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

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕДИНЕНИЙ СНГ

ЭНЕРГЕТИКА

Том 66, № 5
2023

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

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Добрего К. В., Козначеев И. А. Моделирование функционального взаимодействия блоков гибридного накопителя электроэнергии 405

Любчик О. А., Быстрых С. В., Казак А. Н. Минимизация влияния возобновляемых источников энергии на работу энергосистемы путем совместного использования солнечной и ветряной генераций 423

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Свириденко И. И., Шевелев Д. В. Автономная термосифонная система пассивного отвода теплоты от первого контура реакторной установки: особенности функционирования, характеристики и основные преимущества 433

Иокова И. Л., Перехвал М. Б., Мигуцкий И. Е. Система теплоснабжения «умного дома» на базе централизованного теплоснабжения с утилизацией вторичных энергетических ресурсов при помощи теплового насоса 451

Ольшанский А. И., Голубев А. Н. Исследование тепло- и массообмена в процессе конвективной термообработки и сушки теплоизоляционных материалов и приближенное уравнение кривой сушки 461

ЭКОНОМИКА ЭНЕРГЕТИКИ

Садкин И. С., Шипицина А. П., Щинников П. А. Анализ стоимости котельного агрегата угольных энергоблоков в зависимости от начального давления пара и наличия систем очистки дымовых газов 478

Главный редактор Александр Михайлович Маляревич

Редакционная коллегия

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

Ведущий научный 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 29.09.2023. Формат бумаги $60\times84^{1}/_{8}$. Бумага мелованная. Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 11,5. Уч.-изд. л. 7,50. Тираж 100 экз. Дата выхода в свет . 2023. Заказ .

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

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 38200000006896 от 03.03.2014.
220013, г. Минск, пр. Независимости, 65

© Белорусский национальный технический университет, 2023

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

PROCEEDINGS OF THE CIS HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS AND POWER ENGINEERING ASSOCIATIONS

ENERGETIKA

V. 66, No 5
2023

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

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

Dobrego K. V., Koznacheev I. A. Modelling of Functional Interaction of Hybrid Energy Storage System Battery Units 405

Liubchyk V. A., Bystrykh S. V., Kazak A. N. Minimizing of Renewable Energy Sources Impact on the Energy System Operation by the Joint Use of Solar and Wind Generation 423

HEAT POWER ENGINEERING

Sviridenko I. I., Shevelyov D. V. Autonomous Thermosiphon System of Passive Residual Heat Removal from the Primary Circuit of the Reactor Plant: Features of Operation, Characteristics and Basic Advantages 433

Iokova I. L., Perekhval M. B., Migutskii I. E. The “Smart Home” Heat Supply System Based on District Heating with the Utilization of Secondary Energy Resources Using a heat Pump 451

Ol’shanskii A. I., Golubev A. N. Investigation of Heat and Mass Transfer in the Process of Convective Heat Treatment and Drying of Thermal Insulation Materials and Approximate Equation of the Drying Curve 461

POWER ENGINEERING ECONOMICS

Sadkin I. S., Shipitsina A. P., Shchinnikov P. A. Cost Analysis of the Boiler Unit of Coal Power Units Depending on the Initial Steam Pressure and the Availability of Flue Gas Purification Systems 478

Editor-in-Chief Aliaksandr M. Maliarevich

Editorial Board

W. T. WÓJCIK (Lublin University of Technology "Politechnika Lubelska", Lublin, Republic of Poland),
V. V. GALAKTIONOV (Russian Institute of Management named after V. P. Chernov, Moscow, Russian Federation),
M. DADO (Technical University in Zvolen, Zvolen, Slovak Republic),
K. V. DOBREGO (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus) (Deputy Editor-in-Chief),
P. W. ZHUKOWSKI (Lublin University of Technology "Politechnika Lubelska", Lublin, Republic of Poland),
V. V. IVASHECHKIN (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
A. S. KALINICHENKO (Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus),
A. KONNOV (Lund University, Sweden),
K. MAHKAMOV (Northumbria University, United Kingdom),
A. A. 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),
F. A. ROMANIUK (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
V. Yu. RUMIANTSEV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
A.-S. S. SAUHATAS (Riga Technical University, Riga, Republic of Latvia),
V. S. SEVERYANIN (Brest State Technical University, Brest, Republic of Belarus),
V. A. SEDNIN (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
B. S. SOROKA (The Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine),
V. A. STROEV (National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russian Federation),
E. V. TOROPOV (South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation),
G. N. UZAKOV (Karshi Engineering Economic Institute, Karshi, Republic of Uzbekistan),
B. M. KHROUSTALEV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
L. V. SHENETS (RUE "Belinvestenergosberezhenie", Minsk, Republic of Belarus)

Lead Science Editor V. N. Guryanchyk

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

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

Passed for printing 29.09.2023. Dimension of paper 60×84 1/8. Coated paper.
Digital printing. Type face Times. Conventional printed sheet 11,5.
An edition of 100 copies. Date of publishing 2023. Order list .

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

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

© Belarusian National Technical University, 2023

https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-405-422

УДК 621.355:004.94

Моделирование функционального взаимодействия блоков гибридного накопителя электроэнергии

К. В. Добрего[1)], И. А. Козначеев[2)]

[1)]Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),
[2)]Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова
Национальной академии наук Беларуси (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. Оптимизация технико-экономических параметров накопителей электроэнергии – необходимое условие для их широкого применения. В статье развивается общий подход и предлагается методика оценки экономической эффективности гибридизации электрохимических систем накопления энергии. С точки зрения оценки эффективности гибридизации накопителей исследуется ряд модельных систем, работающих в разных условиях нагрузки с использованием различных схем функционального взаимодействия блоков. В качестве базовых типов гибридных накопителей рассматриваются: свинцово-кислотные аккумуляторы (аккумуляторные кислотные батареи – АКБ), дополненные литий-ионными АКБ; свинцово-кислотные АКБ, дополненные суперконденсаторами; литий-ионные АКБ, дополненные суперконденсаторами. В качестве нагрузки системы накопления электроэнергии (СНЭ) рассматриваются: вилочный электропогрузчик, 30-квартирный жилой дом, а также 300-квартирный жилой комплекс. Используется количественно-качественная модель оценки эффективности гибридизации, основанная на сравнении стоимости буферизации электроэнергии каждым типом АКБ и гибридным накопителем в целом. Для всех случаев рассчитываются экономические показатели, характеризующие стоимость буферизации электроэнергии гибридными СНЭ, и анализируются преимущества той или иной схемы взаимодействия блоков гибридной СНЭ. Показано, что эффективность гибридизации демонстрирует сложную нелинейную зависимость от степени гибридизации, вид которой зависит как от типа используемых АКБ, так и от характера графика нагрузки, а также от типа функционального взаимодействия блоков. Характерной особенностью этой зависимости является резкое возрастание экономической эффективности при малых значениях $\alpha \leq 0{,}01$ и дальнейшее замедление роста или падение графика. Полученные результаты позволяют количественно сравнивать эффективность гибридизации СНЭ для конкретных условий ее эксплуатации. Рассмотренные модели и методы могут найти применение при проектировании СНЭ и систем «генератор – накопитель – потребитель», оценке экономической целесообразности гибридизации СНЭ.

Ключевые слова: накопитель электроэнергии, аккумулятор, суперконденсатор, гибридный накопитель, система управления аккумулятором, взаимодействие блоков, эквивалентная схема, моделирование

Для цитирования: Добрего, К. В. Моделирование функционального взаимодействия блоков гибридного накопителя электроэнергии / К. В. Добрего, И. А. Козначеев // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 66, № 5. С. 405–422. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-405-422

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

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

Modelling of Functional Interaction of Hybrid Energy Storage System Battery Units

K. V. Dobrego[1)], I. A. Koznacheev[2)]

[1)]Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),
[2)]Luikov's Heat and mass transfer Institute of National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Optimization of technical and economic parameters of electric power storage devices is a necessary condition for their widespread use. The article develops a general approach and proposes a methodology for assessing the economic efficiency of hybridization of electrochemical energy storage systems (ESSs). From the point of view of evaluating the effectiveness of storage hybridization, a number of model systems operating under different load conditions using different block functional interaction schemes are being investigated. Lead-acid batteries supplemented with lithium-ion batteries; lead-acid batteries supplemented with supercapacitors and lithium-ion batteries supplemented with supercapacitors are considered as the basic types of hybrid storage devices. An electric forklift, a 30-apartment residential building, as well as a 300-apartment residential complex are considered as the load of the ESS. A quantitative and qualitative model for evaluating the effectiveness of hybridization is used, based on comparing the cost of buffering electricity by each type of battery and the hybrid drive as a whole. For all cases, economic indicators characterizing the cost of buffering electricity by hybrid ESSs are calculated and the advantages of a particular scheme of interaction of hybrid ESS blocks are analyzed. It is shown that the hybridization efficiency demonstrates a complex nonlinear dependence on the degree of hybridization, the type of which depends both on the type of batteries used and on the nature of the load schedule, as well as on the type of functional interaction of the blocks. A specific feature of this dependence is a sharp increase in economic efficiency at small values of $\alpha \le 0.01$ and a further slowdown in the growth or fall of the graph. The obtained results make it possible to quantitatively compare the efficiency of the hybridization of the ESS for specific conditions of its operation. The considered models and methods can be used in the design of ESSs and "generator – storage – consumer" systems, assessment of the economic feasibility of hybridization of ESSs.

Keywords: electric energy storage, battery, supercapacitor, hybrid storage, battery management system (BMS), block interaction, equivalent circuit, modeling

For citation: Dobrego K. V., Koznacheev I. A. (2023) Modelling of Functional Interaction of Hybrid Energy Storage System Battery Units. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 66 (5), 405–422. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-405-422 (in Russian)

Введение

В настоящее время в мире все шире применяются системы накопления электрической энергии. Это связано с развитием электротранспорта, ростом «зеленой» энергетики, а также с необходимостью регулирования нагрузки крупных энергосистем. Рост рынка аккумуляторных кислотных батарей (АКБ) в последнее десятилетие составлял 20–30 %. Согласно данным BlumbergNEF [1], мощность и емкость систем накопления электроэнергии в мире выросла за 2022 г. на 16 ГВт / 35 ГВт·ч и приращение объемов накопителей продолжит расти в среднем на 23 % до конца 2030 г. При этом отмечается, что использование накопителей пока не стало экономически привлекательным в большинстве стран мира.

Одним из способов повышения эффективности работы накопителя электроэнергии является его гибридизация, т. е. использование разнородных аккумуляторных блоков, что позволяет выполнить требования технического задания по массе, мощности, запасаемой энергии, либо уменьшить стоимость буферизации электроэнергии по сравнению с накопителем, состоящим из однородных ячеек.

Задача гибридизации формулируется следующим образом. Пусть необходимо создать систему накопления электроэнергии (СНЭ), характеризующуюся рядом технико-экономических параметров. Значения одних параметров СНЭ определены требованиями технического задания (ТЗ), значения других могут варьироваться. Пусть СНЭ может быть построена с использованием АКБ двух типов. Необходимо определить доли ячеек основного и дополнительного типов, при которых удовлетворяются требования ТЗ и (или) достигаются оптимальные значения целевых параметров. Исходя из данной формулировки можно выделить два типа задач: первый – удовлетворение путем гибридизации обязательных требований по массе, мощности, запасаемой энергии и т. п.; второй – минимизация стоимости СНЭ в рамках ограничений по другим параметрам. Последняя задача более сложная, поскольку подразумевается существенное влияние АКБ дополнительного типа на режим работы АКБ основного типа и, следовательно, на экономические характеристики всей СНЭ.

Технические аспекты гибридизации накопительных блоков рассматривались в литературе достаточно давно [2]. Так, задача гибридизации литий-ионных батарей и суперконденсаторов (СК) для применения в системах связи и в гибридных электрических автомобилях обсуждалась и моделировалась уже в 1996 г. в работе [3], в которой показано, что отдаваемая мощность и эксплуатационный ресурс АКБ гибридного автомобиля может быть увеличен за счет пассивной параллельной интеграции с суперконденсаторами. При этом уменьшается не только электрохимический, но и тепловой стресс АКБ [4].

Одна из первых работ по моделированию параллельных гибридных СНЭ на литий-ионных АКБ и СК была опубликована Р. Дугалом в 2002 г. [5]. Автор моделировал суперконденсатор RC цепочкой, а батарею – как идеальный источник напряжения с заданным внутренним сопротивлением. Аналогичное моделирование пассивных гибридных систем проводилось и другими авторами [6]. В исследованиях показано, что лучший эффект от гибридизации СНЭ достигается при коротких импульсах и длинных периодах отдыха нагрузки. Показано, что пассивная гибридизация с использованием СК действует как фильтр низкочастотных составляющих нагрузки [7]. Исследование гибридного накопителя электроэнергии, состоящего из литий-ионной батареи и блока суперконденсаторов, с помощью пакета прикладных программ SimPowerSystems в MatLab представлено в [8]. Однако общих методик оценки эффективности гибридизации не представлено.

В обзорной статье [6] обсуждаются и сравниваются различные подходы к гибридизации аккумуляторных батарей и суперконденсаторов, такие как внешняя и внутренняя гибридизация, последовательная и параллельная

схемы. Основной акцент сделан на системах с внутренней гибридизацией. Собраны примеры современных технических решений в этой области. Выводы работы носят общий характер.

В [9] предложены методики характеризации суперконденсаторов. Установлены уровни тока и напряжения, частотные интервалы для их эффективного тестирования. Приводятся экспериментальные данные для определения функциональных характеристик СК в терминах энергии и плотности мощности, зависимость емкости от напряжения. Предложена электрическая модель суперкоденсаторов, учитывающая их характеристики для использования в качестве пиковых источников энергии для гибридных и электрических автомобилей. Проведена валидация модели как в частотном, так и во временном измерении.

В [8] проводится сравнительное исследование аккумуляторной батареи и гибридного источника энергии. Для нагрузок, имеющих импульсный характер, как пассивные, так и полуактивные и активные схемы гибридизации демонстрируют преимущество по сравнению с питанием только от аккумуляторов. Пассивная гибридная сборка, не требующая процессорного или иного сложного управления, – проста и дешева, однако не позволяет использовать весь потенциал системы. Активные гибридные сборки могут быть оптимизированы под нагрузку, но имеют высокую стоимость из-за необходимости двух DC–DC конверторов. Полуактивные гибридные сборки, использующие один DC–DC конвертор, представляются разумным компромиссом. Представлен математический анализ функционирования гибридных структур, даны рекомендации по их проектированию для случая импульсной нагрузки.

В последние годы большой интерес проявляется к гибридизации СНЭ для конкретных приложений, типов нагрузки, с рассмотрением экономического аспекта задачи. В [10] предложена методология определения оптимальной СНЭ для заданного применения. Метод использует усовершенствованные диаграммы Рагона (в осях удельная мощность – удельная энергия) для определения эффективности работы литий-ионных АКБ и СК зависимости от токового режима и температуры. Рассматривалось применение алгоритма как для электрических, так и гибридных автомобилей, в частности для Tesla Model S, тягача Tesla Semi и многоцелевого автомобиля повышенной проходимости.

Перечисленные и многие другие работы, исследующие технические схемы и решения по гибридным накопителям энергии, не затрагивают вопроса прямой оценки экономической эффективности гибридизации для различных видов нагрузки, в том числе для применения в энергетике и коммунальном хозяйстве.

В [11] представлена количественно-качественная модель оценки эффективности гибридизации, основанная на сравнении стоимости буферизации электроэнергии каждым типом АКБ и гибридным накопителем в целом. Введены понятия коэффициента синергетического эффекта гибридизации и степени внутренней буферизации электроэнергии. Предложен методический подход для расчета этих величин. Показано, что в общем случае ги-

бридизация СНЭ экономически эффективна, если стоимость буферизации электроэнергии дополнительным типом АКБ не более чем в 1,5–2 раза превышает соответствующую стоимость для АКБ основного блока. Так, дополнение литий-ионных блоков суперконденсаторами, как правило, экономически нецелесообразно, хотя может быть продиктовано требованиями по импульсной мощности СНЭ и в некоторых случаях обеспечить положительный экономический эффект.

Целью настоящей работы является продолжение начатой в [11] разработки методов технико-экономического обоснования использования той или иной схемы гибридизации для заданного применения СНЭ.

В статье моделируется взаимодействие блоков накопителей, исследуются различные варианты функционального взаимодействия блоков. В качестве базовых типов гибридных накопителей рассматриваются: 1) свинцово-кислотные АКБ, дополненные литий-ионными (Pb–Li); 2) свинцово-кислотные АКБ, дополненные СК (Pb–СК); 3) литий-ионные АКБ, дополненные СК (Li–СК). В качестве нагрузки СНЭ рассматриваются: вилочный электропогрузчик, 30-квартирный жилой дом, а также 300-квартирный жилой комплекс. Для всех объектов рассчитываются показатели, характеризующие экономическую эффективность буферизации электроэнергии гибридными СНЭ и анализируются преимущества каждой схемы взаимодействия блоков гибридной СНЭ. Полученные результаты позволяют количественно сравнивать эффект применения различных гибридных СНЭ для конкретных условий их эксплуатации. Рассмотренные модели и методы могут найти непосредственное применение при проектировании СНЭ и систем «генератор – накопитель – потребитель».

Взаимодействие блоков гибридного накопителя электроэнергии

Функциональное взаимодействие основного и дополнительного блоков СНЭ может иметь сложный характер и определяться характером нагрузки, емкостью блоков, ограничениями по току для каждого типа АКБ и т. п.

Разделение токовой нагрузки между блоками возможно осуществлять пропорционально их емкости или без сохранения этой пропорции, возможна также зарядка дополнительного блока за счет разрядки основного, и наоборот. Любые режимы с непропорциональным разделением тока назовем режимами с внутренней буферизацией электроэнергии, поскольку в общем случае при их осуществлении происходит перекачка электроэнергии из одного блока в другой.

Токовая нагрузка может распределяться между блоками в разных пропорциях в зависимости от силы тока, динамики его изменения, характера нагрузки, времени суток и т. д. От способа распределения нагрузки между блоками зависит синергетический эффект гибридизации. Рассмотрим некоторые простейшие модели распределения нагрузки между блоками.

Если *токовая нагрузка распределяется пропорционально* емкости блоков, внутренняя буферизация энергии отсутствует (рис. 1). Такой вид совместной работы не позволяет эффективно использовать функциональные особенности разнотипных АКБ.

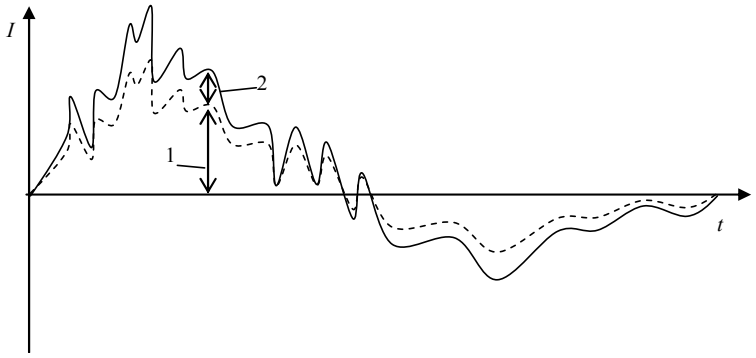


Рис. 1. Пропорциональное разделение нагрузки между основным и добавочным блоками: 1 – нагрузка основного блока; 2 – то же дополнительного

Fig. 1. Proportional separation of the load between the main and additional blocks: 1 – the load of the main block; 2 – the same additional

При *пороговой схеме взаимодействия* основной блок обеспечивает нагрузку до порогового уровня тока $I_{\text{п}}$. Пики нагрузки обслуживаются дополнительным блоком. Пороговый уровень тока $I_{\text{п}}$ устанавливается так, чтобы в среднем согласовать емкость дополнительного блока и нагрузку. Зарядка-разрядка основного и дополнительного блоков не синхронна и не пропорциональна емкости, поэтому можно говорить о перетоках энергии между ними.

Пример реализации такого взаимодействия содержится в [12], где исследуется работа СНЭ для электропогрузчика, состоящего из блока свинцово-кислотных АКБ и суперконденсаторов. Работа СНЭ управляется микропроцессором, который ограничивает ток нагрузки основного блока, при этом блок суперконденсаторов забирает на себя быстропеременную часть нагрузки, обеспечивая смягчение режима работы основного блока (рис. 2).

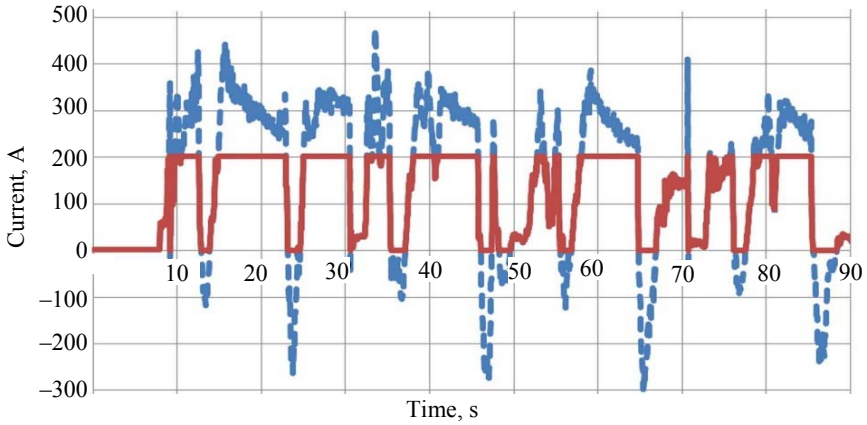


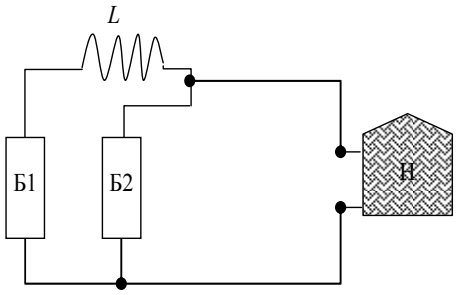
Рис. 2. Токовая нагрузка основного (свинцово-кислотные АКБ) накопителя энергии электропогрузчика [12]: голубая линия – без блока суперконденсаторов; красная – с блоком суперконденсаторов и ограничением по нагрузке

Fig. 2. Current load of the main (lead-acid batteries) energy storage of the electric loader [12]: the blue line – without a block of supercapacitors; the red line – with a block of supercapacitors and a load limit

Пороговое по скорости изменение нагрузки – это подключение дополнительного блока при превышении порога скорости изменения тока нагрузки или плавно при приближении к этому порогу. Как и в случае порогового взаимодействия, зарядка и разрядка не синхронны, имеют место перетоки заряда между блоками. Работа в таком режиме близка к ситуации фильтрации низких частот для основного блока (например, *L*-фильтра) (рис. 3), или к пассивному параллельному включению блоков с существенно различающимися внутренними сопротивлениями и индуктивностями [8].

Рис. 3. Разделение нагрузки между основным и дополнительным блоками посредством *L*-фильтра: Б1, Б2 – основной и дополнительный блоки накопителя; Н – активная нагрузка

Fig. 3. Load separation between the main and additional unitsby means of an *L*-filter: Б1, Б2 – the main and additional storage units; H – active load



Нелинейно-функциональное разделение нагрузки – разделение нагрузки определено нелинейной функцией от тока, например по закону

$$I_2 / I_1 = (I / I_o)^k, \quad (1)$$

где I_o и k – константы. При $k = 1$ ток нагрузки дополнительного блока $I_2 = I|I|/(|I| + I_o)$, а ток основного $I_1 = II_o/(|I| + I_o)$ ни при каких обстоятельствах не превосходит значение I_o. Знак модуля учитывает знакопеременность тока. Зарядка и разрядка основного и дополнительного блоков происходят синхронно, но не пропорционально емкости блоков.

Возможны другие способы разделения нагрузки, в том числе по смешанному градиентно-пороговому принципу.

Существенным моментом при выборе того или иного алгоритма взаимодействия блоков является стоимость его технической реализации. Для функционально сложного разделения нагрузки необходимы активные и полуактивные схемы управления [8], стоимость которых составляет существенную часть стоимости СНЭ.

Постановка задачи

Пусть имеется гибридная СНЭ, подключенная к нагрузке (в общем случае нагрузка и источник объединены, рис. 4).

Рассматриваем три варианта организации функционального взаимодействия основного и дополнительного блоков: пороговое разделение нагрузки, нелинейно-функциональное разделение нагрузки (1) и разделение нагрузки посредством *L*-фильтра (рис. 3).

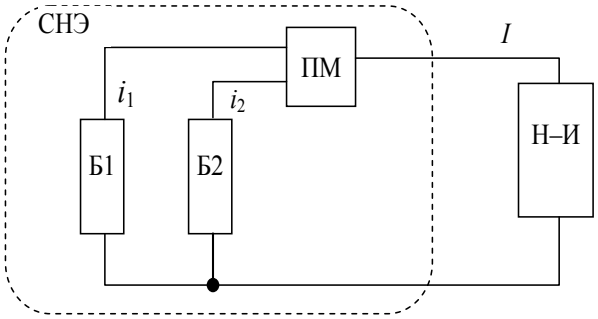


Рис. 4. Схема исследуемой системы:
Б1, Б2 – основной и дополнительный накопительные блоки;
ПМ – преобразователь мощности; Н–И – нагрузка–источник

Fig. 4. Scheme of the system under study:
Б1, Б2 – main and additional storage units;
ПМ – power converter; Н–И – load–source

Первые два варианта реализуются прямым алгебраическим расчетом, а третий – решением нестационарной электротехнической задачи с заданной дискретной функцией тока нагрузки I, где блоки Б1 и Б2 представляются схемами замещения (рис. 5). Для целей настоящей статьи используем наиболее простую схему замещения (рис. 5b). Значение индуктивности L устанавливается с учетом величины постоянной времени $\tau = L / R_1 \sim 10$ с (табл. 1).

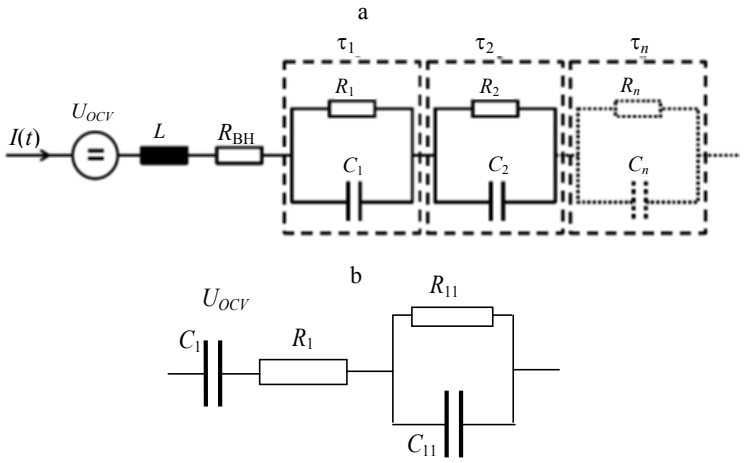


Рис. 5. Схема замещения аккумулятора с регулируемым источником напряжения (типа эквивалентной схемы Рендела) (a) и упрощенная схема (b) [13, 14]:
R_1 – внутреннее омическое сопротивление; R_{11} – динамическая часть сопротивления, связанная с поляризацией

Fig. 5. Battery replacement circuit with an adjustable voltage source (a kind of an equivalent Randall circuit) (a) and a simplified circuit (b) [13, 14]:
R_1 – internal ohmic resistance; R_{11} – the dynamic part of the resistance associated with polarization

Величина внутренней рекуперации электроэнергии [11] определяет степень интенсификации взаимодействия блоков относительно случая пропорционального распределения токовой нагрузки между ними. Определим эту величину как

$$\alpha\,\varepsilon(\alpha) \equiv \int_0^T \left|i_2 - \alpha I\right| dt \Big/ \int_0^T \left|I\right| dt, \tag{2}$$

где i_2 – ток дополнительного блока; I – то же нагрузки; α – степень гибридизации (доля емкости дополнительного блока в общей емкости СНЭ).

Величина $\varepsilon(\alpha)$ зависит от графика нагрузки $I(t)$, поэтому не является характеристикой только СНЭ. Расчеты показывают, что типичные зависимости $\varepsilon(\alpha)$ носят немонотонный характер – быстрый рост при малых α сменяется спадом и возможным незначительным подъемом при $\alpha \sim 0{,}5$. Наибольший интерес представляет оценка $\varepsilon(\alpha)$ при малых α, поскольку она характеризует возможность малой емкостью буферизировать значительный заряд при существенно нестационарном характере нагрузок. Соответствующие оценки, использующие спектральный анализ нагрузки, приведены в [11].

Для графиков нагрузки, заданных равномерным по времени массивом значений тока $\{I_1; \ldots; I_N\}$, расчетные формулы для α в соответствии с определением (2) имеют следующий вид.

Для *порогового разделения нагрузки* вычисления производим по формуле

$$\varepsilon(\alpha) = \frac{\sum_N \left|i_{2,i} - \alpha I_i\right|}{\sum_N \left|I_i\right|}, \tag{3}$$

где i – номер значения тока в массиве, $i_{2,i}$ – рассчитывается по алгоритму

$$\begin{cases} \text{if } \; I_i > I_{\text{п}} \rightarrow i_{2,1} = I_i - I_{\text{п}}; \\ \text{if } \; 0 < I_i \le I_{\text{п}} \rightarrow i_{2,1} = 0; \\ \text{if } \; I_i \le 0 \; \rightarrow i_{2,1} = I_i. \end{cases} \tag{4}$$

В случае дефицита емкости АКБ дополнительного типа состояние его зарядки отслеживается, что определяет алгоритм расчета $i_{2,i}$:

$$\begin{cases} \text{if } \; \left|I_i\right| > I_{\text{п}} \rightarrow i_{2,i} = I_i - I_{\text{п}}; \quad \text{SOC}_i = \text{SOC}_{i-1} - i_{2,i}\Delta t; \\ \text{if } \; \text{SOC}_i \le 0 \rightarrow i_{2,i} = 0; \\ \text{if } \; \left|I_i\right| \le I_{\text{п}} \rightarrow i_{2,i} = I_{\text{п}} - I_i; \quad \text{SOC}_i = \text{SOC}_{i-1} + i_{2,i}\Delta t; \\ \text{if } \; \text{SOC}_i \ge 1 \rightarrow i_{2,i} = 0, \end{cases} \tag{5}$$

SOC – состояние заряда аккумуляторов дополнительного блока, $\text{SOC} \subseteq [0; 1]$.

Для *нелинейно-функционального разделения нагрузки* (1) расчет проводится по формуле

$$\varepsilon(\alpha)=\sum_{N}\left|\frac{I_i\,|I_i|}{|I_i|+I_{\text{o}}}-\alpha I_i\right|\Big/\sum_{N}|I_i|, \tag{6}$$

где I_{o} – параметр модели разделения нагрузки (1).

В случае дефицита емкости аккумуляторов дополнительного типа проводится контроль SOC и расчет тока $i_{2,i}$ по алгоритму, аналогичному (5).

Общая эффективность гибридизации [11] рассчитывается подстановкой функции $\varepsilon(\alpha)$ в формулу

$$\eta(\alpha)=\frac{1}{\dfrac{1-\alpha}{1+\sigma(\alpha+\varepsilon(\alpha))}+\dfrac{\delta_2}{\delta_{10}}\alpha}-1, \tag{7}$$

где δ_{10} – стоимость буферизации электроэнергии основным блоком АКБ в отсутствие дополнительного; δ_2 – то же буферизации электроэнергии дополнительным блоком: σ – коэффициент, характеризующий эффект дополнительного блока АКБ на ресурс работы основного.

Для $\alpha << 1$ выполняется приближенное равенство

$$\eta(\alpha)\cong\sigma e\alpha+\alpha\left[1+\sigma(1-e\alpha)-\frac{\delta_2}{\delta_{10}}\right]. \tag{8}$$

При необходимости аналитического исследования функции $\eta(\alpha)$ можно аппроксимировать $\varepsilon(\alpha)$ дробно-рациональной функцией типа $\varepsilon=\dfrac{e\alpha}{1+d\alpha^2}$.

Модельные графики нагрузки

Для оценки эффективности взаимодействия блоков необходимо рассмотреть реалистичные графики нагрузки или характерные участки таких графиков с высоким разрешением по времени. Получасовые и другие усредненные графики нагрузки энергопотребляющих объектов не применимы, поскольку не содержат информацию о быстропеременных составляющих нагрузки.

Для настоящего исследования используем три модельных графика нагрузок: 1) график нагрузки электрического вилочного погрузчика [12], с дискретизацией 0,2 с [11, 12] (сокращенно – ГН1); 2) десятиминутный модельный график 30-квартирного дома в вечерний пик нагрузки, сгенерированный по модели [15] с дискретизацией 0,2 с (ГН2); 3) аналогичный график нагрузки 300-квартирного жилого комплекса (ГН3). Графики представляют собой массив моментальных значений токов или мощности (рис. 2, 6, 7).

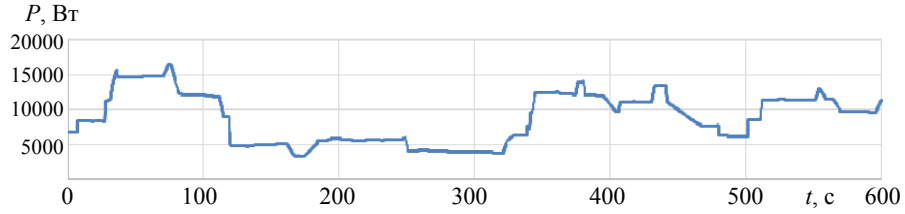


Рис. 6. Десятиминутный участок графика нагрузки 30-квартирного жилого дома в области вечернего пика

Fig. 6. A ten-minute section of the load graph of a 30-apartment residential building in the evening peak area

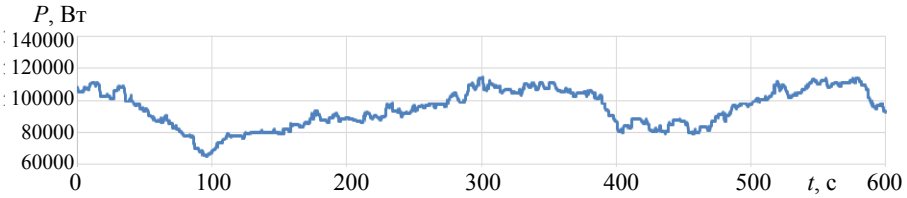


Рис. 7. Десятиминутный участок графика нагрузки 300-квартирного жилого дома в области вечернего пика

Fig. 7. A ten-minute section of the load graph of a 300-apartment residential building in the evening peak area

Очевидно, ГН3 отличается от ГН2 большей средней величиной энергопотребления и меньшим относительным разбросом (дисперсией) мощности ввиду большего количества случайно включаемых-выключаемых потребителей.

Рассматриваются три варианта взаимодействия блоков гибридного накопителя: 1) пороговое разделение нагрузки, где величина порога включения дополнительного блока $I_{\text{о}}$ задается от уровня среднего значения нагрузки по рассматриваемому участку $\bar{I}$ с соответствующим коэффициентом: $I_{\text{п}} = \bar{I}K_{I_{\text{о}}}$; 2) нелинейно-функциональное разделение нагрузки по закону (1), где параметр $I_{\text{о}}$ задается по уровню среднего значения нагрузки по рассматриваемому участку $\bar{I}$; 3) L-разделение нагрузки, параметры схемы замещения для этого варианта даны в табл. 2.

Следует отметить, что значение $K_{I_{\text{о}}}$ и другие параметры разделения нагрузки должны коррелировать с емкостью дополнительного блока АКБ для того, чтобы он не находился в постоянно заряженном или разряженном состоянии. Однако в настоящей статье будем придерживаться фиксированного значения $K_{I_{\text{о}}}$ (и $I_{\text{о}}$) для всех рассматриваемых графиков нагрузок и степеней гибридизации α.

В качестве модельных гибридных СНЭ рассматриваем: 1) свинцово-кислотные АКБ, дополненные литий-ионными (Pb–Li); 2) свинцово-кислотные АКБ, дополненные СК (Pb–СК); 3) литий-ионные АКБ, дополненные СК (Li–СК).

При расчете экономической эффективности гибридизации используем характерные значения стоимости буферизации электроэнергии для каждого из указанных типов накопителей [11].

Очевидно, существенный практический интерес представляет зависимость эффективности гибридизации от параметров, количественно определяющих взаимодействие блоков гибридной СНЭ, таких как I_o и L в схеме с индуктивным разделением нагрузки. Отдельные зависимости такого типа представлены ниже.

Результаты исследования

Для вышеперечисленных вариантов гибридных СНЭ были рассчитаны коэффициент внутренней буферизации электроэнергии $\varepsilon(\alpha)$ (рис. 8) и величина эффективности гибридизации $\eta(\alpha)$ (рис. 9–11) в зависимости от степени гибридизации α. Значения параметров модели, используемые при расчетах, представлены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Значения параметров, используемые для расчетов по (1)–(7)

Parameter values used for calculations according to (1)–(7)

Тип гибридной СНЭ	Общая емкость C_0 ГН1, А·ч	Общая емкость C_0 ГН2, А·ч	Общая емкость C_0 ГН3, А·ч	δ_{10}, \$/(кВт·ч)	δ_2, \$/(кВт·ч)	I_o	L, Гн	σ
Pb–Li	300	3000	30000	0,4	0,085	$\bar{I}$	0,4	1,0
Pb–СК	300	3000	30000	0,4	1,0	$\bar{I}$	0,4	1,0
Li–СК	300	3000	30000	0,085	1,0	$\bar{I}$	0,004	0,6

Таблица 2

Значения параметров схем замещения АКБ, используемые для расчетов *L*-разделения нагрузки

Values of the parameters of the rechargeable acid batteries replacement circuits used for the calculations of *L*-load separation

Тип аккумулятора	C_1*	R_1, Ом	C_{11}, Ф	R_{11}, Ом	U_o, В
Свинцово-кислотный	$(1-\alpha)C_0$	$6\cdot10^{-3}$	100	$6\cdot10^{-3}$	50
Литий-ионный	$(1-\alpha)C_0$	$2\cdot10^{-3}$	2500	$2\cdot10^{-3}$	50
Суперконденсатор	$(1-\alpha)C_0$	$2\cdot10^{-4}$	–	–	50
* 1 А·ч = 3600 Ф.					

Заметим, что разделение нагрузки по формальным «пороговому» и «нелинейно-функциональному» алгоритмам, в отличие от разделения L-фильтром, не учитывает электрофизические особенности основного и дополнительного блоков.

Ниже приведены результаты расчета коэффициента внутренней буферизации электроэнергии, рассчитанного, согласно (1), для случая разделения нагрузки L-фильтром. Для наглядности графиков при малых α использована логарифмическая шкала (рис. 8).

Из графиков видно, что коэффициент ε сложным образом зависит от характера нагрузки и типа гибридной системы. Кривые $\varepsilon(\alpha)$ могут пересекаться при малых значениях α. При этом значение коэффициента внутренней буферизации выше для более амплитудных и высокочастотных графиков нагрузки. Наименьшее значение ε реализуется для «сглаженного» графика нагрузки ГН3.

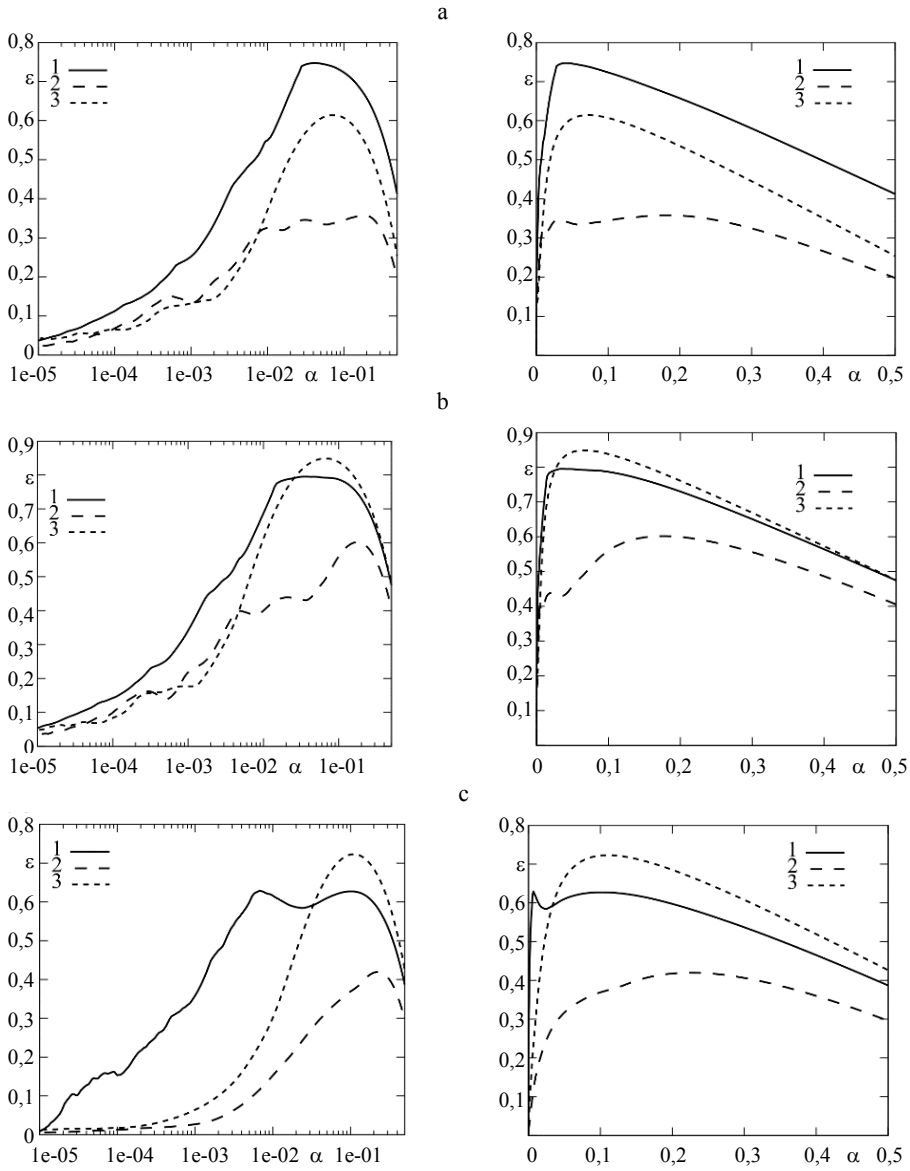


Рис. 8. Коэффициент внутренней буферизации электроэнергии как функция степени гибридизации α при разделении нагрузки *L*-фильтром: a – система Pb–Li; b – Pb–CK; c – Li–CK; 1 – ГН1; 2 – ГН2; 3 – ГН3

Fig. 8. The coefficient of internal buffering of electricity as a function of the degree of hybridization α when the load is separated by an *L*-filter: a – Pb–Li system; b – Pb–SC; c – Li–SC; 1 – load graph – ГН1; 2 – load graph ГН2; 3 – load graph ГН3

Из графиков видно, что экономическая эффективность гибридизации имеет монотонно возрастающий характер для системы Pb–Li и пикообразный характер для других рассмотренных систем. Данная закономерность объясняется тем, что стоимость буферизации литиевыми АКБ ниже, чем таковая свинцово-кислотными АКБ. Следовательно, создание Pb–Li систем обосновано лишь для снижения первоначальных инвестиций на СНЭ.

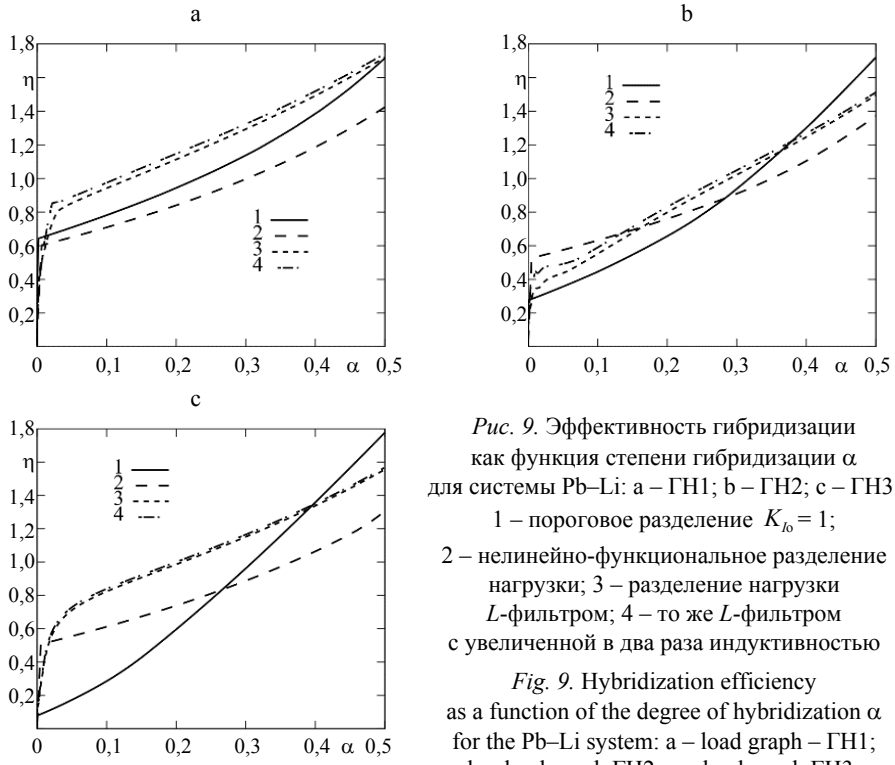


Рис. 9. Эффективность гибридизации как функция степени гибридизации α для системы Pb–Li: a – ГН1; b – ГН2; c – ГН3; 1 – пороговое разделение $K_{Io} = 1$; 2 – нелинейно-функциональное разделение нагрузки; 3 – разделение нагрузки *L*-фильтром; 4 – то же *L*-фильтром с увеличенной в два раза индуктивностью

Fig. 9. Hybridization efficiency as a function of the degree of hybridization α for the Pb–Li system: a – load graph – ГН1; b – load graph ГН2; c – load graph ГН3; 1 – threshold separation $K_{Io} = 1$; 2 – nonlinear functional load separation; 3 – load separation by *L*-filter; 4 – the same with an *L*-filter with twice the inductance

Очевидной особенностью всех графиков является резкое возрастание экономической эффективности с ростом α в области малых значений α (малые емкости дополнительного блока). Использование суперконденсаторов с емкостью порядка десятых долей процента от общей емкости СНЭ оказывается экономически выгодным при отсутствии дополнительных затрат на управление гибридной системой. Пороговый алгоритм разделения нагрузки оказывается наименее эффективным для сглаженной нагрузки ГН3, и наиболее эффективным для работы по графику электропогрузчика ГН1. При электроснабжении жилого дома несколько лучшую эффективность показывает нелинейно-функциональное разделение нагрузки (рис. 9c).

Однако в целом для менее «сглаженных» нагрузок ни один из исследованных алгоритмов взаимодействия блоков не имеет принципиального преимущества перед остальными и, следовательно, целесообразно использовать наиболее простой и экономичный алгоритм. При этом для максимального использования эффекта гибридизации необходимо согласование алгоритма и параметров управления гибридной СНЭ с режимом нагрузки.

Согласно расчетам наибольший эффект гибридизации (среди рассмотренных систем) реализуется для системы, построенной на свинцово-кислотных АКБ (рис. 10). Это объясняется относительно небольшой разницей в стоимости буферизации электроэнергии свинцово-кислотными АКБ и суперконденсаторами, а также значительным «синергетическим» эффектом (коэффициент σ).

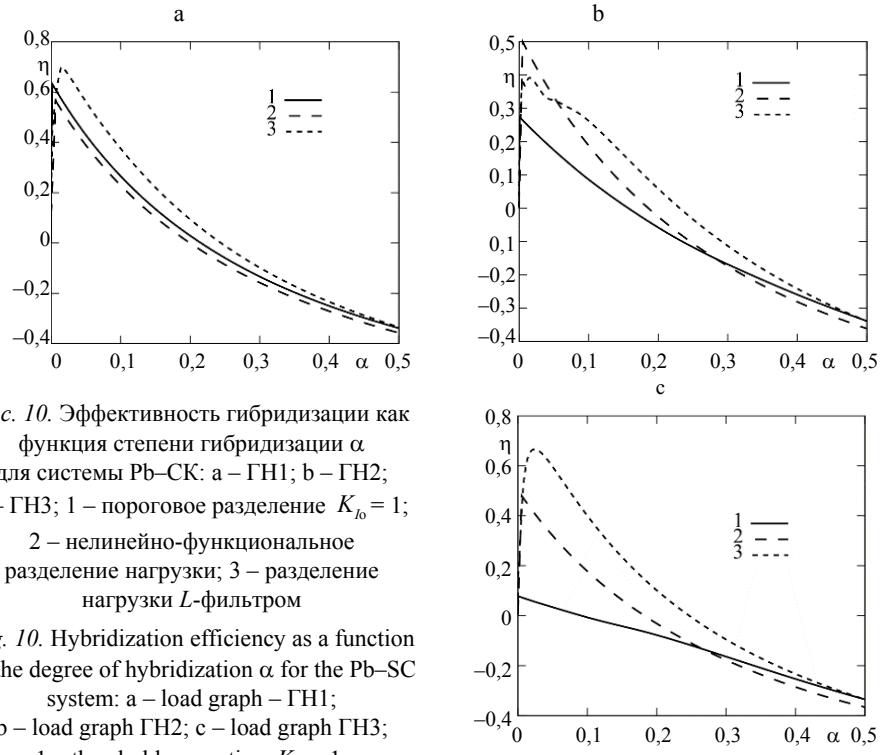


Рис. 10. Эффективность гибридизации как функция степени гибридизации α для системы Pb–СК: a – ГН1; b – ГН2; c – ГН3; 1 – пороговое разделение $K_{Io} = 1$; 2 – нелинейно-функциональное разделение нагрузки; 3 – разделение нагрузки *L*-фильтром

Fig. 10. Hybridization efficiency as a function of the degree of hybridization α for the Pb–SC system: a – load graph – ГН1; b – load graph ГН2; c – load graph ГН3; 1 – threshold separation $K_{Io} = 1$; 2 – nonlinear functional load separation; 3 – load separation by *L*-filter

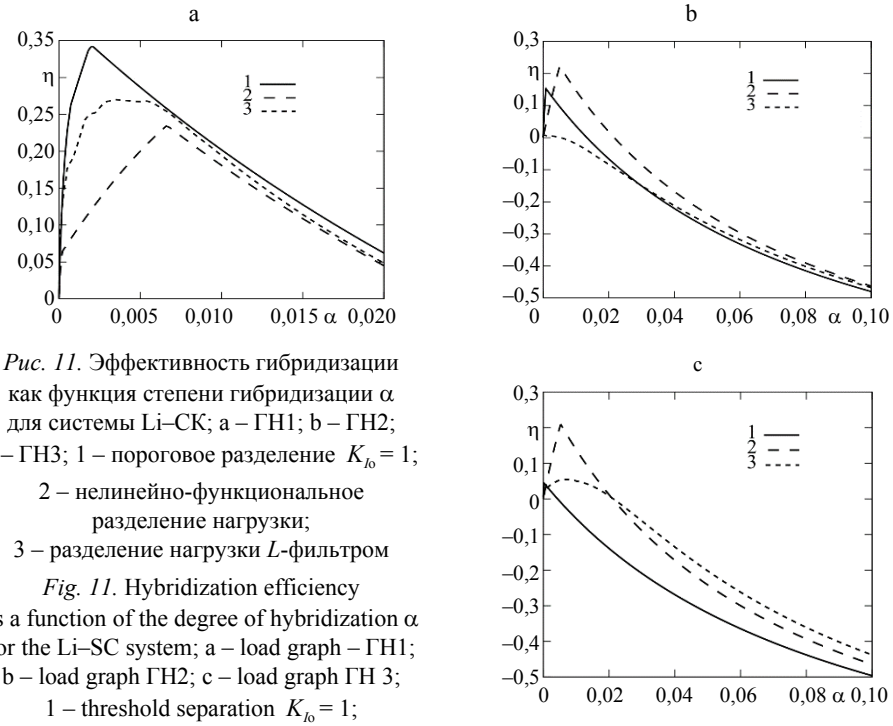


Рис. 11. Эффективность гибридизации как функция степени гибридизации α для системы Li–СК; a – ГН1; b – ГН2; c – ГН3; 1 – пороговое разделение $K_{Io} = 1$; 2 – нелинейно-функциональное разделение нагрузки; 3 – разделение нагрузки *L*-фильтром

Fig. 11. Hybridization efficiency as a function of the degree of hybridization α for the Li–SC system; a – load graph – ГН1; b – load graph ГН2; c – load graph ГН 3; 1 – threshold separation $K_{Io} = 1$; 2 – nonlinear functional load separation; 3 – load separation by *L*-filter

Для демонстрации эффекта варьирования параметров моделей взаимодействия блоков на работу гибридного накопителя представим зависимости эффективности гибридизации для системы Pb–СК при различных уровнях порога разделения нагрузки $I_{\text{п}}$ и графиках нагрузки (рис. 12).

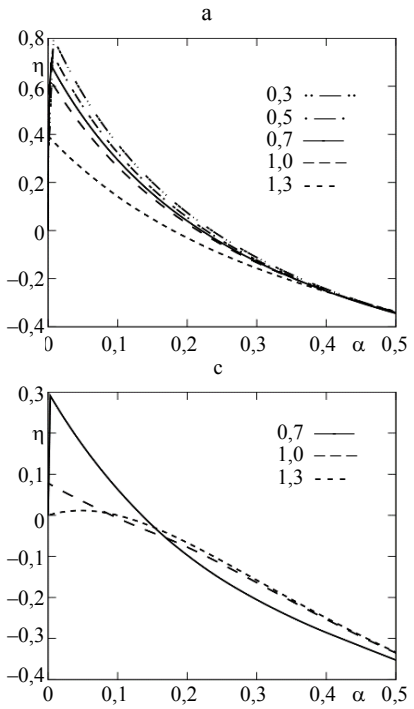


Рис. 12. Эффективность гибридизации как функция степени гибридизации α для системы Pb–СК при уровнях порога разделения нагрузки: K_{I_0} = 0,3; 0,5; 0,7; 1,0; 1,3 соответственно; a – ГН1; b – ГН2; c – ГН3

Fig. 12. Hybridization efficiency as a function of the degree of hybridization α for the Pb–SC system at load separation threshold levels: K_{I_0} = 0,3; 0,5; 0,7; 1,0; 1,3 accordingly; a – the load graph of ГН1; b – load graph ГН2; c – load graph ГН3

Из графиков видно, что максимальная эффективность достигается при низших уровнях разделения нагрузки, т. е. в этих условиях блок суперконденсаторов принимает на себя большую нагрузку. Однако при $I_{\text{п}} < \overline{I}$ энергия, запасенная СК, постоянно убывает, и через определенное время эффективность его работы с основным блоком резко падает. Следовательно, для адекватной оценки эффективности гибридизации при низких порогах разделения нагрузки необходимо рассматривать работу (проводить моделирование) в течение полного времени разрядного полуцикла.

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрена методика оценки эффективности гибридизации СНЭ для заданного графика нагрузки. Ее величина определена как относительное уменьшение стоимости буферизации электроэнергии при замещении части емкости СНЭ аккумуляторами дополнительного типа. Разработанная методика может использоваться для оценки экономической целесообразности гибридизации СНЭ и выбора оптимального алгоритма взаимодействия блоков.

2. Величина эффективности гибридизации демонстрирует специфическую нелинейную зависимость от степени гибридизации, вид которой зависит от типа используемых АКБ, характера графика нагрузки, а также от способа управления взаимодействием блоков. Характерной особенностью этой зависимости для рассмотренных вариантов взаимодействия и графиков нагрузок является резкое возрастание экономической эффективности при малых значениях $\alpha << 0,01$ с дальнейшим замедлением роста или падением графика.

3. Пороговый алгоритм разделения нагрузки оказывается наименее эффективным для сглаженной нагрузки (жилой комплекс) и наиболее эффективным для работы по графику электропогрузчика. При электроснабжении жилого дома несколько лучшую эффективность показывает нелинейно-функциональное разделение нагрузки. Однако ни один из рассмотренных алгоритмов взаимодействия блоков гибридной СНЭ не имеет универсального преимущества перед остальными в плане обеспечения экономической эффективности работы. Выбор алгоритма управления взаимодействием блоков должен осуществляться исходя из особенностей графика нагрузок потребителя. При этом стоимостная компонента электротехнического обеспечения взаимодействия может существенно влиять на итоговую экономическую эффективность гибридной СНЭ.

4. При проектировании СНЭ и оценке эффективности ее гибридизации, необходимо располагать информацией не только о стоимости АКБ и соответствующей стоимости буферизации электроэнергии, но также о предполагаемом графике нагрузки СНЭ, стоимости силового оборудования, реализующего тот или иной алгоритм взаимодействия блоков.

ЛИТЕРАТУРА

1. 1H 2023 Energy Storage Market Outlook [Electronic Resource]. Mode of access: https://about.bnef.com/blog/1h-2023-energy-storage-market-outlook. Date of access: 07.04.2023
2. Ragone, D. V. Review of Battery Systems for Electrically Powered Vehicles / D. V. Ragone // SAE Technical Paper. 1968. No. 680453. https://doi.org/10.4271/680453.
3. Miller, J. R. Battery-Capacitor Power Source for Digital Communication-Simulations Using Advanced Electrochemical Capacitors, in Electrochemical Capacitors, F.M. Delnick and M. Tomkiewicz, Editors, PV95-29. P. 246. The Electrochemical Society Proceedings Series, Pennington, NJ (1996).
4. Dougal, R. A. Power and Life Extension of Battery-Ultracapacitor Hybrids / R. A. Dougal, S. Liu, R. E. White // IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies. 2002. Vol. 25, No 1. P. 120–131. https://doi.org/10.1109/6144.991184.
5. Cericola, D. Hybridization of Rechargeable Batteries and Electrochemical Capacitors: Principles and Limits / D. Cericola, R. Kötz // Electrochimica Acta. 2012. Vol. 72. P. 1–17. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.03.151.
6. A frequency Domain Approach to Analyzing Passive Battery–Ultracapacitor Hybrids Supplying Periodic Pulsed Current Loads / A. Kuperman [et al.] // Energy Conversion and Management 2011. Vol. 52, N 12. P. 3433–3438. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.07.013.
7. Kuperman, A. Battery-Ultracapacitor Hybrids for Pulsed Current Loads: A Review / A. Kuperman, I. Aharon // Renewable and Sustainable Energy Review. 2011. Vol. 15, No 2. P. 981–992. https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.010.
8. Бельский, А. А. Применение гибридных накопителей электроэнергии для выравнивания графика нагрузки предприятий / А. А. Бельский, А. Н. Скамьин, О. С. Васильков // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 3. С. 212–222. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-3-212-222.
9. Characterization Methods and Modelling of Ultracapacitors for Use as Peak Power Sources / W. Lajnef [et al.] // Journal of Power Source. 2007. Vol. 168, Iss. 2. P. 553–560. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.02.049.
10. Catenaro, E. Framework for Energy Storage Selection to Design the Next Generation of Electrified Military Vehicles / E. Catenaro, D. M. Rizzo, S. Onori. Energy. 2021. Vol. 231. P. 120695. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120695.
11. Добрего, К. В. К вопросу создания гибридных систем накопления электроэнергии / К. В. Добрего // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 3. С. 215–232. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-3-215-232.
12. Hybrid Battery-Supercapacitor Storage for an Electric Forklift: a Life-Cycle Cost Assessment / M. Conte [et al.] // Journal of Applied Electrochemistry. 2014. Vol. 44, No 4. P. 523–532. https://doi.org/10.1007/s10800-014-0669-z.
13. A critical Overview of Definitions and Determination Techniques of the Internal Resistance Using Lithium-Ion, Lead-Acid, Nickel Metal-Hydride Batteries and Electrochemical Double-Layer Capacitors as Examples / G. Pilatovich [et al.] // Journal of Power Sources. 2015. Vol. 296. P. 365–376. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.07.073.

14. Гибридные электронакопители на основе аккумуляторов и суперконденсаторов / Ю. В. Бондаренко [и др.] // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2014. № 4. С. 33–38.
15. Добрего, К. В. Модель электрической нагрузки жилищно-коммунального объекта для исследования систем «генератор – накопитель – потребитель» методом Монте-Карло / К. В. Добрего // Наука и техника. 2017. Т. 16, № 2. С. 160–170. https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-2-160-170.

Поступила 21.04.2023 Подписана в печать 27.06.2023 Опубликована онлайн 29.09.2023

REFERENCES

1. *1H 2023 Energy Storage Market Outlook*. Available at: https://about.bnef.com/blog/1h-2023-energy-storage-market-outlook (accessed 07 April 2023).
2. Ragone D. V. (1968) Review of Battery Systems for Electrically Powered Vehicles. *SAE Technical Paper*, (680453). https://doi.org/10.4271/680453.
3. Miller J. R. (1996) Battery-Capacitor Power Source for Digital Communication-Simulations Using Advanced Electrochemical Capacitors, in Electrochemical Capacitors, F. M. Delnick and M. Tomkiewicz, Editors, PV95-29, 246. The Electrochemical Society Proceedings Series, Pennington, NJ.
4. Dougal R. A., Liu S., White R. E. (2002) Power and Life Extension of Battery-Ultracapacitor Hybrids. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 25 (1), 120–131 https://doi.org/13110.1109/6144.991184.
5. Cericola D., Kötz R. (2012) Hybridization of Rechargeable Batteries and Electrochemical Capacitors: Principles and Limits. *Electrochimica Acta* 2012, 72, 1–17. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.03.151.
6. Kuperman A., Aharon I., Kara A., Malki Sh. (2011) A Frequency Domain Approach to Analyzing Passive Battery–Ultracapacitor Hybrids Supplying Periodic Pulsed Current Loads. *Energy Conversion and Management,* 52 (12), 3433–3438. https://doi.org/10.1016/j. enconman.2011.07.013.
7. Kuperman A., Aharon I. (2011) Battery-Ultracapacitor Hybrids for Pulsed Current Loads: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 15 (2), 981–992. https://doi.org/10.1016/j.rser. 2010.11.010.
8. Belsky A. A., Skamyin A. N., Vasilkov O. S. (2020) The Use of Hybrid Energy Storage Devices for Balancing the Electricity Load Profile of Enterprises *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations,* 63 (3), 212–222. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-3-212-222.
9. Lajnef W., Vinassa J.-M., Briat O., Azzopardi S., Woirgard E. (2007) Characterization Methods and Modelling of Ultracapacitors for Use as Peak Power Sources. *Journal of Power Sources,* 168 (2), 553–560. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.02.049.
10. Catenaro E., Rizzo D. M., Onori S. (2021) Framework for Energy Storage Selection to Design the Next Generation of Electrified Military Vehicles. *Energy*, 231, 120695. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120695.
11. Dobrego K. V. (2023) On the Problem of Arrangement of Hybrid Energy Storage Systems. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations,* 66 (3), 215–232. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-3-215-232 (in Russian).
12. Conte M., Genovese A., Ortenzi F., Vellucci F. (2014) Hybrid Battery-Supercapacitor Storage for an Electric Forklift: a Life-Cycle Cost Assessment. *Journal of Applied Electrochemistry,* 44 (4), 523–532. https://doi.org/10.1007/s10800-014-0669-z.
13. Piłatowicz G., Marongiu A., Drillkens J., Sinhuber Ph., Sauer D. U. (2015)A Critical Overview of Definitions and Determination Techniques Of the Internal Resistance Using Lithium-Ion, Lead-Acid, Nickel Metal-Hydride Batteries and Electrochemical Double-Layer Capacitors as Examples. *Journal of Power Sources*, 296, 365–376, https://doi.org/10.1016/j.jpowsour. 2015.07.073.
14. Bondarenko Yu. V., Safronov P. S., Bondarenko O. F., Sydorets V. M., Rogozina T. S. (2014) The Hybrid Energy Storages Based on Batteries and Ultracapacitors for Contact Microwelding. *Tekhnologiya i Konstruirovanie v Elektronnoi Apparature = Technology and Design in Electronic Equipment*, (4), 33–38 (in Russian).
15. Dobrego K. V. (2017) Model for Electric Load of Community Housing Projects to Investigate "Generator – Accumulator – Consumer" System while Using Monte-Carlo Method. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique,*16 (2), 160–170. https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-2-160-170 (in Russian).

Received: 21 April 2023 Accepted: 27 June 2023 Published online: 29 September 2023

https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-423-432

УДК 620.91

Минимизация влияния возобновляемых источников энергии на работу энергосистемы путем совместного использования солнечной и ветряной генераций

О. А. Любчик[1)], С. В. Быстрых[1)], А. Н. Казак[1)]

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

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. Цель исследования – проверка гипотезы о существовании оптимального соотношения установленной мощности солнечных и ветряных электростанций, позволяющего при большой установленной мощности возобновляемых источников энергии с переменным характером работы минимизировать влияние их генерации на работу энергосистемы и снизить емкость накопителей энергии при их использовании в системе. Были поставлены следующие задачи: на основе метеорологических данных произвести почасовой расчет выработки энергии для нескольких лет комплексами из солнечных и ветряных электростанций различной комбинации мощностей, провести анализ выработки и при подтверждении гипотезы найти искомое соотношение мощностей. В ходе исследования применялись методы моделирования и численные методы решения задач оптимизации: метод итерации и нелинейный метод наименьших квадратов. Определен оптимальный диапазон соотношения установленных мощностей солнечных и ветряных электростанций в отдельном комплексе и в целом энергосистеме для условий Республики Беларусь, который составил от 0,4:1,0 до 0,6:1,0 (солнце:ветер). Комплексы энергоисточников, имеющих соотношение мощностей в указанном диапазоне, позволяют снизить требуемую емкость систем накопления энергии по сравнению с емкостью для только солнечных или только ветряных электростанций в 2,6–4 раза, что ведет к уменьшению капитальных затрат и срока окупаемости проекта. Выход за пределы рекомендуемого диапазона приводит к выраженному переизбытку либо дефициту выработки электроэнергии в различные периоды суток разных периодов года в зависимости от соотношения установленных мощностей. Также определена оптимальная удельная емкость систем накопления энергии для комплексов, состоящих из солнечных и ветряных электростанций в рекомендуемых соотношениях установленных мощностей, которая составила 0,4–0,8 кВт·ч/кВт суммарной установленной мощности.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, солнечные электростанции, ветряные электростанции, график нагрузки энергосистемы, выработка электроэнергии, оптимизация, накопители энергии

Для цитирования: Любчик, О. А. Минимизация влияния возобновляемых источников энергии на работу энергосистемы путем совместного использования солнечной и ветряной генераций / О. А. Любчик, С. В. Быстрых, А. Н. Казак // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 66, № 5. С. 423–432. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-423-432

Адрес для переписки	**Address for correspondence**
Любчик Ольга Андреевна	Liubchyk V. A.
Белорусский национальный технический университет	Belarusian National Technical University
просп. Независимости, 65/2,	65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, г. Минск, Республика Беларусь	220013, Minsk, Republic of Belarus
Тел.: +375 17 293-96-24	Tel.: +375 17 293-96-24
olga.liubchik@yandex.ru	olga.liubchik@yandex.ru

Minimizing of Renewable Energy Sources Impact on the Energy System Operation by the Joint Use of Solar and Wind Generation

V. A. Liubchyk[1)], S. V. Bystrykh[1)], A. N. Kazak[1)]

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

Abstract. The purpose of the study was to test the hypothesis of the existence of an optimal ratio of the installed capacity of solar and wind power plants, which allows, with a large installed capacity of renewable energy sources with a variable nature of operation, to minimize the impact of their generation on the operation of the power system and reduce the capacity of energy storage devices when they are used in the system. The following tasks were set: on the basis of meteorological data, to calculate hourly energy generation by complexes of solar and wind power plants of various combinations of capacities for several years, analyze the generation and, if the hypothesis is confirmed, find the optimal ratio of capacities. In the course of the study, modeling methods and numerical methods for solving optimization problems were used, viz. the iteration method and the nonlinear least squares method. The optimal range of the ratio of solar and wind power plants installed capacities in a separate complex and in the whole power system for the conditions of the Republic of Belarus was determined, which was 0.4:1–0.6:1 (sun:wind). Complexes of energy sources with a power ratio in the specified range can reduce the required capacity of energy storage systems compared to the capacity for only solar or only wind power plants by 2.6–4.0 times, which leads to a reduction in capital costs and the payback period of the project. Going beyond the recommended range leads to a pronounced surplus or shortage of electricity generation in different periods of the day of different periods of the year, depending on the ratio of installed capacities. Also, the optimal specific capacity of energy storage systems for complexes consisting of solar and wind power plants in the installed capacities recommended ratios was determined, which amounted to 0.4–0.8 kW·h/kW of total installed capacity.

Keywords: renewable energy sources, solar power plants, wind power plants, power system load schedule, power generation, optimization, energy storage

For citation: Liubchyk V. A., Bystrykh S. V., Kazak A. N. (2023) Minimizing of Renewable Energy Sources Impact on the Energy System Operation by the Joint Use of Solar and Wind Generation. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 66 (5), 423–432. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-423-432 (in Russian)

Введение

Вопросы укрепления энергетической безопасности всегда являлись важными для Республики Беларусь ввиду низкой обеспеченности страны собственными топливно-энергетическими ресурсами. Наиболее широко освещаемыми шагами в направлении обеспечения должного уровня энергобезопасности стали строительство и ввод в эксплуатацию БелАЭС [1–3]. Однако возможности атомной энергетики в повышении уровня энергобезопасности ограничены, так как последняя формируется целым набором индикаторов [4, 5]. К тому же низкая маневренность атомных станций ввиду экономических и технических причин делает нецелесообразным переход на полное электроснабжение страны от энергии ядерного топлива. Поэтому диверсификация структуры и поставщиков топливно-энергетических ресурсов не теряет актуальности, что подтверждается набором индикато-

ров действующей Концепции энергетической безопасности Республики Беларусь.

В настоящее время по-прежнему доминирующим видом топлива в стране является природный газ, импортируемый из Российской Федерации. Смена поставщика значительно повысит себестоимость производимой энергии и сопряжена с трудностями доставки. Смена же природного газа на другие ископаемые виды топлива повлияет на экологическую составляющую производства энергии, вызвав увеличение выбросов парниковых газов и прочих загрязняющих веществ.

Альтернативой диверсификации видов энергоресурсов может стать более активное использование в стране местных, в том числе возобновляемых, источников энергии, что одновременно снизит зависимость от доминирующего экспортера энергоресурсов в Республику Беларусь. Это отмечено в качестве первой стратегической задачи в Государственной программе «Энергосбережение» на 2021–2025 гг.

Потенциал получения электроэнергии от солнца и ветра в Республике Беларусь и особенности интеграции солнечных и ветроэлектростанций в энергосистему

Наибольшим как теоретическим, так и технически возможным потенциалом в Республике Беларусь среди возобновляемых источников энергии обладают солнце и ветер: технически возможный потенциал 153–277 и 32–46 млрд кВт·ч/год соответственно [6, 7].

По официально представленным в открытом доступе данным [8], на начало 2022 г. установленная мощность энергоустановок, работающих за счет энергии солнца, в Республике Беларусь составила 272,5 МВт, за счет энергии ветра – 120 МВт, что позволило в 2021 г. выработать 173,8 и 173,0 млн кВт·ч электрической энергии соответственно. Таким образом, можно говорить об использовании технически доступного потенциала энергии солнца лишь на 0,06–0,11 %, а энергии ветра – на 0,38–0,54 %.

Однако зависимость от погодных условий и трудоемкость прогнозирования выработки энергии [9] вносят определенные сложности в регулирование работы энергосистемы при широком внедрении энергоустановок, работающих за счет энергии солнца и ветра, что подробно рассмотрено в работе [10]. Предложенный в ней механизм загрузки мощностей позволяет сохранить нормальный режим работы КЭС, однако рассматривает солнечные и ветряные электростанции в комплексе, без учета особенностей их работы.

В исследовании [11] рассмотрена экономическая целесообразность применения систем накопления энергии (СНЭ) на базе литий-ионных аккумуляторов в Белорусской энергосистеме для сглаживания переменного характера работы солнечных и ветроустановок. Расчеты проводились исходя из возможности обеспечения полного выравнивания нормализован-

ного суточного графика выработки возобновляемыми источниками энергии с переменным характером работы, каждым в отдельности. Требуемая емкость СНЭ составила 1,6–2,1 кВт·ч на 1 кВт установленной мощности источника энергии, что привело к значительному увеличению простого срока окупаемости.

Авторами сформирована гипотеза о существовании оптимального диапазона соотношений установленных мощностей солнечной и ветряной генераций, позволяющих им при совместной параллельной работе взаимно смягчать колебания выработки энергии, обусловленные погодными условиями и сезонностью, и таким образом снизить необходимую удельную емкость систем накопления энергии.

Описание методики проведения исследования

Для анализа динамики выработки электроэнергии за счет энергии солнца и ветра в Республике Беларусь сформированы массивы данных, представляющих собой значения фактического прихода солнечной радиации на горизонтальную поверхность земли и скорости ветра на высоте 50 м от поверхности земли для 18 контрольных точек, равномерно расположенных по территории страны. Данные взяты за период трех лет с интервалом в один час, что дало возможность произвести дальнейшие вычисления на основе почти полумиллиона исходных значений для каждого из источников энергии.

Для вычисления выработки энергии от солнечных электростанций приняты оптимальные ориентация по сторонам света и угол наклона солнечной батареи к горизонту и эффективность преобразования энергии солнца в электрическую в размере 20 %. При определении выработки энергии ветряной электростанцией использована полученная на основе характеристик нескольких ветроустановок зависимость выдаваемой мощности от скорости ветра.

В отличие от ранее рассмотренного расчета [11], в качестве задачи предлагается установить не обеспечение полного выравнивания нормализованного суточного графика, а повторение возобновляемыми источниками энергии формы суточного графика энергосистемы, характерного для буднего дня отопительного и неотопительного периодов [12]. Для удобства введем понятие модели суточного графика нагрузки энергосистемы (далее – модель графика нагрузки). Под моделью графика нагрузки будем понимать график, построенный по часовым значениям нагрузки в энергосистеме с применением для всех значений единого уменьшающего коэффициента, позволяющего отобразить форму реального суточного графика на графике суточной выработки энергии установками малой мощности. Часовые значения нагрузки $W_{\text{ОЭС,мод}}$ для построения модели графика нагрузки для отопительного и для неотопительного периодов в отдельности определяются с помощью формулы

$$W_{\text{ОЭС,мод}} = W_{\text{ОЭС,ч}} \frac{W_{\text{ВИЭ,сут}}}{W_{\text{ОЭС,сут}}}, \quad (1)$$

где $W_{\text{ОЭС,ч}}$ – часовые значения нагрузки в энергосистеме для типового рабочего дня; $W_{\text{ВИЭ,сут}}$ – средняя суммарная выработка за сутки с помощью установок малой мощности, работающих за счет возобновляемых источников энергии; $W_{\text{ОЭС,сут}}$ – суммарная нагрузка за сутки в энергосистеме.

Исследование проводилось с применением методов моделирования и численных методов решения задачи оптимизации: метода итерации и нелинейного метода наименьших квадратов.

В качестве первой целевой функции выбрано среднеквадратичное отклонение почасовой выработки за счет возобновляемых источников энергии $W_{\text{ВИЭ,ч}}$ от почасовых значений модели графика нагрузки $W_{\text{ОЭС,мод}}$ (рис. 1). Для удобства на шкале справа нанесены соответствующие модели графика нагрузки значения $W_{\text{ОЭС,ч}}$.

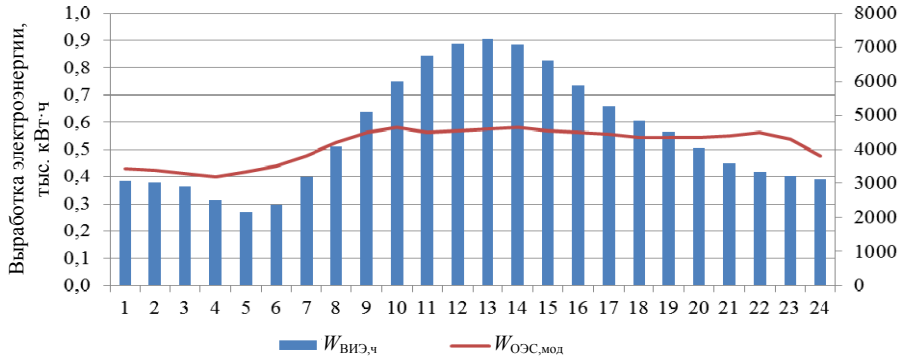


Рис. 1. Пример динамики суточной выработки энергии комплексом из солнечной и ветряной станций (2,3 МВт) и модели графика нагрузки для типового дня неотопительного периода, тыс. кВт·ч

Fig. 1. An example of the dynamics of daily energy production by a complex of a solar and wind power plant (2.3 MW) and a model of the load schedule for a typical day of the non-heating period, thousand kW·h

В идеальном случае значения столбчатой диаграммы ($W_{\text{ВИЭ,ч}}$) и значения кривой ($W_{\text{ОЭС,мод}}$) должны совпадать. Задачей было найти соотношение установленной мощности солнечных и ветряных электростанций, дающих минимальное годовое среднеквадратичное отклонение

$$\sum_{t=1}^{8760} \left(W_{\text{ОЭС,мод},t} - W_{\text{ВИЭ,ч},t} \right)^2 \to \min.$$

Однако расчеты показали, что в ряде случаев минимальному среднеквадратичному отклонению соответствуют мощности, позволяющие накопить в СНЭ значительно больше либо гораздо меньше энергии, чем впоследствии требуется отдать в энергосистему. В связи с этим были введены

дополнительные функции. Первой дополнительной функцией стал модуль произведения максимального за год переизбытка выработки ($\Sigma\Delta W^{+}$) (накопление энергии в СНЭ, в разрезе суток – период с 9 до 19 ч на рис. 1) и максимального дефицита выработки ($\Sigma\Delta W^{-}$) (отдача энергии от СНЭ, в разрезе суток – период с 20 до 8 ч на рис. 1). В реальных условиях в зависимости от погодных условий периоды дефицита и переизбытка выработки электроэнергии возобновляемыми источниками энергии могут длиться более продолжительное время, что увеличивает требуемую емкость накопителей энергии (учтено в исследовании). Второй дополнительной функцией стала разность между максимальным за год переизбытком выработки и максимальным за год дефицитом выработки. Для обеих дополнительных функций, как и для основной функции, проводился поиск минимальных значений путем фиксирования мощности установки на одном источнике энергии (например, ветре) и пошаговом изменении мощности установок на другом источнике энергии (солнце). При этом дополнительно установлено ограничение о не более чем 10-кратном максимальном отношении установленных мощностей между собой.

Введение дополнительных функций позволило скорректировать полученные ранее результаты и не только найти для смоделированной системы минимальные значения требуемой емкости СНЭ, но и сократить до минимума разницу между необходимым накоплением и отдачей энергии от СНЭ.

Описание результатов исследования

В результате проведенного моделирования с поиском решений методом итерации был найден диапазон рекомендуемого соотношения установленных мощностей солнечных и ветряных электростанций, который составил от 0,4:1,0 до 0,6:1,0. Комплексы энергоисточников, имеющие соотношение мощностей в указанном диапазоне, позволяют снизить требуемую емкость СНЭ по сравнению с емкостью СНЭ только для солнечных или только для ветряных электростанций в 2,6–4 раза – с 1,6–2,1 кВт·ч/кВт установленной мощности [11] до 0,4–0,8 кВт·ч/кВт установленной мощности, что ведет к снижению капитальных затрат и срока окупаемости проекта.

На рис. 2 представлена выработка электроэнергии комплексом 2,25 МВт в типовой день для каждого из сезонов года при соотношении установленной мощности солнечных электростанций к ветряным 0,5:1,0.

Как видно из рисунка, в зимнее время график имеет наименьшие колебания по часам, что обеспечивается большими скоростями ветра в холодный период года и низким приходом излучения от солнца. Весной и осенью колебания возрастают, имея максимум суточных колебаний летом, что объясняется снижением выработки энергии ветроустановками и ростом – солнечными. Однако в целом график близок по форме к типовым графикам нагрузки в энергосистеме для буднего дня.

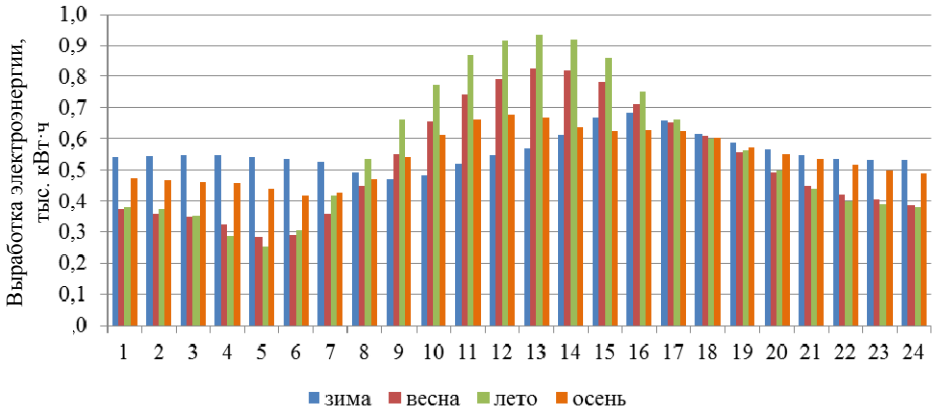


Рис. 2. График выработки энергии комплексом, состоящим из солнечной (0,75 МВт) и ветряной (1,5 МВт) электростанций в типовой день по сезонам года, тыс. кВт·ч

Fig. 2. Schedule of energy generation by a complex consisting of a solar (0.75 MW) and a wind (1.5 MW) power plant on a typical day by season, thousand kW·h

На рис. 3 для сравнения представлена выработка электроэнергии комплексом с соотношением 1:1 общей мощностью 3,0 МВт, где становится заметным явный переизбыток энергии в дневные часы в течение весеннего и летнего периодов.

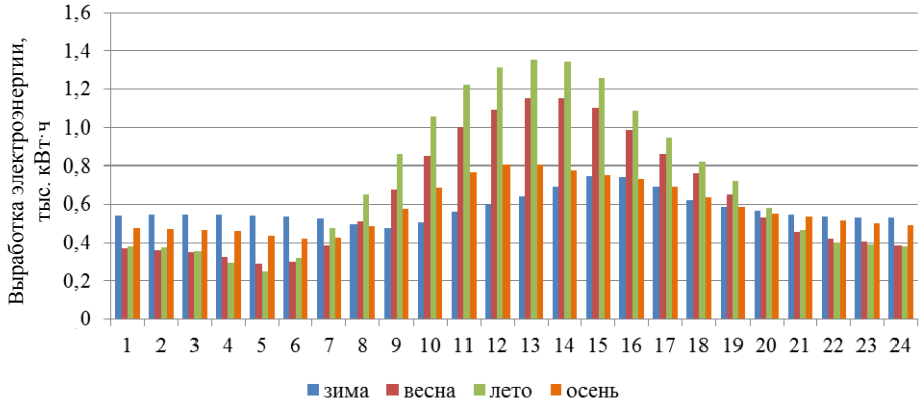


Рис. 3. График выработки энергии комплексом, состоящим из солнечной (1,5 МВт) и ветряной (1,5 МВт) электростанций в типовой день по сезонам года, тыс. кВт·ч

Fig. 3. Schedule of energy generation by a complex consisting of a solar (1.5 MW) and a wind (1.5 MW) power plant on a typical day by season, thousand kW·h

Выход за рекомендуемый диапазон соотношения мощностей и сильное занижение установленной мощности солнечных электростанций также приводит к нежелательным отклонениям от модели графика нагрузки. На графике рис. 4 продемонстрированы результаты моделирования выработки энергии комплексом общей мощностью 1,8 МВт с соотношением 0,2:1,0, где дисбаланс будет наблюдаться уже в осенний и зимний периоды.

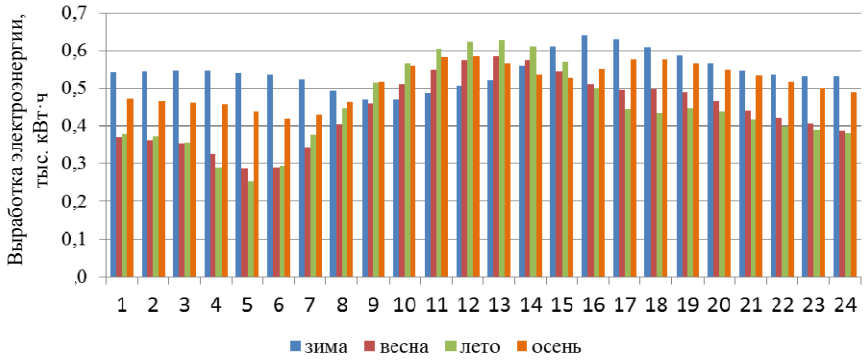


Рис. 4. График выработки энергии комплексом, состоящим из солнечной (0,3 МВт) и ветряной (1,5 МВт) электростанций в типовой день по сезонам года, тыс. кВт·ч

Fig. 4. Schedule of energy generation by a complex consisting of a solar (0.3 MW) and a wind (1.5 MW) power plant on a typical day by season, thousand kW·h

Большая доля ветряных установок увеличивает выработку энергии в ночное время суток и не позволяет повысить выработку в дневное время, когда в энергосистеме наблюдается наибольшее потребление. Большая доля в комплексе солнечных установок приводит к излишнему росту вырабатываемой энергии в дневное время в теплый период года. Поэтому важно соблюдение баланса и комплексное использование солнечной и ветряной генераций для более устойчивой совместной работы, минимизации влияния возобновляемых источников энергии на процессы регулирования в энергосистеме и снижения емкости накопителей энергии при их применении.

ВЫВОДЫ

1. Определен оптимальный диапазон соотношения установленных мощностей солнечных и ветряных электростанций в отдельном комплексе и энергосистеме для условий Республики Беларусь, который составил от 0,4:1,0 до 0,6:1,0 (солнце:ветер). Данное соотношение мощностей позволяет вырабатывать электроэнергию за счет указанных возобновляемых источников энергии в размере, максимально близком к значениям модели суточного графика нагрузки в энергосистеме.

2. Выход за пределы рекомендуемого диапазона приводит либо к переизбытку выработки в ночное время в течение холодного периода года с соответствующим дефицитом в дневное время в течение теплого периода года при превышении генерации за счет ветра, либо к переизбытку в дневное время в теплый период года и дефициту в ночное время в холодный период года при превышении генерации за счет солнца.

3. Определена оптимальная удельная мощность систем накопления энергии для комплексов, состоящих из солнечных и ветряных электростанций в рекомендуемых соотношениях установленных мощностей, которая составила 0,4–0,8 кВт·ч/кВт суммарной установленной мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михалевич, А. А. Энергетическая безопасность / А. А. Михалевич // Наука и инновации. 2021. № 10. С. 10–13.
2. Чиж, Е. П. Энергетическая безопасность Республики Беларусь с учетом ввода БелАЭС [Электронный ресурс] / Е. П. Чиж // Модернизация хозяйственного механизма сквозь призму экономических, правовых, социальных и инженерных подходов: сб. материалов XIII Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 50-летию Научной школы в области исследования модернизации экономики, 22 ноября 2018 г. / редкол.: С. Ю. Солодовников (председатель) [и др.]. Минск: БНТУ, 2018. Режим доступа: https://rep.bntu.by/handle/data/53105?show=full.
3. Зорина, Т. Г. Влияние тенденций развития энергетического сектора Республики Беларусь на укрепление энергетической безопасности / Т. Г. Зорина, О. А. Любчик // Экономическая безопасность как основной приоритет устойчивого развития государства: тез. докл. респ. науч.-практ. конф. (Минск, 26 нояб. 2021 г.) / учреждение образования «Акад. М-ва внутр. дел Респ. Беларусь»; редкол.: О. В. Маркова (отв. ред.) [и др.]. Минск: Академия МВД, 2021. С. 59–62.
4. Концепция энергетической безопасности Республики Беларусь [Электронный ресурс]: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 23 декабря 2015, № 1084 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. Режим доступа: https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C21501084. Дата доступа: 12.06.2023.
5. Методические подходы к решению проблемы энергетической безопасности Молдовы и Беларуси / Е. В. Быкова [и др.]. Кишинев, 2010. 100 с. (Сер. Энергетическая безопасность; кн. 5).
6. Любчик, О. Анализ эффективности работы солнечных электростанций в Республике Беларусь / О. Любчик // Innovatsion Texnologiyalar. 2022. Vol. 1. С. 60–63.
7. Любчик, О. А. Определение потенциала возобновляемых источников энергии в Республике Беларусь и оценка их использования в аграрном секторе / О. А. Любчик // Энерго- и ресурсосбережение: новые исследования, технологии и инновационные подходы: сб. тр. междунар. конф., Карши, 24–25 сент. 2021 г. Т.: Voris-nashriyot, 2021. С. 281–286.
8. IRENA [Electronic resource]. Mode of access: https://www.irena.org/Data/View-data-by-topic/Capacity-and-Generation/Technologies/. Date of access: 17.07.2023.
9. Повышение точности прогнозирования генерации фотоэлектрических станций на основе алгоритмов *k*-средних и *k*-ближайших соседей / П. В. Матренин [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 66, № 4. С. 305–321. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-305-321.
10. Михалевич, А. А. Моделирование работы Белорусской энергосистемы с учетом ввода АЭС / А. А. Михалевич, В. А. Рак // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 1. С. 5–14. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-5-14.
11. Концепция применения систем накопления энергии (СНЭ) на базе литий-ионных аккумуляторов в Белорусской энергосистеме: отчет о НИР (Этап 2) / РУП «БЕЛТЭИ»; рук. А. Ф. Молочко. Минск, 2022. 189 с. № Б 22-4/3.
12. Разработка энергетического баланса энергосистемы Беларуси с учетом развития возобновляемых источников энергии, в том числе ветроэнергетики: научно-технический отчет / А. Ф. Молочко [и др.]. Минск: Альфа-книга, 2019. 238 с.

Поступила 20.06.2023 Подписана в печать 22.08.2023 Опубликована онлайн 29.09.2023

REFERENCES

1. Mikhalevich A. A. (2021) Energy Security. *Nauka i Innovatsii = Science and Innovations*, (10), 10–13 (in Russian).
2. Chizh E. P. (2018) Energy Security of the Republic of Belarus Taking Into Account the Commissioning of the Belarusian NPP. *Modernizatsiya Khozyaistvennogo Mekhanizma Skvoz'*

Prizmu Ekonomicheskikh, Pravovykh, Sotsial'nykh i Inzhenernykh Podkhodov: Sb. Materialov XIII Mezhdunar. Nauchn.-Prakt. Konf., Posvyashchennoi 50-Letiyu Nauchnoi Shkoly v Oblasti Issledovaniya Modernizatsii Ekonomiki, 22 noyabrya 2018 g. [Modernization of the Economic Mechanism through the Prism of Economic, Legal, Social and Engineering Approaches: Collection of Materials of the XIII International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 50th Anniversary of the Scientific School in the Field of Economic Modernization Research, November 22, 2018]. Minsk, BNTU. Available at: https://rep.bntu.by/ handle/data/53105?show=full (in Russian).

3. Zorina T. G., Lyubchik O. A. (2021) Influence of Trends in the Development of the Energy Sector in Belarus on the Enhancing of Energy Security. *Ekonomicheskaya Bezopasnost' kak Osnovnoi Prioritet Ustoichivogo Razvitiya Gosudarstva: Tez. Dokl. Resp. Nauch.-Prakt. Konf. (Minsk, 26 Noyab. 2021 g.)* [Economic Security as the Main Priority of Sustainable Development of the State: Abstracts of the Republican Scientific and Practical Conference (Minsk, 26 Nov. 2021)]. Minsk, Academy of the Ministry of Internal Affairs of the Republic of Belarus, 59–62 (in Russian).
4. The Concept of Energy Security of the Republic of Belarus: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus, December 23, 2015, No. 1084. *National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus*. Available at: https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C21501084 (accessed 12 June 2023) (in Russian).
5. Bykova E. V., Mikhalevich A. A., Postolatii V. M., Fisenko S. P., Shnip A. I., Rimko D. V., Grodetskii M. V. (2010) *Methodological Approaches to Solving the Problem of Energy Security of Moldova and Belarus. Energy Security. Book 5*. Chisinau. 100 (in Russian).
6. Lyubchik O. (2022) Analysis of the Efficiency of Solar Power Plants in the Republic of Belarus. *Innovatsion Texnologiyalar*, 1, 60–63 (in Russian).
7. Lyubchik O. A. (2021) Determination of the Potential of Renewable Energy Sources in the Republic of Belarus and Assessment of their Use in the Agricultural Sector. *Energo- i Resursosberezhenie: Novye Issledovaniya, Tekhnologii i Innovatsionnye Podkhody: Sb. Tr. Mezhdunar. Konf., Karshi, 24–25 sent. 2021 g*. [Energy Conservation and Resource Conservation: New Research, Technologies and Innovative Approaches: Proceedings of the International Conference, Qarshi, September 24–25, 2021]. Tashkent, "Voris-Nashriyot" Publ., 281–286 (in Russian).
8. *IRENA*. Available at: https://www.irena.org/Data/View-data-by-topic/Capacity-and-Generation/Technologies/ (accessed 17 July 2023).
9. Matrenin P. V., Khalyasmaa A. I., Gamaley V. V., Eroshenko S. A., Papkova N. A., Sekatski D. A., Potachits Y. V. (2023) Improving of the Generation Accuracy Forecasting of Photovoltaic Plants Based on *k*-Means and *k*-Nearest Neighbors Algorithms. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 66 (4), 305–321. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-305-321 (in Russian).
10. Mikhalevic A. A., Rak U. A. (2021) Belarus Power Engineering System Modeling Taking into Account the Nuclear Power Plant Commissioning. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations,* 64 (1), 5–14. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-5-14 (in Russian).
11. Molochko A. F. (Supervisor), RUE "BELTEI" (2022) *The Concept of Using Energy Storage Systems (ESS) Based on Lithium-Ion Batteries in the Belarusian Energy System: Research Report (Stage 2). No B 22-4/3*. Minsk 189 (in Russian).
12. Molochko A. F., Sivak A. V., Privalov A. S., Chernetsov O. D., Zhuchenko E. A., Shcherbich V. I. [et al.] (2019) *Development of the Energy Balance of the Belarusian Energy System Taking into Account the Development of Renewable Energy Sources, Including Wind Energy: Scientific and Technical Report*. Minsk, Alfa-Book Publ. 238 (in Russian).

Received: 20 June 2023 Accepted: 22 August 2023 Published online: 29 September 2023

https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-433-450

УДК 621.039.58

Автономная термосифонная система пассивного отвода теплоты от первого контура реакторной установки: особенности функционирования, характеристики и основные преимущества

И. И. Свириденко[1)], Д. В. Шевелев[2)]

[1)]Севастопольский государственный университет (Севастополь, Российская Федерация),
[2)]АО «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций» (Москва, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. Рассмотрена автономная система пассивного отвода остаточного тепловыделения (СПОТ) реакторной установки с ВВЭР, предназначенная для обеспечения безопасности АЭС в условиях аварии с полным длительным обесточиванием. Система предусматривает отвод теплоты непосредственно от первого контура реакторной установки (СПОТ Р). С целью повышения надежности и безопасности аварийного теплоотвода в системе применено теплообменное оборудование на основе испарительно-конденсационных устройств замкнутого типа – двухфазных термосифонов. Основной особенностью таких теплообменников является то, что их термосифонные сборки конструктивно разделяют первый контур и промконтур СПОТ, выводимый за пределы реакторного отделения, и позволяют обеспечить безопасный и эффективный теплоотвод, снижают риск распространения радиоактивных загрязнений за барьеры безопасности. Подобные автономные пассивные системы обеспечат эффективный теплоотвод непосредственно от первого контура, изменив цепочку последовательных участков теплопереноса от ядерного топлива к конечному поглотителю и исключив из нее элементы, например парогенераторы, состояние и работоспособность которых в аварийном процессе теплоотвода оказывают основное влияние на безопасность активной зоны. В статье представлена схема автономной системы теплоотвода, приведено описание ее работы. Рассмотрены основные характеристики протекания аварийного процесса отвода остаточного тепловыделения автономной термосифонной СПОТ Р, полученные методом расчетного моделирования. Проанализированы преимущества автономной термосифонной пассивной системы в сравнении с пассивной системой отвода теплоты реакторной установки с ВВЭР через второй контур (СПОТ ПГ). Полученные результаты предлагаются для решения задач диверсификации пассивных систем безопасности эволюционных реакторных установок АЭС с ВВЭР.

Ключевые слова: АЭС, ВВЭР, реакторная установка, система пассивного отвода теплоты, двухфазный термосифон, полное длительное обесточивание, расчетное моделирование

Для цитирования: Свириденко, И. И. Автономная термосифонная система пассивного отвода теплоты от первого контура реакторной установки: особенности функционирования, характеристики и основные преимущества / И. И. Свириденко, Д. В. Шевелев // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 66, № 5. С. 433–450. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-433-450

Адрес для переписки	**Address for correspondence**
Свириденко Игорь Иванович	Sviridenko Igor I.
Севастопольский государственный университет	Sevastopol State University
ул. Университетская, 33,	33, University st.,
299053, г. Севастополь, Российская Федерация	299053, Sevastopol, Russian Federation
Тел.: +7 978 704-68-74	Tel.: +7 978 704-68-74
i.sviridenko@mail.ru	i.sviridenko@mail.ru

Autonomous Thermosiphon System of Passive Residual Heat Removal from the Primary Circuit of the Reactor Plant: Features of Operation, Characteristics and Basic Advantages

I. I. Sviridenko, D. V. Shevelyov

[1)]Sevastopol State University (Sevastopol, Russian Federation),
[2)]All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation JSC (Moscow, Russian Federation)

Abstract. An autonomous system of passive removal of residual heat (PRRHS) of a reactor installation with VVER designed to ensure the safety of nuclear power plants in an accident with complete long-term blackout is considered. The system provides for the removal of heat directly from the first circuit of the reactor plant (PRRHS R). In order to increase the reliability and safety of the emergency heat sink, heat exchange equipment based on closed-type evaporation and condensation devices – two-phase thermosyphons – has been used in the system. The main feature of such heat exchangers is that their thermosiphon assemblies structurally separate the primary circuit and the auxiliary circuit of the PRRHS, which is removed outside the reactor compartment, and provide safe and efficient heat removal, reduce the risk of radioactive contamination spreading beyond safety barriers. Such autonomous passive systems will provide effective heat removal directly from the primary circuit by changing the chain of successive heat transfer sites from nuclear fuel to the final absorber and excluding from it such elements, as for example steam generators, the condition and operability of which in the emergency process of heat removal have a major impact on the safety of the reactor core. The article presents a diagram of an autonomous heat sink system; also, a description of its operation is given. The main characteristics of the course of the emergency process of removal of residual heat by the autonomous thermosiphon PRRHS R obtained by computational modeling have been considered. The advantages of an autonomous thermosiphon passive system in comparison with a passive heat removal system of a reactor installation with VVER through the second circuit are analyzed. The obtained results are proposed to solve the problems of diversification of passive safety systems of evolutionary reactor plants of nuclear power plants with VVER type reactors.

Keywords: nuclear power plant, VVER, reactor plant, passive heat removal system, two-phase thermosiphon, complete long-term blackout, computational modeling

For citation: Sviridenko I. I., Shevelyov D. V. (2023) Autonomous Thermosiphon System of Passive Residual Heat Removal from the Primary Circuit of the Reactor Plant: Features of Operation, Characteristics and Basic Advantages. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 66 (5), 433–450. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-433-450 (in Russian)

Введение

Проблеме безопасности реакторных установок (РУ) атомных электростанций (АЭС) уделяется особое внимание [1–3]. Наиболее эффективным способом обеспечения безопасности реакторных установок РУ АЭС при аварии с полным длительным обесточиванием является создание условий для естественной циркуляции (ЕЦ) теплоносителя первого контура через активную зону реактора с целью отвода остаточного тепловыделения ядерного топлива. При этом для сохранения устойчивости ЕЦ должны обеспечиваться абсолютная надежность и эффективность внешнего теплоотвода от первого контура [4–8].

Высокая надежность и эффективность внешнего теплоотвода может быть достигнута применением испарительно-конденсационных устройств замкнутого типа – низкотемпературных двухфазных термосифонов (ДТС) [9–11]. Использование теплообменного оборудования на основе ДТС в РУ АЭС позволит сформировать автономные пассивные системы безопасности, функционирование которых не будет зависеть от эксплуатационного со-

стояния и работоспособности основного оборудования РУ – парогенераторов (ПГ). Такие пассивные системы (рис. 1) обеспечат эффективный теплоотвод непосредственно от первого контура, изменив цепочку последовательных участков теплопереноса от ядерного топлива к конечному поглотителю и исключив из нее элементы, состояние и работоспособность которых в аварийном процессе теплоотвода оказывают основное влияние на безопасность активной зоны.

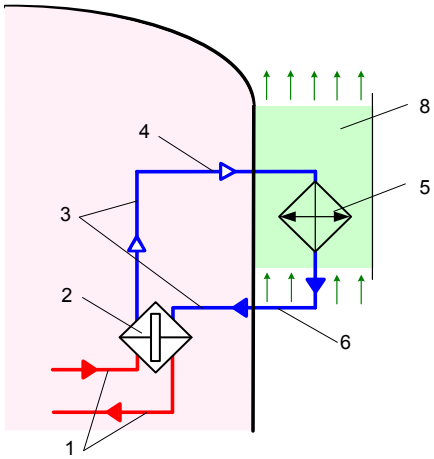


Рис. 1. Принципиальная схема автономной пассивной системы отвода остаточного тепловыделения с термосифонным теплообменником аварийного расхолаживания: 1 – первый контур; 2 – термосифонный теплообменник аварийного расхолаживания; 3 – промконтур; 4 – паровой трубопровод; 5 – теплообменник-конденсатор; 6 – конденсатный трубопровод; 8 – конечный поглотитель

Fig. 1. The principal circuit diagram of the autonomous passive residual heat removal system with thermosiphon based heat exchanger of emergency cooling: 1 – primary circuit; 2 – thermosiphon heat exchanger; 3 – auxiliary circuit; 4 – steam pipeline; 5 – heat exchander-condensor; 6 – condensate pipeline; 8 – ultimate sink

В качестве основного элемента теплоотвода в рассматриваемой пассивной системе используется ординарный двухфазный термосифон – испарительно-конденсационное устройство замкнутого типа, теплоперенос в котором осуществляется передачей скрытой теплоты парообразования своего промежуточного теплоносителя с испарением на участке подвода теплоты, перемещением пара из испарителя в конденсатор и конденсацией пара на участке теплоотвода [12]. Возврат конденсата из зоны конденсации ДТС в его испаритель обеспечивается действием массовых сил. Внешний подвод и отвод теплоты происходят через стенки соответственно испарительного и конденсационного участков ДТС [13].

Теплопередающая поверхность теплообменника аварийного расхолаживания (ТОАР) формируется сборкой вертикальных ординарных ДТС. Являясь автономным замкнутым устройством теплоотвода, ДТС конструктивно разделяют среды внешних контуров, что дает основание рассматривать их как дополнительный промежуточный замкнутый участок теплопереноса с высокой эффективной теплопроводностью, надежно отделяющий первый контур от внешнего контура теплоотвода.

Целью статьи являются описание устройства и принципа действия, анализ особенностей функционирования и полученных расчетных характеристик, а также обсуждение основных преимуществ автономной системы пассивного отвода остаточного тепловыделения на основе ДТС.

Устройство и принцип действия автономной термосифонной СПОТ

Назначение автономной термосифонной системы пассивного отвода теплоты (АТ СПОТ) – отвод остаточного тепловыделения в активной зоне

реактора в условиях аварии с полным длительным обесточиванием и потерей источников электроснабжения, включая аварийные. В состав АТ СПОТ (рис. 2) входят две системы: система пассивного отвода теплоты от первого контура реакторной установки (СПОТ Р) и система пассивного расхолаживания компенсатора давления (СПР КД) [14].

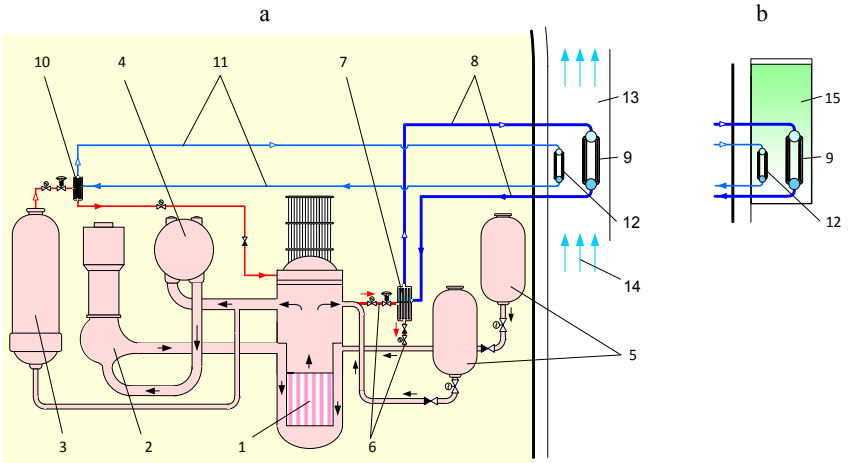


Рис. 2. Схема автономной термосифонной системы пассивного отвода остаточного тепловыделения: 1 – реактор; 2 – главный циркуляционный насос; 3 – компенсатор давления; 4 – парогенератор; 5 – гидроемкости пассивной части системы аварийного охлаждения активной зоны; 6 – петля расхолаживания первого контура; 7 – теплообменник аварийного расхолаживания системы пассивного отвода остаточного тепловыделения от первого контура реакторной установки; 8 – промконтур системы пассивного отвода остаточного тепловыделения от первого контура реакторной установки; 9 – теплообменник-конденсатор системы пассивного отвода остаточного тепловыделения от первого контура реакторной установки; 10 – теплообменник аварийного расхолаживания; 11 – промконтур системы пассивного расхолаживания компенсатора давления; 12 – теплообменник-конденсатор системы пассивного расхолаживания компенсатора давления; 13 – воздушный канал; 14 – поток охлаждающего воздуха; 15 – бак аварийного отвода теплоты

Fig. 2. Circuit diagram of autonomous thermosiphon PRRHS: 1 – reactor; 2 – main circulation pump; 3 – pressure compensator; 4 – steam generator; 5 – hydraulic capacites of the passive part of the emergency cooling system of the core; 6 – cooling loop of the primary circuit; 7 – heat exchanger for emergency cooling of the system of passive removal of residual heat release from the primary circuit of the reactor plant; 8 – auxiliary circuit of the system of passive removal of residual heat release from the primary circuit of the reactor plant; 9 – heat exchanger-condenser of the system of passive removal of residual heat from the primary circuit of the reactor plant; 10 – emergency cooling heat exchanger; 11 – auxiliary circuit of the system of passive cooling of the pressure compensator; 12 – heat exchanger-condenser of the system of passive cooling of the pressure compensator; 13 – air channel; 14 – cooling air flow; 15 – emergency heat removal tank

СПОТ Р формируется из четырех независимых петель теплоотвода производительностью 4×33,3 %. Каждая петля СПОТ Р включает циркуляционную петлю расхолаживания первого контура, термосифонный теплообменник аварийного расхолаживания, замкнутый двухфазный промежуточный контур и теплообменник-конденсатор (ТК). Все основные элементы АТ СПОТ размещаются в гермообъеме РУ, ТК вынесен за его пределы.

Петли расхолаживания СПОТ Р интегрированы с системой аварийного охлаждения активной зоны (САОЗ) на участках ее соединения с реактором: подключены попарно к верхним и нижним трубопроводам САОЗ Dy300. Остаточное тепловыделение в активной зоне и разность высот между ак-

тивной зоной и термосифонными ТОАР в петлях расхолаживания формируют условия устойчивой естественной циркуляции (ЕЦ) первого контура. Нагретый в активной зоне теплоноситель первого контура, циркулируя по трубопроводам САОЗ в подъемном участке петли расхолаживания, поступает в термосифонный ТОАР, омывая снаружи испарительные участки термосифонной сборки. За счет нагрева стенок испарителей ординарных ДТС его промежуточный теплоноситель испаряется. Пар промежуточного теплоносителя ДТС движется в зону конденсации, где конденсируется, отдавая через стенки конденсаторов теплоту промконтуру, омывающему верхнее межтрубное пространство одинарных ДТС. Образовавшийся в конденсаторе ординарного ДТС конденсат промежуточного теплоносителя благодаря массовым силам возвращается в зону испарения.

Теплопередающая поверхность ТОАР сформирована на основе результатов, полученных на экспериментальном стенде СПОТ, и состоит из сборки 1519 ординарных цилиндрических ДТС наружным диаметром 25×2,5 мм и высотой испарительного участка 1,5 м, конденсационного – 1,0 м, транспортного в зоне двойной трубной доски – 0,2 м. Трубная решетка – двойная, крепление ДТС в трубной решетке осуществляется сваркой. Материал ДТС – хромоникелевая сталь 12Х18Н10Т. Промежуточный теплоноситель ДТС – вода [15].

Пар испаряющегося теплоносителя промконтура движется по паровому участку в ТК, где конденсируется на его внутренней трубной поверхности за счет охлаждения снаружи охлаждающим воздухом (рис. 2a) или водой (рис. 2b), находящейся в баке аварийного отвода теплоты (БАОТ), в зависимости от принятой схемы внешнего теплоотвода. Конденсат промконтура из трубной части ТК под действием массовых сил возвращается по конденсатному трубопроводу снова в ТОАР. Промконтур СПОТ Р работает в режиме кольцевого ДТС с разделением потоков пара и конденсата. Испарение теплоносителя промконтура осуществляется на наружной поверхности конденсаторов ординарных ДТС ТОАР, конденсация – на внутренней поверхности труб ТК.

Для создания «организованного» потока охлаждающего воздуха и увеличения его скорости теплообменник-конденсатор помещен в канал, в котором реализованы условия для естественной тяги воздуха.

При организации внешнего теплоотвода от ТК к выкипающей воде в БАОТ, предусматриваются меры аварийной подпитки последних в случае, если энергоснабжение хотя бы одного комплекта систем безопасности не будет восстановлено в течение трех суток с момента исходного события.

СПР КД предназначена для расхолаживания компенсатора давления с гарантированным снижением давления первого контура, что обеспечивает своевременное срабатывание гидроемкостей (ГЕ) пассивной части САОЗ и ввод раствора жидкого поглотителя в первый контур для предотвращения выхода реактора на повторную критичность в процессе расхолаживания.

Расхолаживание КД осуществляется пассивным отводом скрытой теплоты конденсации паровой подушки с постепенным снижением ее параметров. СПР КД формируется двумя автономными петлями производительностью 2×100 %. Термосифонные ТОАР СПР КД аналогичны конструкции ТОАР СПОТ Р, но имеют соответственно меньшую теплообменную поверхность.

СПР КД функционирует параллельно СПОТ Р. ТОАР СПР КД обеспечивает конденсацию выходящего из объема паровой подушки компенсатора пара первого контура. Конденсат из ТОАР СПР КД возвращается в верхнюю часть реактора через трубопроводы системы аварийного газоудаления. Это исключает попадание чистого конденсата в активную зону. Теплота конденсации отводится двухфазным замкнутым промконтуром СПР КД через ТК СПР КД аналогично схеме СПОТ Р [14].

Расчетные характеристики автономной термосифонной СПОТ

Для оценки эффективности АТ СПОТ выполнено расчетное моделирование режимов пассивного отвода остаточного тепловыделения на модели РУ с ВВЭР-1000/В-320 с использованием кода RELAP5/MOD3.4. Моделирование проведено при сравнении использования воздуха и воды для внешнего теплоотвода от ТК СПОТ. Полученные результаты основных характеристик, подтверждающих эффективность и безопасность аварийного теплоотвода автономной термосифонной СПОТ, представлены на рис. 3–7.

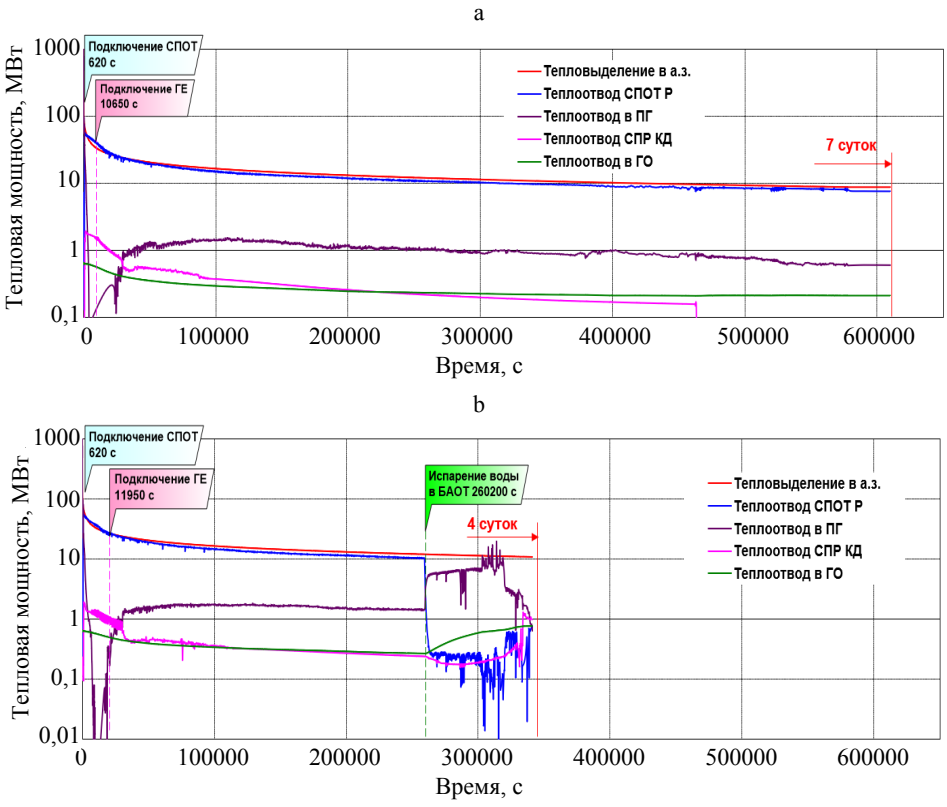


Рис. 3. Соотношение тепловыделения в активной зоне (а. з.) и отводимой тепловой мощности системой пассивного отвода остаточного тепловыделения от первого контура реакторной установки, системой пассивного расхолаживания компенсатора давления, парогенератором и гермообъемом: a – с воздушным; b – с водяным теплообменником-конденсатором

Fig. 3. The ratio of heat release in the reactor core and the heat output removal by the system of passive removal of residual heat release from the primary circuit of the reactor plant, the system of passive cooling of the pressure compensator, steam generator and sealed shell: a – with air heat exchanger-condenser; b – with a water heat exchanger-condenser

АТ СПОТ обеспечивает надежный отвод остаточного тепловыделения вне зависимости от типа конечного поглотителя. При теплоотводе к воздуху (рис. 3a) расчетная продолжительность эффективного функционирования АТ СПОТ не ограничена. При теплоотводе к воде (рис. 3b) безопасное состояние активной зоны определяется запасом воды в БАОТ и объемом воды второго контура в парогенераторах. В рассматриваемой модели запас воды в четырех БАОТ составляет 1600 т, что обеспечивает работу АТ СПОТ в течение трех суток. После полного испарения воды из БАОТ и при невозможности организации их аварийной подпитки отвод остаточного тепловыделения продолжается дополнительно еще сутки за счет сохраненного объема воды в парогенераторах.

Динамика процессов теплоотвода автономной термосифонной СПОТ с воздушными или водяными ТК практически одинакова. Наблюдающиеся небольшие отличия параметров температуры (рис. 4) и давления (рис. 5) связаны с разными температурными напорами относительно конечного поглотителя. Температура воды в БАОТ в течение практически всего времени работы АТ СПОТ составляет приблизительно 100 °С, а атмосферного воздуха не превышает 40 °С или ниже, в зависимости от места расположения АЭС и погодных условий.

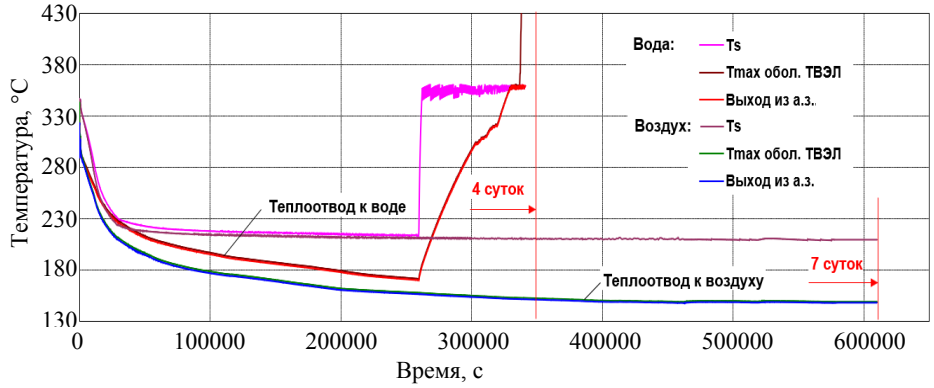


Рис. 4. Температура оболочки ТВЭЛ и теплоносителя при теплоотводе автономной термосифонной системой пассивного отвода остаточного тепловыделения к воде и к воздуху

Fig. 4. The temperature of the fuel element shell and the coolant during heat removal by an autonomous thermosiphon system of passive removal of residual heat to water and to air

Из рис. 5 видно, что при теплоотводе к воздуху давление в первом контуре стабилизируется на уровне 2 МПа к 100000 с, или спустя сутки с момента исходного события аварии. Дальнейшее снижение давления ограничивается продолжающим поступать в первый контур из ГЕ САОЗ борным концентратом. При теплоотводе к воде давление в первом контуре к окончанию третьих суток составляет 2,33 МПа.

АТ СПОТ обеспечивает расхолаживание не только первого контура, но и парогенераторов, о чем свидетельствует характер снижения давления во втором контуре (рис. 5).

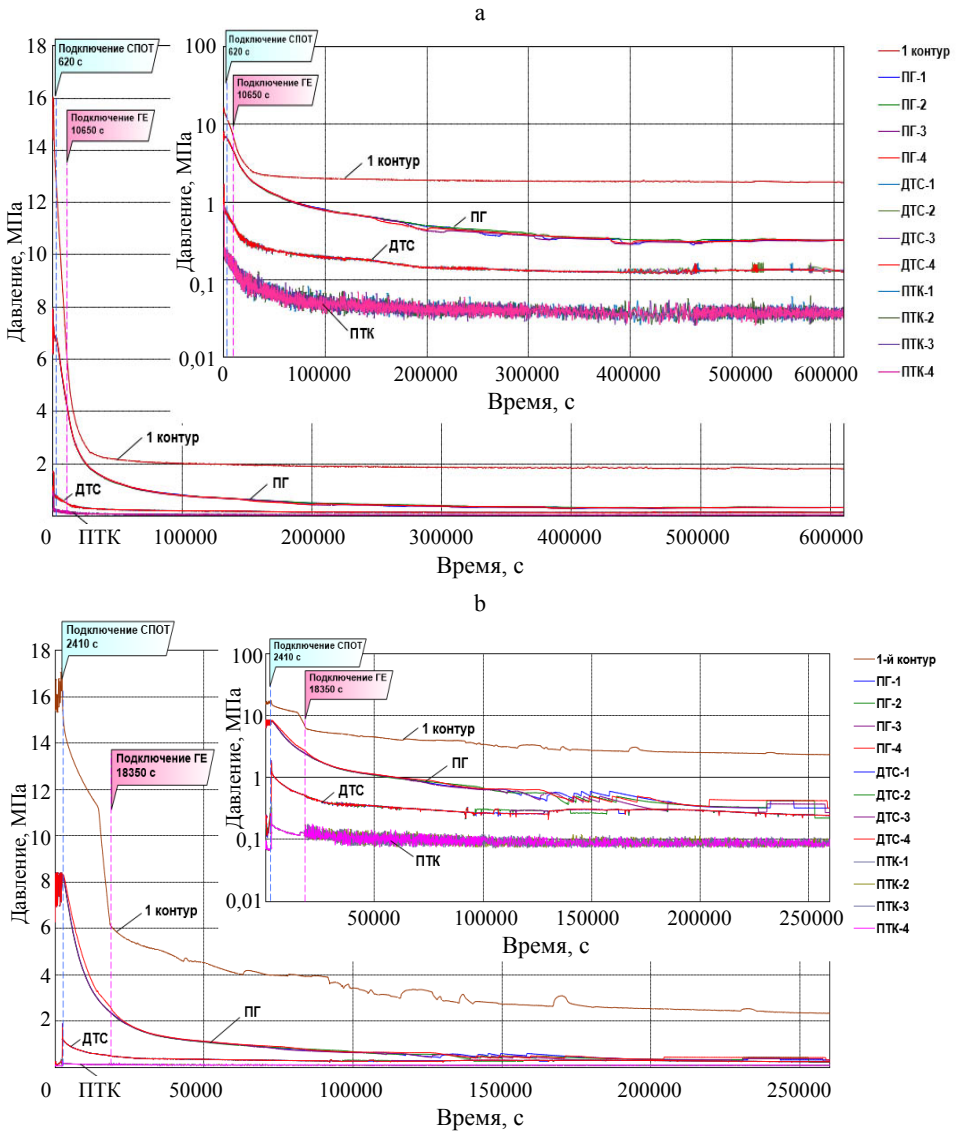


Рис. 5. Изменение давления в элементах реакторной установки
и автономной системы пассивного отвода остаточного тепловыделения:
a – с воздушным теплообменником-конденсатором; b – с водяным

Fig. 5. Pressure change in the reactor installation
and in the autonomous passive residual heat removal system:
a – with air cooled heat exchanger-condenser; b – with water cooled heat exchanger-condenser

При теплоотводе к воздуху давление в ПГ снижается и стабилизируется на уровне ~0,35 МПа к 350000 с аварии, или спустя ~4 сут. с момента исходного события, при теплоотводе к воде – на уровне ~0,3 МПа к 260000 с, или спустя чуть больше 3 сут. с момента исходного события. Аналогично снижается давление в ДТС ТОАР и промконтурах ТОАР. В целом все эти три зависимости коррелируют с постепенно снижающимся уровнем остаточного энерговыделения в активной зоне (рис. 3).

На рис. 6 показано изменение реактивности в процессе расхолаживания при работе АТ СПОТ. Для расчета выбран наиболее неблагоприятный момент топливной кампании, когда концентрация бора в теплоносителе в активной зоне уже близка к нулю, а значит, положительные обратные связи по плотности теплоносителя и отрицательные по его температуре и температуре топлива максимальны. Соответственно РУ ВВЭР-1000 при расхолаживании может выйти на повторную критичность при наиболее высокой температуре теплоносителя первого контура.

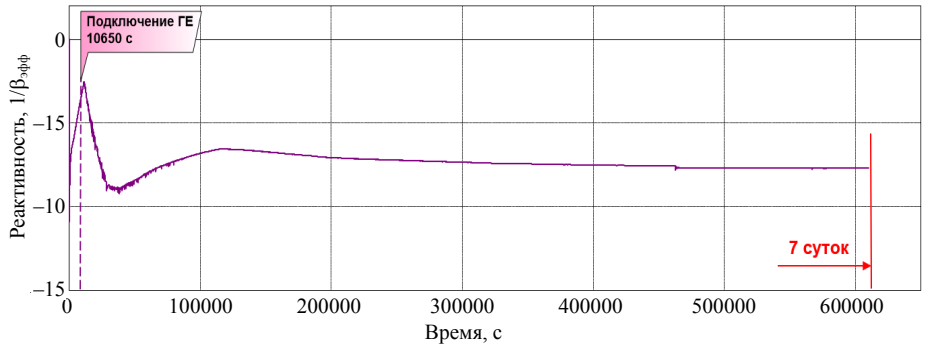


Рис. 6. Изменение реактивности при теплоотводе автономной термосифонной системой пассивного отвода теплоты

Fig. 6. Reactivity change during heat removal with autonomous thermosiphon passive heat removal system

Расчеты показали, что при этих условиях расхолаживаемая РУ может выйти на повторную критичность примерно через 18000 с с момента исходного события аварии. Однако при подключении даже одного из двух каналов СПР КД ситуация принципиально меняется. При функционировании СПР КД за счет своевременного снижения давления в первом контуре начинается слив борного концентрата из ГЕ САОЗ. Минимально возможная глубина подкритичности в момент начала срабатывания ГЕ САОЗ составляет не менее $-3{,}5\beta_{эфф}$ (рис. 6). За счет ввода бора в активную зону подкритичность вновь возрастает, даже несмотря на снижение температуры и увеличение плотности теплоносителя в активной зоне. К концу расчетного интервала (7 сут.) запас подкритичности активной зоны устанавливается на уровне не менее $-8\beta_{эфф}$. Это означает, что даже при наихудшем сочетании нейтронно-физических параметров во время функционирования АТ СПОТ вместе с СПР КД выход РУ на повторную критичность невозможен.

На рис. 7а представлен график мгновенной скорости расхолаживания теплоносителя первого контура. Видно, что максимальное пиковое значение до 88 град/ч кратковременно достигается вскоре после ввода АТ СПОТ в действие, наброса тепловой нагрузки и установления естественной циркуляции во всех контурах АТ СПОТ, а именно через 5,5 мин.

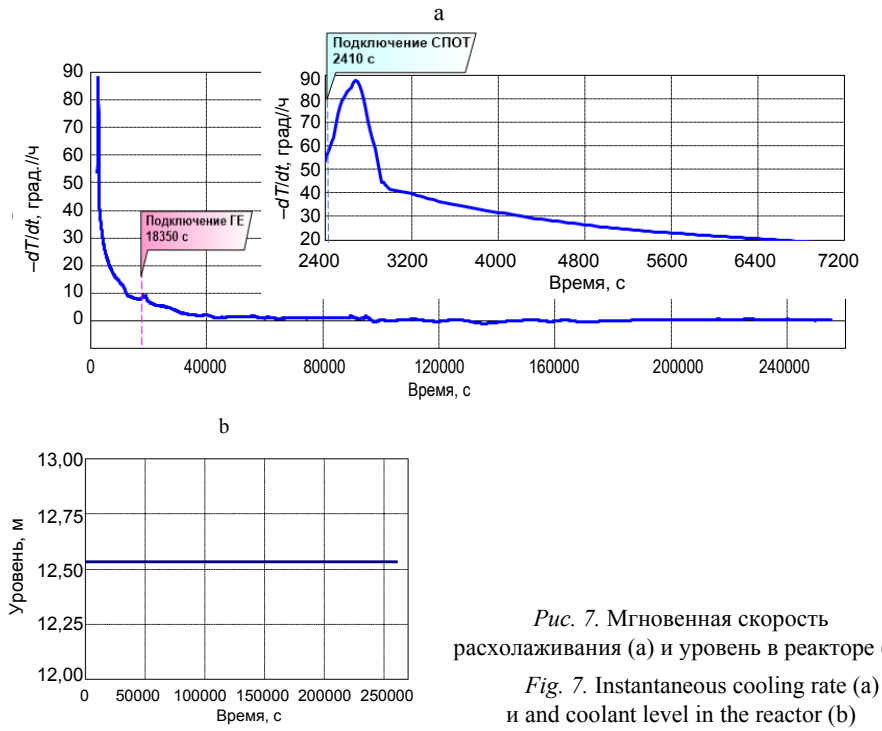


Рис. 7. Мгновенная скорость расхолаживания (a) и уровень в реакторе (b)

Fig. 7. Instantaneous cooling rate (a) and and coolant level in the reactor (b)

Затем, после завершения переходных процессов и по мере снижения температурного напора между контурами, скорость расхолаживания быстро снижается и уже к 27 мин работы АТ СПОТ падает ниже 30 град/ч, а по истечении 1 ч 15 мин – ниже 20 град/ч. Таким образом, среднее значение скорости расхолаживания РУ за любые два часа работы АТ СПОТ не превышает 30 град/ч, что соответствует требованиям [16].

На всем протяжении аварийного процесса уровень теплоносителя первого контура в реакторе остается неизменным (рис. 7b). Паровая или парогазовая подушка в верхнем блоке реактора не формируется. Это обусловлено работой СПР КД со сбросом охлажденного теплоносителя первого контура под крышку реактора по линии аварийного газоудаления. Таким образом, отсутствует риск запаривания главного циркуляционного контура и срыва естественной циркуляции в нем и соответственно оголения обогреваемой части тепловыделяющих сборок в активной зоне не происходит.

При протекании аварии в условиях плотного первого контура состояние так называемого «жесткого контура» не наступает. В КД остается некоторая часть объема, заполненная изначально паром, в дальнейшем – парогазовой смесью, в состав которой входят и неконденсирующиеся газы из теплоносителя первого контура (рис. 8). Иными словами, угроза хрупкого разрушения основного оборудования первого контура и, в первую очередь, корпуса реактора при расхолаживании с помощью АТ СПОТ не возникает.

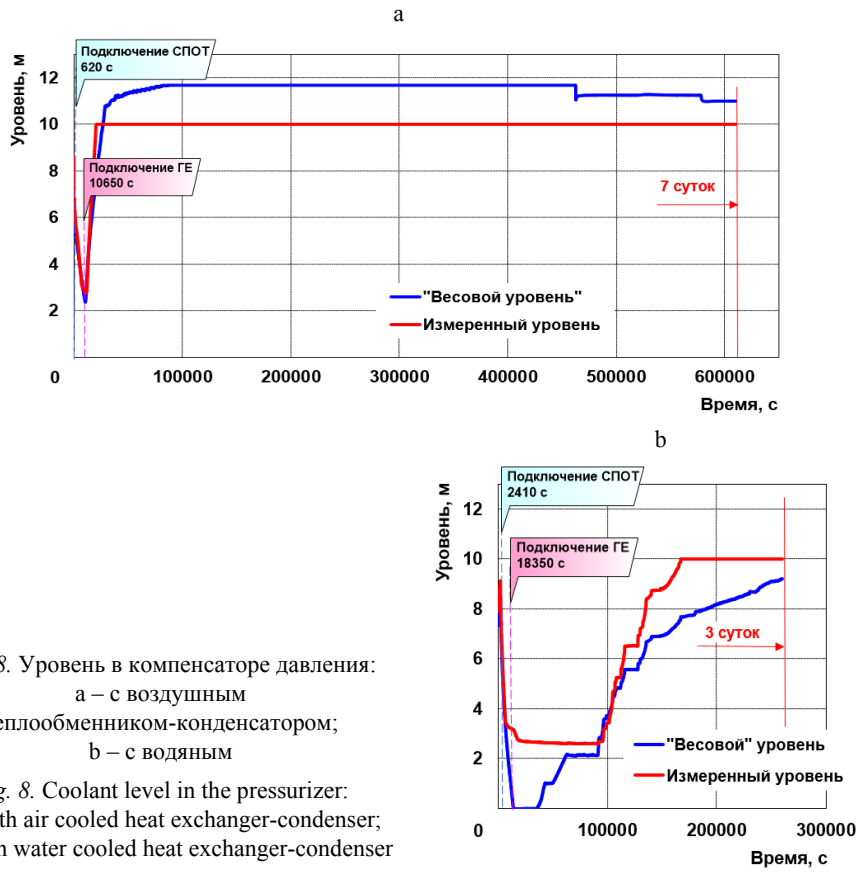


Рис. 8. Уровень в компенсаторе давления:
a – с воздушным
теплообменником-конденсатором;
b – с водяным

Fig. 8. Coolant level in the pressurizer:
a – with air cooled heat exchanger-condenser;
b – with water cooled heat exchanger-condenser

Приведенные выше особенности конструкции АТ СПОТ, принцип ее действия и полученные расчетные характеристики аварийного теплоотвода подтверждают преимущества организации отвода остаточного тепловыделения от первого контура, минуя парогенератор, даже несмотря на то что АТ СПОТ предусматривает использование дополнительного оборудования – промежуточного термосифонного ТОАР в петле расхолаживания. Детальный анализ этих преимуществ представлен ниже в сравнении с соответствующими режимами функционирования известной схемы СПОТ ПГ.

Преимущества автономной термосифонной СПОТ

Основными преимуществами АТ СПОТ являются эффективность теплоотвода от первого контура, надежность функционирования и безопасное состояние активной зоны на всем протяжении аварийного процесса.

При этом эффективность теплоотвода достигается реализацией процессов кипения и конденсации промежуточного теплоносителя на соответствующих участках сборки ДТС, формирующих теплопередающую поверхность ТОАР, а также использованием двухфазного промежуточного контура с аналогичными процессами кипения и конденсации теплоносителя промконтура. А поскольку теплоперенос в ДТС осуществляется передачей скрытой теплоты парообразования своего промежуточного теплоноси-

теля, термосифонное теплообменное оборудование имеет сравнительно высокую эффективную теплопроводность и изотермичность поверхности при низком внутреннем термическом сопротивлении [17, 18].

Сборка ординарных ДТС в ТОАР – это система достаточно большого количества параллельно включенных автономных замкнутых элементов теплопереноса с соответствующим запасом по теплообменной поверхности. Поэтому при аварийной разгерметизации даже нескольких ДТС весь теплообменник, а следовательно, и вся АТ СПОТ работоспособности не теряет, что обеспечивает надежность ее функционирования.

Надежное конструктивное разделение первого контура и промконтура повышает радиационную безопасность рассматриваемого аварийного процесса. Наличие между смежными контурами дополнительного промежуточного участка теплопереноса (сборки ординарных ДТС в ТОАР) формирует еще один промежуточный замкнутый участок между первым контуром и промконтуром. Подобное конструктивное решение получило название принципа тепловой мультибарьерной защиты, когда в направлении наиболее вероятного распространения радиоактивного загрязнения при возможных межконтурных течах добавляется еще один промежуточный замкнутый контур теплопереноса, выполняющий функции дополнительного барьера безопасности.

Кроме того, все промежуточные участки теплопереноса автономной термосифонной СПОТ располагаются внутри барьеров безопасности РУ, что соответственно снижает вероятность радиоактивного загрязнения при наложении аварии с течью первого контура.

В сравнении с традиционными кожухотрубными теплообменниками систем аварийного расхолаживания РУ надежность термосифонного ТОАР существенно выше. Независимость участков теплоподвода и теплоотвода в термосифонном ТОАР создает условия их свободного термического расширения, исключая опасные деформации всех остальных конструктивных элементов теплообменника и обеспечивая его целостность при резком набросе тепловой нагрузки. Это существенно повышает безаварийность теплоотвода от РУ, в первую очередь, при вводе АТ СПОТ в действие.

Продольное обтекание теплоносителем первого контура и промконтура в межтрубном пространстве термосифонного ТОАР обеспечивает относительно небольшое внешнее гидравлическое сопротивление всего теплообменника, что особенно важно для систем аварийного теплоотвода с естественной циркуляцией теплообменивающихся сред.

Габарит по высоте термосифонного ТОАР определяется длиной самих ДТС, и отсутствие подводящих и отводящих камер внешних теплоносителей, применяемых во всех традиционных кожухотрубных теплообменниках, дает еще одно существенное преимущество конструкции ТОАР с ДТС. При достаточно тесной компоновке основного оборудования и трубопроводов сложившейся схемы РУ с ВВЭР термосифонные ТОАР сравнительно легко вписываются в ее конфигурацию.

Наличие дополнительного изолированного по массе теплоносителя участка теплоотвода в виде сборки ДТС позволяет распределить параметры теплопереноса между последовательно расположенными контурами таким образом, что давление в промконтуре при вводе АТ СПОТ в действие (рис. 5) достигает в промконтуре величины не более 0,4–0,5 МПа (в ДТС при этом не более 1,75 МПа), а на этапе длительного установивше-

гося теплоотвода – менее 0,5 МПа. Для сравнения: при организации теплоотвода через второй контур давление в контуре СПОТ ПГ может достигать 8,0 МПа [19].

Функционирование АТ СПОТ не связано с состоянием основного оборудования РУ – парогенераторов и не зависит от их работоспособности. Функционирование же СПОТ ПГ полностью определяется состоянием и работоспособностью ПГ. В частности, при кипении первого контура из-за запаривания верхних рядов трубной системы ПГ ухудшаются условия ЕЦ первого контура, что приводит к постепенному неконтролируемому снижению отводимой от активной зоны тепловой мощности через ПГ [20].

Только одна функция безопасности (ФБ) – отвод теплоты по первому контуру – определяет функционирование АТ СПОТ, что обеспечивается запасом теплоносителя, достаточным для теплоотвода от активной зоны и теплопереноса к промконтуру с наличием устойчивой ЕЦ в петле расхолаживания между реактором и термосифонным ТОАР.

Функционирование же СПОТ ПГ зависит от выполнения четырех ФБ:

1) отвода теплоты от активной зоны по первому контуру;

2) поддержания запаса теплоносителя первого контура, достаточного для переноса теплоты в пределах первого контура от реактора к ПГ, что подразумевает отсутствие запаривания главных циркуляционных трубопроводов и образование гидрозатворов;

3) отвода теплоты по второму контуру (передачи теплоты в ПГ от первого контура к теплообменнику СПОТ ПГ, что требует наличия достаточного запаса котловой воды в ПГ);

4) управления давлением второго контура (для ввода в работу СПОТ ПГ).

При этом функционирование СПОТ ПГ обеспечивается только совместным выполнением всех четырех ФБ.

Как и СПОТ ПГ, схемное решение АТ СПОТ предусматривает возможность отвода теплоты к конечному поглотителю: к выкипающей воде в БАОТ и непосредственно к атмосферному воздуху. И здесь АТ СПОТ имеет свои преимущества.

При воздушном охлаждении теплообменника-конденсатора преимуществом АТ СПОТ является то, что протекание аварийного процесса не требует регулирования отводимой от РУ тепловой мощности. Отводимая термосифонными ТОАР тепловая мощность, с одной стороны, зависит от уровня остаточного тепловыделения в активной зоне, с другой – от интенсивности теплопереноса в промконтуре. Низкие параметры в промконтуре (пиковое избыточное давление ~0,4 МПа, установившееся ~0,12–0,1 МПа со снижением до 0,09–0,08 МПа) являются естественным ограничивающим фактором для теплоотвода к ТК, что в сочетании с относительно высоким термическим сопротивлением участка «первый контур – испарители ДТС» исключает необходимость регулирования (ограничения) отводимой от РУ мощности. Таким образом, в АТ СПОТ интенсивность теплоотвода определяется и одновременно ограничивается участком «первый контур – ДТС – промконтур». Условия же работы участка «промконтур – ТК – конечный поглотитель» практически не отличаются от условий работы схемы СПОТ ПГ, но уже без необходимости в регулировании теплоотвода.

При отводе теплоты от ТК к атмосферному воздуху, а также в варианте с теплоотводом к выкипающей в БАОТ воде преимущество АТ СПОТ заключается в сохранении запаса теплоносителя второго контура в ПГ.

Для обеспечения теплоотвода от первого контура средствами АТ СПОТ не требуется снижения параметров второго контура с целью достижения необходимого температурного напора. Поэтому из ПГ, не участвующего в аварийном теплоотводе, не нужно сбрасывать пар в окружающее пространство, как это реализуется в СПОТ ПГ (так называемый режим «регулирования» [21]). Это предотвращает оголение (даже частичное) трубчатки ПГ в течение всего времени функционирования СПОТ Р. В условиях аварийного теплоотвода при невозможности своевременного пополнения БАОТ по истечении трех суток с момента обесточивания сохраненный в ПГ запас котловой воды достаточен для эффективного теплоотвода от активной зоны через второй контур в течение еще почти суток (рис. 3b и 4b).

СПОТ Р, функционируя вместе с СПР КД, обеспечивает эффективный теплоотвод от РУ. После ввода СПОТ Р в действие, благодаря одновременному расхолаживанию компенсатора с помощью СПР КД, формируются условия для надежного срабатывания ГЕ САОЗ с одновременным сохранением достаточного запаса до кипения теплоносителя первого контура. Впрыск борного концентрата от ГЕ САОЗ предотвращает выход РУ на повторную критичность за счет ввода положительной реактивности при снижении температуры теплоносителя первого контура. Подобный метод позволяет исключить необходимость увеличения эффективности органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ) либо установки дополнительных систем, воздействующих на реактивность [14]. Следовательно, отпадает необходимость в увеличении эффективности ОР СУЗ или применении дополнительных систем, обеспечивающих подкритичность. К примеру, в проекте АЭС-2006 с ВВЭР-1200 по сравнению с ВВЭР-1000/В-320 количество СУЗ было увеличено с 61 до 121 [22].

Важным преимуществом применения АТ СПОТ для аварийного теплоотвода при полном длительном обесточивании РУ в условиях наложения малой течи первого контура является возможность существенного, как минимум на порядок, увеличения продолжительности периода времени до начала плавления активной зоны [14].

Схемное решение АТ СПОТ обеспечивает расхолаживание не только реактора, но и парогенераторов, что позволяет при аварии с обесточиванием сохранить запас химобессоленной воды второго контура и исключить необходимость в восполнении этого запаса для последующего ввода РУ в действие.

В зимний период постоянная продувка первого контура через ТОАР СПОТ Р гарантирует пассивную тепловую защиту воды в БАОТ от замерзания в условиях низкой температуры окружающего воздуха. Это исключает необходимость использования дополнительных общестанционных систем для тепловой защиты БАОТ [13].

ВЫВОДЫ

Использование автономных термосифонных СПОТ в составе систем безопасности эволюционных РУ с ВВЭР является важным шагом на пути повышения безопасности РУ в условиях возможных запроектных аварий с полным длительным обесточиванием. Организация отвода остаточного тепловыделения от первого контура РУ с помощью АТ СПОТ имеет целый ряд преимуществ.

1. Применение в СПОТ теплообменного оборудования на основе ДТС, формирующих надежное конструктивное разделение первого контура и промконтура, позволит обеспечить безопасный и в то же время эффективный теплоотвод, снизить риск распространения радиоактивных загрязнений за пределы барьеров безопасности при межконтурных течах. Это обеспечит не только сохранение активной зоны и всей РУ в работоспособном состоянии при аварии с полным длительным обесточиванием, но и сможет гарантировать радиационную безопасность, надежно предохраняя окружающую среду от возможного выброса радиоактивных загрязнений.

2. СПОТ на основе ДТС отличается простотой конструкции, не нуждается в обслуживании в процессе эксплуатации.

3. Термосифонные ТОАР имеют приемлемые массогабаритные характеристики.

4. АТ СПОТ обеспечивает необходимые условия для ЕЦ первого контура на всех этапах аварийного теплоотвода.

5. Теплоотвод в ДТС за счет переноса скрытой теплоты парообразования своего промежуточного теплоносителя и использование только массовых сил для его транспортировки служат гарантией надежного и эффективного теплоотвода в необходимом диапазоне эксплуатационных параметров.

6. Для работы АТ СПОТ достаточно сохранения лишь одной ФБ – отвода теплоты по первому контуру, что минимизирует требования к состоянию РУ в аварийных условиях: необходим только минимальный запас теплоносителя первого контура в реакторе для надежного теплоотвода от активной зоны.

7. Для начала функционирования АТ СПОТ достаточно лишь факта обесточивания. Ввод в действие системы и начало процесса расхолаживания совершаются в один этап. Исключается необходимость в дополнительном этапе регулирования с потерей части второго контура через быстродействующую редукционную установку со сбросом пара в атмосферу.

8. На всем этапе аварийного процесса АТ СПОТ обеспечивает сохранение достаточного запаса до кипения в активной зоне и поддерживает безопасное значение температуры оболочек ТВЭЛ.

9. В процессе аварийного теплоотвода не требуется регулирование отводимой АТ СПОТ тепловой мощности, уровень которой определяется и одновременно ограничивается условиями теплопереноса на участках «первый контур – ДТС – промконтур». Низкие параметры в промконтуре являются естественным ограничивающим фактором для теплоотвода от первого контура, что в сочетании с относительно высоким термическим сопротивлением участка «первый контур – испарители ДТС» исключает необходимость регулирования (ограничения) отводимой от РУ мощности.

10. Поддержание подкритичности активной зоны при функционировании АТ СПОТ обеспечивается только за счет пассивных систем безопасности. Совместная работа СПОТ Р и СПР КД обеспечивает эффективное снижение давления в первом контуре и своевременное срабатывание ГЕ САОЗ с вводом жидкого поглотителя в первый контур. Это исключает достижение повторной критичности при расхолаживании РУ. При этом отпадает необходимость в увеличении эффективности ОР СУЗ или применении дополнительных систем, обеспечивающих подкритичность.

11. При полном длительном обесточивании с наложением малой течи первого контура – существенное, как минимум на порядок, увеличение времени до начала плавления активной зоны.

12. АТ СПОТ обеспечивает расхолаживание не только реактора, но и парогенераторов, что позволяет в аварийных условиях сохранить запас химобессоленной воды второго контура и исключить необходимость в восполнении этого запаса для последующего ввода РУ в действие.

Полученные результаты расчетного моделирования аварийного отвода остаточного тепловыделения с помощью АТ СПОТ позволяют сделать вывод о возможности ее эффективного применения для эволюционных РУ АЭС с ВВЭР. Разработка и внедрение АТ СПОТ являются шагом на пути диверсификации пассивных систем безопасности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Букринский, А. М. Безопасность атомных станций по федеральным нормам и правилам России и стандартам МАГАТЭ. Сравнение основных принципов и требований по обеспечению безопасности / А. М. Букринский. 3-е изд. М.: НТЦ ЯРБ, 2019. 196 с.
2. Исследование локальной гидродинамики теплоносителя в смешанной активной зоне реактора ВВЭР / С. М. Дмитриев [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 2. С. 151–162. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-151-162.
3. Сорокин, В. В. Расчет времени пуска пассивного каталитического рекомбинатора водорода локализующей системы безопасности АЭС с ВВЭР / В. В. Сорокин // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, No 1. С. 67–75. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-67-75.
4. Пути совершенствования системы пассивного охлаждения активной зоны реактора ВВЭР / А. В. Морозов [и др.] // Материалы XIV Международной научно-технической конференции «Проблемы совершенствования топливно-энергетического комплекса», Саратов, 30 октября – 1 ноября 2018 г. Саратов, 2018. С. 115–120.
5. Passive Safety Systems and Natural Circulation in Water Cooled Nuclear Power Plants [Electronic Resource]. IAEA-TECDOC-1624. Vienna: IAEA, 2009. Mode of access: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1624_web.pdf. Date of access: 07.01.2022.
6. Natural circulation in water cooled nuclear power plants: Phenomena, models, and methodology for system reliability assessments [Electronic Resource]. IAEA-TECDOC-1474. Vienna: IAEA, 2005. Mode of access: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE_1474_web.pdf. Date of access: 05.01.2022.
7. Sierchuła, J. Analysis of passive residual heat removal system in AP1000 nuclear power plant / J. Sierchuła // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 214. Art. ID 012095. https://doi.org/10.1088/1755-1315/214/1/012095.
8. Design, Experiment, and Commissioning of the Passive Residual Heat Removal System of China's Generation III Nuclear Power HPR1000 / Feng Li [et al.] // Science and Technology of Nuclear Installations. 2021. 6 p. https://doi.org/10.1155/2021/6680400.
9. Дан, П. Д. Тепловые трубы / П. Д. Дан, Д. А. Рей; пер. с англ. Ю. А. Зейгарник. М.: Энергия, 1979. 272 с.
10. Чи, С. Тепловые трубы: Теория и практика / С. Чи; пер. с англ. В. Я. Сидоров. М.: Машиностроение, 1981. 207 с.
11. Гершуні, О. Н. Випаровувально-конденсатційні системи теплопередачі для ядерних енергетичних технологій / О. Н. Гершуні, О. П. Ніщик, Є. М. Письменний. Київ: Альтерпрес, 2007. 236 с.
12. Chapter 1 – Natural circulation loops – advantages, challenges, and classification –/ P. K. Vijayan, A. K. Nayak, N. Kumar // Single-Phase, Two-Phase and Supercritical Natural Circulation Systems. Woodhead Publishing, 2019. P. 1–30. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102486-7.00001-9.

13. Passive Residual Heat Removal System for WWER with the Thermosiphon Heatexchange Equipment / I. I. Sviridenko [et al.] // International Journal of Energy for a Clean Environment. 2015. Vol. 16. N 1-4. P. 209–223. https://doi.org/10.1615/InterJEnerCleanEnv.2015015683
14. Свириденко, И. И. Расчетные исследования аварийного теплоотвода ВВЭР автономной термосифонной СПОТ первого контура / И. И. Свириденко, Д. В. Шевелев, В. В. Свердлов // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок: науч.-тех. сб. Сосновый Бор: ФГУП НИТИ, 2018. Вып. 3 (13). С. 28–41.
15. Свириденко И. И. Удержание реактора в подкритическом состоянии при запроектной аварии одновременным расхолаживанием и декомпрессией первого контура / И. И. Свириденко // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2019. № 1. С. 85–96. https://doi.org/10.26583/npe.2019.1.08
16. Инструкция по ликвидации аварий и аварийных ситуаций на реакторной установке энергоблока № 5 Запорожской АЭС. 05.ГТ.00.ИЭ.11. ОП «Запорожская АЭС», 2017. 444 с.
17. Васильев, Л. Л. Теплообменники на тепловых трубах / Л. Л. Васильев. Минск: Наука и техника, 1981. 143 с.
18. Безродный, М. К. Процессы переноса в двухфазных термосифонных системах. Теория и практика / М. К. Безродный, И. Л. Пиоро, Т. О. Костюк. К.: Факт, 2005. 704 с.
19. АЭС «Куданкулам». Классификация систем, оборудования, трубопроводов и элементов теплотехнической части. KK.UJA.0.SR.PZ.PR004. Институт «Атомэнергопроект», 2002.
20. Концепция расширенного использования естественной циркуляции теплоносителя первого контура в энергоблоках с ВВЭР-1000 (1200) и перспективы ее реализации / А. Я. Благовещенский [и др.] // Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики: Материалы 8-й Междунар. науч.-техн. конф., Москва, 23–25 мая 2012 г. М.: Концерн «Росэнергоатом», 2012. С. 602–605.
21. Влияние пассивных систем на протекание типичных запроектных аварий РУ В-392 [Электронный ресурс] / Н. В. Букин [и др.] // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: материалы 2-й науч.-техн. конф., Подольск, 19–23 ноября 2001 г. Режим доступа: http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2001/report1/vpsnptza.pdf. Дата доступа: 17.09.2021.
22. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта / С. А. Андрушечко [и др.]. М.: Логос, 2010. 603 с.

Поступила 17.01.2023 Подписана в печать 28.03.2023 Опубликована онлайн 29.09.2023

REFERENCES

1. Bukrinskii A. M. (2019) *Safety of Nuclear Power Plants According to Federal Norms and Regulations of Russia and IAEA Standards. Comparison of Basic Principles and Requirements for Ensuring Safety*. Third Edition. Moscow, STC NRS. 196 (in Russian).
2. Dmitriev S. M., Gerasimov A. V., Dobrov A. A., Doronkov D. V., Pronin A. N., Ryazanov A. V., Solntsev D. N., Khrobostov A. E. (2020) Investigation of Coolant Local Hydrodynamics in the Mixed Core of the VVER Reactor. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations,* 63 (2), 151–162. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-151-162 (in Russian).
3. Sorokin V. V. (2022) Calculation of Start-Up Time of Passive Catalytic Hydrogen Recombiner of Localization Safety System of a Nuclear Power Plant Equipped with VVER. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations,* 65 (1), 67–75. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-1-67-75 (in Russian).
4. Morozov A. V., Ragulin S. V., Sahipgareev A. R., Shlepkin A. S. (2018) Ways to Improve the Passive Cooling System of the VVER Reactor Core. *Problemy Sovershenstvovaniya Toplivno-Energeticheskogo Kompleksa. Materialy XIV Mezhdunarodnoi Nauch.-Tehn. Konf., Saratov, 30 Oktyabrya – 1 Noyabrya 2018 g.* [Materials of the XIV International Scientific and Technical Conference "Problems of Improving the Fuel and Energy Complex"]. Saratov, 115–120 (in Russian).
5. IAEA (2009) *Passive Safety Systems and Natural Circulation in Water Cooled Nuclear Power Plants: IAEA-TECDOC-1624*. Vienna. Available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1624_web.pdf (accessed 07 January 2022).

6. IAEA (2005) *Natural Circulation in Water Cooled Nuclear Power Plants: Phenomena, Models, and Methodology for System Reliability Assessments. IAEA-TECDOC-1474*. Vienna. Available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE_1474_web.pdf (accessed 05 January 2022).
7. Sierchuła J. (2019) Analysis of Passive Residual Heat Removal System in AP1000 Nuclear Power Plant. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 214, 012095 https://doi.org/10.1088/1755-1315/214/1/012095.
8. Li F., Lu Y., Chu X., Zheng Q., Wu G. (2021) Design, Experiment, and Commissioning of the Passive Residual Heat Removal System of China's Generation III Nuclear Power HPR1000. *Science and Technology of Nuclear Installations,* 2021, 6680400. https://doi.org/10.1155/2021/6680400.
9. Dunn P. D., Reay D. A. (1982) *Heat Pipes*. Elsevier Science & Technology Books.
10. Chi S. W. (1976) *Heat Pipes: Theory and Practice*. Hemisphere Pub. Corp.
11. Gershuni O. N., Nishchik O. P., Pishmennyi E. M. (2007) *Evaporation-Condensation Heat Transfer Systems for Nuclear Energy Technologies*. Kyiv, Al'terpres Publ. 236 (in Ukrainian).
12. Vijayan P. K., Nayak A. K., Kumar N. (2019). Chapter 1 – Natural Circulation Loops – Advantages, Challenges, and Classification. *Single-Phase, Two-Phase and Supercritical Natural Circulation Systems*. Woodhead Publishing, 1–30. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102486-7.00001-9.
13. Sviridenko I. I., Shevelyov D. V., Polyakov O. V., Timofeev V. A., Sviridenko N. N. (2015) Passive Residual Heat Removal System for WWER with the Thermosiphon Heat Exchange Equipment. *International Journal of Energy for a Clean Environment*, 16 (1–4), 209–223. https://doi.org/10.1615/InterJEnerCleanEnv.2015015683.
14. Sviridenko I. I., Shevelev D. V., Sverdlov V. V. (2018) Analytical Researches of Emergency Heat Removal from VVER by Autonomous Thermosyphon PRHRS of Primary Circuit. *Tehnologii Obespecheniya Zhiznennogo Tsikla Yadernyh Energeticheskikh Ustanovok: Nauch.-Tehn. Sbornik = Nuclear Propulsion Reactor Plants. Life Cycle Management Technologies. Collection of Scientific and Technical Papers.* Sosnovy Bor: FSUE "Alexandrov NITI", Iss. 3(13), 28–41 (in Russian).
15. Sviridenko I. I. (2019) Assuring Reactor's Subcriticality Following Beyond Design Accident by Simultaneous Cool Down and Depressurization. *Izvestiya Vuzov. Yadernaya Energetika*, (1), 85–96 (in Russian). https://doi.org/10.26583/npe.2019.1.08.
16. Zaporozhye NPP (2017) *Instructions for the Elimination of Accidents and Emergencies at the Reactor Plant of Power Unit No 5 of the Zaporozhye NPP*. 05.ГТ.00.ИЭ.11 (in Russian).
17. Vasiliev L. L. (1981) *Heat Exchangers on Heat Pipes.* Minsk, Nauka i Tehnika Publ. 143 (in Russian).
18. Bezrodnii M. K., Pioro I. L., Kostyuk T. O. (2005) *Transfer Processes in Two-Phase Thermosiphon Systems. Theory and Practice*. Kyiv, Fakt Publ. 704 (in Russian).
19. Atomenergoproekt (2002) *Kudankulam NPP. Classification of Systems, Equipment, Pipelines and Elements of the Heat Engineering Division*. KK.UJA.0.SR.PZ.PR004 (in Russian).
20. Blagoveshchenskii A. Ya., Bor S. M., Konovich M. N., Mityukov V. N., Bezlepkin V. V., Kukhtevich V. O., Mitryukhin A.G. [et al.] (2012) The Concept of Expanded Use of Natural Circulation of the Primary Coolant in Power Units with VVER-1000 (1200) and Prospects for its Implementation. *Bezopasnost', Effektivnost' i Ekonomika Atomnoi Energetiki: Materialy 8 Mezhdunar. Nauch.-Tehn. Konf., Moskva, 23–25 Maja 2012 g.* [Safety, Efficiency and Economy of Nuclear Energy: Proceedings of the 8th Intern. Sci.-Tech. Conf.]. Moscow, Rosenergoatom Concern, 602–605 (in Russian).
21. Bukin N. V., Borisov L. N., Gromov A. L., Fil N. S., Shumskii A. M. (2001) Influence of Passive Systems on the Course of Typical Beyond Design Basis Accidents of V-392 Reactor Plant. *Obespechenie Bezopasnosti AES s VVER: Materialy 2 Nauch.-Tehn. Konf., Podol'sk, 19–23 Noyabrya 2001 g.* [Ensuring the Safety of VVER NPP: Proceedings of the 2nd Sci.-Tech Conf.]. Available at: http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2001/report1/vpsnptza.pdf (accessed 17 September 2021) (in Russian).
22. Andrushechko S. A., Afrov A. M., Vasiliev B. Yu., Generalov V. N., Kosourov K. B., Semchenkov Yu. M., Ukraintsev V. F. (2010) *NPP with a VVER-1000 Reactor. From the Physical Fundamentals of Operation to the Evolution of the Project*. Moscow, Logos Publ. 603 (in Russian).

Received: 17 January 2022 Accepted: 28 March 2023 Published online: 29 September 2023

https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-451-460

УДК 697.34

Система теплоснабжения «умного дома» на базе централизованного теплоснабжения с утилизацией вторичных энергетических ресурсов при помощи теплового насоса

И. Л. Иокова[1)], М. Б. Перехвал[1)], И. Е. Мигуцкий[1)]

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

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. Одним из важнейших аспектов «умного дома» является его теплоснабжение, которое должно обеспечивать комфортные условия проживания для жильцов и при этом быть эффективным с точки зрения энергопотребления. В настоящей статье рассматривается инновационный подход к системе теплоснабжения в «умных домах», который основан на использовании централизованного теплоснабжения с утилизацией вторичных энергетических ресурсов с использованием теплового насоса. Предлагаемая система теплоснабжения сочетает преимущества классического централизованного теплоснабжения и эффективность тепловых насосов. Предложена расчетная схема, для которой построен температурный график, а также методика расчета тепловых нагрузок для классической схемы теплоснабжения и для ТЭЦ с применением тепловых насосов, согласно которой произведены необходимые расчеты. Для наглядности полученных данных построен график зависимости суммарной паровой нагрузки, необходимой для теплоснабжения, от температуры окружающей среды, а также график зависимости паровой нагрузки от продолжительности стояния температуры окружающей среды. В результате анализа полученных данных определено, что использование тепловых насосов в схемах ТЭЦ снижает генерацию электроэнергии за счет исключения ее выработки на потоке пара в конденсатор, что облегчает покрытие графика электропотребления в части прохождения минимумов нагрузок объединенной энергосистемы. Также интеграция теплового насоса в тепловую схему системы централизованного теплоснабжения позволяет подавлять диссипацию энергии, снижает выбросы парниковых газов в атмосферу, таким образом делая теплоснабжение более устойчивым и экологически безопасным. При этом предложенная система теплоснабжения «умного дома» имеет высокие технико-экономические показатели, обеспечивающие инвестиционную привлекательность такого проекта.

Ключевые слова: «умный дом», система теплоснабжения, «умный город», тепловой насос, ТЭЦ, энергоэффективность

Для цитирования: Иокова, И. Л. Система теплоснабжения «умного дома» на базе централизованного теплоснабжения с утилизацией вторичных энергетических ресурсов при помощи теплового насоса / И. Л. Иокова, М. Б. Перехвал, И. Е. Мигуцкий // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 66, № 5. С. 451–460. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-451-460

Адрес для переписки
Иокова Ирина Леонидовна
Белорусский национальный технический университет
пр. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 (17) 293-92-16
E-mail: pte@bntu.by

Address for correspondence
Iokova Irina L.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Тел.: +375 (17) 293-92-16
E-mail: pte@bntu.by

The "Smart Home" Heat Supply System Based on District Heating with the Utilization of Secondary Energy Resources Using a heat Pump

I. L. Iokova[1)], M. B. Perekhval[1)], I. E. Migutskii[1)]

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

Abstract. One of the most important aspects of a "smart home" is its heating system, which should provide comfortable living conditions for residents while also being energy-efficient. This article discusses an innovative approach to heating systems in "smart homes" based on centralized heating with the utilization of secondary energy resources using a heat pump. The proposed heating system combines the advantages of traditional centralized heating and the efficiency of heat pumps. The article presents a calculated scheme, for which a temperature chart was developed. A methodology for calculating heat loads for both the traditional heating scheme and combined heat and power (CHP) with heat pumps is also proposed, and the necessary calculations were carried out. For clarity of the obtained data, a graph depicting the total steam load required for heating as a function of ambient temperature is constructed, as well as a graph showing the steam load as a function of the duration of the ambient temperature. The analysis of the data revealed that the use of heat pumps in CHP schemes reduces electricity generation by eliminating its production in the steam flow in the condenser. This facilitates the coverage of the electricity consumption schedule during periods of low demand for the integrated energy system. Additionally, integrating a heat pump into the heating system of the centralized heating system helps reduce energy dissipation and greenhouse gas emissions into the atmosphere, making heating more sustainable and environmentally friendly. Moreover, the proposed heating system for a "smart home" demonstrates high technical and economic performance, ensuring the investment attractiveness of such a project.

Keywords: "smart home", heating system, "smart city", heat pump, combined heat and power (CHP), energy efficiency

For citation: Iokova I. L., Perekhval M. B., Migutskii I. E. (2023) The "Smart Home" Heat Supply System Based on District Heating with the Utilization of Secondary Energy Resources Using a heat Pump. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 66 (5), 451–460. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-451-460 (in Russian)

Введение

В последнее время «умные дома» становятся все более популярными. Само понятие «умный дом» (Smart Home) – это концепция, в которой различные системы и устройства в доме связываются между собой, что позволяет обеспечить более быстрое, комфортное и эффективное управление различными аспектами жизни внутри такого дома. Для этих целей всегда используются современные технологии.

К системам «умного дома», помимо других, также относятся системы управления освещением и климатом в помещении. Кроме удобства использования, одним из ключевых критериев популярности строительства «умных домов» является их энергоэффективность: «умные дома» позволяют снизить потребление тепловой и электрической энергии, что, в свою очередь, приводит к снижению счетов потребителей за коммунальные услуги.

С развитием современных технологий также стоит ожидать появления «умных кварталов» и целых «умных городов». «Умный город» (Smart

City) – это широкая концепция развития городской инфраструктуры с использованием современных технологий, которая включает в себя контроль и управление различными сферами жизни, системами и ресурсами, такими как общественная безопасность, транспорт, образование, здравоохранение, энергетика и прочее.

Основная цель «умного города», как и «умного дома», – сделать нашу жизнь проще, удобнее, эффективнее и экологически безопаснее.

Что касается энергетики, то появление интеллектуальных устройств, например для учета и контроля расхода различных видов энергии, позволило повысить эффективность энергосистемы за счет «умного» управления электрической сетью и системой теплоснабжения. Это предоставляет возможность в режиме реального времени оценивать спрос, адаптировать к нему мощности источников энергии и принимать решения по экономии энергии в зависимости от стоимости тарифов в течение суток [1].

С учетом постоянного удорожания ископаемых ресурсов, оказывающего существенное влияние на величину эксплуатационных затрат в жилищном секторе и стоимость коммунальных услуг в отопительный период, в Республике Беларусь постоянно растет интерес к энергосбережению как при новом строительстве, так и при проведении тепловой модернизации и реконструкции уже построенных жилых домов. В связи с этим использование современных технологий для снижения уровня потребляемой зданием энергии является одним из приоритетных направлений развития строящегося и существующего жилищного фонда. Также актуальным остается вопрос определения подходов к реализации концепции «умного (энергоэффективного) дома» в условиях Республики Беларусь [2].

Основная часть

Основная система теплоснабжения в Республике Беларусь – централизованная система теплоснабжения [3, 4]. Это касается и многих других стран. Так, например, в некоторых городах Германии централизованное теплоснабжение также играет большую роль. Здесь преобладает теплогенерация за счет газа, угля, мазута. Однако централизованные системы теплоснабжения обладают относительно невысоким КПД, поэтому декарбонизация тепловых сетей является важной задачей наряду с модернизацией инженерно-технических систем зданий. В последние годы проявился тренд использования в этих целях тепловых насосов [5].

Тепловые насосы широко применяются для отопления зданий, горячего водоснабжения (ГВС), а также для кондиционирования помещений. Они являются эффективным и экологически более дружественным способом получения теплоты, особенно при сравнении с традиционными системами отопления, которые используют ископаемые топлива [6].

Тепловой насос – это эффективная система, которую можно масштабировать. Существующие на сегодняшний день условия внедрения инженерно-технических систем в зданиях (системы водяного отопления) оптималь-

ны для тепловых насосов, но с учетом энергоэффективности здания необходима модернизация здания в целом, поскольку речь идет о годовой потребности в тепловой энергии и возможностях низкотемпературных систем. Проблема в том, что по мере электрификации сектора отопления создается все более и более зависимый от температуры профиль электрической нагрузки, если взять в расчет годовой период.

В данной статье рассматривается вариант применения теплового насоса в схеме ТЭЦ. Централизованное теплоснабжение в основном осуществляется благодаря паротурбинным циклам, среди которых наибольшее распространение получил турбоагрегат типа ПТ-60 [7]. В таком случае тепловой насос, предназначенный для отопления, использует теплоту конденсации отработанного пара, благодаря чему обеспечивает экономию природного газа и уменьшает вредные выбросы в окружающую среду без изменения централизованной системы теплоснабжения, т. е. выступает в роли дополнения к существующей системе и также позволяет оставить неизменными тепловые узлы и пункты. Такой вариант теплоснабжения «умного дома», на наш взгляд, является оптимальным.

Для привода теплового насоса требуется энергия в тепловой или механической (электрической) форме. В первом случае применяются абсорбционные тепловые насосы (АБТН), во втором – парокомпрессионные тепловые насосы (ПКТН). Мерой энергетической эффективности тех и других принято считать энергетический КПД, получивший у нас название отопительного коэффициента ($К_{от}$), а в иностранной литературе – коэффициента преобразования (COP).

Абсорбционный тепловой насос – устройство непрерывного действия, предназначенное для передачи тепловой энергии от источника с более низкой температурой к источнику с более высокой температурой. Для компенсации подобного неестественного перехода тепловой энергии требуется на привод АБТН затратить тепловую энергию. Абсорбционные установки обратного цикла уступают по энергетическим характеристикам парокомпрессионным машинам, но если последним для работы требуется энергетически и экономически более ценная механическая энергия, то первые могут использовать дешевую тепловую энергию отборов паровых турбин, утилизационных котлов, энергии выхлопных газов газовых двигателей внутреннего сгорания, вторичных энергоресурсов. Это обстоятельство и определяет для АБТН нишу, которую они в ближайшее время займут в различных технологических системах [8].

При сравнении ПКТН и АБТН выявлено, что АБТН при равных условиях термодинамически более эффективен, так как эксергетический КПД его выше, чем у ПКТН [9], поэтому в статье будем рассматривать систему теплоснабжения с применением АБТН.

Работа предложенной системы теплоснабжения «умного дома» будет рассмотрена на примере строящегося многоквартирного жилого дома на ул. Одесской в г. Минске.

Для сопряжения АБТН с турбогенератором ПТ-60 можно использовать как два АБТН меньшего, так и один большего типоразмера. Более гибким представляется вариант с двумя АБТН. Для их привода могут использоваться различные теплоносители: пар, вода, дымовые газы, топливо. В данном случае будем использовать пар давлением не менее 0,4 МПа. В итоге выбираем два АБТН марки BDS 30 с суммарной теплопроизводительностью 2,8 МВт.

Упрощенная схема предложенной системы теплоснабжения представлена на рис. 1.

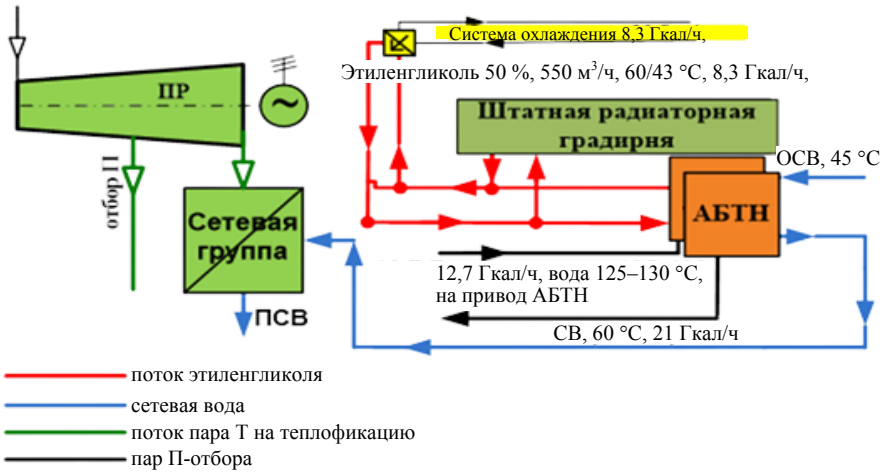


Рис. 1. Расчетная схема системы теплоснабжения

Fig. 1. Estimated diagram of the heat supply system

Методика и расчет системы теплоснабжения

Рассмотрим методику расчета для оценки предложенного варианта.

Нагрузку сетевой группы определяем по формуле

$$Q_{\text{сет.гр}} = Q_{\text{сум}} - Q_{\text{АБТН}},\ \text{МВт}, \tag{1}$$

где $Q_{\text{сет.гр}}$ – нагрузка на сетевую группу, МВт; $Q_{\text{сум}}$ – суммарная нагрузка, МВт; $Q_{\text{АБТН}}$ – нагрузка на АБТН, МВт.

В свою очередь, рассчитаем нагрузку на АБТН

$$Q_{\text{АБТН}} = \frac{\left(t''_{\text{АБТН}} - t_{\text{ОСВ}}\right)Q_{\text{сум}}}{\left(t_{\text{ПСВ}} - t_{\text{ОСВ}}\right)},\ \text{МВт}, \tag{2}$$

где $t''_{\text{АБТН}}$ – температура воды, выходящая из АБТН,°С; $t_{\text{ОСВ}}$ – то же обратной сетевой воды (ОСВ),°С; $t_{\text{ПСВ}}$ – то же прямой сетевой воды (ПСВ),°С.

Нагрузка на привод АБТН

$$Q_{\text{привод}} = \frac{Q_{\text{АБТН}}}{\mu},\ \text{МВт}, \tag{3}$$

где μ – коэффициент преобразования, или отопительный коэффициент, принимаемый равным 1,72.

Утилизируемый поток оборотной воды:

$$Q_{\text{утилиз}} = Q_{\text{АБТН}} - Q_{\text{привод}},\ \text{МВт}. \quad (4)$$

Паровая нагрузка

$$Q_{\text{пар.}} = Q_{\text{сет.гр.}} + Q_{\text{привод}},\ \text{МВт}. \quad (5)$$

Экономия составит

$$\text{Э} = \frac{Q_{\text{утилиз}}}{Q_{\text{сум}}} \cdot 100\ \ \%. \quad (6)$$

Результаты расчетов тепловых нагрузок на сетевую группу как для классической схемы теплоснабжения, так и для ТЭЦ с АБТН представлены в табл. 1 и 2 соответственно:

Таблица 1

Расчет тепловых нагрузок на сетевую группу для ТЭЦ

Calculation of thermal loads on the grid group for CHP

Температура окружающей среды, °С	–24	–20	–16	–12	–8	–4	0	4	8	20
Отопительная нагрузка, МВт	1,33	1,20	1,07	0,95	0,82	0,69	0,57	0,44	0,32	0,0
Нагрузка ГВС, МВт	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17
Суммарная нагрузка, МВт	2,50	2,37	2,25	2,12	1,99	1,87	1,74	1,61	1,49	1,17
Температура сетевой воды (СВ) на выходе, °С	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Нагрузка сетевой группы, МВт	2,50	2,37	2,25	2,12	1,99	1,87	1,74	1,61	1,49	1,17
Паровая нагрузка, МВт	2,50	2,37	2,25	2,12	1,99	1,87	1,74	1,61	1,49	1,17

Таблица 2

Расчет тепловых нагрузок на сетевую группу для ТЭЦ с АБТН

Calculation of thermal loads on the grid group for CHP with ABLHP

Температура окружающей среды, °С	–24	–20	–16	–12	–8	–4	0	4	8	20
Отопительная нагрузка, МВт	1,33	1,20	1,07	0,95	0,82	0,69	0,57	0,44	0,32	0,00
Нагрузка ГВС, МВт	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17
Суммарная нагрузка, МВт	2,50	2,37	2,25	2,12	1,99	1,87	1,74	1,61	1,49	1,17
Температура ПСВ,°С	105,0	105,0	102,8	94,1	85,2	76,1	70,0	70,0	70,0	70,0
Температура ОСВ, °С	70,0	66,2	62,3	58,3	54,2	49,9	45,4	40,6	35,5	35,5
Температура СВ на выходе АБТН, °С	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Разность температур ПСВ и ОСВ	35,0	38,8	40,5	35,7	31,0	26,2	24,6	29,4	34,5	34,5
Разность на выходе из АБТН и ОСВ	–	–	–	1,7	5,8	10,1	14,6	19,4	24,5	24,5
Нагрузка АБТН, МВт	–	–	–	0,098	0,373	0,720	1,034	1,066	1,058	0,833

Окончание табл. 2

Температура окружающей среды, °C	–24	–20	–16	–12	–8	–4	0	4	8	20
Нагрузка сетевой группы, МВт	2,50	2,37	2,25	2,02	1,62	1,15	0,71	0,55	0,43	0,34
COP (μ)	–	–	–	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72
Нагрузка пара на привод АБТН, МВт	–	–	–	0,057	0,217	0,418	0,601	0,620	0,615	0,484
Утилизируемая теплота, МВт	–	–	–	0,041	0,156	0,301	0,433	0,446	0,443	0,349
Экономия, %	–	–	–	1,9	7,8	16,1	24,9	27,6	29,8	29,8
Паровая нагрузка, МВт	2,500	2,370	2,250	2,078	1,837	1,566	1,308	1,168	1,045	0,823

Для расчетной схемы (рис. 1) согласно полученным данным (табл. 2) построим температурный график (рис. 2).

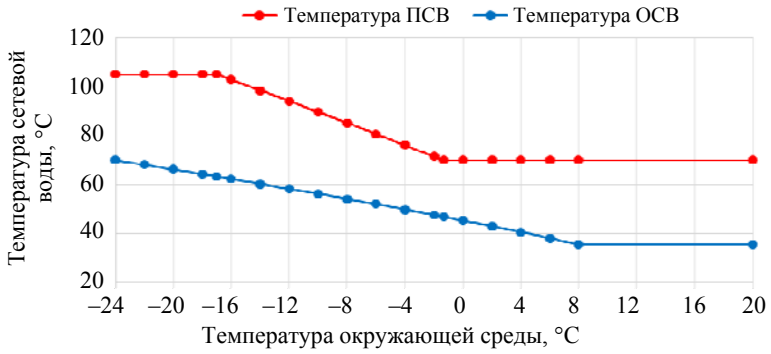


Рис. 2. Температурный график

Fig. 2. Temperature graph

По результатам расчетов, для наглядности полученных данных, построен график зависимости суммарной паровой нагрузки, необходимой для теплоснабжения, от температуры окружающей среды (рис. 3).

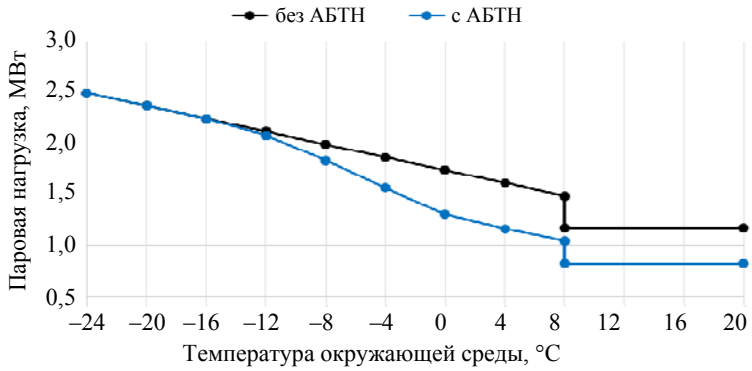


Рис. 3. График зависимости паровой нагрузки от температуры окружающей среды

Fig. 3. Graph of the dependence of the steam load on the ambient temperature

На графике (рис. 3) видно, что при одинаковой температуре окружающей среды паровая нагрузка, необходимая для теплоснабжения, для варианта ТЭЦ с АБТН ниже, чем по классическому варианту теплоснабжения.

Также для наглядности экономии построен график зависимости паровой нагрузки от продолжительности стояния температуры окружающей среды (рис. 4).

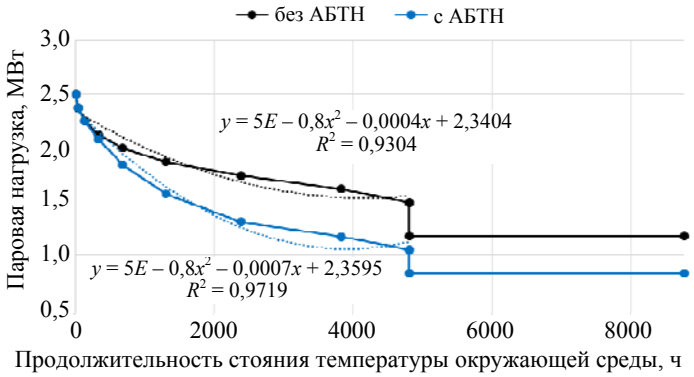


Рис. 4. График зависимости паровой нагрузки
от продолжительности стояния температуры окружающей среды

Fig. 4. Graph of the dependence of the steam load
on the duration of standing ambient temperature

Данный график (рис. 4) аппроксимирован, в результате чего были получены следующие полиномиальные зависимости:

$$y_1 = \left(5 \cdot 10^{-8}\right) x^2 - \left(0,0004\right) x + 2,3404;$$

$$y_2 = \left(9 \cdot 10^{-8}\right) x^2 - \left(0,0007\right) x + 2,3595.$$

Так как количество паровой нагрузки является площадью под графиком, эти зависимости проинтегрированы и определены следующие данные: так, для кривой, характеризующей работу ТЭЦ без АБТН, получено 13113,4 МВт·ч (11277,6 Гкал), а для кривой, характеризующей работу ТЭЦ с АБТН, получено 9841,6 МВт·ч (8463,8 Гкал) (рис. 4). Разницей, отражающей экономию, является разность площадей под графиком (рис. 4). Она составляет 3271,8 МВт·ч (2813,8 Гкал), или 467,1 т у. т.

Использование АБТН в схемах ТЭЦ снижает генерацию электроэнергии на ТЭЦ за счет исключения ее выработки на потоке пара в конденсатор, что, кроме всего прочего, облегчает покрытие графика электропотребления в части прохождения минимумов нагрузок объединенной энергосистемы [10]. Также с помощью интеграции АБТН в тепловую схему ТЭЦ обеспечивается блокирование рассеяния энергии. При этом имеют место высокие технико-экономические показатели, обеспечивающие инвестиционную привлекательность такого проекта.

ВЫВОДЫ

1. Предложенная система теплоснабжения «умного дома», а в будущем «умного жилого комплекса» или даже «умного города» с использованием интеграции АБТН в тепловую схему ТЭЦ позволяет сохранить существующую классическую систему теплоснабжения, лишь модернизировав ее.

2. В результате расчета определено, что рассмотренная система теплоснабжения эффективна, позволяет экономить топливно-энергетические ресурсы.

3. Данное решение предоставляет возможность также повысить электрический КПД ТЭЦ за счет утилизации теплоты охлаждающей воды конденсатора турбины и нагрева тем самым ОСВ.

4. Применение таких систем теплоснабжения позволит уменьшить количество вредных выбросов в окружающую среду, тем самым улучшить экологическую картину квартала, затем района и впоследствии всего «умного города», если и далее двигаться в направлении «зеленого» жилищного строительства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковалев, М. М. Будущее белорусской энергетики на фоне глобальных трендов: моногр. / М. М. Ковалев, А. С. Кузнецов. Минск: Изд. центр БГУ, 2018. 223 с.
2. Китиков, В. О. Электрическое отопление: проблемы и пути решения в Беларуси / В. О. Китиков, Ю. А. Башко // Энергоэффективность: сб. ст. Минск, 2022. С. 12–18.
3. Янчук, В. В. Повышение эффективности действующих тепловых электрических станций в современных условиях / В. В. Янчук, В. Н. Романюк // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 6. С. 511–523. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-511-523.
4. Оценка термодинамической эффективности Объединенной энергетической системы Беларуси. Ч. 1 / В. Н. Романюк [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 1. С. 44–56. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-44-56.
5. Кох, А. Варианты электрификации теплоснабжения в секторе зданий в Германии / А. Кох, А. Лоренц // Энергоэффективность: сб. ст. Минск, 2022. С. 18–22.
6. Кудинов, В. А. Техническая термодинамика и теплопередача: учеб. для академического бакалавриата / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов, Е. В. Стефанюк. 3-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2015. 566 с.
7. Янчук, В. В. Регенеративное использование низкопотенциальных сбросных потоков теплоты ТЭЦ на примере цикла ПТ-60 [Электронный ресурс] / В. В. Янчук, В. Н. Романюк // Актуальные проблемы физики, электроники и энергетики: электронный сб. статей I Междунар. науч.-практ. конф., Новополоцк, 27–28 окт. 2022 г. Новополоцк: Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой, 2023. С. 247–250. Режим доступа: https://elib.psu.by/handle/123456789/38104.
8. Перехвал, М. Б. Применение абсорбционных тепловых насосов и холодильных машин в различных секторах промышленности и жилищно-коммунального хозяйства / М. Б. Перехвал, П. А. Перехвал, И. Л. Иокова // Global Science and Innovations 2022: Central Asia. 2021. № 4 (18). С. 35–38.
9. Перехвал, М. Б. Сравнение эксергетической эффективности абсорбционного и парокомпрессионного тепловых насосов / М. Б. Перехвал, П. А. Перехвал; науч. рук. И. Л. Иокова // Бутаковские чтения: сб. ст. II Всерос. с междунар. участием молодежной конф. / под ред. А. С. Заворина; Томский политехнический университет. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2022. С. 563–565.

10. Абсорбционные тепловые насосы в тепловой схеме ТЭЦ для повышения ее энергетической эффективности / В. Н. Романюк [и др.] // Энергохозяйство предприятий: сб. ст. / сост.: В. Н. Романюк [и др.]. Минск, 2013. С. 14–19.

Поступила 15.06.2023 Подписана в печать 30.08.2023 Опубликована онлайн 29.09.2023

REFERENCES

1. Kovalev M. M., Kuznetsov A. S. (2018) *The Future of Belarusian Energy Against the Background of Global Trends*. Minsk: BSU Publishing Center. 223 (in Russian).
2. Kitikov V. O., Bozhko Yu. A. (2022) Electric Heating: Problems and Solutions in Belarus. *Energoeffektivnost': Sb. St.* [Energy Efficiency: Collected Papers]. Minsk, 12–18 (in Russian).
3. Yanchuk V. V., Romaniuk V. N. (2022) Operating Thermal Power Plants Efficiency Improvement under Current Conditions. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations,* 65 (6), 511–523. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-5-511-523 (in Russian).
4. Romaniuk V. N., Bobich A. A., Ryzhova T. V., Bubyr T. V., Yanchuk V. V., Yatsukhna Y. S. (2023) Assessment of Thermodynamic Efficiency of the Belarusian Energy System. Part 1. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations,* 66 (1), 44–56. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-44-56 (in Russian).
5. Koch A., Lorenz A. (2022) Options for Electrification of Heat Supply in the Building Sector in Germany. *Energoeffektivnost': Sb. St.* [Energy Efficiency: Collected Papers]. Minsk, 18–22 (in Russian).
6. Kudinov V. A., Kartashov E. M., Stefanyuk E. V. (2015) *Technical Thermodynamics and Heat Transfer*. 3rd ed., Moscow, Yurait Publ. 566 (in Russian).
7. Yanchuk V. V., Romaniuk V. N. (2023) Regenerative Use of Low-Potential Waste Heat Flows of Thermal Power Plants on the Example of the "PT-60" Cycle. *Aktual'nye Problemy Fiziki, Elektroniki i Energetiki: Elektronnyi Sbornik Statei I Mezhdunarodnoi Nauch.-Prakt. Konf., Novopolotsk, 27–28 Okt. 2022 g.* [Actual Problems of Physics, Electronics and Energy. Electronic Collection of the Articles of the I International Scientific and Practical Conference, Novopolotsk, October 27–28, 2022]. Novopolotsk, Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk, 247–250 (in Russian).
8. Perekhval M. B., Perekhval P. A., Iokova I. L. (2021) Application of Absorption Heat Pumps and Refrigerating Machines in Various Sectors of Industry and Housing and Communal Services. *Global Science and Innovations 2022: Central Asia*, (4), 35–38 (in Russian).
9. Pereval M. B., Perekhval P. A. (2022) Comparison of the Exergetic Efficiency of Absorption and Vapor Compression Heat Pumps. *Butakovskie Chteniya: Sbornik Statei II Vserossiiskoi s Mezhdunarodnym Uchastiem Molodezhnoi Konferentsii* [Butakov Readings: Collection of the Articles of the II All-Russian Youth Conference with International Participation]. Tomsk, Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 563–565 (in Russian).
10. Romanyuk V. N., Muslina D. B., Bobich A. A., Kolomytskaya N. A. (2013) Absorption Heat Pumps in the Thermal Scheme of a CHP Plant to Increase its Energy Efficiency. *Energokhozyaistvo Predpriyatii: Sb. St.* [Energy Management of Enterprises. Collected Papers]. Minsk, 14–19 (in Russian).

Received: 15 June 2023 Accepted: 30 August 2023 Published online: 29 September 2023

https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-461-477

УДК 66.047.7

Исследование тепло- и массообмена в процессе конвективной термообработки и сушки теплоизоляционных материалов и приближенное уравнение кривой сушки

А. И. Ольшанский[1)], А. Н. Голубев[1)]

[1)]Витебский государственный технологический университет
(Витебск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. Представлены результаты исследования термической обработки в процессах сушки тонких теплоизоляционных материалов на основе наиболее общих закономерностей конвективной сушки влажных тел с установлением уравнения кривой сушки. Установлены численные величины тепло- и массообменных чисел Био для периода падающей скорости сушки. На основе изучения и анализа многих источников приближенно определены диапазоны изменения критериев Лыкова, Поснова, критерия фазового превращения для процессов термической обработки керамики, асбеста, войлока, пластин глины. Показано, что при значениях чисел Био меньше единицы, критериев Лыкова 0,05–0,13, Поснова 0,03–0,08 для режимов сушки с температурой 90–120 °С задача сушки как тепло- и массообменного процесса является внешней и внутренний перенос не влияет на условия взаимодействия поверхности материала с окружающей средой. Показано, что сушка тонких материалов протекает при числе Био меньше единицы и в условиях внешней задачи критерии подобия не влияют на конвективную сушку. Интенсивность испарения влаги с поверхности тела определяется величиной коэффициента теплоотдачи в числе Био и режимными параметрами процесса. Установлено, что процессы сушки материалов относятся к малоинтенсивным процессам. На основе элементов теории теплового регулярного режима установлены темп нагревания влажного тела и темп убыли влагосодержания. Рассмотрена задача построения кривых сушки без проведения экспериментов для определения длительности сушки теплоизоляционных материалов на основе приближенных уравнений, что представляет интерес для практики сушки. Построенные кривые сушки дают несовпадение с действительной кривой с погрешностью 4–5 %.

Ключевые слова: влагосодержание, температура, скорость сушки, коэффициенты теплоотдачи, массоотдачи, критерий Био, коэффициент сушки, темп нагревания тела

Для цитирования: Ольшанский, А. И. Исследование тепло- и массообмена в процессе конвективной термообработки и сушки теплоизоляционных материалов и приближенное уравнение кривой сушки / А. И. Ольшанский, А. Н. Голубев // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 66, № 5. С. 461–477. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-461-477

Адрес для переписки
Голубев Алексей Николаевич
Витебский государственный
технологический университет
просп. Московский, 72,
210038, г. Витебск, Республика Беларусь
Тел.: +375 29 112-79-25
tm@vstu.by

Address for correspondence
Golubev Aleksei N.
Vitebsk State
Technological University
72, Moskovsky Ave.,
210038, Vitebsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 29 112-79-25
tm@vstu.by

Investigation of Heat and Mass Transfer in the Process of Convective Heat Treatment and Drying of Thermal Insulation Materials and Approximate Equation of the Drying Curve

A. I. Ol'shanskii[1)], A. N. Golubev[1)]

[1)]Vitebsk State Technological University (Vitebsk, Republic of Belarus)

Abstract. The results of the study of heat treatment in the drying processes of thin thermal insulation materials based on the most general laws of convective drying of wet bodies with the establishment of the equation of the drying curve are presented. The numerical values of heat and mass transfer Biot numbers for the period of decreasing drying rate are established, too. Based on the study and analysis of numerous sources, the ranges of changes in the Lykov, Posnov, and phase transformation criteria for the processes of heat treatment of ceramics, asbestos, felt, and clay plates have been approximately determined. It is demonstrated that for values of Biot numbers less than one, for Lykov criteria value of 0.05–0.13 and for Posnov criteria value of 0.03–0.08 for drying modes with a temperature of 90–120 ° C, the task of drying, as a heat and mass transfer process, is external, and internal transfer does not affect the conditions of interaction of the material surface with the environment. It is also shown that the drying of thin materials takes place when the Biot number is less than one and, under the conditions of an external problem, the similarity criteria do not affect convective drying. The intensity of moisture evaporation from the body surface is determined by the value of the heat transfer coefficient in the Biot number and the regime parameters of the process. It has been established that the processes of drying materials are low-intensity processes. Based on the elements of the theory of thermal regular regime, the rate of heating of a wet body and the rate of decrease in moisture content are determined. The problem of constructing drying curves without conducting experiments to determine the duration of drying of thermal insulation materials based on approximate equations is considered; this problem is of interest for the practice of drying. The constructed drying curves do not coincide with the actual curve with an error of 4–5 %.

Keywords: moisture content, temperature, drying rate, heat transfer coefficients, mass transfer coefficients, Biot criterion, drying coefficient, body heating rate

For citation: Ol'shanskii A. I., Golubev A. N. (2023) Investigation of Heat and Mass Transfer in the Process of Convective Heat Treatment and Drying of Thermal Insulation Materials and Approximate Equation of the Drying Curve. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 66 (5), 461–477. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-461-477 (in Russian)

Введение

Основной задачей кинетики сушки является определение продолжительности термической обработки в процессах сушки влажных материалов [1–5]. Под кинетикой сушки понимают изменение среднего влагосодержания и средней температуры с течением времени [1–5]. Зависимости $\overline{u} = f(\tau)$ и $\overline{t} = f(\tau)$ в практике сушки принято называть кривыми сушки и температурными кривыми [1–4]. Знание кинетических зависимостей позволяет определить время тепловой обработки влажных материалов, расход теплоты на сушку, плотность тепловых потоков, интенсивность испарения влаги, температуру материала в процессе и основные размеры и тип сушильного аппарата [1, 2].

Основная часть

Для определения длительности сушки надо знать зависимость между скоростью сушки $d\overline{u} / d\tau$ и влагосодержанием материала $\overline{u}$. Такая зави-

симость устанавливается решением дифференциального уравнения влагопереноса для конвективной сушки пластины при постоянных коэффициентах влагопереноса [1, 2, 6–8]. Решение аналитического уравнения влагопереноса имеет вид [2, 8]

$$\left|\frac{\partial \bar{u}}{d\tau}\right| = a_m \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2}.$$

Граничное условие на поверхности пластины

$$-a_m \left|\frac{\partial \bar{u}}{\partial x}\right|_{x=R} = \bar{\alpha}_m (\bar{u}_{x=R} - u_\text{р}).$$

Здесь R – половина толщины пластины; $\bar{\alpha}_m$ – коэффициент массообмена (кг/(ч·°М)); a_m – коэффициент диффузии влаги (м^2/ч),

$$\bar{\alpha}_m = \frac{\lambda_m}{c_m \rho},$$

λ_m – коэффициент массопроводности (кг/(м·ч·°М)); c_m – то же удельной массоемкости (кг/(кг·°М)); ρ – плотность влажного тела (кг/м^3); $\bar{u}$ и $u_\text{р}$ – текущее и равновесное влагосодержание материала; °М – водяной градус.

Решение дифференциального уравнения при заданных краевых условиях при постоянных коэффициентах $\bar{\alpha}_m$ и a_m было решено Льюисом и А. В. Лыковым [2, 8].

Решение Льюиса имеет вид

$$-\frac{\partial \bar{u}}{\partial \tau} \approx \frac{a_m}{R^2}\left(\frac{1}{\frac{1}{2} + \frac{1}{\text{Bi}_m}}\right)(\bar{u} - u_\text{р}).$$

Решение А. В. Лыкова

$$-\frac{\partial \bar{u}}{\partial \tau} \approx \frac{a_m}{R^2}\left(\frac{1}{\frac{4}{\pi^2} + \frac{1}{\text{Bi}_m}}\right)(\bar{u} - u_\text{р}),$$

где $\text{Bi}_m = \dfrac{\bar{\alpha}_m R}{\lambda_m}$ – массообменный критерий Био.

Решения различаются только в коэффициентах (вместо $1/2$ стоит $4/\pi^2$).

Обозначим

$$\frac{a_m}{R^2}\left(\frac{1}{\frac{4}{\pi^2} + \frac{1}{\text{Bi}_m}}\right) = K,$$

получим уравнение кривой скорости сушки

$$-\frac{\partial \overline{u}}{\partial \tau} = K(\overline{u} - u_{\text{р}}),$$

где K – коэффициент сушки.

Система уравнений взаимосвязанного тепло- и массопереноса А. В. Лыкова применяется для описания процессов сушки самых различных материалов [2, 6–8]. В реальных условиях сушки коэффициенты влагопереноса являются величинами переменными, при этом зависимости от влажности и температуры материала находятся в очень сложной форме, что делает невозможным использование полученного решения для определения продолжительности сушки [2, 5]. Невозможность использования точного аналитического расчета кривой скорости сушки для определения времени сушки вызвало необходимость создания упрощенных экспериментальных приближенных методов расчета кривой скорости сушки с минимальным числом постоянных, определяемых из опыта [1–4, 8, 9]. Закономерности процесса сушки влажного тела определяются одновременным протеканием переноса теплоты и массы как внутри тела, так и теплообменом между поверхностью испарения материала при взаимодействии с окружающей средой [1, 2, 4]. Рассматривая процесс сушки как тепло- и массообменный процесс, выделяют следующие задачи [2, 4].

При больших значениях чисел Био (когда тепло- и массообменные числа Bi и Bi_m больше 50) условия массообмена в большей степени определяются внутренними свойствами материала, энергией связи влаги с материалом и режимом сушки [1–5] (*внутренняя задача*). Диффузионное сопротивление переносу влаги внутри влажного тела значительно превышает сопротивление при удалении влаги с поверхности материала в окружающую среду.

При значениях тепло- и массообменных чисел $0{,}5 < \text{Bi}_m < 50$ сушка протекает в условиях, характерных для *смешанной задачи*, когда сопротивление переносу влаги внутри и внешнее сопротивление при удалении влаги с поверхности примерно одинаковы [4].

При значениях чисел $\text{Bi}_m < 0{,}5$ скорость сушки не зависит от внутреннего сопротивления переносу, а определяется внешними условиями тепломассообмена (*внешняя задача*) [2, 4, 8].

Для выяснения количественных факторов, характеризующих задачу переноса теплоты и влаги в материале, и при взаимодействии поверхности испарения материала с окружающей средой необходимо рассмотреть влияние основных критериев подобия тепло- и массопереноса на процесс конвективной сушки влажных материалов [6, 7].

Решение системы дифференциальных уравнений тепло- и массопереноса в общем виде дает зависимость процесса сушки от большой группы тепло- и массообменных критериев подобия [6, 8, 10–12]. Для безразмерных температур и влагосодержаний можно упрощенно выделить главные

$$\overline{T}^*(\overline{U}^*) \text{ и } \overline{U}^*(\overline{T}^*) = f(\mathrm{Bi}, \mathrm{Bi}_m, \mathrm{Fo}, \mathrm{Fo}_m, \mathrm{Lu}, \mathrm{Ko}, \mathrm{Pn}, \varepsilon),$$

где $\mathrm{Bi}, \mathrm{Bi}_m, \mathrm{Fo}, \mathrm{Fo}_m$ – тепло- и массообменные критерии Био и Фурье; Lu, Ko, Pn – критерии Лыкова, Коссовича, Поснова; ε – критерий фазового превращения.

Однако не все критерии в одинаковой мере влияют на характер протекания процесса сушки [6, 10–12]. Сушка тонких материалов толщиной $\delta \approx 5-12$ мм (асбеста, войлока, керамики, пластин глины) при температурах $t_c = 90-120$ °С, скоростях движения воздуха $v \approx 3-10$ м/с протекает по схеме мягкого режима сушки, когда наблюдаются периоды постоянной скорости сушки и температуры материала на уровне температуры мокрого термометра $t_{м.т}$ [13, 14]. На рис. 1–4 представлены кривые сушки и температурные кривые в процессах сушки керамики, войлока, асбеста и глины.

Экспериментальные исследования конвективной сушки тонких материалов при режимах сушки $t_c = 90-120$ °С и $v = 3-10$ м/с показали, что для керамической плитки температурный перепад внутри тела составлял $\Delta t = 4-5$ °С, листового асбеста $\Delta t = 3-4$ °С, войлока $\Delta t = 5-6$ °С, пластин глины ($\delta = 12$ мм) $\Delta t = 1-2$ °С [14]. При конвективной сушке возникают градиенты влагосодержания и температуры, которые направлены противоположно [1, 2]. Градиент влагосодержания направлен от поверхности материала внутрь, а градиент температуры – изнутри материала к поверхности, и поверхностные слои имеют более высокую температуру, чем в центре. Следовательно, при конвективной сушке термовлагопроводность препятствует общему переносу влаги к поверхности [1, 2].

Термовлагопроводность материала определяется критерием Поснова [6, 7]. Критерий Поснова

$$\mathrm{Pn} = \frac{\delta_T \Delta t}{\Delta u}$$

обычно определяют как перепад влагосодержания тела, вызванный разностью температур, δ_T – термоградиентный коэффициент, характеризующий перенос пара и жидкости.

Для оценки влияния отдельных критериев подобия на конвективную сушку изучены источники [7, 10, 12, 15–22]. Значительное влияние на тепло- и массоперенос оказывают критерии поверхностного тепло- и массопереноса Bi и Bi_m. При малых значениях этих критериев скорости изменения температур и влагосодержаний незначительны, а градиенты температуры и влагосодержания малы (внешняя задача). Число Bi_m слабо влияет на внутренний перенос. В реальных условиях сушки критерии Bi и Bi_m зависят друг от друга. С изменением Bi меняется Bi_m, при этом их численные значения имеют приблизительно один порядок [6, 11, 25, 26].

Критерий внутреннего потенциала массопереноса Pn влияет только на массоперенос [6, 11, 17, 22]. Для силикатных, красных, белых каолиновых глин, которые в промышленности идут на производство керамических, фаянсовых, фарфоровых изделий, критерий Pn изменяется в пределах $\mathrm{Pn} \approx 0{,}08-0{,}14$, причем максимальные значения Pn наблюдаются в об-

ласти влагосодержаний $\bar{u} \approx 0{,}05 - 0{,}1$. В процессе сушки керамики изменение критерия Поснова происходит только за счет изменения $\Delta t = t_{\text{п}} - t_{\text{ц}}$ ($\text{Pn} \approx 0{,}08 - 0{,}1$) [11, 15].

Большое влияние на массоперенос оказывает комплексный критерий Федорова $\text{Fe} = \varepsilon\,\text{Ko}\,\text{Pn}$. Однако, поскольку сушка тонких материалов протекает при очень малых значениях критерия Pn и значениях критерия фазового превращения $\varepsilon \to 0$ (влага переносится к поверхности материала в виде жидкости), величиной критерия Федорова можно пренебречь [11–14]. При сушке тонких материалов критерий ε мало зависит от режимных параметров.

Существенное влияние на тепло- и массоперенос оказывает критерий Лыкова Lu. При малых значениях Lu перенос температуры происходит значительно быстрее, чем влагосодержания [6], и критерий Lu оказывает основное влияние на теплоперенос. Анализ использованных источников позволяет дать приближенно предельные изменения критерия Lu. Для войлока $\text{Lu} \approx 0{,}01 - 0{,}06$, для красной глины $\text{Lu} \approx 0{,}04 - 0{,}13$, для белой глины $\text{Lu} \approx 0{,}05 - 0{,}23$, для керамической плитки (силикатные глины) Lu ≈ $\approx (0{,}11 - 0{,}17) \cdot 10^{-2}$ [15] при $\bar{u} \approx 0{,}05 - 0{,}16$ и температурах $t_{\text{с}} = 30 - 57$ °С [15].

Из всей группы критериев подобия в основу по классификации процесса конвективной сушки положены характеристические числа Bi, Bi_m, Fo, Fo_m и число Lu, которые являются количественными факторами, характеризующими задачу переноса теплоты и влаги [4, 6, 11, 22]. По значению критерия Lu все материалы разбиты на три типа: I) $\text{Lu} = 0{,}1 - 0{,}5$; II) Lu = 0,02–0,12; III) Lu = 0,005–0,200 [4]. Недостаток классификации материалов по Bi, Bi_m и Lu заключается в том, что определяющие параметры (коэффициенты диффузии теплоты a и массы a_m, теплоотдачи $\bar{\alpha}$ и массоотдачи $\bar{\alpha}_m$) зависят не только от температуры, влагосодержания, вида материала, но и от конкретного метода и режима сушки [4]. Для определения критериев Bi, Bi_m, $\bar{\alpha}$ и $\bar{\alpha}_m$ использовались формулы для тепло- и массообменного критериев Нуссельта [1–5].

Тепло- и массообменные коэффициенты теплоотдачи $\bar{\alpha}$ и массоотдачи $\bar{\alpha}_m$ определяются по формулам [2, 4, 6, 8]

$$\text{Nu} = C\,\text{Re}^{0,5}\left(\frac{T_{\text{с}}}{T_{\text{м.т}}}\right)^2\left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\text{кр}}}\right)^n; \qquad (1)$$

$$\text{Nu}_m = A\,\text{Re}^{0,6}\,\text{Pr}_m^{\,0,33}\,\text{Gu}^{0,135}\left(\frac{T_{\text{п}}}{T_{\text{с}}}\right)^2, \qquad (2)$$

где числа Нуссельта $\text{Nu} = \dfrac{\bar{\alpha} l}{\lambda_{\text{воз}}}$, $\text{Nu}_m = \dfrac{\bar{\alpha}_m l}{\lambda_m}$; $\bar{\alpha}$ – коэффициент теплоотдачи от поверхности испарения материала в окружающую среду; Re – число

Рейнольдса; l – длина образца материала по набеганию потока; $\lambda_{воз}$ – коэффициент теплопроводности воздуха; $T_с$, $T_{м.т}$ – абсолютные температуры среды и мокрого термометра; $\mathrm{Gu} = \dfrac{T_с - T_{м.т}}{T_с}$ – критерий Гухмана; $\mathrm{Pr}_m = \dfrac{\nu_{воз}}{D}$ – массообменный критерий Прандтля [2, 4, 23]; $\nu_{воз}$ – коэффициент кинематической вязкости воздуха, м^2/ч.

При t = 0 °С коэффициент диффузии D_0 = 0,0754 м^2/ч [23]. Пересчет коэффициента диффузии D_0 на любую температуру проводится по формуле [23]

$$D = D_0\left(\frac{T_с}{273}\right)^{1,89}, \text{ м}^2/\text{ч}.$$

В случае испарения водяных паров с поверхности материала формула имеет вид [23]

$$D = 0{,}0754\left(\frac{T_с}{273}\right)^{1,89}, \text{ м}^2/\text{ч}.$$

Коэффициент кинематической вязкости воздуха $\nu_{воз}$ принимается по средней температуре между поверхностью материала $t_п$ и средой $t_с$. Массообменный критерий Прандтля равен

$$\mathrm{Pr}_m{}^{0,33} = \left(\frac{\nu_{воз}}{D}\right)^{0,33} = \left(\frac{0{,}06}{0{,}20}\right)^{0,33} = 0{,}66 .$$

Коэффициенты C и A в уравнениях (1) и (2) принимают значения: для керамики C = 0,75, для асбеста C = 0,7, для войлока C = 0,435, для пластин глины C = 0,45 [1, 24], постоянная A = 0,49 [23, 24]. Поправки $\left(\overline{u} / \overline{u}_{кр}\right)^n$ и $\left(T_п / T_с\right)^2$ в (1) и (2) учитывают уменьшение коэффициентов $\overline{\alpha}$ и $\overline{\alpha}_m$ в периоде падающей скорости сушки. Для керамики, асбеста и войлока коэффициент n = 0,5, для глины n = 0,9 [1, 14, 24]. Значения коэффициентов тепло- и массоотдачи вычислялись по соотношениям:

$$\overline{\alpha} = \frac{\mathrm{Nu}\,\lambda_{воз}}{l};\ \overline{\alpha}_m = \frac{\mathrm{Nu}_m\,\lambda_m}{l}. \qquad (3)$$

По вычисленным значениям коэффициентов $\overline{\alpha}$ и $\overline{\alpha}_m$ определяются числа Bi и Bi_m:

$$\mathrm{Bi} = \frac{\overline{\alpha} R}{\lambda_{вл}};\ \mathrm{Bi}_m = \frac{\overline{\alpha}_m R}{\lambda_m}. \qquad (4)$$

В табл. 1 приведены результаты расчетов коэффициентов $\overline{\alpha}$, $\overline{\alpha}_m$, Bi, Bi_m, чисел Lu и Pn для процесса сушки керамической плитки.

Величины чисел Bi, Bi_m, Lu и Pn (табл. 1) указывают на то, что процессы сушки тонких теплоизоляционных материалов протекают в условиях внешнего тепло- и массопереноса, когда скорость сушки очень слабо зависит от внутреннего массопереноса [2, 8, 11, 13, 25]. Следовательно, диапазон изменения величин основных критериев подобия показывает, что в условиях внешней задачи в процессах конвективной сушки они практически не оказывают влияния на характер протекания процесса. Интенсивность испарения влаги с поверхности влажного тела определяется величиной коэффициента теплоотдачи $\overline{\alpha}$ в теплообменном критерии Bi и параметрами процесса сушки.

К материалам, удаление влаги из которых происходит в условиях внешней задачи, относятся капиллярно-пористые материалы, сушка которых в периоде падающей скорости протекает с наличием периода постоянной скорости сушки и периода постоянной температуры на уровне температуры мокрого термометра $t_{\text{м.т}}$. Такая внешняя задача относится к малоинтенсивным процессам сушки [1–3].

Таблица 1

Значения критериев подобия и коэффициентов тепло- и массообмена в процессе конвективной термообработки и сушки керамической плитки

Values of similarity criteria and heat and mass transfer coefficients in the process of convective heat treatment and drying of ceramic tiles

Керамическая плитка: $120 \times 80 \times 5$ мм; $\rho = 1860$ кг/м^3.

Режим тепловой обработки: $t_{\text{с}} = 120$ °С; $v = 5$ м/с; $\varphi = 5$ %; $t_{\text{м.т.}} = 49$ °С; $\overline{u}_0 = 0{,}2$;

$\overline{u}_{\text{кр}} = 0{,}1$; $N = 0{,}022$ мин$^{-1}$;

$\lambda_0 = 0{,}8$ Вт/(м·°С); $\lambda_{\text{вл}} \approx \lambda_0 + 0{,}075\overline{t}\,\overline{u}\exp(-2\overline{u})$; $\lambda_m = 0{,}235$ кг/(м·ч·°М);

$m_{\overline{u}} \approx 8{,}7N\exp(-2\overline{u}_0)$; $m_t = 0{,}115\exp(-2\overline{u}_{\text{кр}})$

$\overline{u}$	$\overline{\alpha}$, Вт/(м^2·°С)	$\lambda_{\text{вл}}$, Вт/(м·°С)	Bi	$\overline{\alpha}_m$, кг/(ч·°М)	λ_m, кг/(м·ч·°М)	Bi_m	Lu	Pn
0,08	47,5	1,06	0,120	26,4	0,235	0,28	0,03	0,05
0,06	39,6	1,02	0,097	20,2	0,220	0,21	0,05	0,07
0,04	30,5	0,98	0,078	16,4	0,198	0,20	0,11	0,09
0,02	22,4	0,89	0,064	14,5	0,185	0,19	0,13	0,06

Следовательно, из всей группы критериев подобия, полученных из решения дифференциальных уравнений тепло- и массообмена, в случае внешней задачи можно записать для безразмерных температур и влагосодержаний [8]:

$$\overline{T}^* = \frac{t_{\text{с}} - \overline{t}}{t_{\text{с}} - t_0} = f(-\mathrm{Bi}, \mathrm{Fo}); \qquad (5)$$

$$\bar{U}^* = \frac{\bar{u} - u_{\text{р}}}{\bar{u}_0 - u_{\text{р}}} = f(-\text{Bi}_m, \text{Fo}_m)\,. \tag{6}$$

Из решения полной системы дифференциальных уравнений массо- и теплопереноса для частного случая при отсутствии в материале термовлагопроводности (критерий $\text{Pn} = 0$), а критерий $\varepsilon = 0$ (влага в материале перемещается в виде жидкости) А. В. Лыковым было получено решение:

$$\bar{T}^* = \frac{t_{\text{с}} - \bar{t}}{t_{\text{с}} - t_0} = \exp(-\text{Bi Fo}); \tag{7}$$

$$\bar{U}^* = \frac{\bar{u} - u_{\text{р}}}{\bar{u}_0 - u_{\text{р}}} = \exp(-\text{Bi}_m \text{Fo}_m). \tag{8}$$

В первом периоде сушки температура $t_0 = t_{\text{м.т}}$. Комплексы критериев [8, 26–28, 31]:

$$\text{Bi Fo} = m_t \tau_{\text{II}}; \quad \text{Bi}_m \text{Fo}_m = m_u \tau. \tag{9}$$

Темп нагревания твердого тела m_t и темп убыли влагосодержания m_u определяются экспериментально построением графических зависимостей $\ln(t_{\text{с}} - \bar{t}) = f(\tau)$ и $\ln(\bar{u}_0 - \bar{u}) = f(\tau)$ путем измерения температуры и влагосодержания в каких-либо точках тела для двух последовательных моментов времени регулярного режима [8, 26–28, 31]. Обработкой многих таких зависимостей для процессов сушки керамики, асбеста, войлока, глины, кожи, тканей при различных режимах сушки получены уравнения для m_t и m_u [14, 26–28]:

$$m_t \approx 0{,}115 \exp(-2\bar{u}_{\text{кр}}); \tag{10}$$

$$m_u \approx 8{,}7\, N \exp(-2\bar{u}_0). \tag{11}$$

Для (7) и (8) с учетом (9) запишем в виде [26–28]:

$$\bar{T}^* = \frac{t_{\text{с}} - \bar{t}}{t_{\text{с}} - t_{\text{м.т}}} = \exp(-m_t \tau_{\text{II}}); \tag{12}$$

$$\bar{U}^* = \frac{\bar{u} - u_{\text{р}}}{\bar{u}_0 - u_{\text{р}}} = \exp(-m_u \tau). \tag{13}$$

Из (12) и (13) определяются среднеинтегральная температура материала и длительность сушки [26–29]:

$$\bar{t} = t_{\text{с}} - (t_{\text{с}} - t_{\text{м.т}}) \exp(-m_t \tau_{\text{II}})\,; \tag{14}$$

$$\tau = -\frac{1}{m_u} \ln \frac{\bar{u} - u_{\text{р}}}{\bar{u}_0 - u_{\text{р}}}\,. \tag{15}$$

Время сушки в период падающей скорости

$$\tau_{II} = -\frac{1}{m_u} \ln \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{кр} - u_p}. \quad (16)$$

Для практики сушки большой интерес представляет возможность вычисления продолжительности сушки для любого заданного режима по уравнениям, использование которых не требует проведения эксперимента. Все существующие опытные уравнения для определения длительности сушки содержат, как правило, от четырех до двух постоянных, определяемых из эксперимента [1–5].

Для построения кривой сушки и определения времени сушки, не производя эксперимента, необходимо иметь уравнения, связывающие ряд значений влагосодержания материала со значениями времени сушки, но которые не содержали бы постоянных, требующих проведения дополнительных опытов [8]. При наличии такой кривой сушки и скорости сушки определяется длительность процесса сушки до любого заданного значения влагосодержания без проведения эксперимента. Для построения такой кривой сушки воспользуемся тремя уравнениями, содержащими только одну величину, которую необходимо знать из опыта, – скорость сушки в периоде постоянной скорости *N*.

Уравнение (15), полученное на основе теории регулярного теплового режима [6, 10, 27, 28, 30], содержит параметр *N* в (11). Уравнение А. В. Лыкова для конвективной сушки [8]

$$\tau = \frac{\bar{u}_0 - \vec{u}_{кр}}{N} - \frac{\bar{u}_0}{1{,}8N} \ln \frac{\bar{u} - u_p}{\vec{u}_{кр} - u_p}, \quad (17)$$

где $\vec{u}_{кр}$ – условное критическое влагосодержание материала, определяемое соотношением $\vec{u}_{кр} - u_p = 1{,}8 / \bar{u}_0$.

Уравнение Н. С. Михеевой [32], полученное на основе большого числа опытных исследований по конвективной сушке различных капиллярно-пористых влажных материалов:

$$\tau = \frac{1{,}8}{N} \left[(\bar{u}_0 - u_p) - 0{,}56 \bar{u}_0 \right] \ln \frac{\bar{u}_0}{\bar{u} - u_p}. \quad (18)$$

Необходимый параметр *N* в первом приближении можно определить по методу Докучаева – Смирнова [33] следующим способом: от начального влагосодержания $\bar{u}_0$ выбирается произвольное значение $\bar{u}_1$, близкое к начальному $\bar{u}_0$, соответствующее времени сушки τ_1, и находится направление прямой, которое определяет величину $N \approx \operatorname{tg} \frac{\Delta \bar{u}}{\Delta \tau}$. На рис. 1 и 4 показано определение *N* по методу Докучаева – Смирнова. Кривые сушки, построенные без проведения опытов по формулам (15), (17) и (18) с определением величины *N* по методу Докучаева – Смирнова, дают несовпадение с действительной кривой (I) с погрешностью 4–5 % (рис. 1–4).

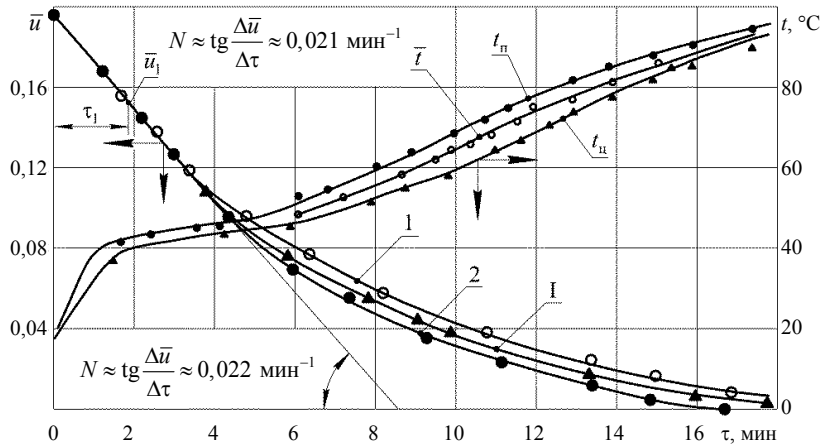


Рис. 1. Опытная кривая сушки (I) и экспериментальные температурные кривые для температур в центре и на поверхности материала в процессе тепловой обработки и сушки керамической плитки; режим сушки: t_c = 120 °C; v = 5 м/с; φ = 5 %; 1 – кривая сушки по формуле (17); 2 – то же по (18), температурная кривая $\bar{t} = f(\tau)$ по (14)

Fig. 1. Experimental drying curve (I) and experimental temperature curves for temperatures in the center and on the surface of the material during heat treatment and drying of ceramic tiles; drying mode: t_c = 120 °C; v = 5 m/s; φ = 5%; 1 – drying curve according to equation (17); 2 – drying curve according to equation (18), temperature curve $\bar{t} = f(\tau)$ according to equation (14)

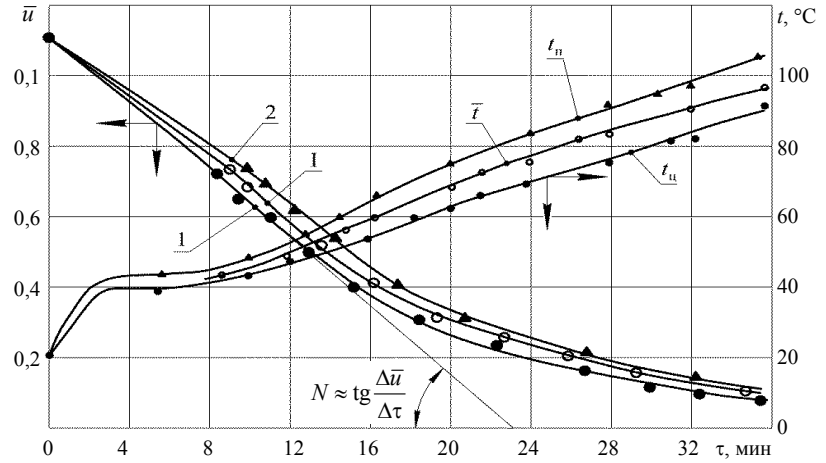


Рис. 2. Опытная кривая сушки (I) и экспериментальные температурные кривые для температур в центре и на поверхности материала в процессе сушки войлочной пластины; режим сушки: t_c = 120 °C; v = 3 м/с; φ = 5 %; 1 – кривая сушки по формуле (17); 2 – то же по (18); экспериментальная температурная кривая $\bar{t} = f(\tau)$ по (14)

Fig. 2. Experimental drying curve (I) and experimental temperature curves for temperatures in the center and on the surface of the material during the drying of the felt plate; drying mode: t_c = 120 °C; v = 3 m/s; φ = 5%; 1 – drying curve according to equation (17); 2 – drying curve according to equation (18); experimental temperature curve $\bar{t} = f(\tau)$ according to equation (14)

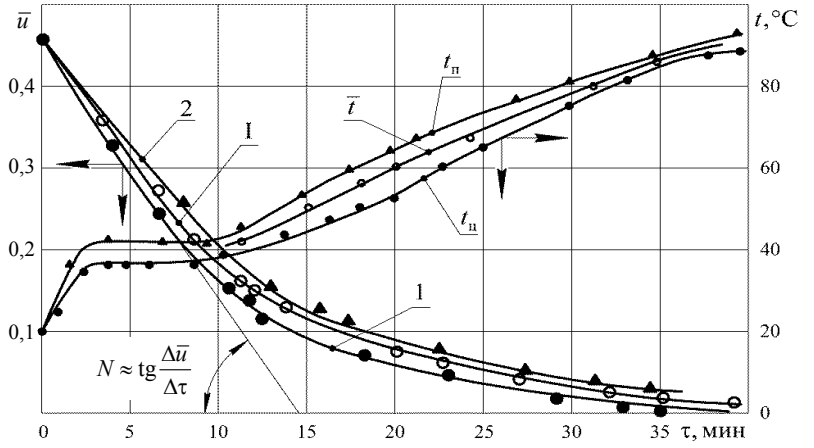


Рис. 3. Экспериментальная кривая сушки (I) и опытные температурные кривые для температур в центре и на поверхности материала в процессе термической обработки и сушки асбестовой пластины; режим сушки t_c = 120 °С; v = 5 м/с; φ = 5 %; 1 – кривая сушки по формуле (17); 2 – то же по (18); экспериментальная кривая $\bar{t} = f(\tau)$ по (14)

Fig. 3. Experimental drying curve (I) and experimental temperature curves for temperatures in the center and on the surface of the material during heat treatment and drying of the asbestos plate; drying mode t_c = 120 °C; v = 5 m/s; φ = 5%; 1 – drying curve according to equation (17); 2 – drying curve according to equation (18); experimental curve $\bar{t} = f(\tau)$ according to equation (14)

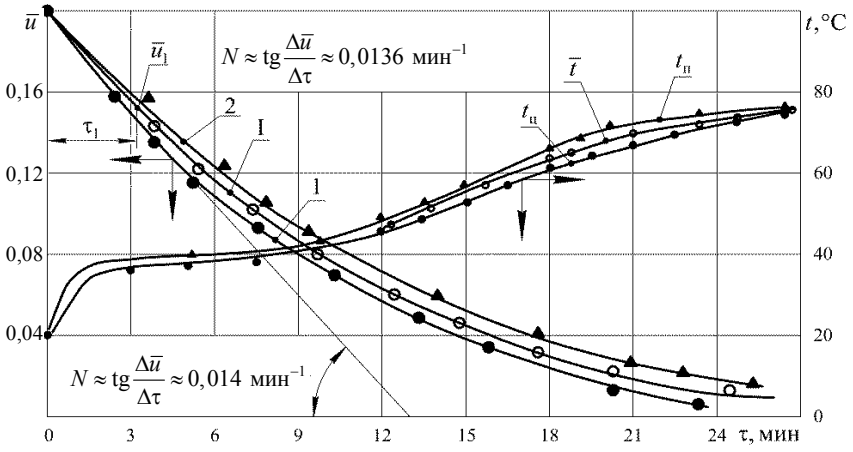


Рис. 4. Опытная кривая сушки (I) и экспериментальные кривые для температур в центре и на поверхности материала для процесса сушки пластин глины; режим сушки t_c = 90 °С; v = 10 м/с; φ = 6 %; 1 – кривая сушки по формуле (17); 2 – то же по (18); расчетная температурная кривая $\bar{t} = f(\tau)$ по (14)

Fig. 4. Experimental drying curve (I) and experimental curves for temperatures in the center and on the surface of the material for the process of drying clay plates; drying mode t_c = 90 °C; v = 10 m/s; φ = 6%; 1 – drying curve according to equation (17); 2 – drying curve according to equation (18); calculated temperature curve $\bar{t} = f(\tau)$ according to equation (14)

Результаты построения кривых сушки по (15), (17) и (18) и сопоставление с экспериментальными значениями для сушки шерстяного войлока и листового асбеста даны в табл. 2, кривых сушки для керамической плитки и пластины из красной глины по (17) и (18) – в табл. 3.

В табл. 2 и 3 приведены также расчеты температуры по уравнению (14) и сопоставление значений с экспериментом.

Таблица 2

Расчет кривой сушки по уравнениям (15), (17), (18) и температуры по (14) и сопоставление значений с экспериментом в процессах сушки шерстяного войлока и листового асбеста

Calculation of the drying curve according to equations (15), (17), (18) and of temperature according to equation (14) and comparison of values with experiment in the processes of drying wool felt and sheet asbestos

Шерстяной войлок: $130\times100\times8$ мм; $\rho = 180$ кг/м^3; $\overline{u}_0 = 1{,}14$; $\overline{u}_{кр} \approx 0{,}73$. Режим сушки: t_c = 120 °C; v = 3 м/с; φ = 5 %; $t_{м.т.}$ = 40 °C; N = 0,051 мин$^{-1}$; $m_{\overline{u}} \approx 0{,}06$ мин$^{-1}$; $m_t = 0{,}027$ мин$^{-1}$.								
$\overline{u}$	0,75	0,70	0,60	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10
τ, мин (15)	8,1	9,2	10,0	13,3	15,9	19,2	24,2	28,8
τ, мин (17)	9,4	10,0	11,8	14,2	16,7	21,3	25,6	–
τ, мин (18)	7,6	8,8	11,4	14,0	16,2	21,2	25,8	–
τ, мин (экс.)	8,5	9,5	10,5	13,5	16,0	19,5	23,5	30
$\overline{t}$, °C (экс.)	40	46	50	54	58	64	72	84
$\overline{t}$, °C (14)	–	45	48	52	56	62,5	71	82
Листовой асбест: $120\times80\times6$ мм; $\rho = 770$ кг/м^3; $\overline{u}_0 = 0{,}46$; $\overline{u}_{кр} = 0{,}21$; N = 0,0295 мин$^{-1}$. Режим сушки: t_c = 120 °C; v = 5 м/с; φ = 5 %; $t_{м.т.}$ = 42 °C; $m_{\overline{u}} \approx 0{,}08$ мин$^{-1}$; $m_t = 0{,}065$ мин$^{-1}$.								
$\overline{u}$	0,25	0,20	0,16	0,14	0,12	0,08	0,04	0,02
τ, мин (15)	7,7	9,4	11,6	12,8	14,4	18,2	24,8	30,6
τ, мин (17)	7,6	10,4	12,5	14,0	15,4	20,4	26,2	32,3
τ, мин (18)	7,6	10,8	12,4	14,2	15,7	19,8	25,8	32,5
τ, мин (экс.)	7,5	10,0	11,5	13,0	15,0	19,0	24,5	31,0
$\overline{t}$, °C (экс.)	42	42	48	57	62	72	86	95
$\overline{t}$, °C (14)	–	–	50,5	59,0	63,5	74,0	88,0	96,0

Таблица 3

Расчет кривой сушки по уравнениям (17), (18) и температуры по (14) и сопоставление значений с экспериментом в процессах сушки керамической плитки и пластин глины

Calculation of the drying curve according to equations (17), (18) and of temperature according to equation (14) and comparison of the values with the experiment in the processes of drying ceramic tiles and clay plates

Керамическая плитка: $120\times80\times5$ мм; $\rho=1860$ кг/м^3; $\overline{u}_0=0{,}2$; $\overline{u}_{кр}=0{,}1$. Режим сушки: $t_c=120$ °С; $v=5$ м/с; φ = 5 %; $t_{м.т.}=49$ °С; $N=0{,}022$ мин$^{-1}$; $m_{\overline{u}}\approx0{,}13$ мин$^{-1}$; $m_t=0{,}09$ мин$^{-1}$.								
$\overline{u}$	0,16	0,12	0,10	0,08	0,06	0,04	0,02	0,01
τ, мин (17)	2,2	3,6	4,9	6,5	8,6	10,8	14,2	18,5
τ, мин (18)	1,8	3,5	5,0	6,6	8,7	11,4	15,3	20,5
τ, мин (экс.)	2,0	3,5	4,5	6,0	8,0	10,5	14,5	19,5
$\overline{t}$, °С (экс.)	48	48	49	57	65	72	87	96
$\overline{t}$, °С (14)	–	–	–	60	67	74,4	88	98
Пластина (красная глина): $120\times80\times10$ мм; $\rho=1860$ кг/м^3; $\overline{u}_0=0{,}2$; $\overline{u}_{кр}=0{,}12$; $N=0{,}014$ мин$^{-1}$. Режим сушки: $t_c=90$ °С; $v=10$ м/с; φ = 6 %; $t_{м.т.}=39$ °С; $m_{\overline{u}}\approx0{,}0816$ мин$^{-1}$; $m_t=0{,}075$ мин$^{-1}$.								
$\overline{u}$	0,16	0,12	0,10	0,08	0,06	0,04	0,02	0,01
τ, мин (17)	3,4	5,6	7,2	9,0	11,6	15,4	19,8	25,4
τ, мин (18)	2,75	5,9	8,2	10,6	14,0	17,6	22,6	–
τ, мин (экс.)	3,0	5,0	7,5	9,5	12,5	16,5	20,5	25,5
$\overline{t}$, °С (экс.)	39	39	39	45	55	62	70	75
$\overline{t}$, °С (14)	–	–	–	47,0	56,5	63,0	71,0	76,5

ВЫВОДЫ

1. Исследованием конвективной сушки теплоизоляционных материалов с одновременным изучением закономерностей переноса теплоты и массы установлено, что процесс термообработки и сушки протекает в условиях внешней задачи, когда тепло- и массообменные числа Био меньше единицы и критерии подобия не влияют на конвективную сушку тонких материалов. Интенсивность теплообмена определяется величиной коэффициента теплоотдачи в числе Био и режимными параметрами процесса сушки.

2. Установлено, что процессы сушки материалов относятся к малоинтенсивным процессам. Дано построение кривых сушки без проведения экспериментов для определения длительности сушки на основе приближенных уравнений, что представляет интерес для практики сушки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. М.: Энергия, 1968. 472 с.
2. Акулич, П. В. Расчеты сушильных и теплообменных установок / П. В. Акулич. Минск: Беларус. наука, 2010. 443 с.
3. Красников, В. В. Кондуктивная сушка / В. В. Красников. М.: Энергия, 1973. 288 с.
4. Сажин, Б. С. Научные основы техники сушки / Б. С. Сажин. М.: Наука, 1997. 447 с.
5. Рудобашта, С. П. Массоперенос в системах с твердой фазой / С. П. Рудобашта. М.: Химия, 1980. 248 с.
6. Лыков, А. В. Теория тепло- и массопереноса / А. В. Лыков, Ю. А. Михайлов. М. – Л.: Госэнергоиздат, 1963. 535 с.
7. Лыков, А. В. Теоретические основы строительной теплофизики / А. В. Лыков. Минск: Изд-во Академии наук БССР, 1961. 519 с.
8. Лыков, А. В. Тепло- и массообмен в процессах сушки / А. В. Лыков. М.: Госэнергоиздат, 1956. 464 с.
9. Куц, П. С. Некоторые закономерности тепловлагообмена и приближенные методы расчета кинематики процесса сушки влажных материалов / П. С. Куц, А. И. Ольшанский // Инженерно-физический журнал. 1977. Т. 32, № 5. С. 1007–1014.
10. Васильев, В. Н. Технология сушки. Основы тепло- и массопереноса / В. Н. Васильев, В. Е. Куцакова, С. В. Фролов. Санкт-Петербург: ГИОРД, 2013. 224 с.
11. Михайлов, Ю. А. Влияние критериев подобия на тепло- и массообмен при конвективной сушке / Ю. А. Михайлов // Известия Академии наук Латвийской ССР, 1957. № 6.
12. Ольшанский, А. И. Регулярный тепловой режим и влияние критериев подобия тепломассообмена на процесс конвективной сушки пористой керамики / А. И. Ольшанский // Инженерно-физический журнал. 2016. Т. 89, № 1. С. 37–48.
13. Рабинович, Г. Д. Новый метод расчета конвективной сушки тонких материалов / Г. Д. Рабинович // Инженерно-физический журнал. 1966. Т. 11, № 2. С. 182–192.
14. Ольшанский, А. И. Исследование сушки тонких материалов с использованием обобщенных комплексных переменных / А. И. Ольшанский // Инженерно-физический журнал. 2016. Т. 89, № 4. С. 884–894.
15. Журавлева, В. П. Массоперенос при термообработке и сушке капиллярнопористых строительных материалов / В. П. Журавлева. Минск: Наука и техника, 1972. 189 с.
16. Лыков, А. В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах / А. В. Лыков. М.: Гостехиздат, 1954. 296 с.
17. Горобцова, Н. Е. Исследование диффузии влаги во влажных материалах / Н. Е. Горобцова // Инженерно-физический журнал. 1968. Т. 15, № 6. С. 1019–1026.
18. Франчук, А. У. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов / А. У. Франчук. М.: НИИ строительной физики, 1969. 142 с.
19. Блази, В. Строительная физика. Справочник проектировщика / В. Блази. М.: Техносфера, 2005. 536 с.
20. Григорьев, И. С. Физические величины: справочник / И. С. Григорьев, Е. З. Мейлихов. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
21. Лыков, А. В. Тепломассообмен: справочник / А. В. Лыков. М.: Энергия, 1972. 552 с.
22. Мельникова, И. С. Определение некоторых критериев переноса тепла и вещества при испарении из твердых тел / И. С. Мельникова // Тепло- и массообмен в процессах испарения: сб. ст. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 255 с.
23. Нестеренко, А. В. Основы термодинамических расчетов вентиляции и кондиционирования воздуха / А. В. Нестеренко. М.: Высш. шк., 1962. 355 с.
24. Лыков, А. В. Кинетика теплообмена в процессе сушки влажных материалов / А. В. Лыков, П. С. Куц, А. И. Ольшанский // Инженерно-физический журнал. 1972. Т. 23, № 3. С. 401–406.
25. Сергеев, Г. Т. Исследование внешнего тепло- и массопереноса при испарении жидкости капиллярно-пористым телом / Г. Т. Сергеев // Инженерно-физический журнал. 1961. Т. 4, № 5. С. 33–37.

26. Ольшанский, А. И. Исследование тепломассообмена в процессах тепловой обработки и сушки теплоизоляционных материалов / А. И. Ольшанский, С. В. Жерносек, А. М. Гусаров // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 2. С. 156–168. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-2-156-168.
27. Ольшанский, А. И. Регулярный тепловой режим нагревания влажных плоских капиллярно-пористых материалов в процессе сушки / А. И. Ольшанский, В. И. Ольшанский // Инженерно-физический журнал. 2014. Т. 87, № 6. С. 1308–1318.
28. Ольшанский, А. И. Экспериментальное исследование кинетики сушки тонких плоских влажных материалов методом регулярного режима с использованием обобщенных комплексных переменных / А. И. Ольшанский, А. М. Гусаров // Инженерно-физический журнал. 2017. Т. 90, № 3. С. 700–713.
29. Ольшанский, А. И. Экспериментальные исследования тепловлагообмена в процессе конвективной сушки тонких влажных материалов / А. И. Ольшанский, С. В. Жерносек, А. М. Гусаров // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 6. С. 564–578. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-564-578.
30. Ольшанский, А. И. Исследование кинетики тепловлагообмена при термической обработке и сушке тонких влажных теплоизоляционных материалов / А. И. Ольшанский, А. Н. Голубев // Энергетика. Изв. высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 1. С. 66–79. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-66-79.
31. Шорин, С. Н. Теплопередача / С. Н. Шорин. М.: Высшая школа, 1964. 491 с.
32. Кавказов, Ю. Л. Тепло- и массообмен в технологии кожи и обуви / Ю. Л. Кавказов. М., Легкая индустрия, 1973. 272 с.
33. Ольшанский, А. И. Исследование процесса сушки пористой керамики методом Докучаева–Смирнова / А. И. Ольшанский // Инженерно-физический журнал. 2013. Т. 86, № 2. С. 77–85.

Поступила 05.04.2023 Подписана в печать 06.06.2023 Опубликована онлайн 29.09.2023

REFERENCES

1. Lykov A. V. (1968) *Theory of Drying*. Moscow, Energiya Publ. 472 (in Russian).
2. Akulich P. V. (2010) *Calculations of Drying and Heat Exchange Installations*. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ. 443 (in Russian).
3. Krasnikov V. V. (1973) *Conductive Drying*. Moscow, Energia Publ. 288 (in Russian).
4. Sazhin B. S. (1997) *Scientific Fundamentals of Drying Techniques*. Moscow, Nauka Publ. 447 (in Russian).
5. Rudobashta S. P. (1980) *Mass Transfer in Systems with a Solid Phase*. Moscow, Khimiya Publ. 248 (in Russian).
6. Lykov A. V., Mikhailov Yu. A. (1963) *Theory of Heat and Mass Transfer*. Moscow – Leningrad, Gosenergoizdat Publ. 535 (in Russian).
7. Lykov A. V. (1961) *Theoretical Foundations of Construction Thermophysics*. Minsk, BSSR Academy of Sciences Publ. 519 (in Russian).
8. Lykov A. V. (1956) *Heat and Mass Transfer in Drying Processes*. Moscow, Gosenergoizdat Publ. 464 (in Russian).
9. Kuts P. S., Ol'shanskii A. I. (1977) Some Features of Heat and Moisture Transfer and Approximate Methods of Calculating the Drying Kinetics of Moist Materials. *Journal of Engineering Physics,* 32, 650–656. https://doi.org/10.1007/BF00862568.
10. Vasiliev V. N., Kutsakova V. E., Frolov S. V. (2013) *Drying Technology. Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. St. Petersburg, Giord Publ. 224 (in Russian).
11. Mikhailov Yu. A. (1957) Influence of Similarity Criteria on Heat and Mass Transfer During Convective Drying. *Izvestiya Akademii Nauk Latviyskoy SSR* [Proceedings of the Academy of Sciences of the Latvian SSR], (6) (in Russian).
12. Ol′shanski A. I. (2016) Regular Thermal Regime and Influence of Heat and Mass Transfer Similarity Criteria on the Process of Convective Drying of Porous Ceramics. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics,* 89, 38–49. https://doi.org/10.1007/s10891-016-1351-6.
13. Rabinovich G. D. (1966) A New Method of Calculation of Convective Drying of Thin Materials. *Journal of Engineering Physics,* 11, 98–104. https://doi.org/10.1007/BF00831262.

14. Ol′shanskii A. I. (2016) Investigation of the Drying of Thin Materials with the use of Generalized Complex Variables. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics,* 89, 886–895. https://doi.org/10.1007/s10891-016-1450-46.
15. Zhuravleva V. P. (1972) *Mass Transfer During Heat Treatment and Drying of Capillary-Porous Construction Materials*. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ. 189 (in Russian).
16. Lykov A. V. (1954) *Transfer Phenomena in Capillary-Porous Bodies*. Moscow, Gostekhizdat Publ. 296 (in Russian).
17. Gorobtsova N. E. (1968) Moisture Diffusion in Moist Materials. *Journal of Engineering Physics,* 15, 1183–1188. https://doi.org/10.1007/BF00828942.
18. Franchuk A. U. (1969) *Tables of Thermal Performance of Construction Materials*. Moscow, Research Institute of Construction Physics. 142 (in Russian).
19. Blasi V. (2005) *Construction Physics. Designer's Handbook*. Moscow, Tekhnosfera Publ. 536 (in Russian).
20. Grigoriev I. S., Meilikhov E. Z. (1991) *Physical Quantities*: *A Handbook*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 1232 (in Russian).
21. Lykov A. V. (1972) *Heat and Mass Transfer: A Handbook*. Moscow, Energiya Publ. 552 (in Russian).
22. Mel'nikova I. S. (1958) Determination of Some Criteria for the Transfer of Heat and Matter During Evaporation from Solids. *Teplo- i Massoobmen v Protsessakh Ispareniya: Sb. St.* [Heat and Mass Transfer in Evaporation Processes. Collection of Articles]. Moscow, USSR Academy of Sciences Publ. 255 (in Russian).
23. Nesterenko A. V. (1962) *Fundamentals of Thermodynamic Calculations of Ventilation and Air Conditioning*. Moscow, Vysshaya shkola Publ. 355 (in Russian).
24. Lykov A. V., Kutz P. S., Ol'shanskii A. I. (1972) Kinetics of Heat Transfer during the Desiccation of Moist Materials. *Journal of Engineering Physics*, 23 (3), 1082–1086. https://doi.org/10.1007/bf00832214.
25. Sergeev G. T. (1961) Study of External Heat and Mass Transfer During the Evaporation of a Liquid by a Capillary-Porous Body. *Inzhenerno-Fizicheskiy Zhurnal* [Engineering and Physics Journal], 4 (5), 33–37 (in Russian).
26. Ol'shanskii A. I., Zhernosek S. V., Gusarov A. M. (2022) Investigation of Heat and Mass Transfer in the Processes of Heat Treatment and Drying of Thermal Insulation Materials. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations,* 65 (2), 156–168. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-2-156-168 (in Russian).
27. Ol'shanskii A. I. (2014) Regular Heat Regime of Heating of Moist Capillary-Porous Materials in the Process of Their Drying. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics,* 87, 1362–1373. https://doi.org/10.1007/s10891-014-1139-5.
28. Ol'shanskii A. I., Gusarov A. M. (2017) Experimental Study of the Kinetics of Drying of Thin Plane Moist Materials by the Regular-Regime Method Using Generalized Complex Variables. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics,* 90, 665–678. https://doi.org/10.1007/s10891-017-1614-x.
29. Ol'shanskii A. I., Zhernosek S. V., Gusarov A. M. (2018) Experimental Studies of Heat and Moisture Exchange in the Process of Convective Drying of Thin Wet Materials. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations,* 61 (6), 564–578/ https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-564-578 (in Russian).
30. Ol'shanskii A. I., Golubev A. N. (2023) Investigation of the Kinetics of Heat and Moisture Exchange during Heat Treatment and Drying of Thin Wet Thermal Insulation Materials. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations,* 66 (1), 66–79. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-66-79 (in Russian).
31. Shorin S. N. (1964) *Heat Transfer*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 491 (in Russian).
32. Kavkazov Yu. L. (1973) *Heat and Mass Transfer in Leather and Footwear Technology*. Moscow, Legkaya Promyshlennost' Publ. 272 (in Russian).
33. Ol'shanskii A. I. (2013) Investigation of the Processes of drying of Porous Ceramics by the Dokuchaev–Smirnov Method. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics,* 86 (1), 80–87. https://doi.org/10.1007/s10891-013-0807-1.

Received: 5 April 2023 Accepted: 6 June 2023 Published online: 29 September 2023

https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-478-492

УДК 621.311

Анализ стоимости котельного агрегата угольных энергоблоков в зависимости от начального давления пара и наличия систем очистки дымовых газов

И. С. Садкин[1)], А. П. Шипицина[1)], П. А. Щинников[1)]

[1)]Новосибирский государственный технический университет (Новосибирск, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. При проектировании электростанций нового типа или оснащении их оборудованием нового поколения решается задача оценки капиталовложений при неопределенности информации о его стоимости. Отсутствие достоверных методов, пригодных к использованию в инженерной постановке, осложняет принятие решений о техническом развитии энергоблоков и ТЭС. При оценке капиталовложений в оборудование энергоблоков электростанций удобно применять неразрывные функции. Их использование позволяет вести анализ без стоимостных ограничений. В статье предлагается метод оценки капиталовложений в котельный остров энергоблоков электростанций на основе степенной параметрической функции. Метод включает оценку стоимости котлоагрегата с системами топливоподготовки в рамках котельного цеха, тяги и дутья. Особенностью метода является то, что стоимость котла включает стоимость природоохранных систем очистки дымовых газов от вредных продуктов сгорания в виде золы, оксидов серы и оксидов азота. Метод разработан в инженерной постановке. В методическом разделе показана работоспособность метода при оценке капиталовложений в котельный остров в сравнении с аналогичным показателем для стран ЕС, США и Китая. При обсуждении результатов исследования установлено, что капиталовложения в угольный котел с системами очистки дымовых газов лежат в диапазоне 25–200 млн дол. США в зависимости от мощности и начальных параметров пара. Доля стоимости природоохранных систем очистки дымовых газов составляют 28–50 % от суммарной стоимости котлоагрегата. Показано, что проектирование угольных энергоблоков с системами очистки дымовых газов на сверхкритические параметры мощностью менее 300 МВт неэффективно из-за низкой конкурентоспособности по показателю удельных капиталовложений в котел.

Ключевые слова: инженерный метод, параметры, капиталовложения, природоохрана, зола, оксиды азота, оксиды серы, степенная функция, котел, котельный остров

Для цитирования: Садкин, И. С. Анализ стоимости котельного агрегата угольных энергоблоков в зависимости от начального давления пара и наличия систем очистки дымовых газов / И. С. Садкин, А. П. Шипицина, П. А. Щинников // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 66, № 5. С. 478–492. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-478-492

Адрес для переписки
Садкин Иван Сергеевич
Новосибирский государственный технический университет
просп. К. Маркса, 20,
630073, г. Новосибирск, Российская Федерация
Тел.: +7 383 346-11-42
sadkinvanya@mail.ru

Address for correspondence
Sadkin Ivan Sergeevich
Novosibirsk State Technical University
20, K. Marks Ave.,
630073, Novosibirsk, Russian Federation
Tel.: +7 383 346-11-42
sadkinvanya@mail.ru

Cost Analysis of the Boiler Unit of Coal Power Units Depending on the Initial Steam Pressure and the Availability of Flue Gas Purification Systems

I. S. Sadkin[1)], A. P. Shipitsina[1)], P. A. Shchinnikov[1)]

[1)]Novosibirsk State Technical University (Novosibirsk, Russian Federation)

Abstract. When designing power plants of a new type or equipping them with new generation equipment, the problem of estimating capital investments is solved with the uncertainty of information on its cost. The lack of reliable methods suitable for use in engineering setting complicates decision-making on the technical development of power units and thermal power plants. When evaluating investments in the equipment of power plant units, it is convenient to use continuous functions. Their use makes it possible to carry out the analysis without cost restrictions. The article proposes a method for estimating capital investments in the boiler island of power units of power plants based on a power parametric function. The method includes an assessment of the cost of a boiler unit with fuel preparation systems within the boiler shop, draught and blast. A specific feature of the method is that the cost of the boiler includes the cost of flue gas purification systems from harmful combustion products in the form of ash, sulfur oxides and nitrogen oxides. The method was developed in an engineering setting. The methodological section demonstrates the performance of the method in assessing capital investments in a boiler island in comparison with the same indicator for the EU countries, the USA and China. When discussing the results of the study, it was found that capital investments in a coal-fired boiler with flue gas purification systems is in the range of US$ 25–200 million, depending on the power and initial steam parameters. The share of the cost of environmental flue gas purification systems is 28–50 % of the total cost of the boiler unit. It is demonstrated that the design of coal-fired power units with flue gas purification systems for supercritical parameters with a capacity of less than 300 MW is inefficient due to low competitiveness in terms of specific investments in the boiler.

Keywords: engineering method, parameters, investments, environmental protection, ash, nitrogen oxides, sulfur oxides, power parametric function, boiler, boiler island

For citation: Sadkin I. S., Shipitsina A. P., Shchinnikov P. A. (2023) Cost Analysis of the Boiler Unit of Coal Power Units Depending on the Initial Steam Pressure and the Availability of Flue Gas Purification Systems. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc*. 66 (5), 478–492. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-478-492 (in Russian)

Введение

В практике принятия решения при оценке капиталовложений в энергетическое оборудование, как правило, используют информацию заводов-изготовителей. В этом случае стоимость оборудования меняется дискретно, в зависимости от технических параметров и характеристик, используемых комплектующих, варианта исполнения, рыночной конъюнктуры, других факторов. Задача осложняется в условиях создания принципиально нового энергетического оборудования или его глубокой модернизации, например оснащением принципиально новыми природоохранными системами в виде рукавных фильтров или систем азотоочистки дымовых газов. В этом случае укрупненные оценки не могут использоваться, так как в них стоимость природоохранных систем определяется как доля от капиталовложений в энергоблок [1, 2], что снижает их достоверность.

При решении аналитических задач удобно использовать линейные зависимости или функции, характеризуемые неразрывностью влияющих параметров и показателей. Актуальность применения подобных функционалов возрастает при оценке стоимости перспективного оборудования, выпуск которого еще не налажен, а значит, отсутствуют сведения о стоимости. Вместе с тем для обоснования эффективности инвестиций в подобное новое оборудование капиталовложения должны быть известны.

Для решения подобных аналитических задач в Новосибирском государственном техническом университете (НГТУ) разработан метод оценки капиталовложений в энергетическое оборудование электростанций с использованием степенной функции вида [3]

$$K = K_0 \prod_i c_i \prod_j \left(\frac{x_j}{x_j^0} \right)^{n_j}, \qquad (1)$$

где K – капиталовложения в агрегат или его технологическую группу (котел, турбина, системы топливоподачи, регенерации, отпуска теплоты и т. п.); K_0 – базовое значение капиталовложений; c_i – коэффициент приведения, учитывающий вид технологической схемы и факторы технического исполнения агрегата или технологической группы (например, для котлов – вид топлива, тип котла, вид шлакоудаления, наличие природоохранных систем и т. п.); x_j – параметр, влияющий на стоимость изготовления оборудования (мощность, давление, температура, теплота сгорания топлива, число часов использования мощности и др.); x_j^0 – базовое значение влияющего параметра; n_j – показатель степени.

Метод прошел актуализацию и может успешно применяться при решении аналитических задач, связанных с оценкой стоимости капиталовложений в энергетическое оборудование [4–13], в том числе в задачах сравнения стоимости однотипного оборудования разных производителей [14, 15].

Далее в статье предлагается анализ влияния начального давления пара и природоохранных систем очистки дымовых газов на стоимость котельного агрегата энергоблоков электростанций с использованием метода оценки капиталовложений на основе степенной функции, разработанного в НГТУ [3, 15].

Методика исследования

Оценку стоимости котельного острова ведут, определяя капиталовложения в котел и в системы его обвязки – топливоподачу и пылеприготовление, тягу и дутье.

В этом случае капиталовложения в котел с системами определяются по выражению

$$K_{\text{К}} = K_{\text{КА}} + K_{\text{ТД}} + K_{\text{ТОП}}, \qquad (2)$$

где $K_{\text{КА}}$ – капиталовложения в котлоагрегат с системами очистки дымовых газов; $K_{\text{ТД}}$ – то же в тягодутьевую установку; $K_{\text{ТОП}}$ – то же в систему топливоподачи и пылеприготовления.

Капиталовложения в котлоагрегат с системами очистки дымовых газов (включая фундаменты, несущие конструкции, необходимые паропроводы, дымососы рециркуляции газов при их наличии):

$$K_{\text{КА}} = K_0^{\text{КА}} \prod_{i=1} c_i \prod_{j=1} \left(\frac{x_j}{x_j^0} \right)^{n_j}, \qquad (3)$$

где $K_0^{\text{КА}} = 7 \cdot 10^6$ дол. США.

В качестве природоохранных систем предусматривается установка мокрой сероочистки с пульпой известняка и комплексной каталитической системы с раствором аммиака для восстановления оксидов азота, а также электрофильтров.

Особенностью настоящего подхода является учет снижения стоимости природоохранных систем в зависимости от роста начального давления пара в котле. Рост начального давления, как правило, связан с увеличением начальной температуры, что вызывает повышение эффективности энергоблоков, следовательно, снижение расхода топлива. В свою очередь, снижение расхода топлива обусловливает снижение требований к природоохранным системам и их удешевление (δ_y) при обеспечении одинаковых нормативных показателей выбросов (рис. 1) [16]. Этот фактор учитывается параметром x_9 и показателем степени n_9 в (3).

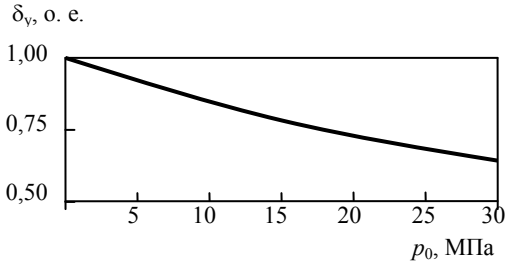


Рис. 1. Относительное снижение стоимости (δ_y) природоохранных систем в зависимости от начального давления пара

Fig. 1. Relative cost reduction (δ_y) of environmental protection systems depending on the initial steam pressure

Капиталовложения в тягодутьевое оборудование определяются по выражению

$$K_{\text{ТД}} = K_0^{\text{ТД}} \prod_{i=1} c_i \left(\frac{x_1}{x_1^0} \right)^{n_1}, \qquad (4)$$

где $K_0^{\text{ТД}} = 0,6 \cdot 10^6$ дол. США.

Коэффициенты приведения c_i, базовые влияющие параметры x_j^0 и показатели степени n_j представлены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Коэффициенты приведения для формул (3)–(5)

Correction coefficients for formulas (3)–(5)

Влияющий фактор	Характеристика фактора		Обозначение	Значение
Коэффициенты приведения для (3)				
Топливо	Камерная топка	Каменный уголь	c_1	1,10
		Бурый уголь		1,15
		Мазут, ВУС		1,05
		Газ		1,00
	Слоевая топка	Каменный уголь		1,05
		Бурый уголь		1,08
Тип котла	Прямоточный		c_2	1,00
	Барабанный			1,05
Перегрев пара	Без промперегрева		c_3	1,00
	С промперегревом			1,16
Профиль котла	Г- и П-образный		c_4	1,00
	Т-образный			1,10
Компоновка	Однокорпусная		c_5	1,00
	Двухкорпусная			1,12
Вид очистных систем	Без систем очистки		c_6	1,00
	Золоочистка			1,23
	Сероочистка			1,20
	Азотоочистка			1,20
	Золо- + серо- или азотоочистка			1,46
	Золо- + серо- и азотоочистка			1,82
Тип топки	Камерная		c_7	1,00
	Кольцевая			0,93
	Кипящий слой			1,45
	Циркулирующий кипящий слой			1,72
Технические способы повышения эффективности сжигания	Ступенчатое сжигание		c_8	1,03
	Рециркуляция			1,03
	Термоподготовка топлива			1,06
	Вихревые предтопки			1,10
Вид шлакоудаления	Твердое		c_9	1,00
	Жидкое			1,10
Коэффициенты приведения для (4)				
Топливо	Уголь		c_1	1,00
	Газ или мазут			0,85
Тип топки	Камерная		c_2	1,00
	С кипящим слоем			1,60
Коэффициенты приведения для (5)				
Вид системы топливоподготовки	С прямым вдуванием		c_1	1,00
	С промбункером			1,20
	С приготовлением дробленки			0,70
	С приемкой ВУС			1,30

Окончание табл. 1
Completion of Table 1

Влияющий фактор	Характеристика фактора	Обозначение	Значение
Вид основного топлива	Каменный уголь	c_2	1,00
	Бурый уголь		1,10
	Мазут или ВСУ		0,60
	Газ		0,40
Пуско-резервное топливо	Мазут	c_3	1,10
	Газ		1,05
Тип системы топливоподачи	ПНК	c_4	1,10
	ПВК		1,00
	Подача дробленки		1,25
	ВУС		1,30
Топливная универсальность	Одно основное топливо	c_5	1,00
	Два основных вида топлива		1,20

Таблица 2

Базовые параметры и показатели степени для формул (3)–(5)
Basic parameters and exponents for formulas (3)–(5)

Наименование	Параметр		Показатель степени	
	Обозначение	Значение	Обозначение	Значение
Базовые параметры и показатели степени для (3)				
Производительность котла, т/ч	x_1^0	100	n_1	≤900 т/ч: 0,8; >900т/ч: 0,77
Давление перегретого пара, МПа	x_2^0	17	n_2	0,40
Температура перегретого пара, °С	x_3^0	545	n_3	0,90
Температура пара пром-перегрева, °С	x_4^0	545	n_4	1,30
Температура уходящих газов, °С	x_5^0	130	n_5	–0,13
Температура питательной воды, °С	x_6^0	230	n_6	0,60
Теплота сгорания условного топлива, МДж/кг у.т.	x_7^0	7000	n_7	–0,20
Число часов использования установленной паропроизводительности, ч/год	x_8^0	6000	n_8	0,20
Снижение стоимости природоохранных систем в зависимости от давления перегретого пара, МПа: – золоочистка (з/о); – золо-, серо- или азото-очистка; – золо-, серо- и азото-очистка	x_9^0	5	n_9	 –0,20 –0,20 –0,28

Окончание табл. 2
Completion of Table 2

Наименование	Параметр		Показатель степени	
	Обозначение	Значение	Обозначение	Значение
Базовые параметры и показатели степени для (4)				
Расход топлива, т.у.т/ч	x_1^0	10	n_1	0,9
Базовые параметры и показатели степени для (5)				
Расход топлива, т.у.т/ч	x_1^0	10	n_1	0,75
Влажность твердого топлива, %	x_2^0	8	n_2	0,1

Капиталовложения в систему топливоподачи и пылеприготовления, включая бункеры, сушилки, мельницы, мельничные вентиляторы и турбовоздуходувки пневмотранспорта пыли, сепараторы, циклоны, пылепроводы:

$$K_{\text{ТОП}} = K_0^{\text{ТОП}} \prod_{i=1} c_i \prod_{j=1} \left(\frac{x_j}{x_j^0} \right)^{n_j}, \tag{5}$$

Здесь $K_0^{\text{ТОП}} = 3,7 \cdot 10^6$ \$ США.

Таким образом, для каменноугольного барабанного котла с камерной топкой, с промежуточным перегревом, П-образной компоновкой, с твердым шлакоудалением, с промбункером и системами золоочистки выражение для определения капиталовложений в котельный остров примет вид

$$K_{\text{К}} = \left\{ \left[K_0^{\text{КА}} c_1 c_2 c_3 c_6 \left(\frac{x_1}{100} \right)^{n_1} \left(\frac{x_2}{17} \right)^{n_2} \left(\frac{x_3}{545} \right)^{n_3} \left(\frac{x_4}{545} \right)^{n_4} \left(\frac{x_5}{130} \right)^{n_5} \left(\frac{x_6}{230} \right)^{n_6} \times \right. \right.$$
$$\left. \left. \times \left(\frac{x_7}{7000} \right)^{n_7} \left(\frac{x_8}{6000} \right)^{n_8} \left(\frac{x_9}{5} \right)^{n_9} \right] + \left[K_0^{\text{ТД}} \left(\frac{x_1}{10} \right)^{n_1} \right] + \left[K_0^{\text{ТОП}} c_1 c_3 \left(\frac{x_1}{10} \right)^{n_8} \left(\frac{x_2}{8} \right)^{n_2} \right] \right\}. \tag{6}$$

В (6) в качестве коэффициентов c_i следует использовать соответствующие значения из табл. 1, в качестве параметров x_j – фактические значения котла, для которого необходимо определить капиталовложения, а показатели степени n_j принимать по табл. 2.

Базовые значения капиталовложений рассчитаны с учетом известных соотношений материалоемкости и технологической сложности различных систем, агрегатов и оборудования, а при определении значений коэффициентов, параметров и показателей степени использованы данные заводов-изготовителей, прайс-листов поставщиков энергетического оборудования аналитических материалов [1, 17–22] с учетом их корректировки на современный уровень и прогнозной оценки [23–30].

Расчеты по предложенной методике показывают, что капиталовложения в котельный остров угольного энергоблока на высокие и сверхвысокие

параметры сопоставимы с затратами на аналогичное оборудование (при новом строительстве) в Китае и США и ниже, чем для стран ЕС (рис. 2), что и отражает практика современного проектирования. В рассмотренном случае затраты в котельный остров не учитывают природоохранных систем очистки дымовых газов, а данные по ЕС, США и Китаю представлены аналитическим агентством Lahmeyer International [1]. Легко видеть, что предложенный метод разработан в инженерной постановке и может применятся без каких-либо дополнений в аналитических задачах оценки капиталовложений в котельный остров энергоблоков электростанций.

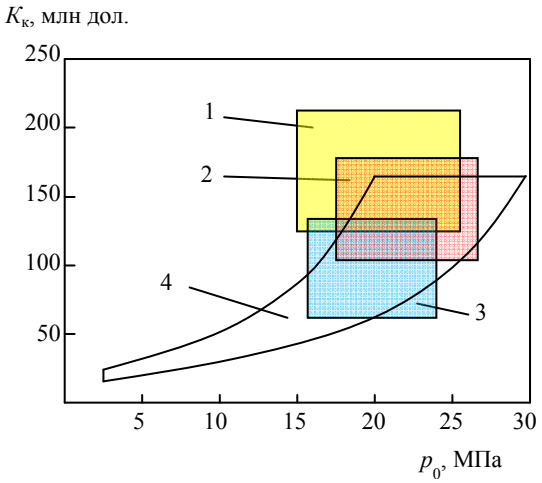


Рис. 2. Капиталовложения в котельный остров без учета систем очистки дымовых газов, с учетом топливоподачи по котельному цеху, пылеприготовления и тягодутьевой установки: 1 – для ЕС; 2 – США, 3 – Китая; 4 – результаты расчетов

Fig. 2. Capital investments in the boiler island, excluding flue gas purification systems but taking into account fuel supply to the boiler shop, coal pulverization and draught installation: 1 – for the EU; 2 – for the USA, 3 – for China; 4 – calculation results

Обсуждение результатов

В представленном выше методе предлагается учитывать стоимость систем очистки дымовых газов как часть стоимости котельного агрегата, который является основой котельного острова. Такой подход позволяет использовать метод в решении аналитических задач сравнения и в проектной работе, при обосновании эффективности инвестиций, когда информация о возможных технических решениях разрознена, часто недостоверна и противоречива.

Применение метода показывает, что стоимость котлоагрегата, оснащенного всеми видами очистки дымовых газов, составит от 25 до 200 млн дол. в зависимости от начального давления пара (рис. 3).

При этом в качестве систем очистки приняты электрофильтры (для золы), мокрая известняковая система (для SO_2) и селективная каталитическая технология (для NO_x).

Доля стоимости природоохранных технологий ($\delta_{оч}$) может составлять от 28 до 50 % от суммарной стоимости котлоагрегата, оснащенного ими (рис. 4). Эта доля зависит от начального давления пара и сочетания газоочистных систем, с переходом от низких и средних параметров к высоким и сверхвысоким она снижается до 10–40 %.

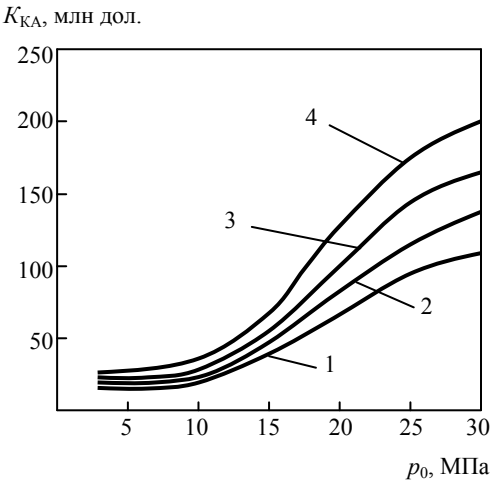


Рис. 3. Капиталовложения в угольный котел с системами очистки дымовых газов: 1 – без систем очистки; 2 – с золоочисткой; 3 – с золо-и серо- или азотоочисткой; 4 – с золо- , серо- и азотоочисткой

Fig. 3. Capital investments in a coal-fired boiler with flue gas purification systems: 1 – without purification systems; 2 – with an ash purification system; 3 – with a purification system from ash and sulfur oxides or nitrogen oxides; 4 – with a purification system from ash, sulfur oxides and nitrogen oxides

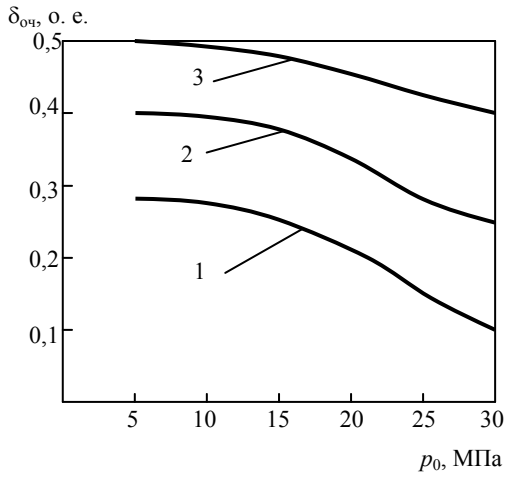


Рис. 4. Снижение доли систем очистки дымовых газов в стоимости котлоагрегата с переходом от низких и средних начальных давлений пара к высоким и сверхвысоким: 1 – для золоочистки; 2 – для золо- и серо- или азотоочистки; 3 – для золо-, серо- и азотоочистки

Fig. 4. Reducing the share of flue gas purification systems in the cost of the boiler unit with the transition from low and medium initial steam pressures to high and ultra-high ones as related to: 1 – an ash purification system; 2 – a purification system from ash and sulfur oxides or nitrogen oxides; 3 – a purification system from ash, sulfur oxides and nitrogen oxides

Далее рассмотрены котлы энергоблоков единичной мощностью 100, 200, 300, 500 и 800 МВт.

Капиталовложения в котлы с системами очистки дымовых газов во всех случаях растут с увеличением начальных параметров пара (рис. 5).

Очевидно, что капиталовложения в оборудование более мощных энергоблоков выше. Вместе с тем удельные капиталовложения у мощных блоков существенно ниже, что делает энергоблоки с единичными мощностями менее 300 МВт неконкурентоспособными.

В частности, удельные капиталовложения в котел с системами очистки дымовых газов для угольного энергоблока мощностью 100 МВт меняются от 250 до 500 дол./кВт с ростом начальных параметров от низких к сверхвысоким. Для блока 800 МВт этот показатель лежит в пределах 250–265 дол./кВт в области сверхвысоких параметров (рис. 6).

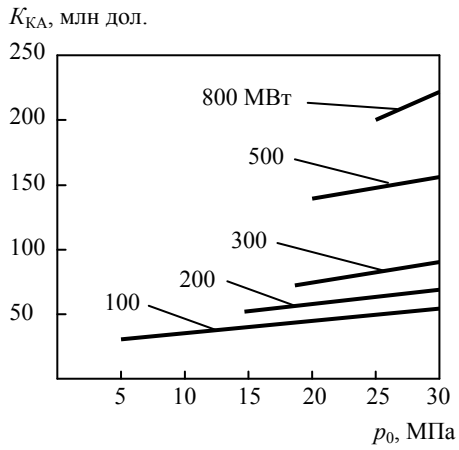


Рис. 5. Капиталовложения в котлы электростанций энергоблоков с системами очистки дымовых газов (электрофильтр, мокрая известняковая сероочистка, селективное каталитическое восстановление оксидов азота)

Fig. 5. Capital investments in boilers of power plants of power units with flue gas purification systems (electrostatic precipitator, limestone wet scrubbing, selective catalytic reduction of nitrogen oxides)

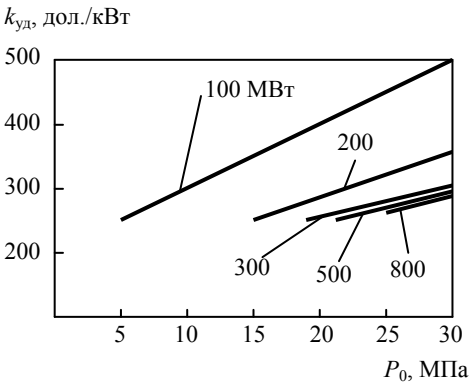


Рис. 6. Удельные капиталовложения в котлы энергоблоков электростанций с системами очистки дымовых газов

Fig. 6. Specific capital investments in boilers of power units of power plants with flue gas purification systems

Одновременно следует отметить, что перевод энергоблоков рассматриваемых типоразмеров с низких, средних и высоких параметров к сверхвысоким и суперсверхвысоким приведет к увеличению капиталовложений $\delta_{ка}$ в котлоагрегат на 10–27 % (рис. 7).

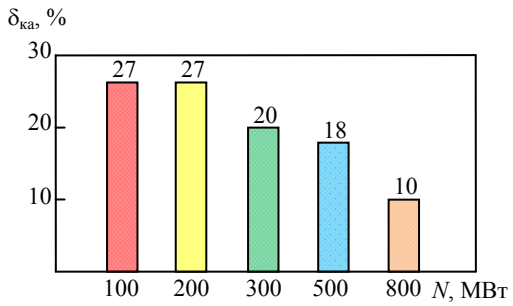


Рис. 7. Увеличение капиталовложений в котлы с системами очистки дымовых газов при их переводе на сверхкритические параметры

Fig. 7. Increasing capital investment in boilers with flue gas purification systems when they are converted to supercritical parameters

Меньшие значения соответствуют большим единичным мощностям.

ВЫВОДЫ

1. Предложен метод оценки капиталовложений в котельный остров энергоблоков угольных электростанций, включающий оценку стоимости

котла с системами тяги и дутья и топливоприготовления в рамках котельного цеха, основанный на применении степенной параметрической функции. При этом в стоимость котла включают стоимость природоохранных систем очистки дымовых газов от вредных продуктов сгорания в виде золы, оксидов серы и оксидов азота. Метод разработан в инженерной постановке и может широко применятся для аналитических задач сравнения, а также в практике проектирования электростанций при обосновании эффективности инвестиции.

2. Проиллюстрирована работоспособность метода при оценке капиталовложений в котельный остров в сравнении с аналогичным показателем для стран ЕС, США и Китая. Капиталовложения в угольный котел с системами очистки дымовых газов находятся в диапазоне 25–200 млн дол. в зависимости от мощности и начальных параметров пара (большие значения – для котлов на сверхкритические параметры; меньшие – для более высоких начальных параметров пара). При этом доля стоимости природоохранных систем очистки дымовых газов составляет 10–50 % от суммарной стоимости котлоагрегата.

3. Проектирование угольных энергоблоков с системами очистки дымовых газов на сверхкритические параметры мощностью менее 300 МВт неэффективно из-за низкой конкурентоспособности по удельным капиталовложениям в котел, которые в 1,4–2 раза превышают аналогичный показатель для энергоблоков мощностью 300–800 МВт. Переход на сверхкритические параметры для энергоблоков ведет к увеличению капиталовложений в котлоагрегат с системами очистки дымовых газов на 10–27 %.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23–29–00035.

ЛИТЕРАТУРА

1. Оценка стоимости строительства и эксплуатации электростанций [Электронный ресурс]: отчет LI 260610. М.: БадФильбель, 2009. Режим доступа: https://topuch.com/otchet-li-260610-oktyabre-2009/index.html. Дата доступа: 10.01.2020.
2. Бродский, Ю. Н. Очистка дымовых газов от диоксида серы магнезитовым методом / Ю.Н. Бродский, Р. Л. Шкляр // Электрические станции. 1993. № 8. С. 15–21.
3. Технико-экономическая эффективность энергоблоков ТЭС / В. С. Ларионов [и др.]. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1998. 31 с.
4. Схемно-параметрическая оптимизация котлов ТЭС с кольцевой топкой / Н. Г. Зыкова [и др.] // Теплофизика и аэромеханика. 2003. Т. 10, № 3. С. 477–483.
5. Комплексные исследования ТЭС с новыми технологиями: монография / П. А. Щинников [и др.]. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. 528 с.
6. Бокун, И. А. Технико-экономический прогноз при выборе оптимальной технологии использования биомассы и местных ископаемых топлив для производства тепловой и электрической энергии / И. А. Бокун, С. С. Северина // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2010. № 4. С. 80–91.

7. Ноздренко, Г. В. Обоснование рационального профиля энергоблока с суперсверхкритическими параметрами пара и установками серо- и азотоочистки / Г. В. Ноздренко, Е. Е. Русских, В. С. Шепель // Научный вестник НГТУ. 2011. № 1 (42). С. 131–138.
8. Sednin, V. A. Analysis of Hydrogen Use in Gas Turbine Plants / V. A. Sednin, A. V. Sednin, A. A. Matsyavin // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2023. Т. 66, №. 2. С. 158–168. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-2-158-168.
9. The Advanced Steam And Gas Technology / P. A. Shchinnikov [et al.] // Journal of Engineering Thermophysics. 2014. Vol. 23, No 3. P. 229–235. https://doi.org/10.1134/S1810232814030060.
10. Овсянник, А. В. Технико-экономический анализ полигенерационных турбоустановок на основе диоксида углерода / А. В. Овсянник, В. П. Ключинский // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 4. С. 387–400. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-387-400.
11. Mehdizadeh, M. A. Ecological and Economic Efficiency of Traditional and Alternative Methods of Electrical Energy Production with the Features of the Islamic Republic of Iran / M. A. Mehdizadeh, A. S. Kalinichenko, S. A. Laptyonok // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2018. Vol. 61, No 1. P. 60–69. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-1-60-69.
12. Технико-экономические показатели новой технологии комбинированного энергоснабжения с ПГУ и термотрансформаторами / О. К. Григорьева [и др.] // Доклады академии наук высшей школы Российской Федерации. 2012. № 1 (18). С. 112–116.
13. Nozdrenko G. Efficiency of Exergy Metod in Combined System of Heat Supply Thermal Power Station With District Ytat Pump / G. Nozdrenko, B. Pashka // International Conference on Knowledge Based Industry 2011, July 06–07, 2011. Ulaanbaatar, Mongolia, 2011. P. 438–442.
14. Shchinnikov, P. A. Evaluation of Capital Investments in Energy Equipment of a Power Plant by a Power Function / P. A. Shchinnikov, A. A. Frantseva, I. S. Sadkin // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1652. Article No. 012024. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1652/1/012024.
15. Щинников, П. А. Поагрегатная оценка капиталовложений в энергоблоки электростанций с использованием параметрической степенной функции / П. А. Щинников, А. А. Францева, И. С. Садкин // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2020. № 2–3 (79). С. 123–138. https://doi.org/10.17212/1814-1196-2020-2-3-123-138.
16. Шипицина, А. П. Влияние природоохранных систем на стоимость котлоагрегатов / Шипицина А. П., П. А. Щинников // Проблемы совершенствования топливно-энергетического комплекса: Материалы XVI Междунар. науч.-техн. конф., Саратов, 11–13 октября 2022 года. Саратов: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., 2022. С. 232–237.
17. Cost and Performance Baseline for Fossil Energy Plants. Vol. 1. Bituminous Coal and Natural Gas to Electricity [Electronic Resource]: Final Report DOE/2010/1397 / National Energy Technology Laboratory. Rev. 2. Pittsburgh, PA, USA, 2010. Mode of access: https://www.nrc.gov/docs/ML1217/ML12170A423.pdf.
18. Тепловые и атомные электрические станции: справочник / под общ. ред. В. А. Григорьева, В. М. Зорина. М.: Энергоатомиздат, 1989. 608 с.
19. Перспективы использования технологии ЦКС при техническом перевооружении ТЭС России / Г. А. Рябов [и др.] // Теплоэнергетика. 2009. № 1. С. 28–36.
20. Шмиголь, И. Н. Проблемы и перспективы сероочистки дымовых газов ТЭС в России / И. Н. Шмиголь // Экология в энергетике: тр. II Междунар. науч.-практ. конф., 19–21 октября 2005 г. М.: Изд-во МЭИ, 2005. С. 107–114.
21. Зайченко, В. М. Экономические аспекты снижения потребления природного газа на тепловых электростанциях / В. М. Зайченко, Э. Э. Шпильрайн, В. Я. Штеренберг // Теплоэнергетика. 2001. № 7. С. 15–18.

22. Тумановский, А. Г. Перспективы решения экологических проблем тепловых электростанций / А. Г. Тумановский, В. Р. Котлер // Теплоэнергетика. 2007. № 6. С. 5–11.
23. Комплексная оценка эффективных масштабов обновления тепловых электростанций при обосновании рациональной структуры генерирующих мощностей на перспективу до 2035 г. / Ф. В. Веселов [и др.] // Теплоэнергетика. 2017. № 3. С. 5–14.
24. Тумановский, А. Г. Перспективы развития угольных ТЭС России / А. Г. Тумановский // Теплоэнергетика. 2017. № 6. С. 3–13.
25. Прогноз научно-технологического развития отраслей топливно-энергетического комплекса России на период до 2035 года: утв. Министром энергетики Российской Федерации 14 октября 2016 года. М.: Минэнерго России, 2016. 106 с.
26. Kumar, R. Cost Analysis of a Coal-Fired Power Plant Using the NPV Method / R. Kumar, A. Kr. Sharma, P.C. Tewari // Journal of Industrial Engineering International. 2015. Vol. 11 (4). P. 495–504. https://doi.org/10.1007/s40092-015-0116-8.
27. Ольховский, Г. Г. Газификация твердых топлив в мировой энергетике (обзор) / Г. Г. Ольховский // Теплоэнергетика. 2015. № 7. С. 3–7.
28. Баторшин, В. А. Пылеугольные энергоблоки Manjung 4 и RBK 8 / В. А. Баторшин // Энергетика за рубежом. 2018. № 2. С. 30–39.
29. Газогенераторные технологии в энергетике: монография / А. В. Зайцев [и др.]. Екатеринбург: Сократ, 2010. 611 с.
30. Щинников, П. А. Современные и перспективные черты российского рынка энергетического машиностроения / П. А. Щинников // Энергетика и теплотехника: сб. науч. тр. / П. А. Щинников, О. В. Боруш; под ред. П. А. Щинникова. Новосибирск, 2019. Вып. 22. С. 7–20.

Поступила 22.02.2023 Подписана в печать 23.05.2023 Опубликована онлайн 29.09.2023

REFERENCES

1. *Estimation of the Cost of Construction and Operation of Power Plants. Report LI 260610*. Moscow, Bad Vilbel, 2009. Available at: https://topuch.com/otchet-li-260610-oktyabre-2009/index.html (accessed 17.10.2020) (In Russian).
2. Brodskii Yu. N., Shklyar R. L. (1993) Flue Gas Purification from Sulfur Dioxide by the Magnesite Method. *Elektricheskie Stantsii = Electrical Stations*, (8), 15–21 (in Russian).
3. Larionov V. S., Nozdrenko G. V., Shchinnikov P. A., Zykov V. V. (1998) *Technical and Economic Efficiency of TPP Power Units.* Novosibirsk, NSTU Publ. 31 (in Russian).
4. Zykova N. G., Serant F. A., Nozdrenko G. V., Shchinnikov P. A. (2003) Scheme and Parameter Optimization of TEP Boilers with an Annular Furnace. *Teplofizika i Aeromekhanika = Thermophysics and Aeromechanics*, (3), 477–483 (in Russian).
5. Shchinnikov P. A., Nozdrenko G. V., Tomilov V. G., Ovchinnikov Yu. V., Lovtsov A. A., Kovalenko P. Yu., Zykova N. G., Vikhman O. A., Borodikhin I. V. (2005) *Complex Research of TPP with New Technologies*. Novosibirsk, NSTU Publ. 528 (in Russian).
6. Bokun I. A., Severina S. S. (2010) Technical and Economic Forecast in Selection of Optimum Biomass and Local Fossil Fuel Application Technology for Thermal Electric Energy Generation. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations,* (4), 80–91 (in Russian).
7. Nozdrenko G. V., Russkikh E. E., Shepel' V. S. (2011) Rational Profile Substantiation for an Ultra-Supercritical Power Unit with Desulphurization and Denitrification Systems. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, (1), 131–138 (in Russian).

8. Sednin V. A., Sednin A. V., Matsyavin A. A. (2023) Analysis of Hydrogen Use in Gas Turbine Plants. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations,* 66 (2), 158–168. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-2-158-168.
9. Shchinnikov P. A., Nozdrenko G. V., Grigoryeva O. K., Kuryanov A. A. (2014) The Advanced Steam and Gas Technology. *Journal of Engineering Thermophysics*, 23 (3), 229–235. https://doi.org/10.1134/S1810232814030060.
10. Ovsyannik A. V., Kliuchinski V. P. (2023) Feasibility Study of Polygeneration Turbine Plants Based on Carbon Dioxide. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations,* 66 (4), 387–400. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-387-400 (in Russian).
11. Mehdizadeh M. A., Kalinichenko A. S., Laptyonok S. A. (2018) Ecological and Economic Efficiency of Traditional and Alternative Methods of Electrical Energy Production with the Features of the Islamic Republic of IRAN. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations,* 61 (1), 60–69 (in Russian). https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-1-60-69.
12. Grigoreva O., Nozdrenko G., Frantseva A., Serant F. A., Tomilov V. G., Ovchinnikov U. V. (2012) Techno-Economic Indicators New Technology Combined Heat Supply with Steam Gas Plant and Thermotransformer. *Doklady Akademii Nauk Vysshei Shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*, (1), 112–116 (in Russian).
13. Nozdrenko G., Pashka B. (2011) Efficiency of Exergy Method in Combined System of Heat Supply Thermal Power Station with District Heat Pump. *International Conference on Knowledge Based Industry 2011, July 06–07, 2011*. Ulaanbaatar, Mongolia, 438–442.
14. Shchinnikov P. A., Frantseva A. A., Sadkin I. S. (2020) Evaluation of Capital Investments in Energy Equipment of a Power Plant by a Power Function. *Journal of Physics: Conference Series,* 1652, 012024. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1652/1/012024.
15. Shchinnikov P. A., Frantseva A. A., Sadkin I. S. (2020) Aggregate Estimation of Investments in Power Plant Units Using a Parametric Power Function. *Nauchnyi Vestnik Novosibirskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta = Science Bulletin of the Novosibirsk State Technical University*, (2–3), 123–138. https://doi.org/10.17212/1814-1196-2020-2-3-123-138 (in Russian).
16. Shiptsina A. P., Shchinnikov P. A. The Influence of Environmental Protection Systems on the Cost of Boilers. *Problemy Sovershenstvovaniya Toplivno-Energeticheskogo Kompleksa: Materialy XVI Mezhdunarodnoi Nauch.-Tekhn. i Konf., Saratov, 11–13 Oktyabrya 2022 goda* [Problems of Improving the Fuel and Energy Complex: Materials of the XVI International Scientific and Technical Conference, Saratov, October 11–13, 2022]. Saratov, Saratov State Technical University Named after Gagarin Yu. A., 232–237 (in Russian).
17. National Energy Technology Laboratory (2010) *Cost and Performance Baseline for Fossil Energy Plants. Vol. 1. Bituminous Coal and Natural Gas to Electricity: Final Report DOE/2010/1397*. Pittsburgh, PA, USA. Available at: https://www.nrc.gov/docs/ML1217/ML12170A423.pdf.
18. Grigoriev V. A., Zorin V. M. (eds.) (1989) *Thermal and Nuclear Power Stations: The Reference Book*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 608 (in Russian).
19. Ryabov G. A., Folomeev O. M., Litun D. S., Sankin D. A., Dmitryukova I. G. (2009) Prospects for Using the Technology of Circulating Fluidized Bed for Technically Refitting Russian Thermal Power Stations. *Thermal Engineering*, 56 (1), 31–40. https://doi.org/10.1134/S0040601509010066.
20. Shmigol' I. N. Problems and Prospects of Flue Gas Desulphurization at TPP in Russia. *Ekologiya v Energetike: Trudy II Mezhdunarodnoi Nauch.-Prakt. Konf., 19–21 Oktyabrya 2005 g.* [Ecology

in Power Engineering: Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference, 19–21 October 2005]. Moscow, Publishing House MPEI, 107–114 (in Russian).

21. Zaichenko V. M., Shpil'rain E. E., Shterenberg V. Ya. (2001) Economic Aspects of Reducing Natural Gas Consumption at Thermal Power Plants. *Teploenergetika = Thermal Engineering*, (7), 15–18 (in Russian).
22. Tumanovskii A. G., Kotler V. R. (2007) Prospects for Solving Environmental Problems Pertinent to Thermal Power Stations. *Thermal Engineering,* 54 (6), 424–431. https://doi.org/10.1134/ S004060150706002X.
23. Veselov F. V., Erokhina I. V., Makarova A. S., Khorshev A. A. (2017) Comprehensive Assessment of the Effective Scope of Modernization of Thermal Power Plants to Substantiate the Rational Structure of the Generating Capacities for the Future until 2035. *Thermal Engineering,* 64 (3), 161–169. https://doi.org/10.1134/S0040601517030107.
24. Tumanovskii A. G. (2017) Prospects for the Development of Coal-Steam Plants in Russia. *Thermal Engineering,* 64 (6), 399–407. https://doi.org/10.1134/S0040601517060088.
25. *Forecast of Scientific and Technological Development of the Fuel and Energy Complex of Russia for the Period up to 2035*. Approved on October 14, 2016. Moscow, Ministry of Energy of Russia Publ., 2016. 106 (in Russian).
26. Kumar R., Sharma A. Kr., Tewari P. C. (2015) Cost Analysis of a Coal-Fired Power Plant Using the NPV Method. *Journal of Industrial Engineering International,* 11 (4), 495–504. https://doi.org/10.1007/s40092-015-0116-8.
27. Ol'khovskii G. G. (2015) Solid Fuel Gasification in the Global Energy Sector (A Review). *Thermal Engineering*, 2015, Vol. 62, No 7, 465–472. https://doi.org/10.1134/S0040601515070071.
28. Batorshin V. A. (2018) Pulverized Coal Power Units Manjung 4 and RBK 8. *Energetika za Rubezhom,* (2), 30–49 (in Russian).
29. Zaitsev A. V., Ryzhkov A. F., Silin V. E., Zagrutdinov R. Sh., Popov A. V., Bogatova T. F. (2010) *Gas-Generating Technologies in Power Engineering*. Ekaterinburg, Sokrat Publ. 611 (in Russian).
30. Shchinnikov P. A., Borush O. V. (2019) Modern and Promising Features of the Russian Power Engineering Market. *Energetika i Teplotekhnika: Sbornik Nauchnykh Trudov* [Power Engineering and Heat Engineering. Collection of Scientific Papers]. Novosibirsk, NSTU Publ., Iss. 22, 7–20 (in Russian).

Received: 22 February 2023 Accepted: 23 May 2023 Published online: 29 September 2023