delta r} L \right] (2\pi r_i) \Delta t \text{ для } i = \overline{1, n-1}, \quad (2)$$

где λ – коэффициент эффективной теплопроводности слоя сыпучего материала; T_i – элемент вектора температур $\mathbf{T} = \{T_i\}$ материала в ячейках, который имеет размерность $n \times 1$; L – высота цилиндрического слоя (высота реактора).

В правой части уравнений (1), (2) множитель в квадратных скобках определяет линейную плотность теплового потока (тепловой поток в расчете на единицу длины аппарата) исходя из разностной формулировки

одномерной записи закона теплопроводности Фурье, а слагаемые в круглых скобках позволяют учесть зависящую от радиуса ячейки поверхность теплопереноса.

Описанная расчетная схема основана на предположении, что перенос теплоты осуществляется как процесс с распределенными в радиальном направлении аппарата параметрами. Это позволяет учитывать зависимость температуры не только от времени (номера шага k), но и от пространственной координаты r (зависящей от номера i ячейки). В расчетах учитывается зависимость коэффициента теплопроводности слоя от температуры, т. е. считается, что $\lambda = \lambda(i, k)$. Зависимость $\lambda = \lambda(T)$ определяется следующим соотношением [16]:

$$\lambda = (1 - \varepsilon^{2/3})\lambda_s + \frac{\varepsilon^{2/3}}{\left(1 - \varepsilon^{1/3} / 2\lambda_s\right) + \left(\varepsilon^{1/3} / \lambda_g\right)}, \quad (3)$$

где ε – пористость слоя ($\varepsilon = 0,7$); λ_s – теплопроводность материала частиц, зависящая от степени конверсии α материала, $\lambda_s = (0,2 - 0,142)\alpha$ [16]; λ_g – то же газовой фазы.

Текущее теплосодержание ячеек без учета тепловых эффектов конверсии частиц рассчитывается как:

$$Q_i^{k+1} = Q_i^k + q_{i-1}^k + q_{i+1}^k \text{ для } i = \overline{2, (n-1)}; \quad (4)$$

$$Q_i^{k+1} = Q_i^k + q_{i+1}^k \text{ для } i = 1; \quad (5)$$

$$Q_i^{k+1} = Q_i^k + q_{i-1}^k + q_s^k \text{ для } i = n, \quad (6)$$

где $q_s^k = -\lambda_n^k (T_n^k - T_s) (2\pi r_n L) \frac{\Delta t}{dr}$ – количество теплоты, поступающее в реактор от источника через наружную поверхность аппарата на k -м рекуррентном шаге; температура поверхности реактора T_s считается постоянной (изотермическое граничное условие).

Описание обезвоживания частиц. Процесс обезвоживания частиц биомассы описан на основе формального механизма, соответствующего протеканию реакции первого порядка. Согласно этому подходу, масса влаги, исходящая в течение промежутка Δt из частиц, содержащихся в каждой ячейке, рассчитывается как

$$\Delta m_{w,i} = k_w^k (X_{w0} - X_{w,i}^k) m_{w,i}^k \Delta t, \quad (7)$$

где k_w – константа скорости процесса обезвоживания материала; X_w , X_{w0} – текущее и начальное влагосодержание материала ячейки; m_w – масса влаги в материале ячейки.

Константа скорости процесса записана в форме аррениусовской зависимости

$$k_{w,i}^k = k_{w0} \exp\left(-\frac{E_{aw}}{RT_i^k}\right), \quad (8)$$

где $k_{w0} = 5,13 \cdot 10^{10}$; $E_{aw} = 88$ кДж/моль [16–18].

Описание термической конверсии частиц. Процесс пиролиза – это совокупность элементарных реакций, которые протекают параллельно или последовательно. Продуктами этих реакций могут быть твердые, жидкие, в том числе древесная смола, и газообразные вещества. В настоящей работе предполагается, что термическое разложение биомассы в отсутствие кислорода, включая все элементарные химические реакции, формально может быть заменено одной реакцией, что соответствует традиционному инженерному подходу [4, 19, 20].

В соответствии с [4] аррениусовское выражение для константы скорости k_p имеет вид

$$k_{p,i}^k = 38,5 \exp\left(-\frac{57200}{RT_i^k}\right). \quad (9)$$

Итоговые балансовые соотношения модели. Соотношения (1)–(9) в конечном счете позволяют описать изменение теплового состояния аппарата и эволюцию навески материала, подвергаемого термической конверсии, при помощи следующих балансовых уравнений, записываемых в векторной форме.

Эволюция массы материала:

$$\mathbf{M}^{k+1} = \mathbf{M}^k - (\mathbf{k}_p^k)^{\wedge(1/m)} \cdot (\mathbf{M}^1 - \mathbf{M}_{fin}) \times \\ \times (k \cdot \Delta t)^{(m-1)/m} \cdot \exp(-(\mathbf{k}_p^k \cdot k \cdot t)^{1/m}) \cdot \Delta t / m; \quad (10)$$

$$\mathbf{M}_w^{k+1} = \mathbf{M}_w^k - \Delta \mathbf{m}_w^k; \quad (11)$$

$$\boldsymbol{\rho}^k = (\mathbf{M}_w^k + \mathbf{M}^k) / [(1-\varepsilon) \cdot \mathbf{V}_a], \quad (12)$$

где \mathbf{M}_{fin} – вектор асимптотического состояния процесса пиролиза, суммарное значение которого оценивается в 25 % от массы начальной загрузки аппарата; значение эмпирического параметра $m = 0,546$ получено в [4]; символы « \wedge », « \cdot », « $/$ » означают поэлементное выполнение операций возведения в степень, умножения и деления соответственно; \mathbf{k}_p – вектор, содержащий константы скорости реакции термопреобразования материала по ячейкам; $\boldsymbol{\rho}$ – вектор плотностей частиц по ячейкам с учетом массы каркаса частиц и массы влаги, содержащейся в частицах; \mathbf{V}_a – вектор объемов ячеек.

Второе слагаемое в уравнении (10) отражает соответствующее разностной расчетной схеме выражение для расчета массы, теряемой рассматри-

ваемым количеством частиц за время рекуррентного шага Δt (оно основано на кинетической зависимости, полученной в [4]).

Распределение влагосодержания по ячейкам рассчитывается как

$$\mathbf{X}^k = \mathbf{M}_{w*}^k / \mathbf{M}^k. \quad (13)$$

Степень конверсии материала для k -го расчетного шага в различных ячейках аппарата представлена вектор-столбцом α

$$\alpha^k = (\mathbf{M}^1 - \mathbf{M}^k) / [\mathbf{M}^1 - \mathbf{M}^1 * (\mathbf{M}^k / \mathbf{M}^1)_{\min}]. \quad (14)$$

Температура ячеек на рекуррентном шаге с номером k рассчитывается как

$$\mathbf{T}^k = \mathbf{Q}^k / (\mathbf{c}^k \cdot \rho^k \cdot \mathbf{V}_a), \quad (15)$$

где \mathbf{Q} – вектор теплоты материала в ячейках, который формируется с учетом внутренней теплопроводности в реакторе (зависимости (1)–(6)), тепловых эффектов реакции и испарения влаги.

Таким образом, сформированные по зависимостям (4)–(6) векторы распределения \mathbf{Q} необходимо на том же рекуррентном шаге скорректировать:

$$\mathbf{Q}^{k+1} = \mathbf{Q}^{k+1} + \mathbf{k}_p^k * \mathbf{M}^k \cdot \Delta t \cdot r_r - \Delta \mathbf{m}_w^k \cdot r_w, \quad (16)$$

где r_r – удельный тепловой эффект реакции пиролиза древесины ($r_r = 1150$ кДж/кг) [4]; r_w – то же испарения влаги ($r_w = 2600$ кДж/кг) [19].

Экспериментальное исследование пиролиза

Экспериментальное исследование процесса пиролиза выполнялось на лабораторной установке, схема и общий вид которой представлены на рис. 2.

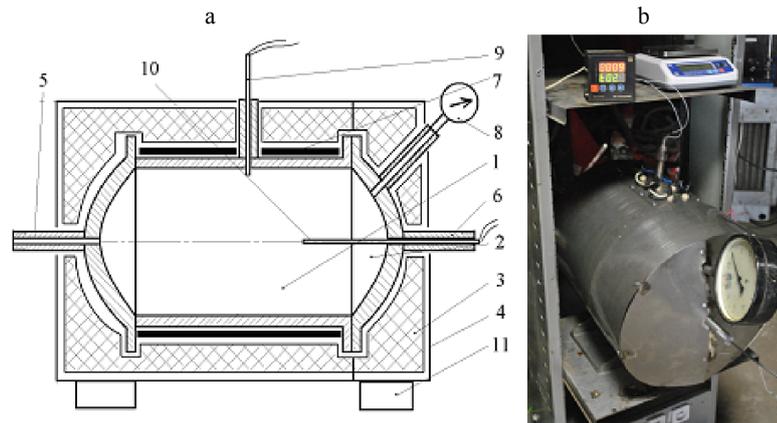


Рис. 2. Схема (а) и общий вид (б) лабораторного реактора: 1 – корпус; 2 – крышка; 3 – тепловая изоляция; 4 – кожух; 5, 6 – штуцер; 7 – электрический нагреватель; 8 – манометр; 9, 10 – термопара; 11 – опорная стойка

Fig. 2. A laboratory reactor: scheme (a) and general view (b): 1 – housing; 2 – cover; 3 – thermal insulation; 4 – casing; 5, 6 – fitting; 7 – electric heater; 8 – manometer; 9, 10 – thermocouple; 11 – support rack

Экспериментальное исследование образования древесного угля выполнено при атмосферном давлении. Основные составные элементы установки: корпус 1, крышка 2, тепловая изоляция 3, кожух 4, штуцера 5 и 6, электрический нагревательный элемент 7, манометр 8, термопары 9 и 10, опорные стойки 11. Наличие двух штуцеров принципиально дает возможность реализовать различные режимы проведения процесса: с принудительным удалением газообразных продуктов реакции, без принудительного отвода, при избыточном давлении (для этого штуцер 5 заглушается, а к штуцеру 6 вместо термопары 10 прикрепляется регулируемый предохранительный клапан для сброса давления при превышении заданного значения).

Температура внутри реактора измерялась с помощью термопар, помещаемых внутри слоя щепы (рис. 2а, позиция 10) и у края боковой поверхности установки (рис. 2а, позиция 9). Опыты длились до установления постоянной температуры в зоне пиролиза, что достигалось за 600 мин (10 ч). По окончании процесса пиролиза электронагреватель отключали, полученный древесный уголь охлаждался. Эксперимент был проведен трижды, а его результаты усреднены. Потеря объема слоя за все время реализации термохимической конверсии не превышала 7–8 %, и было принято решение не учитывать усадку при расчете.

Исследования проводились по следующей методике (более подробно приведена в [21]): навеска массой 4 кг исходного материала загружалась в реактор, после чего включался электрический нагреватель, работающий на постоянной мощности, которая контролировалась на основе непрерывных замеров силы и напряжения подводимого электрического тока. В качестве исходного сырья была использована березовая древесина в виде щепы размером частиц 17×8×6 мм. Влажность исходной древесины составляла 14,2 % по массе, плотность – 506,4 кг/м³, зольность – 0,23 % массы. Важность древесины определялась с помощью влагомера ФАУНА-М (изготовитель ООО «Лента», РФ).

Результаты и обсуждение

Результаты расчетного (линии) и экспериментального (точки) исследований теплового состояния слоя представлены на рис. 3, 4. Рис. 3 иллюстрирует прогрев *n*-й ячейки, т. е. наружного цилиндрического слоя, который непосредственно контактирует с нагреваемой поверхностью аппарата. Как видно, температура ячейки повышается почти линейно практически все время, до выхода на горизонтальный участок, который свидетельствует об истощении реакционной массы. Обращает на себя внимание незначительный перегиб графика (точка перегиба примерно соответствует моменту времени 137 мин), когда слой интенсивно обезвоживается. Процесс удаления влаги несколько замедляет прогрев слоя, что наблюдается даже в прилегающей к нагреваемой поверхности ячейке. Более заметным этот

процесс становится во внутренних ячейках, нагрев которых начинается с запаздыванием из-за постепенности кондуктивного распространения теплоты внутрь реактора.

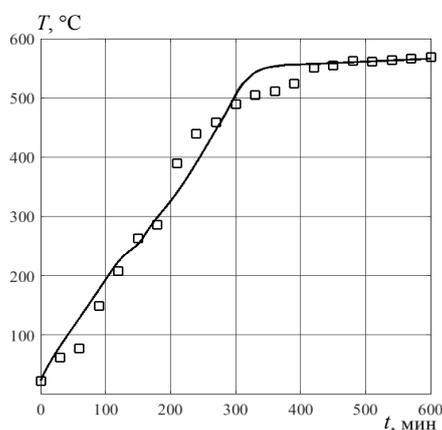


Рис. 3. Расчетно-экспериментальные данные изменения температуры в n -й (наружной) ячейке

Fig. 3. Calculated and experimental data on temperature variation in the n^{th} (outside) cell

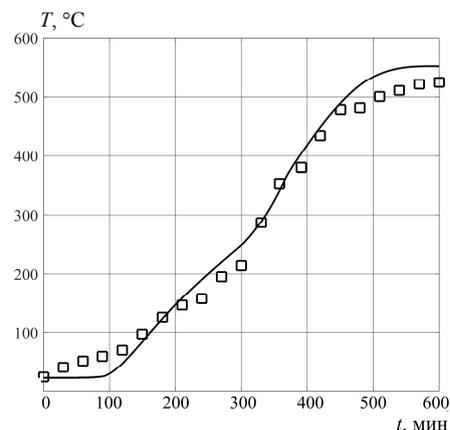


Рис. 4. Расчетно-экспериментальные данные изменения температуры в первой (осевой) ячейке

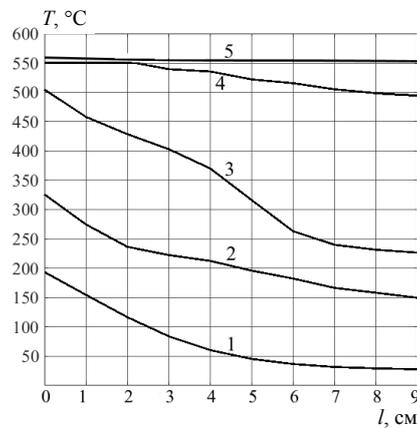
Fig. 4. Calculated and experimental data on temperature variation in the first (axial) cell

Иллюстрацией этого процесса в известной степени служит рис. 4: сложный нелинейный характер повышения температуры в первой ячейке обусловлен указанным запаздыванием, потерей теплоты материалом, в том числе в предшествующих по направлению миграции теплоты ячейках, а также экзотермическим характером реакции пиролиза. Расчетные процедуры не предполагают удаления теплоты из материала в аппарате, кроме потерь теплоты при удалении влаги из частиц. В результате весь аппарат прогревается до температуры нагревательного элемента (550 °C), однако продолжающаяся экзотермическая реакция сообщает дополнительную теплоту, поэтому температура может подняться (рис. 3). Внутри слоя (рис. 4, 5) температура повышается медленнее, но вследствие учета тепловыделения от реакции расчетные значения температур оказываются выше, чем экспериментальные.

Расчетные радиальные профили температуры в различные моменты времени приведены на рис. 5. Видно, что распределение температуры на отметке 100 мин формируется в основном за счет кондуктивного распространения теплоты внутрь цилиндра, однако уже к 200 мин характер распределения меняется из-за появления локальных источников и стоков теплоты. На кривых рис. 5 (кроме линии 1) возникают перегибы и локальные экстремумы, несмотря на их монотонное убывание для любых моментов времени.

Рис. 5. Расчетные радиальные профили температур в различные моменты времени: 1 – 100 мин; 2 – 200; 3 – 300; 4 – 450; 5 – 600 мин (координата l отсчитывается в радиальном направлении от поверхности к оси аппарата)

Fig. 5. Calculated radial temperature profiles at different moments of time: 1 – 100 min; 2 – 200; 3 – 300; 4 – 450; 5 – 600 min (the l coordinate is measured in the radial direction from the surface to the axis of the device)



Изменение плотности материала, рассчитанного с учетом наличия в нем влаги, показано на рис. 6, т. е. здесь представлена суммарная кинетика обезвоживания и конверсии частиц. В значительной мере кинетика этих процессов зависит не от расчетной схемы модели, а от выбора эмпирических кинетических зависимостей. Так, зависимости (8)–(10), обеспечивая интегральную убыль плотности (рис. 6), вносят существенно различный вклад, а, кроме того, уменьшение плотности за счет обезвоживания и протекания реакции происходит в разное время технологического процесса.

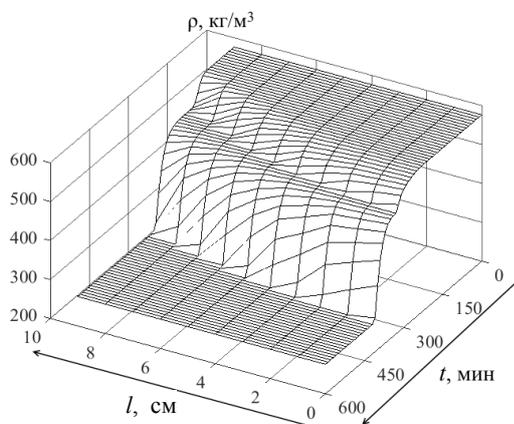


Рис. 6. Расчетное изменение плотности (с учетом влажности) материала в пространстве реактора
Fig. 6. Calculated change in the density (taking into account humidity) of the material in the reactor space

Дифференциальные кривые убыли массы для процессов обезвоживания (линия 1) и для термической конверсии (линия 2) представлены на рис. 7.

Как видно, эти процессы идут параллельно, внося существенный вклад в убыль массы частиц, только на участке с 200 до 335 мин. Соответственно до указанного временного интервала уменьшение массы навески в основном связано с процессом сушки (который, однако, инициируется примерно после 100 мин от начала нагрева аппарата). После 335 мин убыль массы определяется только термической конверсией частиц.

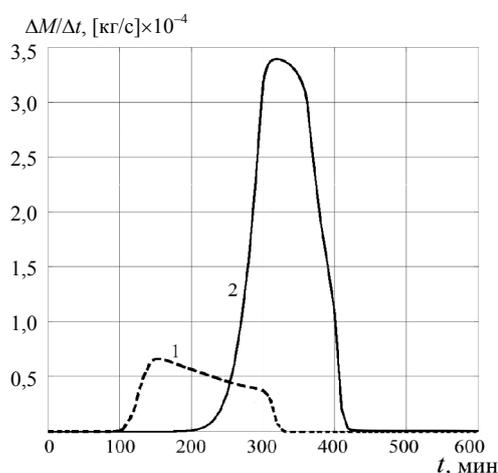


Рис. 7. Дифференциальные кривые уменьшения массы навески для процесса:

1 – сушки частиц;
2 – термической конверсии частиц

Fig. 7. Differential curves of mass loss of a hitch for process:
1 – drying particles;
2 – particles thermal conversion

ВЫВОДЫ

1. В работе выполнено построение математической модели функционирования аппарата периодического действия для проведения пиролиза древесной биомассы. Данная модель основана на декомпозиции пространства реактора на объемы малого, но конечного размера, что позволяет повысить адекватность описания процесса за счет его расчета по локальным параметрам состояния и потенциалам переноса.

2. Прогностическая эффективность модели обеспечивается использованием полученных ранее кинетических закономерностей брутто-реакции термического разложения. Таким образом, предложенная математическая модель и кинетические закономерности для описания брутто-реакции пиролиза частиц древесины являются независимыми, но их сочетание позволяет с приемлемой точностью прогнозировать протекание процесса. Данная математическая модель может рассматриваться в качестве достоверной основы компьютерного метода расчета процесса пиролиза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корсак, Е. П. Формирование системы угроз энергетической безопасности Республики Беларусь / Е. П. Корсак // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 4. С. 388–398. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-388-398>.
2. Фортов, В. Е. Состояние развития возобновляемых источников энергии в мире и в России / В. Е. Фортов, О. С. Попель // Теплоэнергетика. 2014. № 6. С. 4–13.
3. Лосюк, Ю. А. Некоторые аспекты термохимической конверсии торфа / Ю. А. Лосюк, С. В. Жибрик, С. В. Корчиненко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2008. № 5. С. 60–66.
4. Малько, М. В. Кинетика пиролиза древесной биомассы в изотермических условиях / М. В. Малько, С. В. Василевич // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2019. Т. 64, № 3. С. 321–331. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-321-331>.
5. Расчетное исследование выхода твердых продуктов пиролиза древесины при повышенном давлении / С. В. Василевич [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 3. С. 253–263. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-3-253-263>.

6. Gidaspow, D. *Multiphase Flow and Fluidization: Continuum and Kinetic Theory Descriptions* / D. Gidaspow. San Diego: Academic Press, 1994. 467 p. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-21244-X>.
7. Multiscale Modeling of Gas-Fluidized Beds / M. A. van der Hoef [et al.] // *Advances in Chemical Engineering*. 2006. Vol. 31. P. 65–149. [https://doi.org/10.1016/s0065-2377\(06\)31002-2](https://doi.org/10.1016/s0065-2377(06)31002-2).
8. Review of Discrete Particle Modeling of Fluidized Beds / N. G. Deen [et al.] // *Chemical Engineering Science*. 2007. Vol. 62, Iss. 1–2. P. 28–44. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2006.08.014>.
9. Доброго, К. В. Макрокинетические модели термического разложения доломита для расчета сорбционных систем газогенераторов / К. В. Доброго // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2015. № 5. С. 51–59.
10. Babkin, V. A. Turbulent Fluid Flows in a Circular Pipe and Plane Channel and Models of Mesoscale Turbulence / V. A. Babkin, V. N. Nikolaevskii // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2011. Vol. 84, No. 2. P. 430–439. <https://doi.org/10.1007/s10891-011-0489-5>.
11. Meso-scale Oriented Simulation Towards Virtual Process Engineering (VPE) – the EMMS Paradigm / W. Ge [et al.] // *Chemical Engineering Science*. 2011. Vol. 66, Iss. 19. P. 4426–4458. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.05.029>.
12. Dai, Q. Influence of Meso-scale Structures on Drag in Gas-solid Fluidized Beds / Q. Dai, C. Chen, H. Qi // *Powder Technology*. 2016. Vol. 288. P. 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.10.031>.
13. Application of the Theory of Markov Chains to Theoretical Study of Processes in a Circulating Fluidized Bed / A. Mitrofanov [et al.] // *Particulate Science and Technology*. 2019. Vol. 37, Iss. 8. P. 1032–1037. <https://doi.org/10.1080/02726351.2018.1525459>.
14. Theoretical and Experimental Study of Particulate Solids Drying in Circulating Fluidized Bed / A. Mitrofanov [et al.] // *JP Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. Vol. 18, No 2. P. 267–276. <https://doi.org/10.17654/hm018020267>.
15. Zhukov, V. P. Simulation of Combined Heterogeneous Processes Based on Discrete Models of the Boltzmann Equation / V. P. Zhukov, A. N. Belyakov // *Theor. Found. Chem. Eng.* 2017. Vol. 51, Iss. 1. P. 88–93. <https://doi.org/10.1134/s0040579517010158>.
16. Radiative Pyrolysis of Wet Wood under Intermediate Heat Flux: Experiments and Modelling / V. Pozzobon [et al.] // *Fuel Processing Technology*. 2014. Vol. 128. P. 319–330. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.07.007>.
17. Bryden, K. M. Modeling the Combined Impact of Moisture and Char Shrinkage on the Pyrolysis of a Biomass Particle / K. M. Bryden, M. J. Hagge // *Fuel*. 2003. Vol. 82, Iss. 13. P. 1633–1644. [https://doi.org/10.1016/s0016-2361\(03\)00108-x](https://doi.org/10.1016/s0016-2361(03)00108-x).
18. Comprehensive Study of Biomass Particle Combustion / H. Lu [et al.] // *Energy and Fuels*. 2008. Vol. 22, Iss. 4. P. 2826–2839. <https://doi.org/10.1021/ef800006z>.
19. Fatehi, H. A Comprehensive Mathematical Model for Biomass Combustion / H. Fatehi, X. S. Bai // *Combustion Science and Technology*. 2014. Vol. 186, Iss. 4–5. P. 574–593. <https://doi.org/10.1080/00102202.2014.883255>.
20. Mujumdar, A. S. *Handbook of Industrial Drying* / A. S. Mujumdar. 3rd ed. New York: CRC Press; Taylor & Francis Group, 2006. 1278 p. <https://doi.org/10.1201/9781420017618>.
21. Исследование процесса получения древесного угля путем пиролиза под давлением / С. В. Василевич [и др.] // *Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук*. 2017. № 3. С. 64–71.

Поступила 01.07.2020 Подписана в печать 08.09.2020 Опубликована онлайн 29.01.2021

REFERENCES

1. Korsak E. P. (2019) Formation of the System of Threats to Energy Security of the Republic of Belarus. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (4), 388–398. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-388-398> (in Russian).
2. Fortov V. E., Popel' O. S. (2014) The Current Status of the Development of Renewable Energy Sources Worldwide and in Russia. *Teploenergetika = Thermal Engineering*, 61 (6), 389–398. <https://doi.org/10.1134/s0040601514060020>.

3. Losiuk Y. A., Gibric S. V., Korchinenko S. V. (2008) Some Aspects of Thermochemical Decomposition of Peat. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (5), 60–66 (in Russian).
4. Malko M. V., Vasilevich S. V. (2019) Kinetics of Pyrolysis of Wood Biomass under Isothermal Conditions. *Vestsi Natsyyanal'nai Akademii Navuk Belarusi. Seryya Fizika-Tekhnichnykh Navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*, 64 (3), 321–331. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-321-331> (in Russian).
5. Vasilevich S. V., Malko M. V., Degterov D. V., Asadchyi A. N. (2020) Computational Study of the Yield of Solid Wood Pyrolysis Products under High Pressure. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (3), 253–263. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-3-253-263> (in Russian).
6. Gidaspow D. (1994) *Multiphase Flow and Fluidization: Continuum and Kinetic Theory Descriptions*. San Diego, Academic Press Publ. 467. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-21244-X>.
7. Hoef van der M. A., Ye M., Sint Annaland van M., Andrews A. T., Sundaresan S., Kuipers J. A. M. (2006) Multiscale Modeling of Gas-Fluidized Beds. *Advances in Chemical Engineering*, 31, 65–149. [https://doi.org/10.1016/s0065-2377\(06\)31002-2](https://doi.org/10.1016/s0065-2377(06)31002-2).
8. Deen N. G., Sint Annaland van M., Hoef van der M. A., Kuipers J. A. M. (2007) Review of Discrete Particle Modeling of Fluidized Beds. *Chemical Engineering Science*, 62 (1–2), 28–44. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2006.08.014>.
9. Dobrego K. V. (2015) Dolomite Thermal-Decomposition Macrokinetic Models for Evaluation of the Gasgenerators Sorbent Systems. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (5), 51–59 (in Russian).
10. Babkin V. A., Nikolaevskii V. N. (2011) Turbulent Fluid Flows in a Circular Pipe and Plane Channel and Models of Mesoscale Turbulence. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 84 (2), 430–439. <https://doi.org/10.1007/s10891-011-0489-5>.
11. Ge W., Wang W., Yang N., Li J., Kwauk M., Chen F. [et al.] (2011) Meso-Scale Oriented Simulation Towards Virtual Process Engineering (VPE) – the EMMS Paradigm. *Chemical Engineering Science*, 66 (19), 4426–4458. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.05.029>.
12. Dai Q., Chen C., Qi H. (2016) Influence of Meso-Scale Structures on Drag in Gas-Solid Fluidized Beds. *Powder Technology*, 288, 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.10.031>.
13. Mitrofanov A., Mizonov V., Camelo A., Tannous K. (2019) Application of the Theory of Markov Chains to Theoretical Study of Processes in a Circulating Fluidized Bed. *Particulate Science and Technology*, 37 (8), 1032–1037. <https://doi.org/10.1080/02726351.2018.1525459>.
14. Mitrofanov A., Mizonov V., Shuina E., Kasatkina N., Shpeynova N. (2019) Theoretical and Experimental Study of Particulate Solids Drying in Circulating Fluidized Bed. *JP Journal of Heat and Mass Transfer*, 18 (2), 267–276. <https://doi.org/10.17654/hm018020267>.
15. Zhukov V. P., Belyakov A. N. (2017) Simulation of Combined Heterogeneous Processes Based on Discrete Models of the Boltzmann Equation. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 51 (1), 88–93. <https://doi.org/10.1134/s0040579517010158>.
16. Pozzobon V., Salvador S., Bézian J. J., El-Hafi M., Le Maout Y., Flamant G. (2014) Radiative Pyrolysis of Wet Wood under Intermediate Heat Flux: Experiments and Modelling. *Fuel Processing Technology*, 128, 319–330. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.07.007>.
17. Bryden K. M., Hagge M. J. (2003) Modeling the Combined Impact of Moisture and Char Shrinkage on the Pyrolysis of a Biomass Particle. *Fuel*, 82 (13), 1633–1644. [https://doi.org/10.1016/s0016-2361\(03\)00108-x](https://doi.org/10.1016/s0016-2361(03)00108-x).
18. Lu H., Robert W., Peirce G., Ripa B., Baxter L. L. (2008) Comprehensive Study of Biomass Particle Combustion. *Energy and Fuels*, 22 (4), 2826–2839. <https://doi.org/10.1021/ef800006z>.
19. Fatehi H., Bai X. S. (2014) A Comprehensive Mathematical Model for Biomass Combustion. *Combustion Science and Technology*, 186 (4–5), 574–593. <https://doi.org/10.1080/00102202.2014.883255>.
20. Mujumdar A. S. (ed.) (2006) *Handbook of Industrial Drying*. 3rd ed. New York, CRC Press; Taylor & Francis Group. 1278. <https://doi.org/10.1201/9781420017618>.
21. Vasilevich S. V., Malko M. V., Bahach U. N., Degterev D. V., Asadchyi A. N. (2017) Study of the Process of Charcoal Producing by Pyrolysis under Pressure. *Vestsi Natsyyanal'nai Akademii Navuk Belarusi. Seryya Fizika-Tekhnichnykh Navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*, (3), 64–71 (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-65-77>

УДК 658.261:621.56

Турбодетандерные установки на низкокипящих рабочих телах

А. В. Овсянник¹⁾, В. П. Ключинский¹⁾

¹⁾Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого (Гомель, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. В статье изучена возможность повышения эффективности турбодетандерных циклов на низкокипящих рабочих телах (НКРТ) при помощи методов, применяемых для паровых турбин (повышение параметров рабочего тела перед турбодетандером и использование вторичного перегрева). Рассмотрены четыре схемы турбодетандерного цикла: без перегрева НКРТ, с однократным перегревом, с двукратным перегревом, с двукратным перегревом на сверхкритических параметрах. Все исследуемые циклы рассматривались с теплообменным аппаратом на выходе из турбодетандера, предназначенным для подогрева конденсата НКРТ, образовавшегося в конденсаторе турбодетандерной установки. Для изучаемых схем построены циклы в P - h -координатах. Разработана методика термодинамического анализа вышеуказанных циклов на основе эксергетического коэффициента полезного действия. Результаты исследований представлены в виде диаграмм Грассмана – Шаргута, на которых в масштабе изображены потери эксергии по элементам изучаемых циклов, а также показан положительный эффект от работы турбодетандерного цикла в виде электрической мощности. Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что основные потери, оказывающие существенное влияние на эксергетический КПД, происходят в котле-утилизаторе. Повышение параметров НКРТ, а также использование промежуточного перегрева приводят к снижению потерь в котле-утилизаторе и, как следствие, к повышению эксергетического КПД турбодетандерного цикла. Наибольшим эксергетическим КПД из исследуемых схем обладает турбодетандерный цикл с двукратным перегревом на сверхкритических параметрах низкокипящего рабочего тела.

Ключевые слова: тригенерация, фреон, вторичные энергетические ресурсы, тепловые отходы, энергосбережение, термодинамическая эффективность, эксергетический анализ, перегрев рабочего тела, сверхкритические параметры, диаграммы Грассмана – Шаргута, потери эксергии, совершаемая работа, продукты сгорания, электрическая энергия

Для цитирования: Овсянник, А. В. Турбодетандерные установки на низкокипящих рабочих телах / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 1. С. 65–77. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-65-77>

Адрес для переписки

Овсянник Анатолий Васильевич
Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого
просп. Октября, 48,
246746, г. Гомель, Республика Беларусь
Тел.: +375 232 40-20-36
ovsyannik@tut.by

Address for correspondence

Ovsyannik Anatolii V.
Sukhoi State Technical
University of Gomel
48, October Ave.,
246746, Gomel, Republic of Belarus
Tel.: +375 232 40-20-36
ovsyannik@tut.by

Turbo-Expander Units on Low Boiling Working Fluids

A. V. Ovsyannik¹⁾, V. P. Kliuchinski¹⁾

¹⁾Sukhoi State Technical University of Gomel (Gomel, Republic of Belarus)

Abstract. The article examines the possibility of increasing the efficiency of the turbo-expander cycles on low-boiling working fluids using those methods that are used for steam turbines, viz. increasing the parameters of the working fluid before the turbo-expander and using secondary overheating. Thus, four schemes of the turbo-expander cycle are considered: the one without overheating of the low-boiling working fluid, the one with single overheating of low-boiling fluid, the one with double overheating and the one with double overheating at supercritical parameters. All the studied cycles were considered with a heat exchanger at the outlet of the turbo expander, designed to heat the condensate of a low-boiling working fluid formed in the condenser of the turbo expander unit. Cycles in $P-h$ coordinates were built for the studied schemes. The method of thermodynamic analysis of the studied cycles based on the exergetic efficiency has been developed. The results of the research are presented in the form of Grassman-Shargut diagrams, which show exergy losses in the elements of the studied cycles on a scale, and also show the positive effect of the operation of the turbo-expander cycle in the form of electrical power. The analysis of the obtained results showed that the main losses that have a significant impact on the exergy efficiency are the losses of exergy in the recovery boiler. The increase of parameters of low-boiling working body, and the use of intermediate superheating reduce losses in the waste heat boiler and, consequently, increases exergetic efficiency of turbo-expander cycle. The turbo-expander cycle with double overheating at supercritical parameters of the low-boiling fluid is of the largest exergetic efficiency out of the schemes that have been examined.

Keywords: trigeneration, freon, secondary energy resources, thermal waste, energy saving, thermodynamic efficiency, exergetic analysis, overheating of the working fluid, supercritical parameters, Grassman – Shargut diagrams, exergy losses, work performed, products of combustion, electric energy

For citation: Ovsyannik A. V., Kliuchinski V. P. (2021) Turbo-Expander Units on Low Boiling Working Fluids. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 64 (1), 65–77. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-65-77> (in Russian)

Введение

Одной из приоритетных задач энергосбережения является эффективное и рациональное использование топливно-энергетических ресурсов. Повышение термодинамической эффективности генерации энергии различных видов необходимо рассматривать как один из возможных путей решения этой задачи [1].

Для утилизации тепловых отходов продуктов сгорания газотурбинных установок, а также вторичных энергетических ресурсов, в большом количестве имеющихся на промышленных предприятиях, можно использовать тригенерационные турбодетандерные установки [2–6] (рис. 1). В турбодетандерном цикле на таких установках используются низкокипящие рабочие тела [7, 8].

Целью данной работы является изучение способов повышения эффективности турбодетандерного цикла на НКРТ.

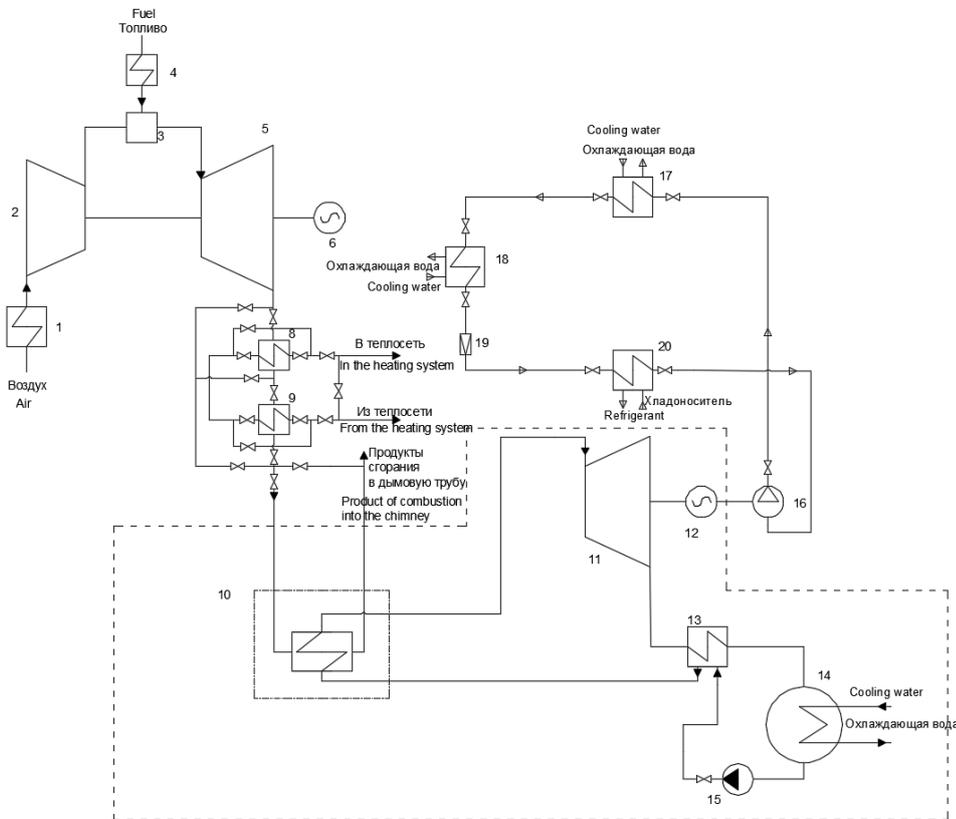


Рис. 1. Схема тригенерационной турбодетандерной установки на низкокипящих рабочих телах: 1, 4, 13 – теплообменник; 2 – компрессор газотурбинной установки; 3 – камера сгорания; 5 – газовая турбина; 6, 12 – генератор; 8, 9 – подогреватель сетевой воды; 10 – котел-утилизатор; 11 – турбодетандер; 14 – конденсатор; 15 – насос; 16 – компрессор; 17 – конденсатор парокомпрессионной холодильной машины; 18 – переохладитель; 19 – дроссель; 20 – испаритель

Fig. 1. The scheme of the trigeneration turbo-expander unit on low boiling working fluids: 1, 4, 13 – heat exchanger; 2 – compressor of the gas turbine unit; 3 – combustion chamber; 5 – gas turbine; 6, 12 – generator; 8, 9 – system water heating boiler; 10 – waste heat boiler; 11 – turbo-expander; 14 – condenser; 15 – pump; 16 – compressor; 17 – condenser of the vapor-compression refrigeration machine; 18 – overcooler; 19 – throttle; 20 – evaporator

Постановка задачи

В зависимости от наклона линии насыщенного пара на $T-s$ -диаграмме НКРТ можно разделить на «сухие», «влажные» и «изоэнтропные» (рис. 2) [7].

Большие исследования в области повышения эффективности циклов проводились для паровых турбин, где в качестве рабочего тела используется водяной пар. Основными путями повышения эффективности паровых циклов являются: повышение параметров пара перед турбиной и использование промежуточного перегрева с целью предотвращения недопустимой конечной влажности пара [8].

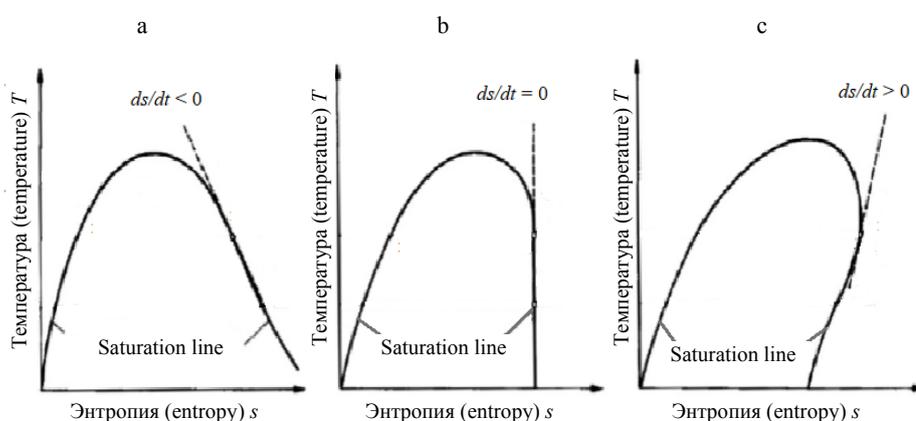


Рис. 2. T - s -диаграммы веществ: а – «влажного»; б – «изоэнтропного»; с – «сухого»

Fig. 2. T - s -diagrams of: a – “wet” substance; b – “isotropic” substance; c – “dry” substance

Известно, что T - s -диаграмма воды имеет линию насыщения, схожую с «влажными» НКРТ. Однако большое количество низкокипящих рабочих тел имеют «сухую» либо «изоэнтропную» линию насыщенного пара на T - s -диаграмме. Таким образом, возникает необходимость исследовать возможность повышения эффективности турбодетандерного цикла на НКРТ при помощи методов, применяемых для паровых турбин.

Исследуемые схемы и принцип их работы

Исследования проводились для четырех схем турбодетандерного цикла: без перегрева НКРТ (рис. 3а); с однократным перегревом (рис. 3б); с двукратным перегревом (рис. 3с); с двукратным перегревом на сверхкритических параметрах (рис. 3д).

Принцип работы изучаемых схем следующий: из конденсатора жидкое НКРТ насосом подается в теплообменник, где нагревается парами НКРТ, поступающими из турбодетандера. Затем рабочее тело направляется в котел-утилизатор, где нагревается, парообразуется и перегревается (для случаев, представленных на рис. 3б, с, д). Далее рабочее тело поступает в турбодетандер, где совершает механическую работу по вращению вала турбодетандера, связанного муфтой с генератором электрического тока. Для случаев, показанных на рис. 3с, д, рабочее тело после совершения работы в турбодетандере высокого давления снова направляется в котел-утилизатор для повторного перегрева в промышленном перегревателе, после чего поступает в турбодетандер низкого давления, где снова совершает работу. Затем НКРТ охлаждается до температуры насыщения при данном давлении в теплообменнике и поступает в конденсатор, где и конденсируется.

В качестве НКРТ принят озонобезопасный фреон R236EA, имеющий «сухую» характеристику линии насыщения, нулевой потенциал разрушения озонового слоя и потенциал глобального потепления, равный 1370 за 100 лет. Исходные данные, принятые в расчетах, представлены в табл. 1.

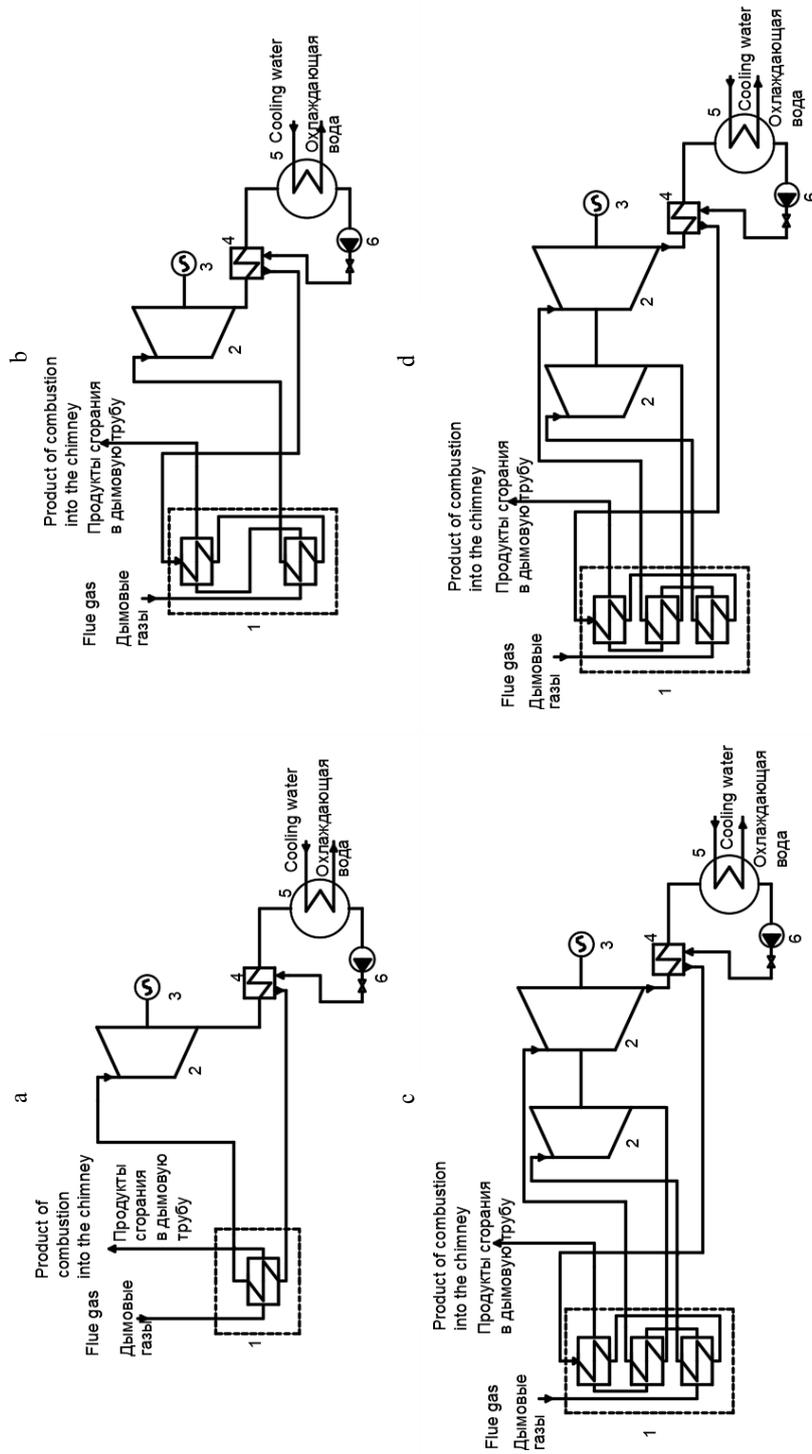


Рис. 3. Исследуемые схемы турбодетандерного цикла: 1 – котел-утилизатор; 2 – турбодетандеры высокого и низкого давления; 3 – генератор; 4 – теплообменник; 5 – конденсатор; 6 – насос

Fig. 3. The schemes of turbo-expander cycle under study: 1 – waste heat boiler; 2 – turbo-expander of high and a low pressure; 3 – electric generator; 4 – heat exchanger; 5 – condenser; 6 – pump

Таблица 1

Исходные данные для расчетов
Initial data

Наименование показателя	Турбодетандерный цикл			
	без перегрева НКРТ	с однократным перегревом НКРТ	с двукратным перегревом НКРТ	с двукратным перегревом на сверхкритических параметрах НКРТ
Температура дымовых газов на входе в котел-утилизатор, °С	300	300	300	300
Давление НКРТ перед турбодетандером высокого давления, МПа	1,935	1,935	1,935	4
Температура НКРТ перед турбодетандером высокого давления, °С	110	180	180	180
Давление НКРТ перед турбодетандером низкого давления, МПа	–	–	0,428	0,841
Температура НКРТ перед турбодетандером низкого давления, °С	–	–	180	180
Температура НКРТ в конденсаторе, °С	25	25	25	25

Циклы исследуемых схем представлены на рис. 4–7. Они состоят из следующих процессов: 1–2 – повышение давления НКРТ в насосе; 2–2' – изобарный нагрев НКРТ в теплообменнике; 2'–3 – изобарный процесс нагрева, кипения и перегрева (рис. 5–7) НКРТ в котле-утилизаторе; 3–4 (рис. 4, 5), 3–3', 3''–4 (рис. 6, 7) – расширение паров НКРТ в турбодетандере; 3'–3'' – изобарный процесс перегрева НКРТ в промежуточном пароперегревателе котла-утилизатора; 4–5 – изобарный процесс охлаждения паров НКРТ в теплообменнике; 5–1 – изобарно-изотермический процесс конденсации НКРТ в конденсаторе.

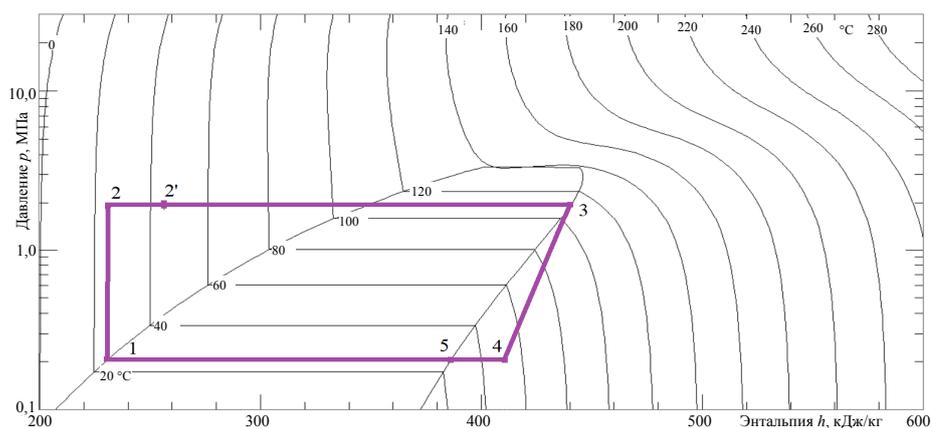


Рис. 4. Цикл турбодетандерной установки без перегрева низкокипящего рабочего тела

Fig. 4. The cycle of the turbo-expander unit without overheating of a low boiling working fluids

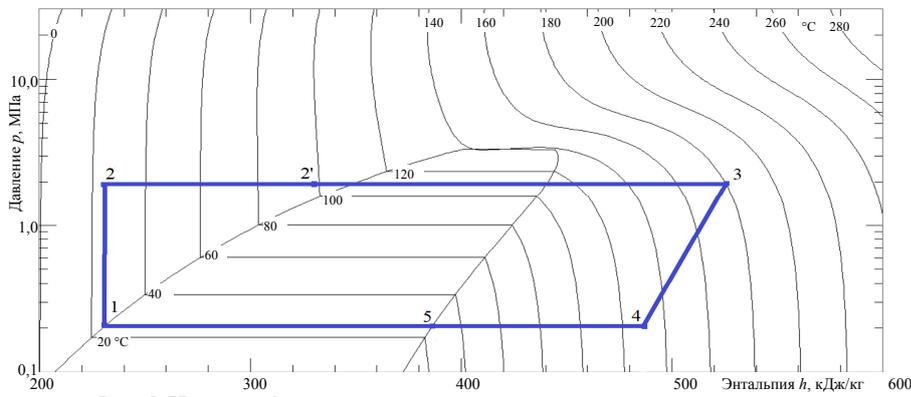


Рис. 5. Цикл турбодетандерной установки с однократным перегревом низкокипящего рабочего тела

Fig. 5. The cycle of the turbo-expander unit with single overheating of a low boiling working fluids

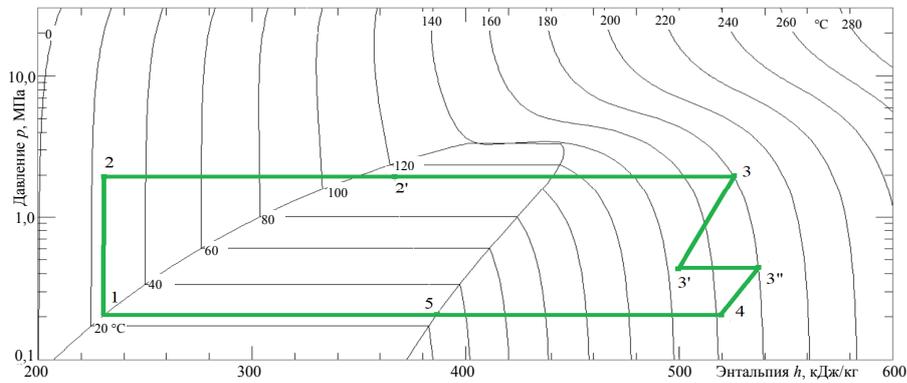


Рис. 6. Цикл турбодетандерной установки с двукратным перегревом низкокипящего рабочего тела

Fig. 6. The cycle of the turbo-expander unit with double overheating of a low boiling working fluids

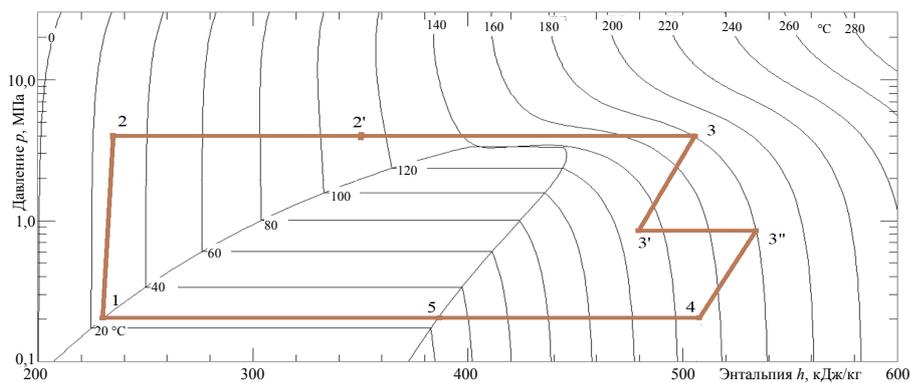


Рис. 7. Цикл турбодетандерной установки с двукратным перегревом на сверхкритических параметрах низкокипящего рабочего тела

Fig. 7. The cycle of the turbo-expander unit with double overheating of a low boiling working fluids on supercritical parameters

Термодинамический анализ

Оценить эффективность исследуемых циклов можно при помощи эксергетического анализа, результатом которого является определение эксергетического КПД [9, 10]:

$$\eta_e = \frac{\sum E_3}{\sum E_3} = 1 - \frac{\sum D}{\sum E_3}, \quad (1)$$

где $\sum E_3$ – потоки эксергии, сумма или разность которых определяет получаемый эффект; $\sum E_3$ – потоки эксергии, сумма или разность которых определяет затраты; $\sum D$ – потери эксергии в цикле, кДж/кг.

Таким образом, для определения эксергетического КПД необходимо определить потери эксергии в цикле, которые можно представить как сумму потерь эксергии по элементам исследуемого цикла:

$$\sum D = D_{\text{КУ}} + D_{\text{ТД}} + D_{\text{ТО}} + D_{\text{КД}} + D_{\text{Н}}, \quad (2)$$

где $D_{\text{КУ}}$ – потери эксергии в котле-утилизаторе; $D_{\text{ТД}}$ – то же в турбодетандере; $D_{\text{ТО}}$ – то же в теплообменнике; $D_{\text{КД}}$ – то же в конденсаторе; $D_{\text{Н}}$ – то же в насосе.

Потери эксергии в котле-утилизаторе находим по формуле

$$D_{\text{КУ}} = E_q + E_2 - E_3, \quad (3)$$

где E_q – эксергия горячих дымовых газов, подводимых к котлу-утилизатору, кДж/кг; E_2 – то же низкокипящего рабочего тела на входе в котел-утилизатор; E_3 – то же низкокипящего рабочего тела на выходе из котла-утилизатора.

В свою очередь эксергия горячих дымовых газов определяется как

$$E_q = Q_{\text{ш}} \eta_t^{\text{ОЦК}} = Q_{\text{ш}} \left(1 - \frac{T_0}{T_{\text{ГДГ}}} \right), \quad (4)$$

где $Q_{\text{ш}}$ – количество теплоты, подведенной в котел-утилизатор с дымовыми газами; $\eta_t^{\text{ОЦК}}$ – термический КПД обратимого цикла Карно; T_0 – температура окружающей среды; $T_{\text{ГДГ}}$ – то же горячего источника тепловой энергии (горячих дымовых газов, поступающих в котел-утилизатор).

Потери эксергии в турбодетандере для схем:

– без перегрева и с однократным перегревом НКРТ

$$D_{\text{ТД}} = E_3 - E_4 - L_{\text{дТД}} \eta_{\text{мезТД}} \eta_{\text{ген}}; \quad (5)$$

– с двукратным перегревом НКРТ

$$D_{\text{ТД}} = E_3 - E_{3'} + E_{3''} - E_4 - L_{\text{дТД}} \eta_{\text{мезТД}} \eta_{\text{ген}}, \quad (6)$$

где $L_{\text{дТД}}$ – действительная работа, совершаемая в турбодетандере, кДж;

$\eta_{\text{мезТД}}$ – механический КПД турбодетандера; $\eta_{\text{ген}}$ – КПД генератора.

Действительная работа, совершаемая в турбодетандере, для схем:

– без перегрева и с однократным перегревом НКРТ

$$L_{\text{дТД}} = (h_3 - h_4)G_{\text{НКРТ}}; \quad (7)$$

– с двукратным перегревом НКРТ

$$L_{\text{дТД}} = (h_3 - h_{3'} + h_{3''} - h_4)G_{\text{НКРТ}}, \quad (8)$$

где $G_{\text{НКРТ}}$ – расход НКРТ в цикле; $h_3, h_{3'}, h_{3''}, h_4$ – энтальпии НКРТ на входе и выходе из турбодетандера, турбодетандеров высокого и низкого давления (для схемы с двукратным перегревом), кДж/кг.

Потери эксергии:

– в теплообменнике

$$D_{\text{ТО}} = (E_4 - E_5) - (E_{2'} - E_2); \quad (9)$$

– в конденсаторе

$$D_{\text{КД}} = E_5 - E_1; \quad (10)$$

– в насосе

$$D_{\text{Н}} = L_{\text{дН}} - (E_2 - E_1), \quad (11)$$

где $L_{\text{дН}}$ – действительная работа, совершаемая насосом, определяется как

$$L_{\text{дН}} = (h_2 - h_1)G_{\text{НКРТ}}. \quad (12)$$

Результаты исследований

Приняв эксергию продуктов сгорания, поступающих в котел-утилизатор, за единицу, можно найти относительное распределение потерь эксергии по элементам исследуемых циклов.

Для удобства анализа полученных данных представим результаты в виде диаграмм Грассмана – Шаргута [11–13] (рис. 8–11).

Как видно из диаграмм (рис. 8–10), однократный и вторичный перегрев НКРТ в конечном итоге приводят к увеличению эксергетического КПД с 28,16 до 36,22 % и с 36,22 до 37,20 % соответственно. Это связано, в первую очередь, со снижением потери эксергии в котле-утилизаторе и увеличением эксергии, превращаемой в электрическую энергию в турбодетандере.

тандере. Увеличение параметров рабочего тела приводит и к увеличению регенерации эксергии в теплообменнике.

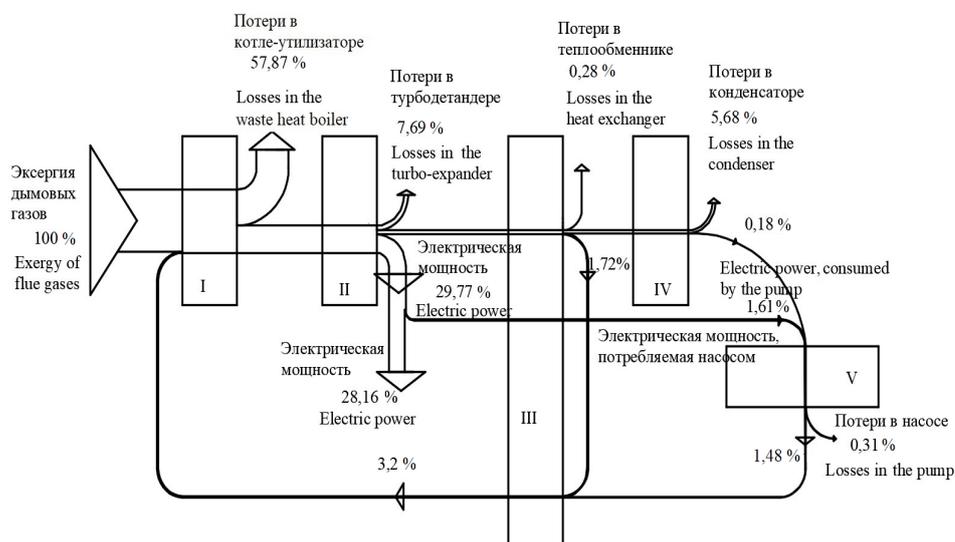


Рис. 8. Диаграмма Грассмана – Шаргута для турбодетандерного цикла без перегрева низкокипящего рабочего тела: I – котел-утилизатор; II – турбодетандер; III – теплообменник; IV – конденсатор; V – насос

Fig. 8. Grassman – Shargut diagram for a turbo-expander cycle without overheating of a low-boiling working fluid: I – waste heat boiler; II – turbo-expander; III – heat exchanger; IV – condenser; V – pump

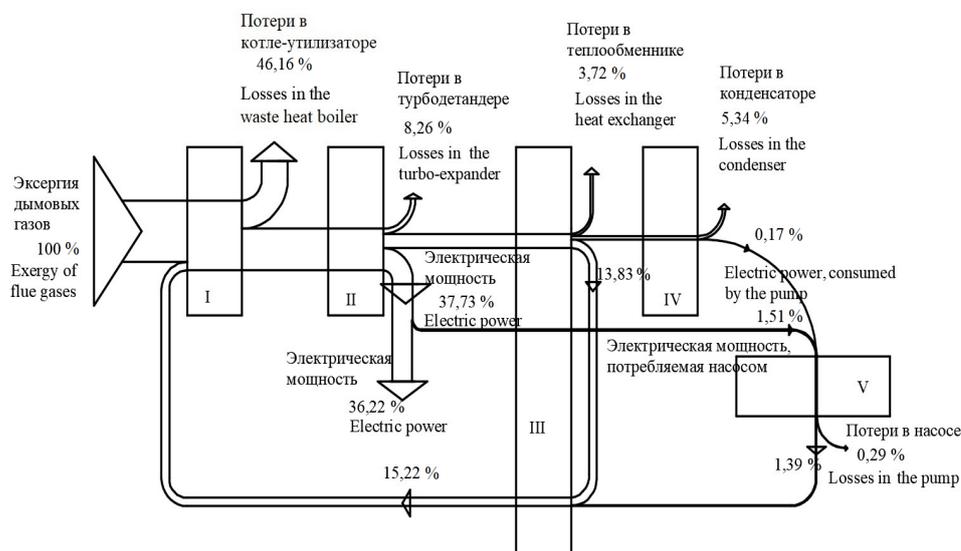


Рис. 9. Диаграмма Грассмана – Шаргута для турбодетандерного цикла с однократным перегревом низкокипящего рабочего тела: I – V – то же, что на рис. 8

Fig. 9. Grassman – Shargut diagram for a turbo-expander cycle with single overheating of a low boiling working fluids: I – V – the same as in the Fig. 8

Повышение давления перед турбодетандером до сверхкритического также приводит к увеличению эксергетического КПД с 37,20 до 42,55 % (рис. 11). Кроме того, повышение давления перед турбодетандером, в отличие от случаев, рассмотренных выше, приводит к снижению количества эксергии, передаваемой конденсату НКРТ в теплообменнике.

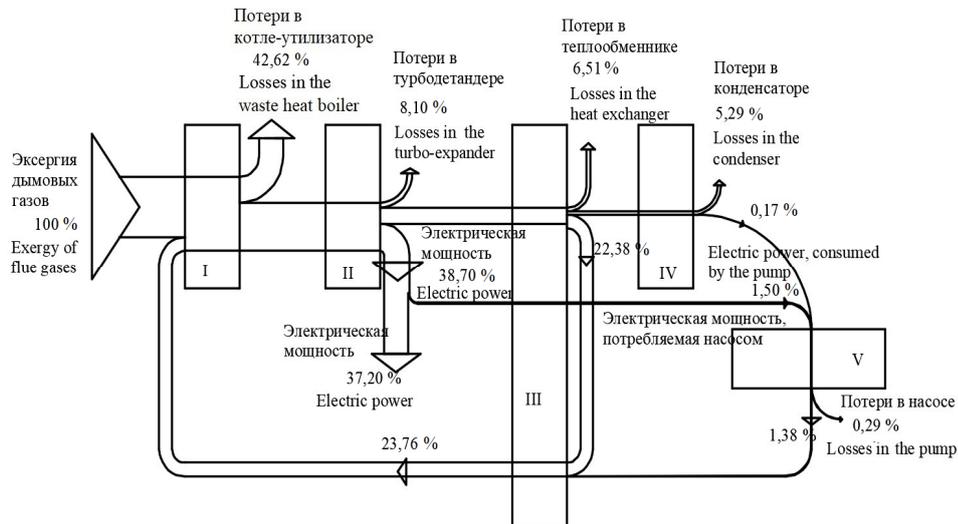


Рис. 10. Диаграмма Грассмана – Шаргута для турбодетандерного цикла с двукратным перегревом низкокипящего рабочего тела: I – V – то же, что на рис. 8

Fig. 10. Grassman – Shargut diagram for a turbo-expander cycle with double overheating of low boiling working fluids: I – V – the same as in the Fig. 8

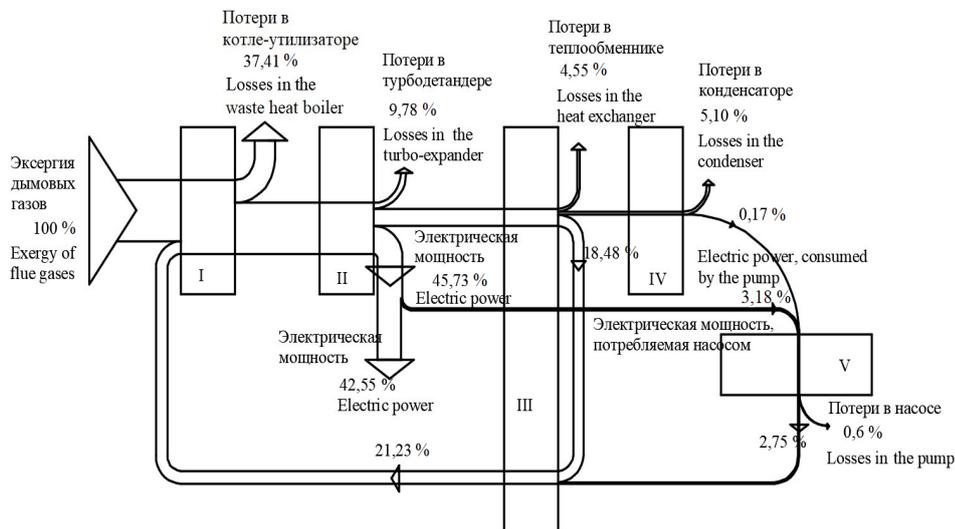


Рис. 11. Диаграмма Грассмана – Шаргута для турбодетандерного цикла с двукратным перегревом на сверхкритических параметрах низкокипящего рабочего тела: I – V – то же, что на рис. 8

Fig. 11. Grassman – Shargut diagram for a turbo-expander cycle with double overheating of supercritical parameters of low boiling working fluids: I – V – the same as in the Fig. 8

ВЫВОД

Основные потери, оказывающие существенное влияние на эксергетический КПД, происходят в котле-утилизаторе. Повышение параметров низкокипящих рабочих тел, а также использование промежуточного перегрева приводят к снижению потерь в котле-утилизаторе и, как следствие, к повышению эксергетического КПД турбодетандерного цикла. Наибольшим эксергетическим КПД из исследуемых схем обладает турбодетандерный цикл с двукратным перегревом на сверхкритических параметрах низкокипящих рабочих тел.

ЛИТЕРАТУРА

1. Схемы тригенерационных установок для централизованного энергоснабжения / А. В. Клименко [и др.] // Теплоэнергетика. 2016. № 6. С. 36–43.
2. Trigeneration Units on Carbon Dioxide with Two-Time Overheating with Installation of Turbo Detainer and Recovery Boiler / A. V. Ovsyannik [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1683, No 042010. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/4/042010>.
3. Ovsyannik, A. V. Thermodynamic Analysis and Optimization of Low-Boiling Fluid Parameters in a Turboexpander / A. V. Ovsyannik, V. P. Kliuchinski // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1683, No 042005. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/4/042005>.
4. Тригенерация энергии в турбодетандерных установках на диоксиде углерода / А. В. Овсянник [и др.] // Вестник ГГТУ имени П. О. Сухого. 2019. № 2. С. 41–51.
5. Овсянник, А. В. Турбодетандерная установка на диоксиде углерода с производством жидкой и газообразной углекислоты / А. А. Овсянник // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 1. С. 77–87. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-77-87>.
6. Овсянник, А. В. Разработка компьютерной программы для оптимизации параметров низкокипящего рабочего тела в турбодетандерной установке / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Вестник ГГТУ имени П. О. Сухого. 2020. № 3/4. С. 108–115.
7. Овсянник, А. В. Термодинамический анализ озонобезопасных низкокипящих рабочих тел для турбодетандерных установок / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 6. С. 554–562. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-554-562>.
8. Ovsyannik, A. V. Heat Exchange at the Boiling of Ozone-Safe Refrigerants and their Oil-Freon Mixtures / A. V. Ovsyannik, A. I. Arshukov, P. A. Kovalchuk // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1683, No 022012. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/2/022012>.
9. Technical, Economical and Market Review of Organic Rankine Cycles for the Conversion of Low-Grade Heat for Power Generation / F. Velez [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012. Vol. 16, No 6. P. 4175–4189. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.022>.
10. Трухний, А. Д. Стационарные паровые турбины / А. Д. Трухний. М.: Энергоатомиздат, 1990. 640 с.
11. Бродянский, В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа / В. М. Бродянский. М.: Энергия, 1973. 295 с.
12. Бродянский, В. М. Эксергетический метод и его приложения / В. М. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек; под ред. В. М. Бродянского. М.: Энергоатомиздат, 1988. 288 с.
13. Шаргут, Я. Эксергия / Я. Шаргут, Р. Петела. М.: Энергия, 1968. 280 с.

Поступила 31.12.2019 Подписана в печать 02.03.2020 Опубликована онлайн 29.01.2021

REFERENCES

1. Klimentko A. V., Agababov V. S., Il'ina I. P., Rozhnatovskii V. D., Burmakina A. V. (2016) Layouts of Trigeneration Plants for Centralized Power Supply. *Thermal Engineering*, 63 (6), 414–421. <https://doi.org/10.1134/s0040601516060045>.

2. Ovsyannik A. V., Kovalchuk P. A., Arshukov A. I., Klyuchinski V. P. (2020) Trigeration Units on Carbon Dioxide with Two-Time Overheating with Installation of Turbo Detainder and Recovery Boiler. *Journal of Physics: Conference Series*, 1683 (042010). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/4/042010>.
3. Ovsyannik A. V., Kliuchinski V. P. (2020) Thermodynamic Analysis and Optimization of Low-Boiling Fluid Parameters in a Turboexpander. *Journal of Physics: Conference Series*, 1683 (042005). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/4/042005>.
4. Ovsyannik A. V., Valchenko P. A., Koval'chuk P. A., Arshukov A. I. (2019) Trigeration of Energy in Carbon Dioxide Turbo-Expander Plants. *Vestnik Gomel'skogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta imeni P. O. Sukhogo* [Bulletin of Gomel State Technical University Named after P. O. Sukhoi], (2), 41–51 (in Russian).
5. 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).
6. Ovsyannik A. V., Kliuchinski V. P. (2020) Development of a Computer Program for Optimizing the Parameters of a Low-Boiling Working Fluid in a Turbo-Expander Installation. *Vestnik Gomel'skogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta imeni P. O. Sukhogo* [Bulletin of Gomel State Technical University Named after P. O. Sukhoi], (3/4), 108–115 (in Russian).
7. Ovsyannik A. V., Kliuchinski V. P. (2020) Thermodynamic Analysis of Ozone-Safe Low Boiling Working Media for Turbo-Expander Plants. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (6), 554–562. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-554-562> (in Russian).
8. Ovsyannik A. V., Arshukov A. I., Kovalchuk P. A. (2020) Heat Exchange at the Boiling of Ozone-Safe Refrigerants and their Oil-Freon Mixtures. *Journal of Physics: Conference Series*, 1683 (022012). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/2/022012>.
9. Velez F., Segovia J. J., Martín M. C., Antolin G., Chejne F., Quijano A. (2012) Technical, Economical and Market Review of Organic Rankine Cycles for the Conversion of Low-Grade Heat for Power Generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16 (6), 4175–4189. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.022>.
10. Trukhnii A. D. (1990) *Stationary Steam Turbines*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 640 (in Russian).
11. Brodyanskii V. M. (1973) *Exergetic Method of Thermodynamic Analysis*. Moscow, Energia Publ. 295 (in Russian).
12. Brodyanskii V. M., Fratsher V., Mikhalek K. (1988) *Exergetic Method and its Applications*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 288 (in Russian).
13. Shargut Y., Petela R. (1968) *Exergy*. Moscow, Energia Publ. 280 (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-78-90>

УДК 621.039:621.311.25

Эффективность использования пускорезервной котельной для получения пиковой выработки паровой турбиной АЭС

В. А. Хрусталеv¹⁾, М. В. Гариевский²⁾

¹⁾Саратовский государственный технический университет имени Ю. А. Гагарина (Саратов, Российская Федерация),

²⁾Саратовский научный центр РАН (Саратов, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. В статье представлена методика оценки эффективности использования потенциальной тепловой мощности пускорезервной котельной (ПРК) для повышения электрической мощности и маневренности паротурбинной установки энергоблока АЭС с водо-водяным энергетическим реактором (ВВЭР). Проведен анализ технических характеристик ПРК Балаковской АЭС (Саратовская область) и определены месторождения углеводородного сырья вблизи станции. Показано, что на АЭС с ВВЭР в России пускорезервные котельные используются в основном только до послепусковой нормальной эксплуатации, оборудование ПРК поддерживается в холодном резерве и не участвует в технологическом процессе генерации. Проанализированы результаты исследований по совершенствованию систем регулирования и управления мощностью энергоблоков, общих принципов повышения эффективности производства, передачи и распределения электрической энергии, а также вопросы привлечения потенциала энерготехнологических источников промпредприятий для обеспечения графиков нагрузки. Обоснована возможность использования энергокомплекса АЭС и ПРК как единого объекта регулирования. Применены приоритетные схемно-параметрические разработки авторов по возможности использования тепловой мощности ПРК для повышения мощности паровой турбины энергоблока АЭС с реакторной установкой ВВЭР в пиковые периоды, а также энтальпийный балансный метод расчета тепловых потоков. Рассчитаны площадь поверхности дополнительного подогревателя системы регенерации «деаэратор – подогреватели высокого давления» и его стоимость. На основе расчетов показано, что дополнительная мощность, которая может быть получена в паровой турбине АЭС 1200 МВт за счет использования в дополнительном теплообменнике теплоты модернизированной пускорезервной котельной, составляет 40,5 МВт. Укрупненно оценены дополнительные затраты на реализацию схемы утилизации теплоты ПРК при разных ценах на газовое топливо и получаемый при этом системный эффект. Расчеты показали приемлемость сроков окупаемости предложенной модернизации.

Ключевые слова: дополнительный подогреватель системы регенерации, отборный пар, питательная вода, регенерация, энтальпия, температура, регулирование частоты, системный эффект

Для цитирования: Хрусталеv, В. А. Эффективность использования пускорезервной котельной для получения пиковой выработки паровой турбиной АЭС / В. А. Хрусталеv, М. В. Гариевский // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 1. С. 78–90. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-78-90>

Адрес для переписки

Хрусталеv Владимир Александрович
Саратовский государственный технический университет имени Ю. А. Гагарина
ул. Политехническая, 77,
410054, г. Саратов, Российская Федерация
Тел.: +7 845 299-87-60
khroustalevva@mail.ru

Address for correspondence

Khrustalev Vladimir A.
Yuri Gagarin State Technical University
of Saratov
77, Polytechnicheskaya str.,
410054, Saratov, Russian Federation
Tel.: +7 845 299-87-60
khroustalevva@mail.ru

Efficiency of Using the Auxiliary Boiler for Peak Power Generation by a Steam Turbine of NPP

V. A. Khrustalev¹⁾, M. V. Garievskii²⁾

¹⁾Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (Saratov, Russian Federation),

²⁾Saratov Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (Saratov, Russian Federation)

Abstract. The article presents the technique of an estimation of efficiency of use of potential heat output of an auxiliary boiler (AB) to improve electric capacity and manoeuvrability of a steam turbine unit of a power unit of a nuclear power plant (NPP) equipped with a water-cooled water-moderated power reactor (WWER). An analysis of the technical characteristics of the AB of Bala-kovo NPP (of Saratov oblast) was carried out and hydrocarbon deposits near the NPP were determined. It is shown that in WWER nuclear power plants in Russia, auxiliary boilers are mainly used only until the normal operation after start-up whereas auxiliary boiler equipment is maintained in cold standby mode and does not participate in the generation process at power plants. The results of research aimed to improve the systems of regulation and power management of power units; general principles of increasing the efficiency of production, transmission and distribution of electric energy, as well as the issues of attracting the potential of energy technology sources of industrial enterprises to provide load schedules have been analyzed. The possibility of using the power complex NPP and the AB as a single object of regulation is substantiated. The authors' priority scheme-parametric developments on the possibility of using the thermal power of the auxiliary boilers to increase the power of the steam turbine of a nuclear power plant unit equipped with WWER reactors unit during peak periods, as well as the enthalpy balance method for calculating heat flows, were applied. The surface area of the additional heater of the regeneration "deaerator – high pressure heaters" system and its cost were calculated. On the basis of calculations, it was shown that the additional power that can be obtained in the steam turbine of the NPP with a capacity of 1200 MW due to the use of heat of the modernized auxiliary boiler in the additional heat exchanger is 40.5 MW. The additional costs for the implementation of the heat recovery scheme of the auxiliary boiler at different prices for gas fuel and the resulting system effect were estimated in an enlarged way. Calculations have shown the acceptability of the payback period of the proposed modernization.

Keywords: additional heater of the regeneration system, extraction steam, feed water, regeneration, enthalpy, temperature, frequency control, system effect

For citation: Khrustalev V. A., Garievskii M. V. (2021) Efficiency of Using the Auxiliary Boiler for Peak Power Generation by a Steam Turbine of NPP. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 64 (1), 78–90. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-78-90> (in Russian)

Введение

В условиях увеличения доли ядерной генерации в энергосистемах России важны и актуальны задачи повышения маневренности, приемистости и надежности уже работающих и проектируемых энергоблоков АЭС с ВВЭР [1–3]. В [4] отмечается, что проблема неравномерных графиков электрических нагрузок общеизвестна, является глобальной, в частности в Беларуси, во время отопительных периодов выражается вынужденным «вытеснением» эффективной теплофикационной выработки и переходом к теплоснабжению от котлов через редуционно-охладительные установки. Эта же проблема характерна и для ОЭС России, особенно там, где велика

доля ТЭЦ и АЭС. Стремление поддержать выработку АЭС только на базовом уровне, обусловленное меньшей топливной составляющей, снижает эффективность теплофикации, особенно в ночные зимние периоды при низких электрических и высоких тепловых нагрузках. В [4] предложено расширить использование потенциала теплотехнологий в генерации дешевой электроэнергии на когенерационных энерготехнологических комплексах, придавая им позитивную роль потребителей-регуляторов.

Аналізу реально достигнутой эффективности систем автоматического управления мощностью энергоблоков посвящена работа белорусских ученых-энергетиков [5] в связи с ожидаемым вводом в эксплуатацию двух энергоблоков АЭС мощностью 1200 МВт. В [6] сформулированы важнейшие направления роста эффективности производства, передачи и распределения электрической энергии с учетом всего комплекса системных факторов. При этом рассматриваются не только социально-экономические показатели, но и четкость нормативно-правовой базы, системы тарифного регулирования, а также степень выполнения договорных условий по энергоснабжению с безусловным обеспечением требуемого уровня надежности энергосистемы в целом.

Вопросы повышения эффективности АЭС с ВВЭР путем создания комбинированных энергокомплексов на их основе рассматривались в [7, 8]. Одним из возможных малозатратных способов адаптации АЭС к требованиям энергосистемы и повышения системной эффективности энергоблоков является интеграция ПРК и энергоблока АЭС в составе энергокомплекса как единого объекта регулирования [9, 10]. На АЭС с ВВЭР в России пускорезервные котельные используются только до послепусковой нормальной эксплуатации, их оборудование поддерживается в холодном резерве и не участвует в технологическом процессе генерации на станциях. Таким образом, согласно нормативно-технической документации и стандартам организации проводятся проверочные регламентные растопки энергетических котлов ПРК, стационарные паровые коллекторы собственных нужд поддерживаются в горячем резерве, а также проводятся специальные химико-технологические операции по консервации тепломеханического оборудования ПРК в режиме ожидания.

Предлагаемый энергокомплекс [11, 12] позволяет получить дополнительную мощность и повысить маневренность АЭС без снижения коэффициента использования установленной мощности. Предусмотрено максимально близкое расположение дополнительного подогревателя системы регенерации (ДПСР) к деаэратору и тракту подогревателя высокого давления (ПВД), в том числе на пониженных отметках (минусовые отметки машинного зала).

Использование природного и более дешевого попутного газа в котельных агрегатах ПРК целесообразно только в пиковые часы, при этом организуется постоянный либо периодический (в зависимости от режима использования) прогрев на участках ПРК – ДПСР. Предлагаемый энергоком-

плекс, наравне с приведенным в [4] способом выравнивания графика электрических нагрузок, может быть использован как дополнительное средство обеспечения участия АЭС в противоаварийном регулировании при падении частоты в энергосистемах путем быстрых подъемов и снижения нагрузки (+2 и –8 % от номинальной мощности соответственно), что требуется по стандарту СТО 59012820.27.120.20.004–2013 «Нормы участия энергоблоков атомных электростанций в нормированном первичном регулировании частоты».

Основная часть

Пускорезервная котельная обеспечивает паром низких параметров объекты АЭС в период строительства и пуска (при проведении важнейших пусконаладочных операций – горячей обкатки реакторной установки, пробного набора вакуума в конденсаторе турбины и т. д.), причем как при первых пусках с имитаторами топлива, так и в последующие периоды планово-предупредительных ремонтов [13]. В случае подключения к ПРК турбоустановок небольшой мощности можно обеспечивать безопасную работу энергоблока при аварийных отключениях.

ПРК, расположенную в отдельно стоящем здании на территории атомной станции, предложено соединить с системой регенерации одного ближайшего к котельной энергоблока. В табл. 1 представлены характеристики котлов ГМ-50-14/250, которыми укомплектована ПРК Балаковской АЭС.

Таблица 1

Характеристики котлов ГМ-50-14/250 Балаковской АЭС
Characteristics of GM-50-14/250 boilers used at Balakovo NPP

Наименование показателя	Е-50-1.4/250ГМ (ГМ-50-14/250)
Номинальная паропроизводительность, т/ч	50
Давление перегретого пара, МПа (кгс/см ²)	1,4 (14)
Температура перегретого пара, °С	250
Температура питательной воды, °С	100
Энтальпия питательной воды при 1,4 МПа, кДж/кг	420
Топливо	Газ, мазут
Коэффициент полезного действия, %	93,0 / 91,0
Габаритные размеры котлоагрегата, длина × ширина × высота, м	18,2×11,2×14,6
Масса котла, т (в сейсмическом исполнении)	140 (164)
Тепловая мощность четырех котлов, кВт (т)	130718

Перегретый пар из котлов ПРК с температурой 250 °С имеет при давлении 14 бар температуру насыщения 197 °С, т. е. перегрев, который необходимо снимать в специальном отсеке ДПСР, составляет 53 °С.

КПД котельного агрегата на газе составляет 93 %, на мазуте – 91 %. Также может быть использован после очистки попутный газ (при наличии

рядом с АЭС месторождений), при этом его стоимость примерно на 50 % ниже, а КПД котельного агрегата не превышает 90 %. Как видно из рис. 1, такие месторождения имеются рядом с Балаковской АЭС.

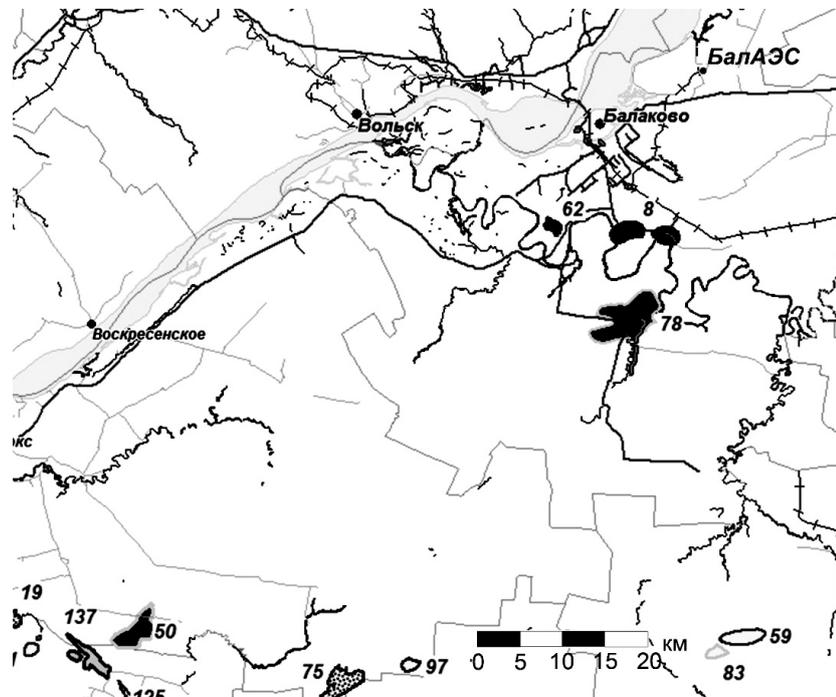


Рис. 1. Карта-схема месторождений углеводородного сырья вблизи Балаковской АЭС по состоянию на 01.01.2016 (данные Территориального фонда геологической информации по Приволжскому федеральному округу)

Fig. 1. The map of hydrocarbon deposits near Balakovo NPP as of 01.01.2016 (data from the Territorial Geological Information Fund for the Volga Federal District)

На рис. 1 показаны следующие месторождения: 8 – Балаковское (нефть, разрабатываемое), 22 км от АЭС; 62 – Красно-Ярское (нефть, законсервированное), 26 км; 78 – Наумовское (нефть, разведываемое), 30 км; 59 – Коптевское (газоконденсатное, разведываемое), 68 км; 83 – Ново-Коптевское (нефть, разведываемое), 70 км. Необходимо отметить, что подвод газа к ПРК уже предусмотрен по проекту, но не исключается и подключение (врезка) газа из более дешевых месторождений.

При средней плотности $0,65 \text{ кг/м}^3$ (Соколовогорское месторождение природного газа) низшая теплота сгорания природного газа почти вдвое выше, чем у условного топлива, и по верхнему пределу составляет $58,2 \text{ МДж/кг}$. В табл. 2 представлены данные, принятые для расчета ДПСР в блоке с ВВЭР-1200, играющего роль ПВД-3 (ПВД-3 ранее применялся в паротурбинных установках энергоблоков с ВВЭР-1000; в последних схемах паровых турбин для энергоблоков 1200 МВт принята двухниточная система ПВД с двумя ступенями подогрева).

Необходимо также учитывать возможную дифференциацию тарифов на пиковую, базовую и ночную выработку. При этом хотя стоимость газовой генерации по сравнению с ядерной (в условном эквиваленте) будет более высокой, использование ПРК в пиковые часы позволит компенсировать упущенную прибыль при 2%-м запасе по мощности при участии АЭС в нормированном первичном регулировании частоты. Полная компенсация снижения коэффициента использования установленной мощности энергоблоков может происходить только при постоянном включении ПРК по любому из способов, изложенных в [11].

Таблица 2

Оценка затрат и общей эффективности модернизации пускорезервной котельной
Estimates of costs and overall efficiency of modernization of the auxiliary boiler

Наименование показателя	Значение
Теплотворная способность топлива, МДж/м ³ (МДж/кг)*:	
– природный газ	33,6–35,8 (54,6–58,2)
– попутный газ	23,5–29,7 (27,6–34,5)
Цена на топливо, руб./м ³ (руб./кг):	
– природный газ	3,2–3,8 (5,2–6,2)
– попутный газ	1,3–1,5 (1,5–1,76)
Тариф на пиковую электроэнергию, руб./(МВт·ч)	1500; 3000; 4500
Достижимый (усредненный) коэффициент теплопередачи в ДПСР, кВт/(м ² ·К):	
– без оребрения	0,6
– с навивкой	2,2
Стоимость металла трубчатой системы подогревателя, руб./кг:	
– без оребрения	170–200
– с навивкой	220–280
Подогрев воды после деаэрационно-питательного тракта, °С:	
– в ДПСР	18
– в ПВД-2 (без ДПСР)	32
– в ПВД-2 (с включенным ДПСР)	14
Энтальпия пара, конденсата, скрытая теплота парообразования в процессе конденсации в ДПСР, кДж/кг	2788,4; 830,1; 1958,3
Энтальпия питательной воды при $t_{пв} = 100/195,4$ °С, кДж/кг	420/820
Энтальпия перегретого пара на выходе из ПРК, кДж/(кг·К)	2948
Тепловая мощность ПРК (четыре котла) с учетом постоянного возврата питательной воды в ПРК при $t_{пв} = 100/195,4$ °С, МВт (т)	150/132,2
Реально обеспечиваемый расход греющего пара из расчета заявленной тепловой мощности ПРК при $t_{пв} = 100/195,4$ °С, т/ч (кг/с)	200/225,3 (55,5/62,6)
* При плотности 0,615 кг/м ³ .	

Для рассматриваемого в данной статье менее затратного варианта следует учитывать, что общий расход пара из ПРК (при $t_{пв} = 195^\circ\text{C}$) по проекту составляет 225,3 т/ч (62,6 кг/с), или половину от расчетного значения отборного пара 450,8 т/ч (125,2 кг/с) на втором ПВД (из отбора 2). Это позволяет подключать пар из двух рабочих ниток в одну и затем выравнять температуру обоих потоков в дополнительном смесителе.

Разработанная авторами приоритетная схема [11] по возможности использования тепловой мощности ПРК для повышения мощности паровой турбины энергоблока АЭС с реакторной установкой ВВЭР-1200 представлена на рис. 2.

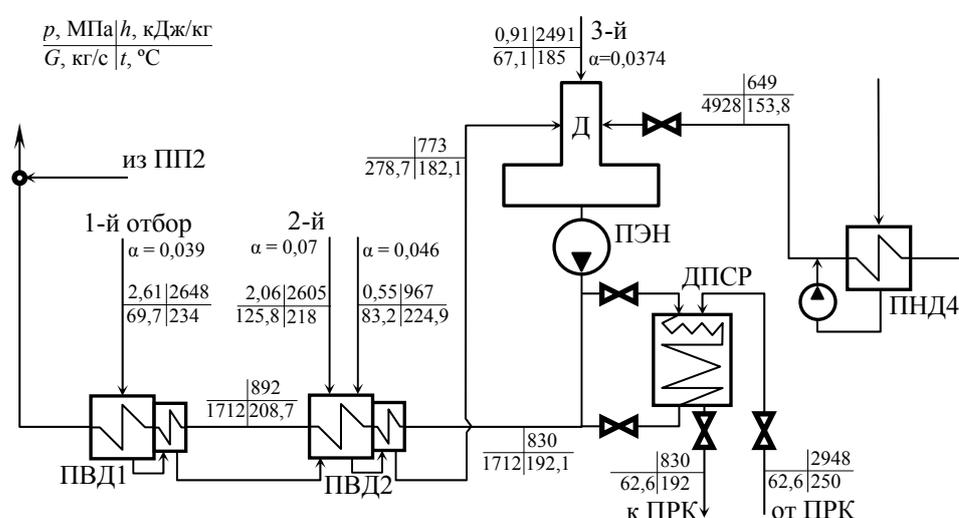


Рис. 2. Схема включения дополнительного подогревателя системы регенерации, питаемого паром пускорезервной котельной, в схему паровой турбины энергоблока с ВВЭР-1200 (проект АЭС-2006)

Fig. 2. The chart of inclusion an additional heater of the regeneration system that uses the of steam of an auxiliary boiler in the scheme of the steam turbine of the power unit with WVER-1200 (NPP-2006 project)

Типовая t - q -диаграмма теплообмена перегретого пара, поступающего из ПРК, изображена на рис. 3.

Подогрев питательной воды в ДПСР определим по следующим формулам:

– на участке конденсации пара

$$\Delta t_b^k = \frac{G_n}{G_b} \cdot \frac{r}{c_p} \eta_{тп}, \quad (1)$$

– на участке съема перегрева

$$\Delta t_b^{пе} = \frac{G_n}{G_b} \cdot \frac{h_{пе} - h''}{c_p} \eta_{тп}, \quad (2)$$

где G_n , G_b – расход пара и воды соответственно, кг/с; c_p – теплоемкость воды, кДж/(кг·К); r – скрытая теплота парообразования, кДж/кг;

$h_{пе}$, h'' – энтальпия перегретого и насыщенного пара, кДж/кг; $\eta_{тп}$ – КПД теплового потока.

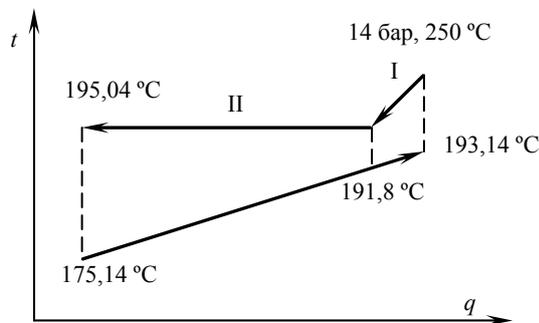


Рис. 3. T - q -диаграмма теплообмена в дополнительном подогревателе системы регенерации:

I – зона съема перегрева; II – зона конденсации

Fig. 3. T - q heat transfer diagram in the additional heater of the regeneration system:

I – overheat removal zone; II – condensation zone

Если принять, что на участке съема перегрева передаваемая теплота $Q_{пе} = 159,6$ кДж/кг, а на участке конденсации $Q_k = 1958,3$ кДж/кг, то подогрев воды при средней теплоемкости $c_p = 4,31$ кДж/(кг·К) составит:

$\Delta t_B^k = 16,5$ °С – на участке конденсации пара при тепловой мощности ПРК $Q_{ПРК} = 62,6$ МВт (т), $G_B = 1711,4$ кг/с, $\eta_{тп} = 0,99$;

$\Delta t_B^{пе} = 1,35$ °С – на участке съема перегрева.

Таким образом, общий нагрев $\Delta t_{\Sigma} = 17,85$ °С.

Горячий дренаж специальным насосом вновь направляется в ПРК. Смешение с основным потоком нежелательно из-за более низких требований к качеству воды ПРК по сравнению со вторым контуром АЭС. Прямой и обратный трубопроводы (пара и горячего дренажа ~195 °С, 14 бар) должны быть теплоизолированы, котлы реконструированы для повышения температуры питательной воды со 100 до 195 °С. Из-за увеличения энтальпии питательной воды с 420 до 820 кДж/кг соответственно при 100 и 195 °С номинальная суммарная паропроизводительность котлов ПРК вырастет на 13 %. Из формул (1), (2) следует, что это даст дополнительный подогрев 1,9 °С.

Расчет поверхности дополнительного подогревателя системы регенерации

Площадь погонного метра трубочки теплообменника $F_{п}$ и его вес P определим по формулам:

$$F_{п} = \pi D, \text{ м}^2/\text{п. м}; P = F_{п} S \gamma, \text{ кг/п. м}, \quad (3)$$

где D , S – диаметр и толщина трубочки соответственно; γ – удельный вес стали, 7,85 г/см³.

Стоимость теплообменника рассчитывается по формуле

$$Z_{\text{то}} = k_{\text{изг}} \Pi_{\text{м}} PF / F_{\text{п}}, \quad (4)$$

где $k_{\text{изг}}$ – коэффициент удорожания теплообменника при изготовлении и монтаже, принят 1,3; $\Pi_{\text{м}}$ – цена металла, принята 170–200 руб./кг; P – вес погонного метра поверхности, кг; F – площадь теплообменника, м²; $F_{\text{п}}$ – площадь погонного метра поверхности, м²/п. м.

Разделим зоны конденсации и съема перегрева согласно рис. 3 и внутри каждой определим среднелогарифмический температурный напор. По передаваемой теплоте на зону съема перегрева приходится 0,0755 о. е., на зону конденсации – 0,9245. Следовательно, с учетом коэффициентов теплопередачи подогрев в зоне I составит всего 1,35 °С, а в зоне конденсации II – 16,65 °С. В зоне II примем $k_{\text{II}} = 2,2$ кВт/(м²·К) (трубы с навивкой), в зоне I – $k_{\text{I}} = 0,6$ кВт/(м²·К). Среднелогарифмический температурный напор в этих зонах: $\Delta t_{\text{срI}}^{\text{пог}} = 18,52$ °С; $\Delta t_{\text{срII}}^{\text{пог}} = 8,086$ °С.

Поверхности в зонах I и II определим из уравнений:

$$F_{\text{I}} = \frac{Q_{\text{I}}}{k_{\text{I}} \cdot \Delta t_{\text{I}}^{\text{пог}}}, \text{ м}^2; \quad F_{\text{II}} = \frac{Q_{\text{II}}}{k_{\text{II}} \Delta t_{\text{II}}^{\text{пог}}}, \text{ м}^2, \quad (5)$$

где $k_{\text{I}} = 0,6$ кВт/(м²·К); $k_{\text{II}} = 2,2$ кВт/(м²·К) (трубы с навивкой).

Стоимость ДПСР определим по формуле

$$\Pi_{\text{ДПСР}} = k_{\text{уд}} (F_{\text{I}}^{\text{пог}} + F_{\text{II}}^{\text{пог}}) P \Pi_{\text{м}}, \text{ млн руб.} \quad (6)$$

Для принятых исходных данных стоимость ДПСР составит 37,89 млн руб.

Расчет дополнительной мощности, получаемой в паровой турбине

Балансный расчет второго ПВД показывает, что при включении ДПСР потребный расход регенеративного пара из отбора турбины составляет 221 т/ч (61,4 кг/с) вместо 452,8 т/ч (125,8 кг/с), т. е. 45 %. Дополнительную мощность при снижении расхода на 231,8 т/ч (64,4 кг/с), т. е. на 55 %, определим по формуле

$$\Delta N = \Delta D_{\text{отб}} (h_{\text{отб}} - h_{\text{с}} + h_{\text{III}} - h_{\text{к}}) \eta_{\text{мг}} (1 - \xi_{\text{сн}}), \quad (7)$$

где $\Delta D_{\text{отб}}$ – снижение расхода пара в отборе, кг/с; $h_{\text{отб}}$, $h_{\text{с}}$, h_{III} , $h_{\text{к}}$ – энтальпия по реальному процессу расширения пара в ограничиваемом отборе, на входе в сепаратор, выходе из II ступени сепаратора пароперегревателя и на входе в конденсатор соответственно, кДж/кг; $\eta_{\text{мг}}$, $(1 - \xi_{\text{сн}})$ – электро-механический КПД турбины и КПД энергоблока АЭС, учитывающий долю расхода на собственные нужды, соответственно.

По формуле (7) $\Delta N = 44,77$ МВт, в действительности относительное снижение расхода в отбор примерно на столько же увеличивает относительный расход воды по конденсатному тракту [14]. Из-за снижения суммарного горячего дренажа из верхнего ПВД и I ступени сепаратора пароперегревателя растет расход пара в деаэрактор. Увеличиваются также расходы в элементы тракта подогревателя низкого давления, в связи с чем реальное увеличение мощности АЭС составит 40,5 МВт (3,375 %).

Увеличение мощности позволит получить дополнительную годовую выручку в размере

$$\Delta R = \Delta N \cdot 8760 \cdot \text{КИУМ} \cdot T, \quad (8)$$

где ΔN – повышение мощности энергоблока АЭС, МВт; КИУМ – коэффициент использования установленной мощности; T – тариф на электроэнергию, руб./ (МВт·ч).

Затраты на топливо для ПРК определим по формуле

$$Z_{\text{топл}}^{\text{ПРК}} = 3600 \cdot \frac{\Delta N \cdot 8760 \cdot \text{КИУМ}}{Q_n^p \eta_{\text{АЭС}} \eta_k} C_r, \quad (9)$$

где Q_n^p – низшая теплота сгорания природного газа, принята 57 МДж/кг; $\eta_{\text{АЭС}}$ – КПД АЭС; η_k – то же котельной; C_r – стоимость природного газа, принята 5 руб./кг.

Схема с ДПСР нужна для подъема мощности в пиковые и аварийные периоды и поддержания частоты по нормативным требованиям +2 % в условиях ее падения из-за дефицита генерации в сравнении с потреблением ($\Delta N = 24$ МВт). Окончательный эффект может быть определен по полной годовой прибыли при работе на мощности N , превышающей номинальную на 40,5 МВт, что соответствует полной располагаемой дополнительной мощности. Результаты расчетов эффективности модернизации ПРК приведены в табл. 3 для двух вариантов увеличения мощности: на 24 МВт (2 %) и 40,5 МВт (3,375 %).

Таблица 3

Результаты расчетов эффективности модернизации ПРК

Results of calculating the effectiveness of modernization of the auxiliary boiler

Наименование показателя	Увеличение мощности на	
	2 %	3,375 %
Увеличение мощности, МВт	24	40,5
Увеличение выручки от продажи электроэнергии, млн руб./год	252,3	425,7
Затраты на топливо для ПРК, млн руб./год	189,16	319,2
Дополнительная прибыль, млн руб./год	63,1	106,6

За пять лет (предельный срок окупаемости) прибыль составит 532,8 млн руб., что с учетом затрат в ДПСР и невысокой стоимости модернизации ПРК свидетельствует об экономической целесообразности данного мероприятия.

Стоит отметить, что возможности эффективного использования в послепусковые периоды оборудования паровых электродных котлов (например, на БелАЭС) менее очевидны. Здесь необходим учет льготных условий, по которым обычно АЭС расходует энергию на собственную ПРК (по себестоимости, на питательные и другие электронасосы), и тарифов на произведенные за счет этой ПРК дополнительные продукты: теплоту или, например, водород для транспорта. Таким образом, один из предпочтительных путей загрузки ПРК – среднетемпературный паровой электролиз воды для получения водорода и кислорода – связан с возможным появлением значительных излишков энергии после ввода на полную мощность БелАЭС [15]. После некоторой модернизации пускорезервная котельная с паровыми электродными котлами вполне может служить этой цели.

ВЫВОДЫ

1. На примере Балаковской АЭС проведен анализ технических характеристик пускорезервной котельной на природном и попутном газе. Обоснована возможность использования пускорезервной котельной для дополнительной генерации электрической энергии в часы пиковой нагрузки и улучшения маневренных свойств энергокомплексов в составе пускорезервной котельной и энергоблока АЭС как единого объекта регулирования.

2. Предложенные энергокомплексы предназначены для использования на базе АЭС двухконтурного типа с водо-водяными энергетическими реакторами с целью генерации дополнительной мощности, повышения коэффициента использования установленной мощности, а также участия АЭС в регулировании графиков нагрузки на мощности выше номинальной (с частичным замещением нового строительства). Укрупненные расчеты показали приемлемость сроков окупаемости такой модернизации (от 1,5 до 3,5 года).

3. Реализация новых гибридных тепловых схем позволяет попутно увеличивать безопасность АЭС, а также использовать ее в противоаварийном регулировании частоты в энергосистемах путем быстрых сбросов и подъемов нагрузки на -8 и $+2$ % от номинальной соответственно, что требуется действующими нормативами.

4. Для оценки эффективности применения варианта модернизации пускорезервной котельной с паровыми электродными котлами и использования среднетемпературного парового электролиза воды для производства водорода и кислорода необходимы специальные исследования с учетом вопросов безопасности, действующих тарифных меню на продаваемую в сеть электроэнергию, а также цен на водород и кислород.

ЛИТЕРАТУРА

1. АЭС с ВВЭР: режимы, характеристики, эффективность / Р. З. Аминов [и др.]. М.: Энергоатомиздат, 1990. 264 с.

2. Efficient Ways for Setting up the Operation of Nuclear Power Stations in Power Systems in the Base Load Mode / R. Z. Aminov [et al.] // *Thermal Engineering*. 2011. Vol. 58, No 5. P. 370–376. <https://doi.org/10.1134/S0040601511050016>.
3. The Comparative Effectiveness of Serving Peak Loads in the Variants of Providing Nuclear Power Plants with a Base Load / V. M. Batenin [et al.] // *Thermal Engineering*. 2012. Vol. 59, No 7. P. 557–565. <https://doi.org/10.1134/S004060151207004X>.
4. К вопросу обеспечения графиков электрической нагрузки энергосистемы с привлечением потенциала энерготехнологических источников промышленных предприятий / Б. М. Хрусталеv [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2010. № 1. С. 42–55.
5. Кулаков, Г. Т. Системный анализ научно-технической информации по системам автоматического управления мощностью энергоблоков / Г. Т. Кулаков, К. И. Артёменко // *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>.
6. Жежеленко, И. В. Основные направления повышения эффективности производства, передачи и распределения электрической энергии / И. В. Жежеленко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 1. С. 28–35. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-1-28-35>.
7. Rosen, M. A. Energy, Environmental, Health and Cost Benefits of Cogeneration from Fossil Fuels and Nuclear Energy Using the Electrical Utility Facilities of a Province / M. A. Rosen // *Energy for Sustainable Development*. 2009. Vol. 13, No 1. P. 43–51.
8. Opportunities for Cogeneration with Nuclear Energy. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2017. 108 p.
9. Хрусталеv, В. А. Системная технико-экономическая эффективность комбинирования ГТУ и АЭС с ВВЭР-1000 / В. А. Хрусталеv, М. В. Гариевский // *Труды Академэнерго*. 2015. № 4. С. 126–137.
10. Хрусталеv, В. А. Об эффективности АЭС при использовании оборудования пускорезервной котельной / В. А. Хрусталеv, М. В. Гариевский // *Труды Академэнерго*. 2019. № 4. С. 88–97.
11. Паротурбинная АЭС: пат. RU № 2602649 С2 / В. А. Хрусталеv, Д. О. Башлыков, А. А. Симонян. Опубл. 20.11.2016.
12. Паротурбинная АЭС с модуляцией по мощности: пат. RU № 2599722 С1 / В. А. Хрусталеv, В. М. Сучков. Опубл. 10.10.2016.
13. Носанкова, Л. В. Применение пускорезервной котельной для проекта АЭС 2006 [Электронный ресурс] / Л. В. Носанкова, Д. А. Марачёва // *Материалы 14 конф. молодых спец. по ядерным энерг. установкам, Москва, 21–22 марта 2012*. Режим доступа: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms2012/documents/kms2012-031.pdf>.
14. Новикова, З. Ю. Эффективность вытеснения ПВД в схеме ПГУ на базе АЭС / З. Ю. Новикова, В. А. Хрусталеv // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2012. № 9–10. С. 69–77.
15. Куличенков, В. П. Использование водорода в качестве топлива для транспортных средств / В. П. Куличенков // *Энергетик*. 2019. № 7. С. 39–43.

Поступила 22.01.2020 Подписана в печать 31.03.2020 Опубликована онлайн 29.01.2021

REFERENCES

1. Aminov R. Z., Khrustalev V. A., Dukhovenskii A. S., Osadchii A. I. (1990) *WWPR-Equipped Nuclear Power Plants: Modes, Characteristics, Efficiency*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 264 (in Russian).
2. Aminov R. Z., Shkret A. F., Burdenkova E. Yu., Garievskii M. V. (2011) Efficient Ways for Setting up the Operation of Nuclear Power Stations in Power Systems in the Base Load Mode. *Thermal Engineering*, 58 (5), 370–376. <https://doi.org/10.1134/S0040601511050016>.
3. Batenin V. M., Aminov R. Z., Shkret A. F., Garievskii M. V. (2012) The Comparative Effectiveness of Serving Peak Loads in the Variants of Providing Nuclear Power Plants with a Base Load. *Thermal Engineering*, 59 (7), 557–565. <https://doi.org/10.1134/S004060151207004X>.

4. Khrustalev B. M., Romaniouk V. N., Kovalev Y. N., Kolomytskaya N. A. (2010) To Problem Pertaining to Provision of Electric Power Load Schedules of Power Systems while Involving Potential of Power Technological Sources of Industrial Enterprises. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (1), 42–55 (in Russian).
5. 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 Obedinenii 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).
6. Zhezhelenko I. V. (2018) The Main Directions of Improving the Efficiency of Production, Transmission and Distribution of Electrical Energy. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (1), 28–35. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-1-28-35> (in Russian).
7. Rosen M. A. (2009) Energy, Environmental, Health and Cost Benefits of Cogeneration from Fossil Fuels and Nuclear Energy Using the Electrical Utility Facilities of a Province. *Energy for Sustainable Development*, 13 (1), 43–51.
8. *Opportunities for Cogeneration with Nuclear Energy* (2017) Vienna, International Atomic Energy Agency, 108.
9. Khrustalev V. A., Garievsky M. V. (2015) System Technical and Economic Efficiency of Combining Gas Turbines and Nuclear Power Plants with WWPR-1000. *Trudy Akademenergo = Transactions of Academenergo*, (4), 126–137 (in Russian).
10. Khrustalev V. A., Garievsky M. V. (2019) On the Efficiency of NPP Using Equipment of the Start-Up Secondary Boiler. *Trudy Akademenergo = Transactions of Academenergo*, (4), 88–97 (in Russian).
11. Khrustalev V. A., Bashlykov D. O., Simonyan A. A. (2016) *Steam Turbine Nuclear Power Plant*: Patent RU No 2602649 C2 (in Russian).
12. Khrustalev V. A., Suchkov V. M. (2016) *Steam Turbine Nuclear Power Plant with Power Modulation*: Patent RU No 2599722 C1 (in Russian).
13. Nosankova L. V., Maracheva D. A. (2012) Application of the Start-Up Secondary Boiler for the NPP 2006 Project. *Materialy 14 Konf. Molodykh Spets. po Yadernym Energ. Ustanovkam, Moskva, 21–22 Marta 2012* [Materials of the 14th Conference of Young Specialists in Nuclear Power Plants]. Available at: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms2012/documents/kms2012-031.pdf> (in Russian).
14. Novikova Z. Yu., Khrustalev V. A. (2012) Efficiency of Displacement of a High-Pressure Heater in the CCGT Scheme Based on Nuclear Power Plants. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Problemy Energetiki = Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, (9–10), 69–77 (in Russian).
15. Kulichenkov V. P. (2019) Use of Hydrogen as a Fuel for Vehicles. *Energetik*, (7), 39–43 (in Russian).

Received: 22 January 2020

Accepted: 31 March 2020

Published online: 29 January 2021