

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕДИНЕНИЙ СНГ

ЭНЕРГЕТИКА

Том 66, № 1
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

- Романюк Ф. А., Румянцев В. Ю., Румянцев Ю. В.** Цифровые фильтры симметричных составляющих входных сигналов микропроцессорных защит электроустановок 5
- Матренин П. В., Хальясмаа А. И., Русина А. Г., Ерошенко С. А., Попкова Н. А., Секацкий Д. А.** Оперативное прогнозирование скорости ветра для автономной энергетической установки тяговой железнодорожной подстанции 18

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

- Седнин В. А., Бубырь Т. В.** Оценка эффективности регенерации тепловых отходов в продуваемых непроходных каналах теплотрасс 30
- Романюк В. Н., Бобич А. А., Рыжова Т. В., Бубырь Т. В., Янчук В. В., Яцухно Я. С.** Оценка термодинамической эффективности Объединенной энергетической системы Беларуси. Часть 1 44
- Uzakov G. N., Novik A. V., Davlonov X. A., Almardanov X. A., Chuliev S. E.** Heat and Material Balance of Heliopyrolysis Device
(**Узаков Г. Н., Новик А. В., Давлонов Х. А., Алмарданов Х. А., Чулиев С. Э.** Тепловой и материальный баланс гелиопиролизного устройства) 57
- Ольшанский А. И., Голубев А. Н.** Исследование кинетики тепловлагообмена при термической обработке и сушке тонких влажных теплоизоляционных материалов 66
- Лабкович О. Н., Погирницкая С. Г.** Оптимизация рабочих характеристик магнитожидкостных уплотнений для ветроэнергетических установок 80
- Овчинников Л. Н., Овчинников Н. Л., Митрофанов А. В., Василевич С. В., Шпейнова Н. С.** Экспериментальное и расчетное исследование формирования композитного гранулированного топлива 91

Главный редактор Федор Алексеевич Романюк

Редакционная коллегия

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

Ведущий стилистический редактор В. Н. Гурьянчик

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

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

Подписано к печати 31.01.2023. Формат бумаги 60×84¹/₈. Бумага мелованная.
Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 12,5. Уч.-изд. л. 8,75. Тираж 100 экз.
Дата выхода в свет . 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 № 02330/74 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 1

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

Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V. Symmetrical Components Digital Filters for Microprocessor-Based Protection Input Signals	5
Matrenin P. V., Khalyasmaa A. I., Rusina A. G., Eroshenko S. A., Papkova N. A., Sekatski D. A. Operational Forecasting of Wind Speed for an Self-Contained Power Assembly of a Traction Substation	18

HEAT POWER ENGINEERING

Sednin V. A., Bubyr T. V. Assessment of the Efficiency of Thermal Waste Regeneration in the Blown Impassable Channels of Heating Mains	30
Romaniuk V. N., Bobich A. A., Ryzhova T. N., Bubyr T. V., Yanchuk V. V., Yatsukhna Y. S. Assessment of Thermodynamic Efficiency of the Belarusian Energy System. Part 1	44
Uzakov G. N., Novik A. V., Davlonov X. A., Almardanov X. A., Chuliev S. E. Heat and Material Balance of Heliopyrolysis Device	57
Ol'shanskii A. I., Golubev A. N. Investigation of the Kinetics of Heat and Moisture Exchange during Heat Treatment and Drying of Thin Wet Thermal Insulation Materials	66
Labkovich O. N., Pogiritskaya S. G. Optimization of Performance Characteristics of Magnetofluidic Seals for Wind Power Plants	80
Ovchinnikov L. N., Ovchinnikov N. L., Mitrofanov A. V., Vasilevich S. V., Shpeynova N. S. Experimental and Computational Study of the Formation of Composite Granular Fuel	91

Editor-in-Chief Fiodar A. Romaniuk

Editorial Board

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

Leading Style Editor V. N. Guryanchyk

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

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

Passed for printing 31.01.2023. Dimension of paper 60×84¹/₈. Coated paper.
Digital printing. Type face Times. Conventional printed sheet 12,5.
An edition of 100 copies. Date of publishing 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 No 02330/74 from 03.03.2014.
220013, Minsk, 65, Nezavisimosty Ave.

© Belarusian National Technical University, 2023

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-5-17>

УДК 621.316.925

Цифровые фильтры симметричных составляющих входных сигналов микропроцессорных защит электроустановок

Ф. А. Романюк¹⁾, В. Ю. Румянцев¹⁾, Ю. В. Румянцев¹⁾

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

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

Реферат. В микропроцессорных защитах применяются измерительные органы, реагирующие на отдельные симметричные составляющие сигналов или их комбинацию. Это позволяет выполнять соответствующие устройства защиты более чувствительными. Из всех разновидностей цифровых фильтров симметричных составляющих преимущественно используются фильтры обратной и нулевой последовательностей. Из известных алгоритмов их программной реализации целесообразно использовать фильтры, формирующие ортогональные составляющие требуемой последовательности из ортогональных составляющих фазных или междуфазных величин сигналов. В качестве формирователей последних применяются цифровые фильтры Фурье, отличающиеся инерционностью. По этой причине их переходные режимы сопровождаются возникновением динамической погрешности, которая может существенно влиять на функционирование фильтров симметричных составляющих, ухудшая их свойства. Значительное снижение указанного влияния может быть достигнуто за счет применения для выделения ортогональных составляющих входных сигналов формирователей с коррекцией динамических погрешностей. Их основой являются нерекурсивные цифровые фильтры Фурье, ортогональные составляющие которых подвергаются программной корректирующей обработке с целью получения эквивалентных составляющих, отличающихся быстрозатухающими динамическими амплитудными погрешностями. Коррекция динамической фазовой погрешности реализуется в процессе получения результирующих ортогональных составляющих, являющихся комбинацией составляющих Фурье и вычисленных по ним расчетных. На основе информации об амплитудах и текущих фазах сигналов, содержащейся соответственно в эквивалентных и результирующих составляющих, формируются итоговые ортогональные составляющие, отличающиеся минимальными амплитудными и фазовыми погрешностями в переходных режимах. По этим составляющим рассчитываются ортогональные составляющие сигнала обратной и нулевой последовательностей в соответствующем фильтре. В среде динамического моделирования MATLAB-Simulink-SimPowerSystems реализована цифровая модель, в состав которой входят энергосистема, трехфазная группа трансформаторов тока, нагрузка, блок короткого замыкания, а также модели фильтров обратной и нулевой последовательностей. Исследование функциони-

Адрес для переписки

Румянцев Владимир Юрьевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 326-89-51
vrumiantsev@bntu.by

Address for correspondence

Rumiantsev Vladimir Yu.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 326-89-51
vrumiantsev@bntu.by

рования указанных фильтров выполнялось с использованием двух видов тестовых воздействий: трехфазной системы синусоидальных сигналов и трехфазной системы сигналов, приближенных к реальным вторичным токам при коротких замыканиях. Результаты исследований показали, что разработанные цифровые фильтры обратной и нулевой последовательностей по сравнению с аналогичными фильтрами Фурье, принятыми за эталоны, имеют в 1,1–1,4 раза более высокое быстродействие и отличаются улучшенными динамическими показателями.

Ключевые слова: цифровые фильтры симметричных составляющих, фильтры обратной и нулевой последовательностей, ортогональные составляющие, динамическая погрешность, коррекция амплитудной и фазовой погрешностей, модель, MATLAB-Simulink, тестовое воздействие, быстродействие, динамические показатели

Для цитирования: Романюк, Ф. А. Цифровые фильтры симметричных составляющих входных сигналов микропроцессорных защит электроустановок / Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев, Ю. В. Румянцев // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 66, № 1. С. 5–17. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-5-17>

Symmetrical Components Digital Filters for Microprocessor-Based Protection Input Signals

F. A. Romaniuk¹⁾, V. Yu. Rumiantsev¹⁾, Yu. V. Rumiantsev¹⁾

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

Abstract. In microprocessor protections, measuring bodies are used that react to individual symmetrical components of signals or a combination of them. This makes the corresponding protection devices more sensitive. Of all the varieties of digital filters of symmetrical components, filters of the negative and zero sequences are mainly used. As for the known algorithms of their software implementation, it is advisable to use filters that form orthogonal components of the required sequence from orthogonal components of phase or phase-to-phase values of signals. Digital Fourier filters, characterized by inertia, are used as formers of the latter. For this reason, their transient modes are accompanied by the appearance of a dynamic error, which can significantly affect the functioning of filters of symmetrical components, worsening their properties. A significant reduction in this effect can be achieved by using shapers with correction of dynamic errors to isolate the orthogonal components of the input signals. They are based on non-recursive digital Fourier filters, the orthogonal components of which are subjected to software correction processing in order to obtain equivalent components characterized by fast-fading dynamic amplitude errors. Correction of the dynamic phase error is realized in the process of obtaining the resulting orthogonal components, which are a combination of Fourier components and calculated ones that have been estimated according to them. Based on the information about the amplitudes and current phases of the signals contained in the equivalent and resultant components, respectively, the resulting orthogonal components are formed, differing in minimal amplitude and phase errors in transient modes. According to these components, the orthogonal components of the signal of the negative and zero sequences in the corresponding filter are calculated. In the dynamic modeling environment of MATLAB-Simulink-SimPowerSystems, a digital model is implemented, which includes a power system, a three-phase group of current transformers, a load, a short-circuit block, as well as models of negative and zero sequence filters. The study of the functioning of these filters was carried out using two types of test actions, viz. a three-phase system of sinusoidal signals and a three-phase system of signals close to real secondary currents in short circuits. The results of the research have demonstrated that the developed digital filters of the negative and zero sequences have 1.1–1.4 times higher performance as compared with similar Fourier filters

accepted as reference and that they are distinguished by improved magnitudes of dynamic indicators.

Keywords: digital filters of symmetric components, filters of negative and zero sequences, orthogonal components, dynamic error, correction of amplitude and phase errors, model, MATLAB-Simulink, test action, performance, dynamic indicators

For citation: Romaniuk F. A., Rumiantsev V. Yu., Rumiantsev Yu. V. (2023) Symmetrical Components Digital Filters for Microprocessor-Based Protection Input Signals. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 66 (1), 5–17. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-5-17> (in Russian)

Введение

В существующих микропроцессорных защитах электроустановок широко применяются измерительные органы, реагирующие на отдельные симметричные составляющие входных сигналов или их комбинацию [1]. Это, помимо других преимуществ, позволяет выполнять соответствующие устройства защиты более чувствительными. Необходимо отметить, что из всех разновидностей цифровых фильтров симметричных составляющих (ФСС) преимущественно используются фильтры обратной и нулевой последовательностей [2]. При надобности фильтр прямой последовательности может быть организован путем перемены местами двух входов в фильтре обратной последовательности, что делает вполне достаточным подробное рассмотрение только этого фильтра.

Теоретические предпосылки

В микропроцессорных защитах из известных алгоритмов программной реализации ФСС целесообразно использовать фильтры, формирующие ортогональные составляющие (ОС) соответствующей последовательности из ОС фазных или междуфазных величин входных сигналов [3]. При этом в цифровом ФСС вначале формируются ОС контролируемых входных сигналов, по которым в последующем вычисляются значения ОС необходимой последовательности. Главным элементом такого ФСС является формирователь ОС входных сигналов, основные свойства которого определяют динамические показатели формирователя соответствующей последовательности в целом [4].

В качестве формирователей ОС в современных микропроцессорных защитах главным образом используются цифровые фильтры (ЦФ) Фурье различных модификаций с присущей им инерционностью [5]. По этой причине переходные режимы ЦФ сопровождаются возникновением динамической погрешности, включающей амплитудную и фазовую составляющие, которые могут существенно влиять на функционирование ФСС, ухудшая их свойства.

Заметное снижение такого влияния может быть получено за счет применения для выделения ОС входных сигналов предложенных в [6, 7] формирователей с коррекцией динамической погрешности. Их основой явля-

ются нерекурсивные ЦФ Фурье [8], выделяющие косинусные x_{jcn} и синусные x_{jsn} ($j = a, b, c$) ОС основной гармоники входных сигналов x_{jn} .

Ортогональные составляющие Фурье подвергаются специальной программной коррекции, в результате чего формируются эквивалентные ОС x_{jeqcn} , x_{jeqsn} с быстрозатухающими динамическими амплитудными погрешностями.

Коррекция динамической фазовой погрешности осуществляется в процессе получения результирующих ОС x_{jcm} , x_{jsm} , являющихся комбинацией ОС Фурье и вычисленных по ним расчетных ОС по методике, представленной в [7]. На основе информации об амплитудах и текущих фазах сигналов, содержащейся соответственно в эквивалентных и результирующих ОС, формируются итоговые ОС x_{jcvn} , x_{jsvn} , у которых амплитудные и фазовые погрешности в переходных режимах заметно меньше по сравнению с ОС Фурье x_{jcn} , x_{jsn} [9].

По итоговым косинусной x_{acvn} , x_{bcvn} , x_{ccvn} и синусной x_{asvn} , x_{bsvn} , x_{csvn} ОС сигналов фаз с использованием приведенных в [10] выражений вычисляются косинусная x_{2cn} и синусная x_{2sn} ортогональные составляющие сигнала обратной последовательности:

$$x_{2cn} = \frac{1}{3} \left(x_{acvn} - \frac{1}{2} x_{bcvn} + \frac{\sqrt{3}}{2} x_{bsvn} - \frac{1}{2} x_{ccvn} - \frac{\sqrt{3}}{2} x_{csvn} \right); \quad (1)$$

$$x_{2sn} = \frac{1}{3} \left(x_{asvn} - \frac{1}{2} x_{bsvn} - \frac{\sqrt{3}}{2} x_{bcvn} - \frac{1}{2} x_{csvn} + \frac{\sqrt{3}}{2} x_{ccvn} \right),$$

а также нулевой последовательности:

$$x_{0cn} = \frac{1}{3} (x_{acvn} + x_{bcvn} + x_{ccvn}); \quad (2)$$

$$x_{0sn} = \frac{1}{3} (x_{asvn} + x_{bsvn} + x_{csvn}).$$

Необходимо обратить внимание, что принципиально возможен другой вариант реализации ЦФ нулевой последовательности. Он предполагает вычисление по выборкам для одного момента времени входных сигналов фаз x_{jn} составляющей нулевой последовательности

$$x_{0n} = \frac{1}{3} (x_{an} + x_{bn} + x_{cn}), \quad (3)$$

из которой формирователем с коррекцией динамической погрешности выделяются косинусная x_{0cn} и синусная x_{0sn} ОС.

Представленные теоретические предпосылки положены в основу разработанных ЦФ токов обратной и нулевой последовательностей. Анализ их работоспособности и эффективности выполнялся с использованием ре-

зультатов вычислительного эксперимента путем сравнительной оценки ключевых показателей с аналогичными параметрами таких же фильтров, где в качестве формирователей ОС входных токов задействованы ЦФ Фурье, называемые в дальнейшем цифровыми фильтрами соответствующей последовательности Фурье.

Моделирование

Вычислительный эксперимент проводился с использованием разработанной модели, реализованной в среде динамического моделирования MATLAB-Simulink-SimPowerSystems [11]. В структуре этой модели содержится энергосистема, трехфазная группа трансформаторов тока с возможностью воспроизводить насыщение их магнитных систем для моделирования воздействий, приближенных к реальным вторичным токам фаз, нагрузка, блок короткого замыкания, а также модели цифровых элементов, обеспечивающие реализацию функций разработанных фильтров тока обратной и нулевой последовательностей и аналогичных фильтров Фурье. Воспроизведение моделей блоков и элементов структуры выполнено с применением положений, содержащихся в [12].

Результаты исследований

Основными динамическими показателями цифровых ФСС, способными оказывать влияние на поведение измерительных органов, создавая условия для излишних срабатываний при внешних КЗ и замедления срабатывания при внутренних КЗ, а также препятствующими достижению высокой чувствительности, являются быстродействие, динамическая погрешность и выходной сигнал небаланса [10].

Быстродействие ФСС можно оценить временным интервалом с момента подачи на вход соответствующей системы сигналов до момента достижения выходным сигналом заданного значения.

Динамическая фазовая погрешность является функцией времени и представляет собой разность текущих значений фаз выходного и входного сигналов ФСС, последний из которых сформирован по первым гармоникам системы входных сигналов. Сравнительную оценку ФСС по данному показателю можно проводить путем сопоставления уровней и характера изменений указанной погрешности.

Выходной сигнал небаланса представляет собой сигнал на выходе ФСС при подаче на его вход системы сигналов, не содержащей выделяемой последовательности. Сравнить ФСС по этому показателю можно, оценивая уровни и характер изменения выходных сигналов небаланса.

На рис. 1 представлены зависимости, отражающие динамические показатели разработанного фильтра токов обратной последовательности (ФТОП) и аналогичного фильтра Фурье при двухфазном КЗ с входным воздействием, приближенным к синусоидальному сигналу.

В момент времени 0,04 с (рис. 1а) возникает двухфазное КЗ, при котором вторичные токи i_a , i_b , i_c являются синусоидальными. При этом в разработанном фильтре и фильтре Фурье появляется ток обратной последовательности (рис. 1б).

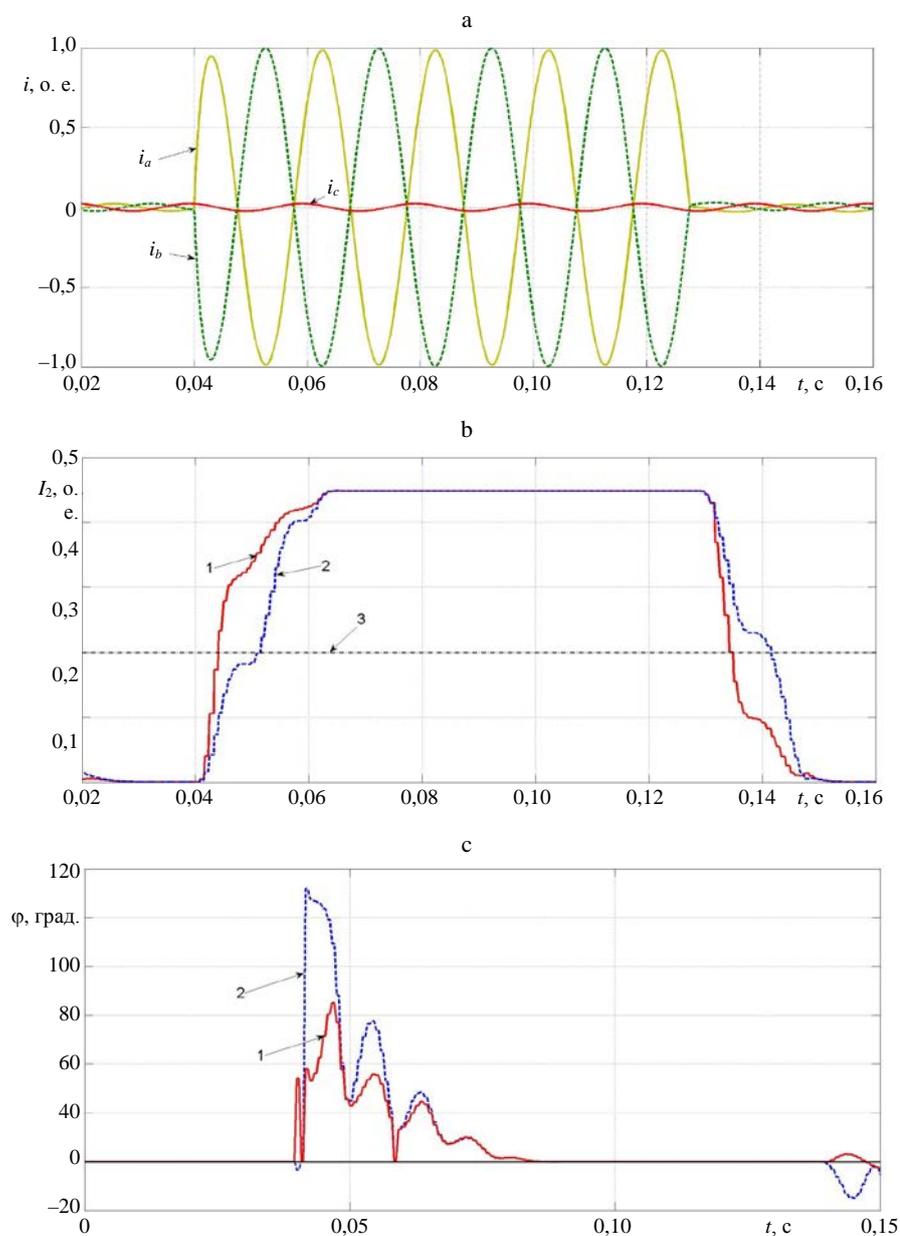


Рис. 1. Динамика фильтра токов обратной последовательности при двухфазном коротком замыкании с входным воздействием, приближенным к синусоидальному сигналу: а – вторичные синусоидальные токи фаз i_a , i_b , i_c ; б – ток обратной последовательности в фильтре; в – динамическая фазовая погрешность; 1 – в разработанном фильтре токов обратной последовательности; 2 – в фильтре токов обратной последовательности Фурье; 3 – заданный ток

Fig. 1. Dynamics of the negative sequence current filter in case of a two-phase short circuit with an input effect close to a sinusoidal signal:
а – secondary sinusoidal currents of i_a , i_b , i_c phases; б – negative sequence current in the filter; в – dynamic phase error; 1 – in the negative sequence current filter that has been developed; 2 – in the negative sequence current Fourier filter; 3 – set current

Очевидно, что в разработанном ФТОП указанный ток (рис. 1b, кривая 1) нарастает быстрее, чем в ФТОП Фурье (рис. 1b, кривая 2): в первом случае он достигает значения заданного тока (рис. 1b, кривая 3) в момент времени 0,042 с, а во втором – 0,05 с. После отключения двухфазного КЗ в момент времени 0,13 с (рис. 1a) ток обратной последовательности в разработанном ФТОП (рис. 1b, кривая 1) спадает быстрее, чем в ФТОП Фурье (рис. 1b, кривая 2).

Представленные на рис. 1с зависимости показывают, что в разработанном ФТОП динамическая фазовая погрешность (рис. 1с, кривая 1) существует в течение того же промежутка времени, что и в ФТОП Фурье (рис. 1с, кривая 2), однако ее уровень на начальном этапе КЗ значительно меньше.

Анализ результатов исследования поведения ФТОП в других несимметричных режимах при синусоидальных входных воздействиях свидетельствует, что разработанный фильтр в сравнении с фильтром Фурье имеет более высокое быстродействие и обладает лучшими динамическими свойствами.

На рис. 2 представлены зависимости, аналогичные приведенным на рис. 1, при входном воздействии, приближенном к реальному вторичному току.

После возникновения двухфазного КЗ в момент времени 0,04 с (рис. 2a) трансформаторы тока поврежденных фаз входят в режим насыщения сердечников под воздействием содержащихся в токах апериодических составляющих. Анализ изменений токов обратной последовательности (рис. 2b) и динамических фазовых погрешностей (рис. 2с) в разработанном ФТОП и ФТОП Фурье при несимметричных КЗ с реальными вторичными токами дает основания для вывода о более высоких динамических свойствах первого фильтра по сравнению с вторым в этих режимах. Различие в быстродействии исследуемых ФТОП возрастает с увеличением степени насыщения сердечников трансформаторов тока (рис. 2b).

На рис. 3 показано изменение токов небаланса в ФТОП при трехфазном КЗ с входным воздействием, приближенным к синусоидальному сигналу.

В момент времени 0,04 с возникает трехфазное КЗ (рис. 3a), в результате чего в ФТОП появляется ток небаланса (рис. 3b), который изменяется во времени и после завершения переходного процесса исчезает. Максимальное значение тока небаланса в разработанном ФТОП (рис. 3b, кривая 1) несколько больше, чем в ФТОП Фурье (рис. 3b, кривая 2). При этом указанный ток в разработанном фильтре затухает более интенсивно, чем в фильтре Фурье. После отключения трехфазного КЗ в момент времени 0,125 с (рис. 3a) также появляется ток небаланса (рис. 3b), характер изменения и время существования которого примерно такие же, как и при возникновении КЗ.

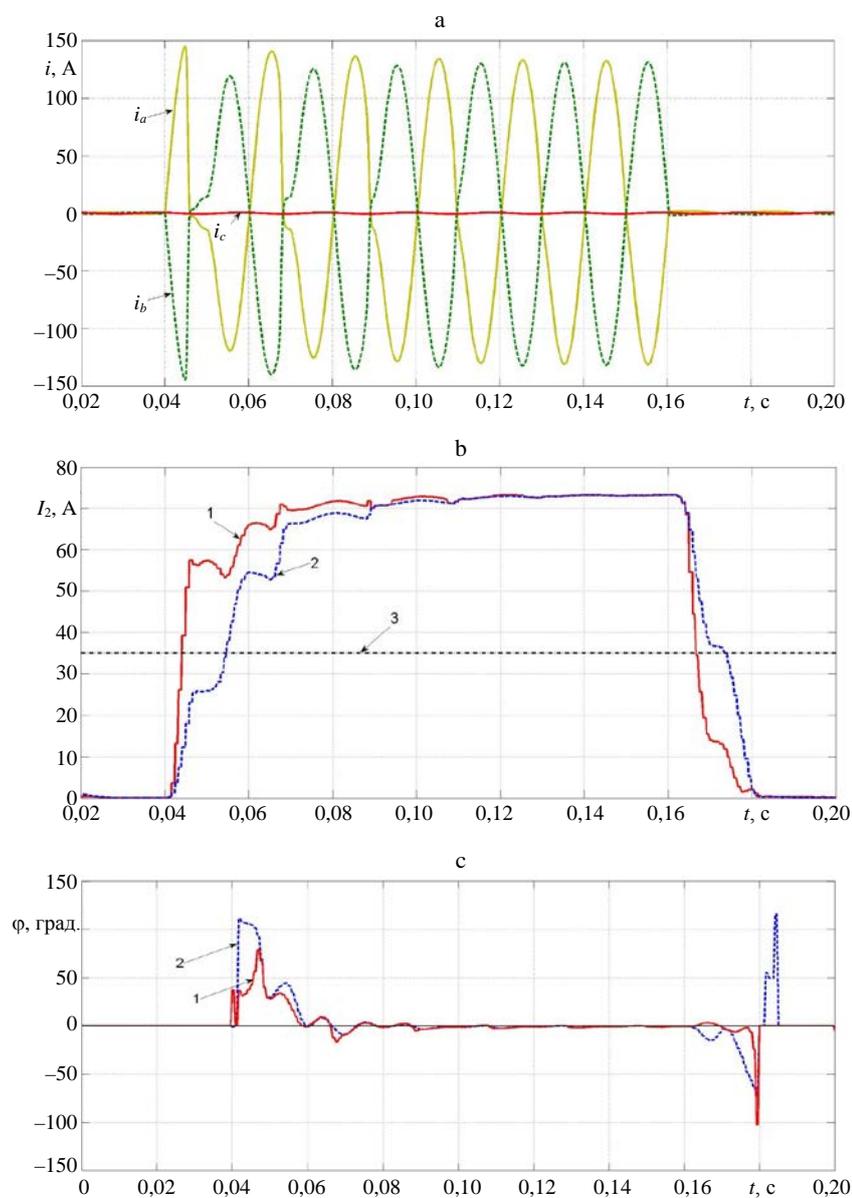


Рис. 2. Динамика фильтра токов обратной последовательности при двухфазном коротком замыкании с входным воздействием, приближенным к реальному вторичному току: а – реальные вторичные токи фаз i_a , i_b , i_c ; б – ток обратной последовательности в фильтре; в – динамическая фазовая погрешность; 1 – в разработанном фильтре токов обратной последовательности; 2 – в фильтре токов обратной последовательности Фурье; 3 – заданный ток

Fig. 2. Dynamics of the negative sequence current filter in case of a two-phase short circuit with an input effect close to a real secondary current: а – real secondary currents of i_a , i_b , i_c phases; б – negative sequence current in the filter; в – dynamic phase error; 1 – in the negative sequence current filter that has been developed; 2 – in the negative sequence current Fourier filter; 3 – set current

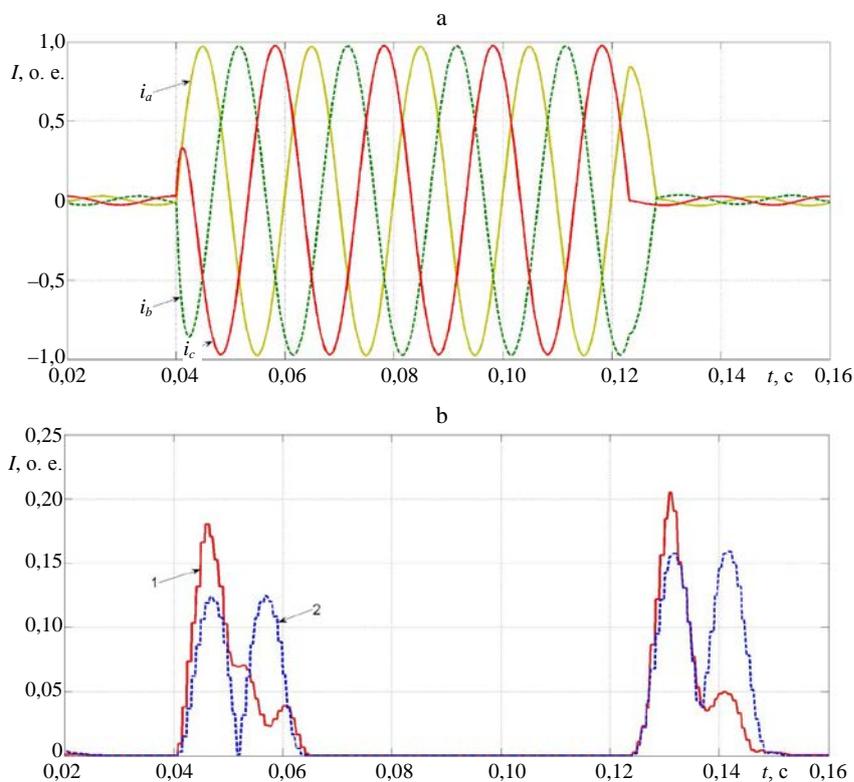


Рис. 3. Ток небаланса фильтра токов обратной последовательности при трехфазном коротком замыкании с входным воздействием, приближенным к синусоидальному сигналу:

- a – вторичные синусоидальные токи фаз i_a , i_b , i_c ; б – ток небаланса в фильтре;
 1 – в разработанном фильтре токов обратной последовательности;
 2 – в фильтре токов обратной последовательности Фурье

Fig. 3. The unbalance current of the negative sequence current filter in case of a three-phase short circuit with an input effect close to a sinusoidal signal takes place:

- a – secondary sinusoidal currents of i_a , i_b , i_c phases; б – unbalance current in the filter;
 1 – in the negative sequence current filter that has been developed;
 2 – in the negative sequence current Fourier filter

При трехфазном КЗ со сложным входным воздействием, приближенным к реальному вторичному току, в обоих ФТОП ток небаланса имеет почти одинаковый сложный характер изменения, а длительность его существования зависит от степени насыщения сердечников трансформаторов тока.

Резюмируя изложенное выше, следует отметить, что разработанный ФТОП имеет в 1,2–1,4 раза более высокое быстродействие и лучшие динамические показатели по сравнению с аналогичными фильтрами Фурье.

Из предложенных выше вариантов реализации фильтра токов нулевой последовательности (ФТНП) более предпочтительным представляется второй, в основе которого лежит выражение (3). Очевидно, что этот вариант существенно проще в алгоритмическом отношении и отличается более высокими динамическими свойствами.

На рис. 4 приведены зависимости, характеризующие динамические свойства ФТНП при КЗ на землю с входным воздействием, приближенным к вторичному току нулевой последовательности (рис. 4а). Анализ измене-

ний токов в фильтрах (рис. 4б, кривые 1, 2), а также динамических фазовых погрешностей (рис. 4с, кривые 1, 2) дает основания для вывода о более высоких динамических свойствах разработанного ФТНП в сравнении с ФТНП Фурье. Это подтверждается результатами исследований и при КЗ на землю с синусоидальным входным воздействием.

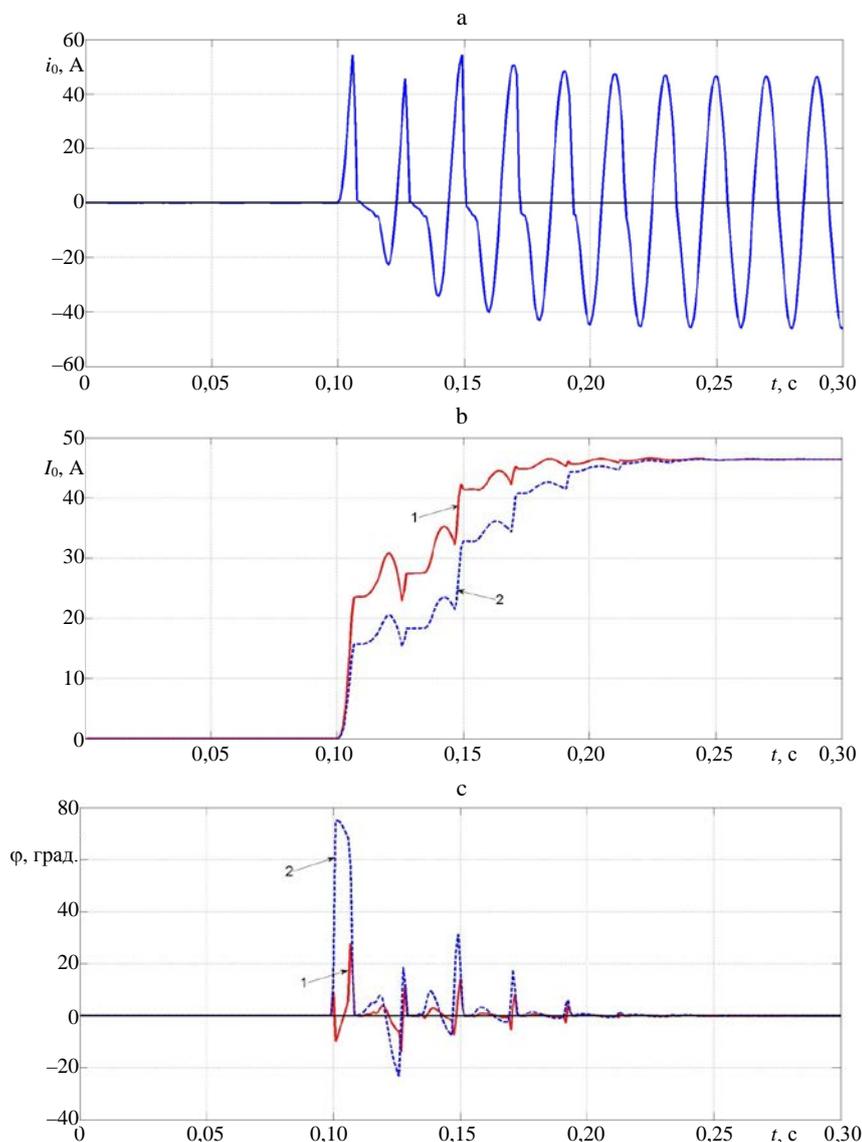


Рис. 4. Динамика фильтра токов нулевой последовательности при коротком замыкании на землю с входным воздействием, приближенным к реальному вторичному току: а – реальный вторичный ток нулевой последовательности; б – ток нулевой последовательности в фильтре; с – динамическая фазовая погрешность; 1 – в разработанном фильтре токов нулевой последовательности; 2 – в фильтре токов нулевой последовательности Фурье

Fig. 4. Dynamics of the zero sequence current filter in case of a short circuit to the ground with an input effect close to the real secondary current: а – real secondary current of the zero sequence; б – zero sequence current in the filter; с – dynamic phase error; 1 – in the zero sequence current filter that has been developed; 2 – in the zero sequence current Fourier filter

На рис. 5 приведены зависимости, отражающие изменение тока небаланса в ФТНП при трехфазном КЗ. При синусоидальном входном воздействии токи небаланса в разработанном ФТНП и ФТНП Фурье имеют схожий характер изменения при отличающихся максимальных значениях (рис. 5а). В случае сложного входного воздействия появляются более высокие значения токов небаланса (рис. 5б). Основное отличие состоит в том, что в разработанном ФТНП ток небаланса затухает быстрее, чем в ФТНП Фурье.

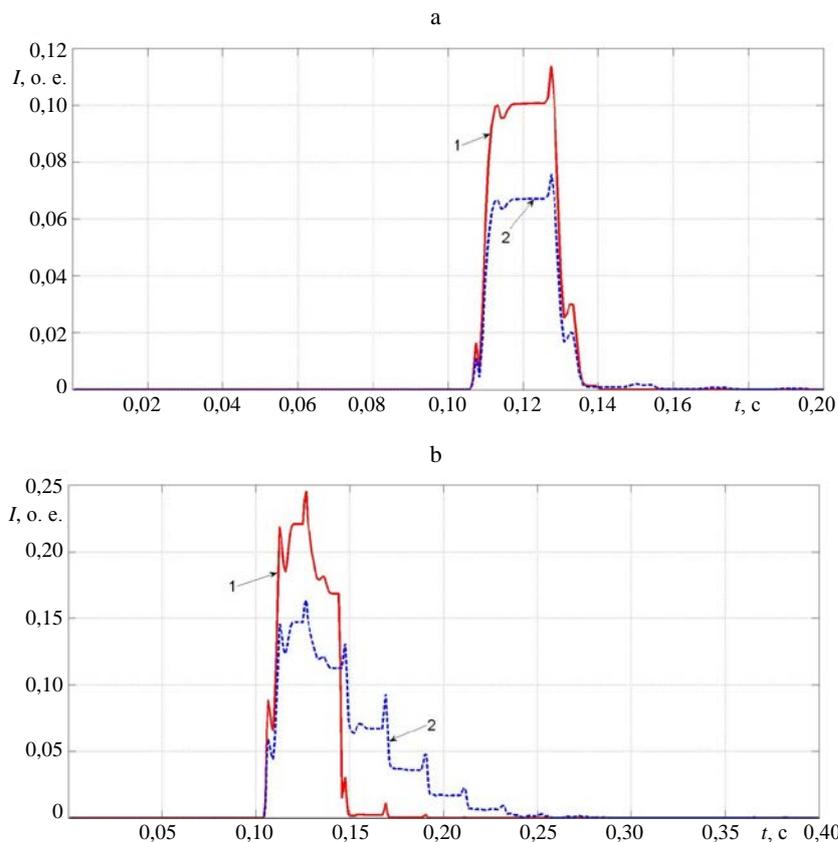


Рис. 5. Ток небаланса фильтра токов нулевой последовательности при трехфазном коротком замыкании: а – с входным синусоидальным воздействием; б – со сложным воздействием, приближенным к реальному вторичному току; 1 – в разработанном фильтре токов нулевой последовательности; 2 – в фильтре токов нулевой последовательности Фурье

Fig. 5. The unbalance current of the zero sequence current filter in case of a three-phase short circuit with an input effect close to a sinusoidal signal: a – with an input sinusoidal effect; b – with a complex effect, close to the real secondary current; 1 – in the zero sequence current filter that has been developed; 2 – in the zero sequence current Fourier filter

Резюмируя вышеизложенное, можно отметить, что разработанный ФТНП в сравнении с ФТНП Фурье имеет в 1,1–1,5 раза более высокое быстродействие и отличается улучшенными динамическими показателями.

ВЫВОДЫ

1. Реализацию цифровых фильтров симметричных составляющих входных сигналов микропроцессорных защит предпочтительно осуществлять с использованием формирователей ортогональных составляющих с коррекцией динамической погрешности.

2. Разработанные цифровые фильтры тока обратной и нулевой последовательностей с коррекцией динамической погрешности по сравнению с аналогичными на основе ортогональных составляющих Фурье имеют в 1,1–1,5 раза более высокое быстродействие и отличаются улучшенными динамическими показателями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Овчаренко, Н. И. Аналоговые и цифровые элементы автоматических устройств энергосистем. М.: Энергоатомиздат, 1989. 320 с.
2. Романюк, Ф. А. Формирование симметричных составляющих входных сигналов в микропроцессорных защитах / Ф. А. Романюк // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 1998. № 5. С. 13–19.
3. Федосеев, А. М. Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей / А. М. Федосеев. М.: Энергоатомиздат, 1984. 520 с.
4. Шнеерсон, Э. М. Измерительные органы релейной защиты на основе микропроцессорных структур / Э. М. Шнеерсон. М.: Информэлектро, 1984. 92 с.
5. Шнеерсон, Э. М. Цифровая релейная защита / Э. М. Шнеерсон. М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.
6. Совершенствование алгоритма формирования ортогональных составляющих входных величин в микропроцессорных защитах / Ф. А. Романюк [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 2. С. 95–108. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-2-95-108>.
7. Компенсация динамической фазовой погрешности при формировании ортогональных составляющих входных сигналов в микропроцессорных защитах / Ф. А. Романюк [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 3. С. 197–208. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-197-208>.
8. Фадке Арун, Г. Компьютерная релейная защита в энергосистемах / Г. Фадке Арун, С. Торп Джеймс. 2-е изд. М.: Техносфера, 2019. 370 с.
9. Романюк, Ф. А. Формирование ортогональных составляющих входных сигналов в цифровых измерительных органах защит с коррекцией динамических погрешностей / Ф. А. Романюк, Ю. В. Румянцев, В. Ю. Румянцев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 4. С. 289–300. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-4-289-300>.
10. Романюк, Ф. А. Информационное обеспечение микропроцессорных защит электроустановок / Ф. А. Романюк. Минск: Технопринт, 2001. 133 с.
11. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimowerSystems и Simulink / И. В. Черных. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2011. 288 с.
12. Испытания микропроцессорных токовых защит: теория, моделирование, практика / И. В. Новаш [и др.]. Минск: БНТУ, 2001. 168 с.

REFERENCES

1. Ovcharenko N. I. (1989) *Analog and Digital Elements of Automatic Devices of Power Systems*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 320 (in Russian).
2. Romaniuk F. A. (1998) Formation of Symmetric Components of Input Signals in Microprocessor Protections. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, (5), 13–19 (in Russian).
3. Fedoseev A. M. (1984) *Relay Protection of Electric Power Systems. Relay Protection of Networks*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 520 (in Russian).
4. Schneerson E. M. (1984) *Measuring Elements of Relay Protection Based on Microprocessor Structures*. Moscow, Informelectro Publ. 92 (in Russian).
5. Schneerson E. M. (2007) *Digital Relay Protection*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 549 (in Russian).
6. Romaniuk F. A., Rumiantsev Yu. V., Rumiantsev V. Yu., Novash I. V. (2021) Improvement of Algorithm for Formation of Orthogonal Components of Input Quantities in Microprocessor Protection. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (2), 95–108. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-2-95-108> (in Russian).
7. Romaniuk F. A., Rumiantsev Yu. V., Rumiantsev V. Yu., Novash I. V. (2022) Compensation of Dynamic Phase Error in the Formation of Orthogonal Components of Input Signals in Microprocessor Protections. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (3), 197–208. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-197-208> (in Russian).
8. Phadke A. G., Thorp J. S. (2019) *Computer Relaying for Power Systems*. 2nd ed. Moscow, Tekhnosfera Publ. 370 (in Russian).
9. Romaniuk F. A., Rumiantsev Yu. V., Rumiantsev V. Yu. (2022) Formation of Orthogonal Components of Input Signals in Digital Measuring Protection Elements with Correction of Dynamic Errors. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (4), 289–300. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-4-289-300> (in Russian).
10. Romaniuk F. A. (2001) *Information Support of Microprocessor Protection of Electrical Installations*. Minsk, Technoprint Publ. 133 (in Russian).
11. Chernykh I. V. (2011) *Modeling of Electrical Devices in MatLab, SimowerSystems and Simulink*. Moscow, DMK Press Publ; Saint-Petersburg, Piter Publ. 288 (in Russian).
12. Novash I. V., Romaniuk F. A., Rumyantsev V. Yu., Rumyantsev Yu. V. (2021). *Tests of Microprocessor Current Protections: Theory, Modeling, Practice*. Minsk, BNTU Publ. 168 (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-18-29>

УДК 621.311

Оперативное прогнозирование скорости ветра для автономной энергетической установки тяговой железнодорожной подстанции

П. В. Матренин^{1, 2)}, А. И. Хальясмаа^{1, 2)}, А. Г. Русина¹⁾, С. А. Ерошенко^{1, 2)},
Н. А. Попкова³⁾, Д. А. Секацкий³⁾

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

²⁾Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (Екатеринбург, Российская Федерация),

³⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

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

Реферат. В настоящее время рассматриваются перспективы создания гибридных энергетических установок с использованием возобновляемых источников энергии, в том числе энергии ветра, и систем накопления энергии на базе технологий водородной энергетики. Для управления такой системой накопления энергии необходимо оперативное прогнозирование генерации от возобновляемых источников, в частности ветровых энергетических установок. Их выработка зависит от скорости и направления ветра. В статье представлены результаты решения задачи оперативного прогнозирования скорости ветра для проекта гибридной энергетической установки, направленной на повышение пропускной способности железнодорожного участка между станциями Яя и Ижморская (Кемеровская область Российской Федерации). Проанализированы почасовые данные скоростей и направлений ветра за 15 лет, построена нейросетевая модель и предложена компактная архитектура многослойного перцептрона для краткосрочного прогнозирования скорости и направления ветра на 1 и 6 ч вперед. Разработанная модель позволяет минимизировать риски переобучения и потери точности прогнозирования из-за изменения условий работы модели со временем. Особенность данной статьи заключается в исследовании устойчивости модели, обученной на данных многолетних наблюдений, к долгосрочным изменениям, а также анализе возможностей повышения точности прогнозирования за счет регулярного дообучения модели на вновь поступающих данных. Установлен характер влияния размера обучающей выборки и самоадаптации модели на точность прогнозирования и устойчивость ее работы на горизонте в несколько лет. Показано, что для обеспечения высокой точности и устойчивости нейросетевой модели прогнозирования скорости ветра необходимы данные многолетних метеорологических наблюдений.

Ключевые слова: прогнозирование скорости ветра, ветроэнергетика, система электрификации железных дорог, нейронные сети

Для цитирования: Оперативное прогнозирование скорости ветра для автономной энергетической установки тяговой железнодорожной подстанции / П. В. Матренин [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 66, № 1. С. 18–29. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-18-29>

Адрес для переписки

Секацкий Дмитрий Александрович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-65-82
dsekatski@gmail.com

Address for correspondence

Sekatski Dzmitry A.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-65-82
dsekatski@gmail.com

Operational Forecasting of Wind Speed for an Self-Contained Power Assembly of a Traction Substation

P. V. Matrenin^{1,2)}, A. I. Khalyasmaa^{1,2)}, A. G. Rusina¹⁾, S. A. Eroshenko^{1,2)},
N. A. Papkova³⁾, D. A. Sekatski³⁾

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

²⁾Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin
(Ekaterinburg, Russian Federation),

³⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Currently, the prospects of creating hybrid power assemblies using renewable energy sources, including wind energy, and energy storage systems based on hydrogen energy technologies are being considered. To control such an energy storage system, it is necessary to perform operational renewable sources generation forecasting, particularly forecasting of wind power assemblies. Their production depends on the speed and direction of the wind. The article presents the results of solving the problem of operational forecasting of wind speed for a hybrid power assembly project aimed at increasing the capacity of the railway section between Yaya and Izhmorskaya stations (Kemerovo region of the Russian Federation). Hourly data of wind speeds and directions for 15 years have been analyzed, a neural network model has been built, and a compact architecture of a multilayer perceptron has been proposed for short-term forecasting of wind speed and direction for 1 and 6 hours ahead. The model that has been developed allows minimizing the risks of overfitting and loss of forecasting accuracy due to changes in the operating conditions of the model over time. A specific feature of this work is the stability investigation of the model trained on the data of long-term observations to long-term changes, as well as the analysis of the possibilities of improving the accuracy of forecasting due to regular further training of the model on newly available data. The nature of the influence of the size of the training sample and the self-adaptation of the model on the accuracy of forecasting and the stability of its work on the horizon of several years has been established. It is shown that in order to ensure high accuracy and stability of the neural network model of wind speed forecasting, long-term meteorological observations data are required.

Keywords: wind speed forecasting, wind power, railway electrification system, neural networks

For citation: Matrenin P. V., Khalyasmaa A. I., Rusina A. G., Eroshenko S. A., Papkova N. A., Sekatski D. A. (2023) Operational Forecasting of Wind Speed for an Self-Contained Power Assembly of a Traction Substation. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 66 (1), 18–29. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-18-29> (in Russian)

Введение

Технические ограничения, накладываемые максимальной пропускной способностью линий электропередачи и трансформаторного оборудования тяговых подстанций, вследствие большей распределенности точек потребления электроэнергии кардинально отличаются от технических ограничений, учитываемых в системах электроснабжения крупных промышленных предприятий или населенных пунктов. Основное отличие заключается в большой протяженности участков электрической сети между тяговыми подстанциями. Тяжелые железнодорожные составы являются мощными потребителями электрической энергии, ограничивающими пропускную способность линий электропередачи, максимальную потребляемую мощность и электроэнергию, что выражается в падении напряжения и снижении скорости движения состава.

Использование автономных энергетических установок, в том числе на возобновляемых источниках энергии, позволяет системам электроснабжения железнодорожного транспорта не только минимизировать провалы напряжения, но и повысить экологичность, снизив углеродный след. Особенно это актуально для протяженных межподстанционных участков, где существенны потери электроэнергии при ее передаче от подстанций к локомотиву. Провалы напряжения приводят к снижению скорости движения состава и отставанию от графика [1]. По этим причинам возникает необходимость разработки и внедрения дополнительной силовой энергетической установки, способной компенсировать провалы напряжения [2, 3]. В качестве такого источника питания обычно используют энергию солнца [3–6] и ветра [6–8], что в сочетании с аккумулирующими электроустановками [9, 10] позволяет решать задачу снижения углеродного следа, поставленную в Стратегии научно-технического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 г. и перспективу до 2025 г. [11].

Так, например, если просадка напряжения не приводит к критичному отставанию состава средней тяжести, для ее компенсации можно направить электроэнергию автономных гибридных энергетических установок (АГУЭ). Они генерируют электроэнергию за счет энергии ветра или солнца, запасаемой в накопитель, чтобы использовать в электрической сети для минимизации просадок напряжения. Но если в накопителе объем запасенной энергии мал, в ближайший час скорость ветра ожидается низкой и по графику будет двигаться тяжелый состав, накопленную энергию следует оставить для обеспечения его прохождения. В другом случае может оказаться, что накопитель энергии заполнен, а в ближайший час скорость ветра будет высокой. Следовательно, можно использовать накопленную энергию, даже если не возникает провалов напряжения, для снижения электропотребления от внешней сети.

Основная часть

Оперативное прогнозирование скорости ветра – нетривиальная задача, поскольку в каждом конкретном случае ее решение зависит не только от климатических особенностей местности, абсолютной и относительной высоты, формы рельефа и экспозиции склона по отношению к ветровому потоку, но и от доступности различных метеорологических данных и требуемого горизонта прогнозирования.

Для прогнозирования скорости ветра применяют несколько основных групп методов [12, 13]:

- построение физических метеорологических моделей. Этот подход может обеспечить необходимую точность прогноза, но предъявляет высокие требования к метеорологическим данным и отличается высокой вычислительной сложностью;
- статистические методы обработки временных рядов, достоинствами которых являются низкая вычислительная сложность и низкий риск переобучения модели, но их точность не всегда удовлетворительна;

• методы машинного обучения [13–15], позволяющие достичь высокой точности в лабораторных условиях для определенной выборки данных. Однако при их использовании возникают проблемы переобучения и снижения надежности [13, 16].

Объект исследования – протяженный участок железной дороги между станциями Яя и Ижморская в Кемеровской области (Российская Федерация). На рис. 1, 2 представлены диаграммы распределения ветра по скорости и направлениям за 2020–2022 гг. Анализ показывает, что скорость ветра относительно небольшая, а его направление отличается стабильностью.

В задачах прогнозирования временных рядов в электроэнергетике важна адаптация моделей к новым условиям функционирования, обусловленным изменением климатического состояния окружающей среды или режима работы объекта [16, 17]. Для повышения возможностей и точности прогнозирования за счет регулярного дообучения модели на поступающих данных проводится исследование устойчивости модели, обученной на данных многолетних наблюдений, к долгосрочным изменениям. Необходимо выполнять настройку на длительных интервалах, поскольку достижение высокой точности на коротком тестовом сроке (не более одного года) не является достаточным основанием полагать, что модель можно эксплуатировать и в последующие годы.

Для обучения и валидации прогнозной модели использована выборка 131472 почасовых значений скорости ветра за 2007–2021 гг. [18]. Данные для населенного пункта Яя приведены на рис. 1. Хотя установка АГЭУ предполагается между станциями [2], скорость ветра с допустимой погрешностью можно считать одинаковой в середине участка и его крайних точках.

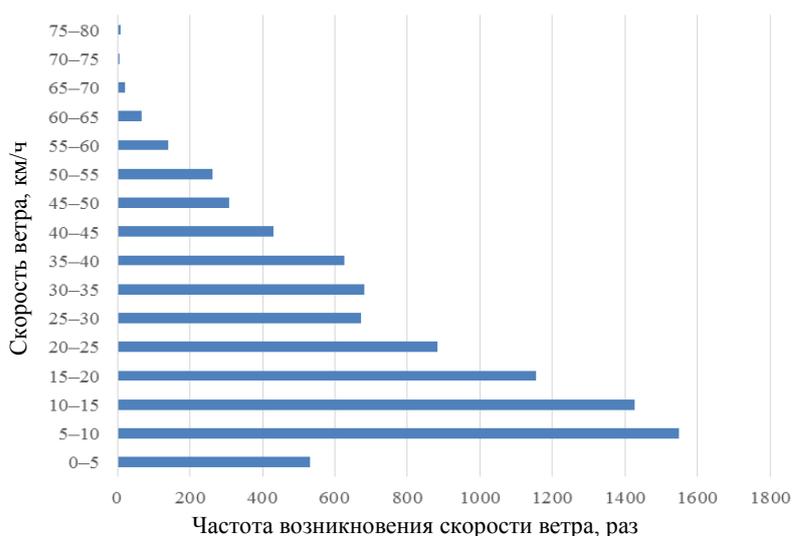


Рис. 1. Диаграмма повторяемости скорости ветра

Fig. 1. Wind speed repeatability histogram

Выбранный авторами подход к построению нейросетевой модели прогнозирования скорости ветра на час вперед описан в [13]. Архитектура нейронной сети, полученная в процессе ее настройки на решаемую задачу, включает: входные значения, вектор из 12 ретроспективных скоростей ветра; первый входной слой из 16 нейронов; второй скрытый слой из 8 нейронов; третий скрытый слой из 4 нейронов; выходной нейрон. Нейроны первого – третьего слоев используют функцию активации ReLU [19, 20], выходной – сигмоидальную функцию. Для эффективной оптимизации в обучении нейронной сети применяется метод Adam. Кроме того, для предотвращения переобучения используется L2-регуляризация. Программная реализация выполнена на языке Python 3, нейронная сеть создана на основе библиотеки Keras.

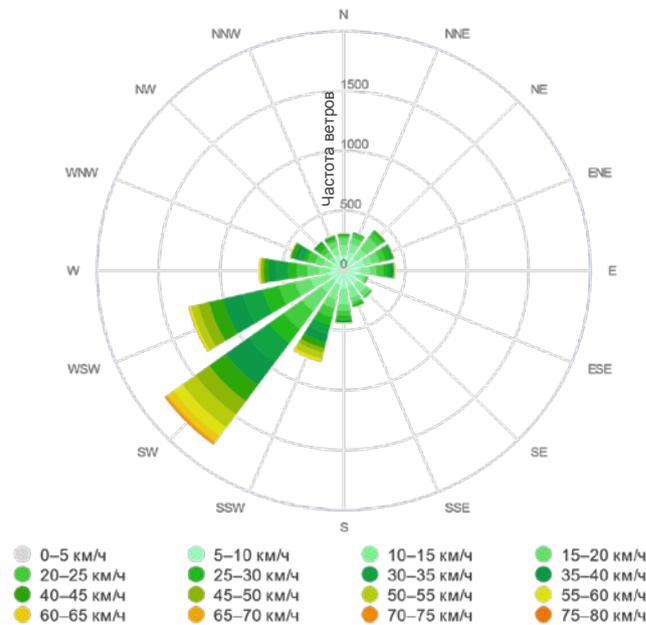


Рис. 2. Роза ветров

Fig. 2. Wind rose

Использованы следующие показатели, характеризующие точность прогнозирования:

- среднеквадратичное отклонение (root mean squared error – RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_i^*(y_{[i-w:i-1]}))^2}; \quad (1)$$

- среднее значение модулей отклонения (mean absolute error – MAE)

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - y_i^*(y_{[i-w:i-1]})|; \quad (2)$$

- нормализованное среднее значение модулей отклонения (normalized mean absolute error – $nMAE$)

$$nMAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - y_i^*(y_{[i-w:i-1]})|}{\sum_{i=1}^n y_i} \cdot 100 \% \quad (3)$$

где y – истинное значение скорости ветра в i -й час; y^* – прогнозное значение скорости ветра на i -й час; $y_{[i-w:i-1]}$ – вектор истинных почасовых значений скорости ветра за предыдущие w часов; w – количество часов, длительность временного ряда, который используется для модели; n – размер выборки для вычисления ошибки.

Вычислительные эксперименты выполняли по приведенному ниже алгоритму.

1. Создание нейросетевой модели для прогнозирования скорости ветра на 1 ч вперед: обучение модели на данных за 10 лет (2007–2016 гг.), валидация для настройки гиперпараметров на данных 2017–2018 гг. Длительность обучения 200 итераций (эпох). Модель обозначена как ANN_0 (artificial neural network – искусственная нейронная сеть).

2. Тестирование обученной модели на данных 2019–2021 гг. с сохранением результатов, метрик точности в соответствии с выражениями (1)–(3) за каждый месяц.

3. Адаптация модели в режиме дообучения (ANN_U) на данных предыдущих трех лет (200 эпох), затем тестирование на данных за один месяц. Таким образом, модель учитывает новые данные каждый месяц. Например, для тестирования модели на информации за май 2019 г. она дообучалась на данных с апреля 2016 г. по апрель 2019 г. включительно.

4. Работа модели в режиме обучения с нуля на скользящем окне (ANN_R). Тестовый период 2019–2021 гг. Обучение на данных предыдущих трех лет (200 эпох), затем тестирование на данных за один месяц. Аналогично пункту 3, но в режиме обучения с нуля для каждого следующего месяца.

5. Применение интегрированной модели Бокса – Дженкинса (autoregressive integrated moving average – ARIMA) на данных 2019–2021 гг. для сопоставления результатов. ARIMA выбрана, так как является моделью статистического анализа, а не машинного обучения, и широко используется в прогнозировании в энергетике [21].

6. Повторение пунктов 1–5 для прогноза на 6 ч вперед.

Результаты экспериментов для прогнозирования скорости ветра, приведенные в табл. 1–3 и на рис. 3–5, позволяют сделать следующие выводы:

- точность краткосрочного прогнозирования скорости ветра на 1 ч достаточна для оперативного управления автономной энергетической установкой, так как средняя ошибка менее 6 %;
- нейросетевая модель может использоваться длительный период (для данных последующих трех лет) после обучения даже без адаптации, по-

скольку модель, обученная на данных 2007–2016 гг., показала практически одинаковую точность на валидационной (2017–2018 гг.) и тестовой (2019–2021) выборках;

- дообучение нейросетевой модели на новых данных снижает ошибку прогнозирования. Снижение является небольшим, но для его достижения достаточно лишь раз в месяц запускать дообучение модели на новых данных;

- обучение модели с нуля на относительно небольшом количестве новых данных (три года) оказалось наименее эффективным вариантом. Это показывает, что длительность обучающей выборки в рассматриваемой задаче – более важный фактор, чем новизна используемой информации.

Таблица 1

Результаты прогнозирования скорости ветра на валидационной выборке (2017–2018 гг.)

The results of wind speed forecasting on the validation set (2017–2018)

Модель	Гиперпараметры		
	Среднее значение модулей отклонения MAE, m/s	Нормализованное среднее значение модулей отклонения n MAE, %	Среднеквадратичное отклонение RMSE, m/s
ANN ₀ , 1 ч вперед	0,421	5,26	0,650
ANN ₀ , 6 ч вперед	1,841	23,03	2,423

Таблица 2

Результаты прогнозирования скорости ветра на 1 ч вперед на тестовой выборке (2019–2021 гг.)

The results of 1-hour wind speed forecasting on the test sampling of the set (2019–2021)

Модель	Гиперпараметры		
	Среднее значение модулей отклонения MAE, м/с	Нормализованное среднее значение модулей отклонения n MAE, %	Среднеквадратичное отклонение RMSE, м/с
ANN ₀	0,419	5,78	0,650
ANN _U	0,397	5,41	0,612
ANN _R	0,618	8,45	0,867
ARIMA	0,440	6,16	0,716

Таблица 3

Результаты прогнозирования скорости ветра на 6 ч вперед на тестовой выборке (2019–2021 гг.)

The results of 6-hour wind speed forecasting on the test sampling of the set (2019–2021)

Модель	Гиперпараметры		
	Среднее значение модулей отклонения MAE, м/с	Нормализованное среднее значение модулей отклонения n MAE, %	Среднеквадратичное отклонение RMSE, м/с
ANN ₀	1,823	24,260	2,356
ANN _U	1,795	23,780	2,311
ANN _R	1,886	24,851	2,417
ARIMA	2,310	30,560	2,352

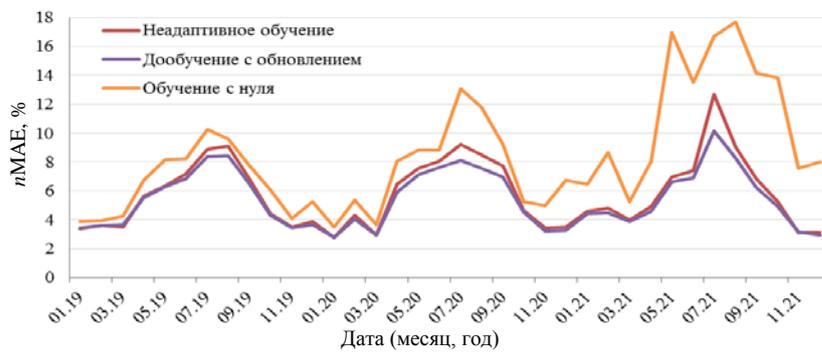


Рис. 3. Изменение среднемесячной ошибки прогнозирования на 1 ч вперед на тестовой выборке

Fig. 3. The change in the average monthly forecasting error for 1 hour ahead on the test sampling

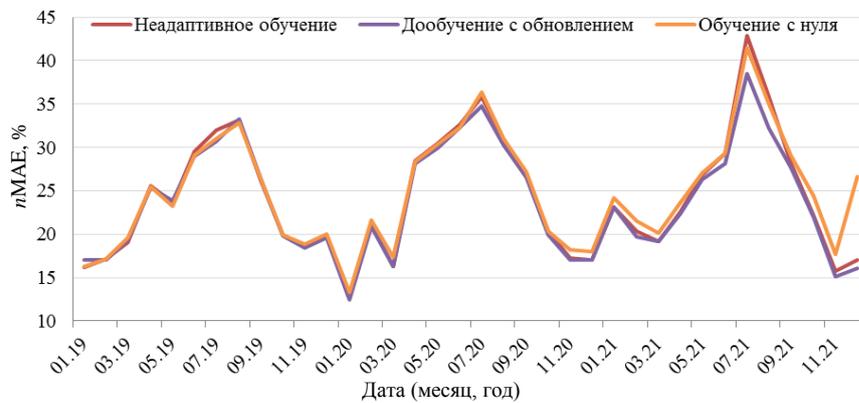


Рис. 4. Изменение среднемесячной ошибки прогнозирования на 6 ч вперед на тестовой выборке

Fig. 4. The change in the average monthly forecasting error for 6 hour ahead on the test sampling

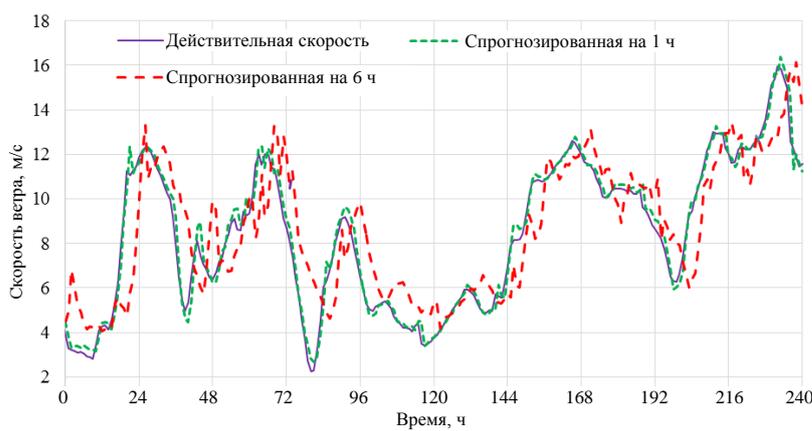


Рис. 5. Сопоставление скорости ветра и прогнозов, полученных нейросетевой моделью с дообучением (показаны последние 10 сут. тестовой выборки)

Fig. 5. Comparison of wind speed and forecasts obtained by a neural network model with additional training (the last 10 days of the test sampling of the set are shown)

Дополнительно выполнено прогнозирование направления ветра на 1 ч вперед нейросетевой моделью в режимах обучения на данных 2007–2018 гг. и тестирования на данных 2019–2021 гг., результаты тестирования приведены в табл. 4. Точность прогнозирования оказалась достаточно высокой, полученная информация может применяться в том числе и для управления поворотами гондолы ветроустановки. Такой подход позволяет снизить погрешность прогнозирования выработки электроэнергии.

Таблица 4

**Результаты прогнозирования скорости ветра на 6 ч вперед
на тестовой выборке (2019–2021 гг.)**

The results of 6-hour wind speed forecasting on the test sampling of the set (2019–2021)

Горизонт прогнозирования, ч	Гиперпараметры		
	Среднее значение модулей отклонения MAE, град.	Нормализованное среднее значение модулей отклонения n MAE, %	Среднеквадратичное отклонение RMSE, град.
1	4,00	2,970	15,47
6	14,28	10,600	25,45

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрена задача краткосрочного прогнозирования скорости и направления ветра для эффективного применения ветроэнергетической установки в составе автономной энергетической установки тяговой железнодорожной подстанции.

2. Исследовано влияние различных режимов адаптации на точность прогнозирования скорости ветра на выборке данных за 15 лет для Кемеровской области. В работе использована компактная многослойная архитектура нейронной сети, что позволило получить высокую точность прогноза с низким риском переобучения и реализовать автоматическое регулярное дообучение нейронной сети в процессе ее эксплуатации (адаптацию модели к долгосрочным изменениям климатических условий).

3. Полученные результаты показывают, что более эффективно дообучение модели на вновь поступающих данных, а не обучение с нуля на новых данных за три последних года. Это говорит о необходимости обучения моделей на длительных выборках, но с постепенной адаптацией к новым данным.

4. Средняя ошибка прогнозирования скорости ветра на 1 ч вперед на тестовой выборке за два года составила 0,4 м/с (5,4 %), направления – 4° (3 %). Такая ошибка позволяет применять ветроэнергетические установки в составе автономной энергетической установки тяговой железнодорожной подстанции, в которой необходимы краткосрочные прогнозы генерации для управления процессом компенсации провалов напряжений при движении тяжелых составов на протяженных участках между подстанциями.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы развития Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина в соответствии с программой стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

ЛИТЕРАТУРА

1. Power Electronic Transformer-Based Railway Traction Systems: Challenges and Opportunities / J. Feng [et al.] // *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2017. Vol. 5, Iss. 3. P. 1237–1253. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2017.2685464>.
2. Mitrofanov, S. V. Analysis of the Impact of Autonomous Hybrid Power Plants on the Railways Capacity / S. V. Mitrofanov, D. V. Armeev, E. A. Domahin // *XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems Of Electronic Instrument Engineering (APEIE)*. 2021. P. 161–165. <https://doi.org/10.1109/APEIE52976.2021.9647596>.
3. Energetic Simulation of DC Railway Micro-Grid Interconnecting with PV Solar Panels, EV Charger Infrastructures and Electrical Railway Network / J. Pouget [et al.] // *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. 2020. P. 1–7. <https://doi.org/10.1109/VPPC49601.2020.9330829>.
4. Energy Management of a Smart Railway Station Considering Regenerative Braking and Stochastic Behaviour of ESS and PV Generation / İ. Şengör [et al.] // *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2018. Vol. 9, Iss. 3. P. 1041–1050. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2017.2759105>.
5. The Potential of Photovoltaics to Power the Railway System in China / L. Ji [et al.] // *Energies*. 2020. Vol. 13, Iss. 15. P. 3844. <https://doi.org/10.3390/en13153844>.
6. Mitrofanov, S. V. Stationary Hybrid Renewable Energy Systems for Railway Electrification: A Review / S. V. Mitrofanov, N. G. Kiryanova, A. M. Gorlova // *Energies*. 2021. Vol. 14, Iss. 18. P. 5946. <https://doi.org/10.3390/en14185946>.
7. Aguado, J. A. Optimal Operation of Electric Railways With Renewable Energy and Electric Storage Systems / J. A. Aguado, A. J. Sanchez Racero, S. de la Torre // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2018. Vol. 9, Iss. 2. P. 993–1001. <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2574200>.
8. Evaluation of the Influence of Electrified Railway on Wind Farm / F. Ding [et al.] // *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*. 2017. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ITEC-AP.2017.8080804>.
9. Гринчик, Н. Н. Об измерении электрического сопротивления жидких электролитов аккумуляторных батарей / Н. Н. Гринчик, К. В. Доброго, М. А. Чумаченко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 6. С. 494–507. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-494-507>.
10. Доброго, К. В. Моделирование аккумуляторных батарей и их сборок с учетом деградации параметров / К. В. Доброго, Ю. В. Бладыко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 1. С. 27–39. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-27-39>.
11. Стратегия научно-технологического развития холдинга «Российские железные дороги» на период до 2025 года и на перспективу до 2030 года (Белая книга) [Электронный ресурс] // *Инновационный дайджест РЖД*. М., 2018. Режим доступа: <https://zszd.rzd.ru/api/media/resources/c/17/121/18071?action=download>. Дата доступа: 21.03.2022.
12. Zhou, Q. Hybrid Forecasting System Based on an Optimal Model Selection Strategy for Different Wind Speed Forecasting Problems / Q. Zhou, C. Wang, G. Zhang // *Applied Energy*. 2019. Vol. 250. С. 1559–1580. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.05.016>.
13. Матренин, П. В. Устойчивое краткосрочное прогнозирование скорости ветра с помощью адаптивных компактных нейронных сетей / П. В. Матренин, В. З. Манусов, Е. А. Игумнова // *Problemele Energeticii Regionale*. 2020. No 3. P. 69–80. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4018960>.
14. Current Methods and Advances in Forecasting of Wind Power Generation / A. M. Foley [et al.] // *Renewable Energy*. 2012. Vol. 37, Iss. 1. P. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.05.033>.

15. Zhang, L. Wind Speed Forecasting Using a Two-Stage Forecasting System with an Error Correcting and Nonlinear Ensemble Strategy / L. Zhang, Y. Dong, J. Wang // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 176000–176023. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2957174>.
16. Оптимизация топологии сети с ВИЭ-генерацией на основе модифицированного адаптированного генетического алгоритма / А. М. Брамм [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 4. С. 341–354. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-4-341-354>.
17. Meteoblue, Weather Close to You [Electronic Resource]. Mode of access: <https://www.meteoblue.com/en/weather>. Date of access: 21.03.2022.
18. Adaptive Ensemble Models for Medium-Term Forecasting of Water Inflow When Planning Electricity Generation under Climate Change / P. Matrenin [et al.] // *Energy Reports*. 2022. Vol. 8. P. 439–447. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.11.112>.
19. Brownlee, J. A Gentle Introduction to the Rectified Linear Unit (ReLU) [Electronic Resource] / J. Brownlee // *Machine Learning Mastery*. 2019. Mode of access: <https://machinelearningmastery.com/rectified-linear-activation-function-for-deep-learning-neural-networks/>. Date of access: 08.04.2021.
20. Liu, Danqing. A Practical Guide to ReLU [Electronic Resource] / Danqing Liu // *Medium*. 2017. Mode of access: <https://medium.com/@danqing/a-practical-guide-to-relu-b83ca804f1f7>. Date of access: 08.04.2021.
21. Amini, M. H. ARIMA-Based Decoupled Time Series Forecasting of Electric Vehicle Charging Demand for Stochastic Power System Operation / M. H. Amini, A. Kargarian, O. Karabasoglu // *Electric Power Systems Research*. 2016. Vol. 140. P. 378–390. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.06.003>.

Поступила 05.10.2022 Подписана в печать 07.12.2022 Опубликована онлайн 31.01.2023

REFERENCES

1. Feng J., Chu W. Q., Zhang Z., Zhu Z. Q. (2017) Power Electronic Transformer-Based Railway Traction Systems: Challenges and Opportunities. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 5 (3), 1237–1253. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2017.2685464>.
2. Mitrofanov S. V., Armeev D. V., Domahin E. A. (2021) Analysis of the Impact of Autonomous Hybrid Power Plants on the Railways Capacity. *XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE)*, 161–165, <https://doi.org/10.1109/APEIE52976.2021.9647596>.
3. Pouget J., Guo B., Bossoney L., Coppex J., Roggo D., Ellert C. (2020) Energetic Simulation of DC Railway Micro-Grid Interconnecting with PV Solar Panels, EV Charger Infrastructures and Electrical Railway Network. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/VPPC49601.2020.9330829>.
4. Şengör İ., Kılıçkiran H. C., Akdemir H., Kekezoglu B., Erdinç O., Catalão J. P. S. (2018) Energy Management of a Smart Railway Station Considering Regenerative Braking and Stochastic Behaviour of ESS and PV Generation. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 9 (3), 1041–1050. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2017.2759105>.
5. Ji L., Yu Z., Ma J., Jia L., Ning F. (2020) The Potential of Photovoltaics to Power the Railway System in China. *Energies*, 13 (15), 3844. <https://doi.org/10.3390/en13153844>.
6. Mitrofanov S. V., Kiryanova N. G., Gorlova A. M. (2021) Stationary Hybrid Renewable Energy Systems for Railway Electrification: A Review. *Energies*, 14 (18), 5946. <https://doi.org/10.3390/en14185946>.
7. Aguado J. A., Sánchez Racero A. J., Torre de la S. (2018) Optimal Operation of Electric Railways with Renewable Energy and Electric Storage Systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9 (2), 993–1001. <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2574200>.
8. Ding F., Zhang D., He J., Liu H., Li Y. (2017) Evaluation of the Influence of Electrified Railway on Wind Farm. *2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ITEC-AP.2017.8080804>.

9. Grinchik N. N., Dobrego K. V., Chumachenko M. A. (2018) On the Measurement of Electric Resistance of Liquid Electrolytes of Accumulator Battery. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (6), 494–507. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-494-507> (in Russian).
10. Dobrego K. V., Bladyko Y. V. (2021) Modeling of Batteries and their Assemblies Taking Into Account the Degradation of Parameters. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (1), 27–39. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-27-39> (in Russian).
11. Strategy for Scientific and Technological Development of Russian Railways Holding for the Period until 2025 and for the Perspective until 2030: White Book. Moscow, 2018. *Innovative Digest of RR*. Available at: <https://zszd.rzd.ru/api/media/resources/c/17/121/18071?action=download> (accessed 21 March 2022) (in Russian).
12. Zhou Q., Wang C., Zhang G. (2019) Hybrid Forecasting System Based on an Optimal Model Selection Strategy for Different Wind Speed Forecasting Problems. *Applied Energy*, 250, 1559–1580. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.05.016>.
13. Matrenin P. V., Manusov V. Z., Igumnova E. A. (2020) Robust Short-Term Wind Speed Forecasting Using Adaptive Shallow Neural Networks. *Problemele Energeticii Regionale*, 3 (47), 69–80. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4018960> (in Russian).
14. Foley A. M., Leahy P. G., Marvuglia A., McKeogh E. J. (2012) Current Methods and Advances in Forecasting of Wind Power Generation. *Renewable Energy*, 37 (1), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.05.033>.
15. Zhang L., Dong Y., Wang J. (2019) Wind Speed Forecasting Using a Two-Stage Forecasting System with an Error Correcting and Nonlinear Ensemble Strategy. *IEEE Access*, 7, 176000–176023. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2957174>.
16. Bramm A. M., Khalyasmaa A. I., Eroshenko S. A., Matrenin P. V., Papkova N. A., Sekatki D. A. (2022) Topology Optimization of the Network with Renewable Energy Sources Generation Based on a Modified Adapted Genetic Algorithm. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (4), 341–354. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-4-341-354> (in Russian).
17. *Meteoblue, Weather Close to You*. Available at <https://www.meteoblue.com/en/weather> (accessed 1 March 2022).
18. Matrenin P., Safaraliev M., Dmitriev S., Kokin S., Eshchanov B., Rusina A. (2022) Adaptive Ensemble Models for Medium-Term Forecasting of Water Inflow When Planning Electricity Generation under Climate Change. *Energy Reports*, 8, Supl. 1, 439–447. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.11.112>.
19. Brownlee J. (2019) A Gentle Introduction to the Rectified Linear Unit (ReLU). *Machine Learning Mastery*. Available at: <https://machinelearningmastery.com/rectified-linear-activation-function-for-deep-learning-neural-networks> (accessed 8 April 2021).
20. Danqing Liu (2017) A Practical Guide to ReLU. *Medium*. Available at: <https://medium.com/@danqing/a-practical-guide-to-relu-b83ca804f1f7> (accessed 8 April 2021).
21. Amini M. H., Kargarian A., Karabasoglu O. (2016) ARIMA-Based Decoupled Time Series Forecasting of Electric Vehicle Charging Demand for Stochastic Power System Operation. *Electric Power Systems Research*, 140, 378–390. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.06.003>.

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-30-43>

УДК 697.343

Оценка эффективности регенерации тепловых отходов в продуваемых непроходных каналах теплотрасс

В. А. Седнин¹⁾, Т. В. Бубырь¹⁾

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

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

Реферат. Для повышения энергетической эффективности тепловых сетей с теплопроводами, размещенными в непроходных каналах, разработано схемно-структурное решение регенеративно-утилизационного использования тепловых отходов, возникающих при транспорте тепловой энергии. Ввиду сложности создания натурной экспериментальной установки в исследовании применена виртуальная, реализованная средствами программного комплекса Ansys, на которой выполнен активный численный эксперимент. Получены регрессионные уравнения для расчета интенсивности теплоотдачи от трубопроводов и ограждающих конструкций канала при заданном изменении типоразмера, длины каналов и трубопроводов для различных температур наружного воздуха и грунта, характерных для отопительного и межотопительного периодов. Проведены статистический анализ, верификация и валидация указанных регрессионных соотношений, получены двумерные сечения гиперповерхностей в исследованном диапазоне изменения управляемых факторов. Представлены результаты численного моделирования рабочих режимов принудительной вентиляции непроходных каналов теплотрасс с определением плотности тепловых потоков от грунта и трубопроводов сетевой воды, расхода воздуха, мощности вытяжных вентиляторов. При этом принимались следующие условия: скорость потока воздуха не выше 8 м/с, длина участка теплопровода обеспечивает температуру воздуха на выходе из канала, при которой не происходит увеличение потерь теплоты от трубопроводов сетевой воды к грунту при штатных режимах эксплуатации теплосетей. Исследована энергетическая эффективность утилизации теплоты, рассеиваемой трубопроводами сетевой воды и охлаждения грунта в непроходных каналах теплотрасс, путем интенсификации их вентиляции и применения теплонасосного оборудования в концевых точках каналов для нагрева сетевой воды в зависимости от геометрических характеристик участка теплотрассы, температуры воздуха, грунта и сетевой воды установки на центральных тепловых пунктах или непосредственно на теплоисточниках. Выявлен потенциал энергосбережения для систем централизованного теплоснабжения с различными видами теплоисточников и объединенной энергосистемы при утилизации тепловых потоков от грунта и теплопроводов, проложенных в непроходных каналах. На базе энергосберегающего потенциала проведена технико-экономическая оценка и определены условия экономической целесообразности реализации предложенного технического решения.

Ключевые слова: грунт, моделирование, статистический анализ, сетевая вода, тепловые сети, теплоотдача, теплопроводы, утилизация, численный эксперимент, энергетическая эффективность

Для цитирования: Седнин, В. А. Оценка эффективности регенерации тепловых отходов в продуваемых непроходных каналах теплотрасс / В. А. Седнин, Т. В. Бубырь // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 1. С. 30–43. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-30-43>

Адрес для переписки

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

Address for correspondence

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

Assessment of the Efficiency of Thermal Waste Regeneration in the Blown Impassable Channels of Heating Mains

V. A. Sednin¹⁾, T. V. Bubyr¹⁾

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

Abstract. To solve the problem of increasing the energy efficiency of thermal networks with heat pipelines located in impassable channels, a schematic and structural solution for the rational utilization of thermal waste generated during the transport of thermal energy has been developed. Due to the complexity of creating a full-scale experimental installation, a virtual experimental installation created by means of the Ansys software package was used in the study, on which an active numerical experiment was performed. Regression equations have been obtained for calculating the intensity of heat transfer from pipelines and channel enclosing structures with a given change in the size, length of channels and pipelines for various outdoor and ground temperatures characteristic of the heating and inter-heating periods. Statistical analysis, verification and validation of the obtained regression correlations were carried out, two-dimensional hypersurface cross-sections were obtained in the studied range of controlled factors. The results of numerical simulation of the operating modes of forced ventilation of impassable channels of heating mains with determination of the density of heat flows from the ground and mains water pipelines, air flow and the corresponding exhaust fan capacities have been presented. The following conditions in this case were accepted: the air flow rate is not higher than 8 m/s, the length of the heat pipeline section ensures the air temperature at the outlet of the channel at which there is no increase in heat losses from mains water pipelines to the ground under normal operating conditions of heating networks. The energy efficiency of heat utilization dissipated by mains water pipelines as well as ground cooling in impassable heating mains channels was investigated by intensifying their ventilation and using heat pump equipment at the end points of the channels for heating mains water, depending on the geometric characteristics of the heating mains section, air temperature, soil and mains water installations at central heating points or directly at heat sources. The potential of energy saving for district heating systems with various types of heat sources and the combined power system during the utilization of heat flows from the ground and heat pipelines laid in impassable channels has been identified. On the basis of the energy-saving potential, a technical and economic assessment was carried out and the conditions for the economic feasibility of implementing the proposed technical solution were determined.

Keywords: soil, modeling, statistical analysis, network water, heating networks, heat transfer, heat pipelines, utilization, numerical experiment, energy efficiency

For citation: Sednin V. A., Bubyr T. V. (2023) Assessment of the Efficiency of Thermal Waste Regeneration in the Blown Impassable Channels of Heating Mains. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 66 (1), 30–43. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-66-1-30-43> (in Russian)

Введение

Регенерация потоков теплоты, рассеиваемой трубопроводами сетевой воды при транспорте тепловой энергии в системах централизованного теплоснабжения, утилизация теплоты охлаждения грунта и наружного воздуха выбраны объектом данного исследования. В качестве целевой функции принята зависимость для снижения потребления первичного энергоресурса, которым в большинстве теплогенерирующих источников является природный газ. Несмотря на то что с вводом в эксплуатацию Белорусской АЭС доля природного газа в приходной части энергобаланса энерго-

системы должна уменьшиться с 97 до 59 %, задача по ее снижению остается актуальной.

Для систем централизованного теплоснабжения важно сокращение финансовых затрат, в первую очередь путем экономии топлива на разных стадиях производства, транспорта и потребления тепловой энергии. Это возможно также за счет регенерации потоков теплоты, рассеиваемой трубопроводами сетевой воды, утилизации теплоты охлаждения грунта и переохлаждения наружного воздуха в условиях применения теплотрасс с непроходными каналами путем размещения в концевых точках теплотрасс на тепловых пунктах (ТП) вытяжных вентиляторов и теплонасосных установок (ТНУ) [1]. Теплотрассы в непроходных каналах занимают значительную часть в сетевых районах, например, в системе теплоснабжения г. Витебска их удельный вес составляет до 50 %. В ряде случаев от них нецелесообразно отказываться, и очевидно, что в обозримом будущем они сохранятся на сетевых районах и промышленных предприятиях. В качестве ТНУ рассматривается парокompрессионный тепловой насос. Косвенный эффект – увеличение потребления электроэнергии в системе теплоснабжения, что актуально при возникшем профиците электрогенерирующих мощностей в энергосистеме.

Для решения обозначенной задачи проведено планирование эксперимента, в рамках которого установлены определяющие факторы и диапазоны их изменения (46 точек для исследования влияния шести факторов) [1, 2]:

- длина участка теплотрассы ($L = 20\text{--}100$ м);
- эквивалентный диаметр участка теплотрассы ($D_{\text{мод}} = 0,093\text{--}0,430$), учитывающий геометрию канала в продольном и поперечном сечениях;
- скорость воздуха ($\omega = 0,5\text{--}10$ м/с);
- температура прямой и обратной сетевой воды соответственно: ($t_{\text{псв}} = 65\text{--}115$ °С, $t_{\text{осв}} = 39\text{--}58$);
- температура входящего воздуха ($t_{\text{вх.вз}} = -24\text{--}8$ °С);
- температура грунта ($t_{\text{гр}} = 7,0\text{--}13,1$ °С).

Создание адекватной экспериментальной установки, обеспечивающей проведение эксперимента, в соответствии с установленными в ходе планирования требованиями в принципе невозможно, поэтому разработана виртуальная экспериментальная установка на платформе программного комплекса Ansys [3].

Получены уравнения регрессии, позволяющие установить [4–6]:

- мощность потока теплоты, рассеиваемой трубопроводами сетевой воды;
- мощность потока теплоты процесса теплопереноса между грунтом, прилегающим к каналу, и воздухом, протекающим внутри канала;
- мощность интегрального потока теплоты для процессов теплопереноса, протекающих между потоком воздуха с трубопроводами сетевой воды и грунтом через ограждающие конструкции канала;
- потери напора при движении потока воздуха внутри канала.

Общий вид уравнений регрессии

$$\begin{aligned}
Y_i = & \delta_0 + \delta_1 L + \delta_2 L^2 + \delta_3 D_{\text{мод}} + \delta_4 D_{\text{мод}}^2 + \delta_5 \omega + \delta_6 \omega^2 + \delta_7 t_{\text{св}} + \\
& + \delta_8 t_{\text{св}}^2 + \delta_9 t_{\text{вх.вз}} + \delta_{10} t_{\text{вх.вз}}^2 + \delta_{11} t_{\text{гр}} + \delta_{12} t_{\text{гр}}^2 + \delta_{13} L D_{\text{мод}} + \delta_{14} L \omega + \\
& + \delta_{15} L t_{\text{св}} + \delta_{16} L t_{\text{вх.вз}} + \delta_{17} L t_{\text{гр}} + \delta_{18} D_{\text{мод}} \omega + \delta_{19} D_{\text{мод}} t_{\text{св}} + \delta_{20} D_{\text{мод}} t_{\text{вх.вз}} + \\
& + \delta_{21} D_{\text{мод}} t_{\text{гр}} + \delta_{22} \omega t_{\text{св}} + \delta_{23} \omega t_{\text{вх.вз}} + \delta_{24} \omega t_{\text{гр}} + \delta_{25} t_{\text{св}} t_{\text{вх.вз}} + \delta_{26} t_{\text{св}} t_{\text{гр}} + \delta_{27} t_{\text{вх.вз}} t_{\text{гр}}.
\end{aligned}$$

Значения коэффициентов этих уравнений приведены в табл. 1 [4, 7].

Таблица 1

Значения коэффициентов в уравнениях регрессии

Values of coefficients in regression equations

Коэффициент уравнения регрессии	Функция отклика для расчета				Удельные потери напора на участке Y_5 , Па/м
	Мощность удельного теплового потока, Вт/м ²				
	суммарного $q_{\text{вз}}$	от прямой сетевой воды $q_{\text{псв}}$	от обратной сетевой воды $q_{\text{осв}}$	от грунта $q_{\text{гр}}$	
δ_0	64,00000	2,09	0,83	7,20	-0,164
δ_1	-0,239	0,115	0,0546	-0,178	0,000296
δ_2	0,00216	-0,000268	-0,0002	0,000682	1,96E-06
δ_3	-103,0	12,7	10,6	-14,8	0,307
δ_4	154,00	-0,319	-5,58	81,00	2,48
δ_5	-0,565	0,500	0,508	5,320	0,126
δ_6	-0,141	-0,0441	-0,0425	-0,394	0,00476
δ_7	-0,71	0,088	0,095	-0,313	-0,00192
δ_8	0,00487	0,00125	-3,73E-06	0,00150	1,05E-05
δ_9	-1,49	-0,159	-0,217	-2,97	-0,000290
δ_{10}	0,0134	0,00213	0,00084	0,0061	3,69E-05
δ_{11}	0,065	-0,479	-0,237	2,06	-0,00459
δ_{12}	0,168	0,0271	0,0109	0,0450	0,000291
δ_{13}	-0,295	-0,246	-0,129	0,234	-0,00113
δ_{14}	0,0193	0,000586	0,00062	0,00530	-7,5E-05
δ_{15}	-0,000450	-0,000402	-9,3E-05	-6,4E-05	-7,5E-08
δ_{16}	0,00538	0,000288	0,000355	0,00253	1,7E-07
δ_{17}	-0,00571	-0,00016	-0,00026	-0,00269	-5,3E-07
δ_{18}	3,22	0,000550	-0,084	-4,06	-0,457
δ_{19}	0,125	0,138	0,061	0,0368	-7,9E-05
δ_{20}	0,164	-0,270	-0,226	3,55	0,00508
δ_{21}	-0,595	0,070	0,072	-3,57	-0,0004
δ_{22}	0,00280	0,00127	0,000465	0,000384	1,6E-06
δ_{23}	-0,087	-0,00197	-0,00225	-0,087	-0,00022
δ_{24}	0,086	0,00094	0,00166	0,090	1,52E-05
δ_{25}	0,00081	-0,00031	-1,8E-05	-0,000240	1,9E-07
δ_{26}	-0,0111	0,000505	0,000572	0,00357	3,96E-06
δ_{27}	-0,00179	-0,00024	-6,5E-05	-0,00212	1,85E-06

Для анализа регрессионных зависимостей построены двумерные сечения гиперповерхностей, соответствующих полученным уравнениям регрессии при зафиксированных значениях тех или иных факторов [7]. Проведены верификация и валидация регрессионных соотношений. Они могут использоваться для расчетов характеристик при проектировании, поскольку охватывают основной набор теплотрасс в непроходных каналах [7]. В этом контексте не требуется обобщений указанных уравнений в виде критериальных зависимостей, что облегчает задачу специалистам.

В качестве основных критериев при оптимизации разработанного технического решения принимались экономия топлива и срок возврата инвестиций [8]. Оптимизация выполнялась в области, определяемой следующими ограничениями параметров:

- скорость потока воздуха в канале теплотрассы до 8 м/с (из-за возможности возникновения недопустимого шума при более высокой скорости);
- мощность используемых вентиляторов до 20 кВт (при превышении этой величины велика вероятность, что температура нагрева потока воздуха в непроходном канале теплотрассы достигнет температуры грунта или ее превысит, что приведет к увеличению теплопотерь).
- отопительный коэффициент ТНУ, температура охлаждаемого воздуха и нагреваемой сетевой воды выбирались таким образом, чтобы обеспечивать условие, при котором затраты электроэнергии на привод ТНУ не превышают увеличение количества теплоты, передаваемой потребителю.

В исследовании рассмотрены непроходные каналы теплотрасс с диаметром теплопровода 80–1000 мм, используемые в тепловых сетях централизованного теплоснабжения городов Беларуси. В табл. 2 приведены данные об участках тепловых сетей с непроходными каналами для системы централизованного теплоснабжения Витебска.

Таблица 2

Участки тепловых сетей с непроходными каналами для системы централизованного теплоснабжения Витебска длиной 100 м и более
Sections of heating networks with impassable channels for the Vitebsk district heating system which length is 100 m or more

Диаметр теплопровода, мм	80	100	125	150	200	250	300	350
Количество участков, шт.	62	82	45	92	70	60	51	5
Диаметр теплопровода, мм	400	450	500	600	700	800	900	1000
Количество участков, шт.	45	1	76	44	55	10	7	10

Для демонстрации полученных результатов из представленного ряда выбраны участки с диаметром теплопровода 80, 125, 150, 200 мм.

Основная часть

На первом этапе численного эксперимента для выбранных участков теплотрассы непроходного канала с помощью соотношений из [3] вычисляются определяющие размеры и живые сечения. Далее по представленным выше уравнениям регрессии по характерным для каждого месяца вы-

бранного климатического района (табл. 3) температурам воздуха, грунта и сетевой воды в соответствии с температурным графиком источника для каждого участка теплотрассы определяется скорость потока продуваемого воздуха, производится расчет мощностей потоков теплоты, рассеиваемой трубопроводами сетевой воды, мощностей потоков теплоты процесса теплопереноса между грунтом, прилегающим к каналу, и воздухом, протекающим внутри канала, мощностей интегральных потоков теплоты для процессов теплопереноса, протекающих между потоком воздуха с трубопроводами сетевой воды и грунтом через ограждающие конструкции канала, а также потерь напора при движении потока воздуха внутри канала. Расчет для каждого участка теплотрассы принудительно заканчивается, если температура нагрева вентилируемого воздуха достигает температуры грунта, тем самым определяется допустимая длина этого участка.

Таблица 3

Характерная температура окружающего воздуха и грунта для Витебска**The characteristic temperature of the surrounding air and soil for Vitebsk**

Параметр	Период							
	Январь	Февраль	Март	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Межотопительный
Температура окружающего воздуха, °С	-5,9	-4,8	-0,5	11,7	6,2	0,5	-3,8	14,16
Температура грунта, °С	4,7	3,8	3,2	13	11,5	9,0	6,6	8,54

Если длина участка канала превышает значение, предусмотренное уравнением регрессии, участок разбивают на отрезки требуемой длины, при этом характеристики потока воздуха на входе каждого последующего отрезка соответствуют расчетным характеристикам потока воздуха на выходе предшествующего отрезка. Погрешность такого подхода не превышала 15–20 %. Результаты расчетов определяющих величин для перечисленных диаметров теплотрасс и характерных температур приведены на рис. 1, 2.

По полученным данным можно оценить мощность вытяжного вентилятора для каждого характерного периода года и выбрать нагнетатель, оснащенный частотным приводом, ввиду значительного изменения расхода воздуха. Затем определяют мощность доступных для утилизации низкотемпературных потоков теплоты, по температуре охлаждения воздуха рассчитывают отопительный коэффициент ТНУ, его электрическую и тепловую мощность для заданного отрезка времени.

По данным [9], для отопительного коэффициента пароконденсационной ТНУ в интервале температур до -20 °С путем аппроксимации получена зависимость вида

$$COP_{hp} = 0,90 \cdot 10^{-3} t_{oc}^2 + 0,056 t_{oc} + 3,13,$$

для которой погрешность не превышает 1,4 %, а коэффициент детерминации 0,9971.

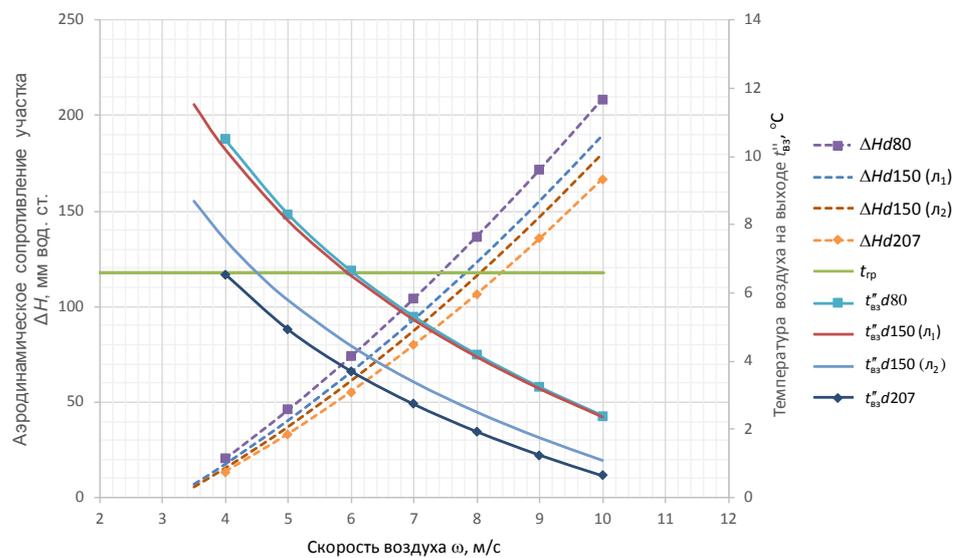


Рис. 1. Аэродинамическое сопротивление участка, обеспечивающая требуемую температуру нагрева воздуха, для различных диаметров трубопроводов ($d80-d207$; $л_1, л_2$ – лотки различных типоразмеров для трубопроводов одного диаметра) при длине участка 150 м для декабря

Fig. 1. The aerodynamic drag of the section and the air pumping speed which provides the required air heating temperature for various pipeline diameters ($d80-d207$; $л_1, л_2$ – trays of various sizes for one pipeline diameter) when the section length is 150 m for December

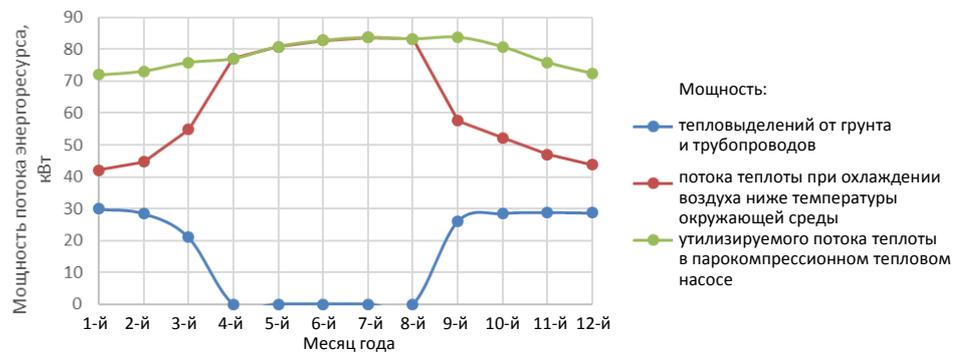


Рис. 2. Мощность низкотемпературных потоков теплоты в исследуемой системе утилизации

Fig. 2. The power of low-temperature heat flows in the recycling system under study

В табл. 4 приведены основные характеристики процесса утилизации тепловыделений и мощности привода ТНУ в непроходном канале при диаметре трубопровода 200 мм и длине 200 м в зависимости от средней температуры месяца при температурном графике центрального регулирования отпуска тепловой энергии 120/70 °С с верхней срезкой 105 °С. На рис. 3 представлено сравнение мощностей потоков теплоты при принудительной вентиляции канала при охлаждении воздуха ниже температуры окружающей среды и постоянной мощности ТНУ.

Таблица 4

Среднемесячные характеристики утилизируемого теплового потока и мощности привода теплонасосной установки в канале теплопровода диаметром 200 мм, длиной 200 м

Average monthly characteristics of the heat flow to be disposed and of the drive power of the heat pump unit in a channel with a heat pipe diameter of 200 mm and a length of 200 m

Параметр	Период							
	Январь	Февраль	Март	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Межотопительный
Температура воздуха на входе в теплонасосную установку, °С	4,70	3,80	3,20	13,00	11,50	9,00	6,60	8,54
Температура воздуха на выходе из теплонасосной установки (охлаждение), °С	-21,10	-18,40	-13,50	-1,93	-6,16	-13,50	-19,90	-3,50
Мощность утилизируемого потока теплоты, кВт	72,0	73,1	75,9	83,7	80,7	75,9	72,4	81,5
в том числе мощность потока теплоты процесса нагрева воздуха в канале, кВт	29,9	28,5	21,0	26,1	28,5	28,9	28,7	0
Отопительный коэффициент COP_{hp}	2,36	2,41	2,54	3,03	2,82	2,54	2,38	2,88
Мощность электропривода теплонасосной установки, кВт	53,0	51,9	49,1	41,3	44,3	49,1	52,6	43,5

Анализ температуры сетевой воды ГПО «Витебскэнерго» за 2015–2017 гг. показывает, что температура ОСВ для средней температуры отопительного сезона близка к 45 °С, а ее максимальное значение 60,2 °С зафиксировано при температуре наружного воздуха –28 °С. Согласно данным климатологии, такая низкая температура наружного воздуха имеет стояние не более 3 ч в год [10], а средняя продолжительность отопительного сезона составляет 202 сут. (4818 ч). Исходя из этого, расчеты проводились по средним температурам наружного воздуха для каждого месяца отопительного периода, а температура ОСВ, которая является в данном случае в ТНУ теплоприемником, принималась равной 45 °С.

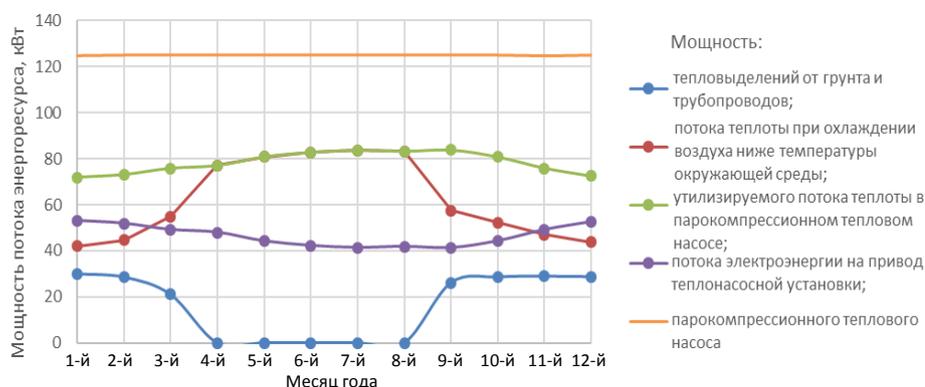


Рис. 3. Характер изменения среднемесячных тепловых потоков и мощности электропривода теплопровода диаметром 200 мм, длиной 200 м

Fig. 3. The nature of the change in the average monthly heat flows and of the power of the electric drive of the heat pipeline with a diameter of 200 mm and a length of 200 m

На основе данных о расходе и температуре потока воздуха, поступающего на ТПУ по характерным месяцам отопительного и межотопительного периодов, значений COP_{hp} определяли температуру охлаждения воздуха в ТПУ так, чтобы мощность последнего в течение года практически не изменялась (рис. 3, зеленая линия). В межотопительный период воздух поступает в ТПУ с помощью вентилятора из окружающей среды и охлаждается. Таким образом максимально используют номинальную мощность ТПУ. Температура всего потока сетевой воды изменяется незначительно, поскольку его расход больше, чем необходимо ТПУ. Нагрев воды в ТПУ осуществляется в диапазоне 60–90 °С [11–16].

На втором этапе выполнена технико-экономическая оценка разработанного решения. В табл. 5 приведены основные экономические параметры исследуемой системы: стоимость оборудования, налоговые отчисления, тарифы на энергоресурсы и др.

Расчетная зависимость для системной экономии топлива определяется исходя из вида теплогенерирующего источника системы теплоснабжения:

– в случае районной котельной имеем

$$\Delta B = Q_{\text{ТПУ}} b_{\text{ср.энергосист}} - W_{\text{эз}} b_{\text{замык.ист}};$$

– для ТЭЦ соответственно

$$\Delta B = Q_{\text{ТПУ}} (b_{\text{ср.энергосист}} - w_{\text{ср.энергоист}}) - W_{\text{эз}} b_{\text{замык.ист}},$$

где $Q_{\text{ТПУ}}$ – теплопроизводительность ТПУ, ГДж/ч; $b_{\text{ср.энергосист}}$ – удельный расход условного топлива на производство тепловой энергии на теплоисточнике, кг/ГДж; $w_{\text{ср.энергоист}}$ – удельная выработка электроэнергии на тепловом отборе, средняя по энергосистеме, кВт·ч/ГДж; $W_{\text{эз}}$ – затраты электроэнергии на привод ТПУ и вентилятора, кВт·ч; $b_{\text{замык.ист}}$ – удельный расход условного топлива на производство электроэнергии на замыкающем конденсационном электрогенерирующем источнике, кг/(кВт·ч).

Таблица 5

Исходные данные для технико-экономической оценки

Initial data for technical and economic assessment

Параметр	Численное значение
Тариф на покупку природного газа, руб./тыс. м ³	400
Ставка рефинансирования Национального банка Республики Беларусь, %	30
Годовая процентная ставка по кредиту, %	8,0
Средневзвешенная ставка дисконтирования, %	7,75
Низшая теплота сгорания природного газа, МДж/м ³	33,7
Теплота сгорания условного топлива, МДж/кг	29,3
Курс доллара Национального банка Республики Беларусь на 26.07.2021, руб./дол.	2,5136
Удельный расход условного топлива на производство электроэнергии на замещающей электростанции, г/(кВт·ч)	240
Удельный расход условного топлива на производство тепловой энергии на теплоисточнике, кг/ГДж	39,86
Удельная стоимость капитальных затрат на модернизацию теплового пункта, руб./кВт	1160
Удельные текущие затраты на эксплуатацию оборудования без учета потребления энергоресурсов, руб./кВт	232

На рис. 4–6 представлены результаты численного исследования на примере канала теплотрассы диаметром 200 мм в пределах изменения длины участка от 100 до 300 м, присоединенного к центральному тепловому пункту, для системы теплоснабжения, источником теплоты в которой выступает районная котельная. Влияние мощности ТНУ на системную экономию топлива и сроки возврата инвестиций представлено на рис. 4 и 5, на рис. 6 отражен характер изменения сроков возврата инвестиций и годовой системной экономии для участка теплотрассы длиной 200 м.

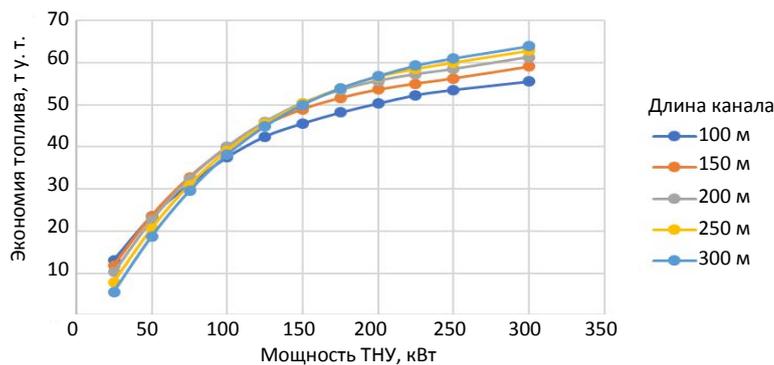


Рис. 4. Влияние мощности теплонасосной установки на системную экономию топлива для канала теплотрассы диаметром 200 мм

Fig. 4. The effect of the heat pump unit power on the system fuel economy for the heating main channel with a diameter of 200 mm

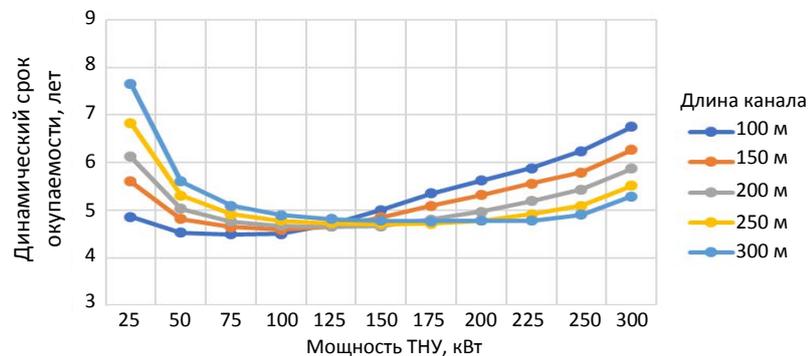


Рис. 5. Влияние мощности теплонасосной установки на динамический срок возврата инвестиций для теплотрассы диаметром 200 мм

Fig. 5. Influence of the heat pump unit capacity on the dynamic return on investment period for heating mains with a diameter of 200 mm

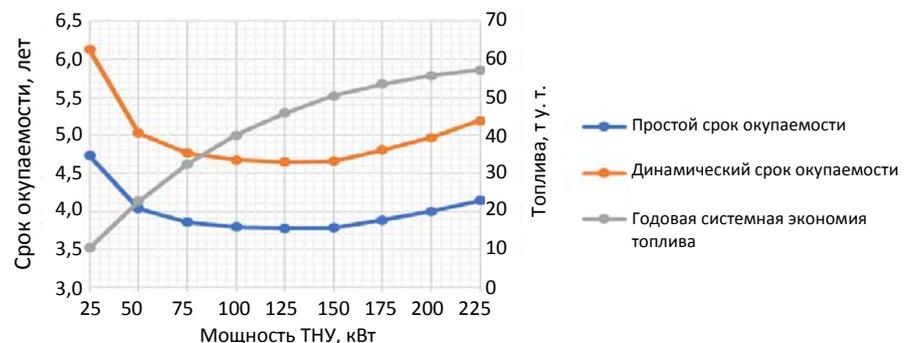


Рис. 6. Влияние мощности теплонасосной установки на срок окупаемости и системную экономию для участка канала теплотрассы диаметром 200 мм, длиной 200 м

Fig. 6. Influence of the heat pump unit capacity on payback periods and system savings for a section of a heating main channel with a diameter of 200 mm and a length of 200 m

Эффект от повышения мощности ТНУ, равный $\pm 50\%$ при мощности 25 кВт, с увеличением длины теплопровода сглаживается и при мощности выше 50 кВт составляет менее $\pm 10\%$ (рис. 4). Динамический срок возврата инвестиций (рис. 5) практически во всем диапазоне исследования находится в интервале 4,5–7,0 года и не превышает 8 лет для мощности 25 кВт, т. е. выполняется ограничение по сроку возврата инвестиций для энергосберегающих проектов в Беларуси. Характер изменения сроков окупаемости и экономии топлива (рис. 6) показывает наличие области минимумов в пределах изменения мощности ТНУ от 75 до 175 кВт.

Из анализа полученных данных следует, что экономия инвестиций несколько выше на теплотрассах больших диаметров, что ожидаемо. В то же время независимо от длины участка для каждого диаметра теплотрассы имеется оптимальная мощность ТНУ. Так, для теплотрассы диаметром 200 мм это диапазон 110–150 кВт. Суммарный энергосберегающий эффект для системы централизованного теплоснабжения Витебска составляет 6,38 тыс. т у. т. в год при инвестициях 7,25 млн дол. и сроках их возврата порядка 4,5 года.

Успешная реализация разработанного технического решения во многом опирается на моделирование процессов теплопереноса и аэродинамики

с помощью программного комплекса Ansys. Это направление актуально в рамках цифровой экономики в целом, а также при совершенствовании представленных исследований по применению тепловых насосов в системах централизованного теплоснабжения [17, 18]. Для повышения качества и эффективности функционирования объектов теплоснабжения, несомненно, будет развиваться технология цифровых двойников. В свою очередь, расширение практики применения информационных технологий для управления распределенными системами, к которым относятся системы централизованного теплоснабжения, потребует инновационных подходов и в сфере обработки и передачи больших объемов информации [19].

ВЫВОДЫ

1. Для повышения эффективности систем централизованного теплоснабжения предложено схемно-структурное решение регенеративно-утилизационного использования тепловых отходов, возникающих при транспорте теплоносителя теплопроводами, размещенными в непроходных каналах, за счет принудительной вентиляции последних и размещения теплонасосного оборудования в граничных точках тепловых сетей. Данное решение позволяет регенерировать часть теплоты, рассеиваемой трубопроводами сетевой воды, и утилизировать теплоту охлаждения грунта вокруг непроходных каналов теплотрасс. Техническая реализация предполагает установку на тепловых пунктах или непосредственно на источниках теплоты дополнительного оборудования в составе компрессионных тепловых насосов и вытяжных вентиляторов, обеспечивающих прокачку воздуха через заданный участок непроходного канала. Нагретый в ходе прокачки через канал воздух в дальнейшем охлаждается в испарителе теплонасосной установки, в конденсаторе которой нагревается сетевая вода.

2. На основании полученных уравнений регрессии для мощностей потоков теплоты, рассеиваемой трубопроводами сетевой воды и от грунта, а также потерь напора при движении потока воздуха внутри канала предложена методика анализа и оценки эффективности применения разработанного технического решения применительно к тепловым сетям с теплопроводами разного типоразмера и длины при различных температурах наружного воздуха и грунта, обеспечивающая реализацию комплекса задач.

3. Результаты численного исследования показывают, что разработанное техническое решение экономически эффективно, динамический срок окупаемости по системной экономии в сложившейся экономической ситуации в Республике Беларусь не превышает требуемых сроков возврата инвестиций 4,5–7,0 года.

ЛИТЕРАТУРА

1. Седнин, В. А. Системы регенеративно-утилизационного теплоиспользования для теплотрасс в непроходных каналах / В. А. Седнин, Т. В. Бубыр // Энергия и менеджмент. 2017. № 4 (97). С. 2–6.
2. Седнин, В. А. Регенеративно-утилизационное теплоиспользование в непроходных каналах теплотрасс / В. А. Седнин, Т. В. Бубыр // Глобальная энергетика: партнерство и устойчивое развитие стран и технологий: сб. науч.-практ. конф. в рамках Форума проектов программ Союзного государства – VI Форума вузов инженерно-технологического профиля, 24–28 октября 2017 г. Минск: БНТУ, 2018. С. 116–120.
3. Седнин, В. А. Численное исследование сложного теплообмена в продуваемых непроходных каналах теплотрасс / В. А. Седнин, Т. В. Бубыр // Энергетика. Изв. высш. учеб.

- заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62. № 1. С. 61–76. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-61-76>.
4. Седнин, В. А. Исследование теплообмена в продуваемых непроходных каналах тепло-трасс. Часть 1 / В. А. Седнин, Т. В. Бубырь // Наука и техника. 2021. Т. 20, № 2. С. 150–160. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-2-150-160>.
 5. Халафян, А. А. Промышленная статистика. Контроль качества, анализ процессов, планирование экспериментов в пакете STATISTICA / А. А. Халафян. М.: Либроком, 2013. 384 с.
 6. Тихомиров, В. Б. Планирование и анализ эксперимента (при проведении исследований в легкой и текстильной промышленности) / В. Б. Тихомиров. М.: Легкая индустрия, 1974. 262 с.
 7. Седнин, В. А. Исследование теплообмена в продуваемых непроходных каналах иеплотрасс. Часть 2 / В. А. Седнин, Т. В. Бубырь // Наука и техника. 2021. Т. 20, № 3. С. 248–258. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-248-258>.
 8. Средний расчетный срок окупаемости мероприятий по энергосбережению [Электронный ресурс] / Департамент по энергоэффективности. 2017. Режим доступа: <https://energoeffect.gov.by/programs/forming/spravka/2010-12-29-15-10-34>. Дата доступа: 22.06.2021.
 9. Брух, С. В. Особенности применения воздушных тепловых насосов для северных территорий [Электронный ресурс] / С. В. Брух // СОК. 2017. № 4. Режим доступа: <https://www.c-o-k.ru/articles/osobennosti-primeneniya-vozdushnyh-teplovyyh-nasosov-dlya-severnyh-territoriy>. Дата доступа: 22.01.2022.
 10. Строительная климатология (Изменение № 1 СНБ 2.04.02–2000) = Будаўнічая кліматалогія. Будаўнічыя нормы Рэспублікі Беларусь: СНБ 2.04.02–2000. Введ. 01.07.07. Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2007. 35 с.
 11. Тепловые насосы воздух-вода NIBE™ F2120 [Электронный ресурс] / ЭНЕРГЕО. 2022. Режим доступа: <http://energeo.by/products/heatpumps/air-water/f2120/>. Дата доступа: 11.08.2022.
 12. Air to Water Heat Pump High Temperature [Electronic Resource] / Daikin Airconditioning UK Ltd. 2022. Mode of access: https://www.daikin.co.uk/en_gb/product-group/air-to-water-heat-pump-high-temperature.html. Date of access: 13.08.2022.
 13. High Temperature Heat Pumps [Electronic Resource] // European Fluorocarbons Technical Committee (EFCTC). 2022. Mode of access: <https://www.fluorocarbons.org/applications/high-temperature-heat-pumps/>. Date of access: 13.08.2022.
 14. Norwegian Researchers Develop ‘World’s Hottest Heat Pump’ [Electronic Resource] // Ammonia 21. Mode of access: <https://ammonia21.com/norwegian-researchers-develop-worlds-hottest-heat-pump/>. Date of access: 13.08.2022.
 15. A Review and Perspective on Industry High-Temperature Heat Pumps [Electronic Resource] / J. Jiang [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022. Vol. 161, 112106. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112106>.
 16. Высокотемпературный тепловой насос (водонагреватель) ТСАН200НН на природном хладагенте CO₂ [Электронный ресурс]. 2022. Режим доступа: <https://tica.pro/catalog/co2-heat-pump/>. Дата доступа: 11.08.2022.
 17. К вопросу использования побочных низкотемпературных тепловых энергоресурсов в системах теплоснабжения предприятий и промышленных узлов / В. Н. Романюк [и др.] // Энергия и менеджмент. 2017. № 5. С. 2–9.
 18. Седнин, В. А. Интеграционные тенденции в системах теплоснабжения / В. А. Седнин, А. В. Седнин // Энергоэффективность. 2021. № 6. С. 23–27.
 19. Sednin, A. V. An Approach to Data Processing for the Smart District Heating System / A. V. Sednin, A. V. Zherelo // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 3. С. 240–249. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-240-249>.

Поступила 18.10.2022 Подписана в печать 29.11.2022 Опубликована онлайн 31.01.2023

REFERENCES

1. Sednin V. A., Bubyr T. V. (2017) Systems of Regenerative and Utilization of Heat Use for Heating Mains in Impassable Channels. *Energiya i Menedzhment* [Energy and Management], (4), 2–6 (in Russian).
2. Sednin V. A., Bubyr T. V. (2018) Regenerative and Utilization of Heat in Impassable Channels of Heating Mains. *Global'naya Energetika: Partnerstvo i Ustoichivoe Razvitie Stran*

- i Tekhnologii: Sb. Nauch.-Prakt. Konf. v Ramkakh Foruma Proektov Programm Soyuznogo Gosudarstva – VI Foruma Vuzov Inzhenerno-Tekhnologicheskogo Profilya, 24–28 Oktyabrya 2017 g.* [Global Energy: Partnership and Sustainable Development of Countries and Technologies: Scientific-and-Practical Conference within the Framework of the Forum of Projects of the Union State Programs – VIth Forum of Universities of Engineering and Technology Profile, October 24–28, 2017]. Minsk, BNTU, 116–120 (in Russian).
- Sednin V. A., Bubyр T. V. (2019) Numerical Study of Complex Heat Transfer in Blown Impassable Channels of Heating Mains. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (1), 61–76. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-61-76> (in Russian).
 - Sednin V. A., Bubyр T. V. (2021) Heat Transfer Research in Blown-Through Non-Passable Heating Mains Channels. Part 1. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 20 (2), 150–160. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-2-150-160> (in Russian).
 - Khalafyan A. A. (2013) *Industrial Statistics. Quality Control, Process Analysis, Experiment Planning with the Use of the STATISTICA Package*. Moscow, Librokom Publ. 384 (in Russian).
 - Tikhomirov V. B. (1974) *Planning and Analysis of the Experiment (when Conducting Research in the Light and Textile Industry)*. Moscow, Legkaya Industriya Publ. 262 (in Russian).
 - Sednin V. A., Bubyр T. V. (2021) Heat Transfer Research in Blown-Through Non-Passable Heating Mains Channels. Part 2. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 20 (3), 248–258. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-248-258> (in Russian).
 - Average Estimated Payback Period of Energy Saving Measures (2017). *Department for Energy Efficiency of the State Committee for Standardization of the Republic of Belarus*. Available at: <https://energoeffect.gov.by/programs/forming/spravka/2010-12-29-15-10-34> (accessed 22 June 2021) (in Russian).
 - Brukh S. V. (2017) Specific Features of the Use of air Heat Pumps for the Northern Territories. *S.O.K.*, (4). Available at: <https://www.c-o-k.ru/articles/osobennosti-primeneniya-vozdushnyh-teplovyyh-nasosov-dlya-severnyh-territoriy> (accessed 22 January 2022) (in Russian).
 - Construction Climatology* (Amendment No 1 of the Building Code of Belrus 2.04.02–2000). Minsk, Architecture and Construction Ministry of the Republic of Belarus, 2007. 35 (in Russian).
 - NIBE™ F2120. *ENERGEO: Energy Saving Solution*. Available at: <http://energeo.by/products/heatpumps/air-water/f2120/> (accessed 11 August 2022) (in Russian).
 - Air to Water High Temperature Heat Pump. *DAIKIN*. Available at: https://www.daikin.co.uk/en_gb/product-group/air-to-water-heat-pump-high-temperature.html (accessed 13 August 2022).
 - High Temperature Heat Pumps. *European Fluorocarbons Technical Committee (EFCTC)*. Available at: <https://www.fluorocarbons.org/applications/high-temperature-heat-pumps> (accessed 13 August 2022).
 - Norwegian Researchers Develop ‘World’s Hottest Heat Pump’. *Ammonia 21: Cooling Marketplace*. Available at: <https://ammonia21.com/norwegian-researchers-develop-worlds-hottest-heat-pump> (accessed 13 August 2022).
 - Jiang J., Hu B., Wang R. Z., Deng N., Cao F., Wang Ch.-Ch. (2022) A Review and Perspective on Industry High-Temperature Heat Pumps. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161, 112106. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112106>.
 - High Temperature Heat Pump (Water Heater) TCAH200HH with Natural CO₂ Refrigerant. *TICA*. 2022. Available at: <https://tica.pro/catalog/co2-heat-pump> (accessed 11 August 2022) (in Russian).
 - Romaniuk V. N., Bubyр T. V., Boiko E. G. (2017) On the Issue of the Use of Secondary Low-Temperature Thermal Energy Resources in Heat Supply Systems of Enterprises and Industrial Units. *Energiya i Menedzhment [Energy and Management]*, (5), 2–9 (in Russian).
 - Sednin V. A., Sednin A. V. (2021) Integration Trends in Heat Supply Systems. *Energoeffektivnost' [Energy Efficiency]*, (6), 23–27 (in Russian).
 - Sednin A. V., Zherelo A. V. (2022) An Approach to Data Processing for the Smart District Heating System. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (3), 240–249. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-240-249> (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-44-56>

УДК 621.311.22

Оценка термодинамической эффективности Объединенной энергетической системы Беларуси

Часть 1

В. Н. Романюк¹⁾, А. А. Бобич¹⁾, Т. В. Рыжова¹⁾, Т. В. Бубырь¹⁾,
В. В. Янчук¹⁾, Я. С. Яцухно¹⁾

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

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

Реферат. Энергосистема – одна из основ современного государства, и необходимость ее успешного развития и функционирования не подлежит сомнению. В этой связи актуален ее объективный анализ на базе комплекса показателей: экономических, энергетических и термодинамических. Вместе с тем традиционная оценка работы энергосистемы осуществляется на основе таких характеристик, как удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии и отпуск тепловой энергии, что не дает полной картины и не всегда применяется корректно. В настоящей статье впервые на базе эксергетического метода рассматривается расчет эксергетического коэффициента полезного действия. Данный показатель позволяет наиболее простым способом получить объективную оценку термодинамической эффективности такого сложного формирования, как энергосистема современной страны. В качестве примера проанализированы Объединенная энергетическая система Беларуси в целом и конденсационные электростанции в частности за достаточно продолжительный срок (2000–2021) и в различные характерные периоды времени. Описана методика расчета эксергетического коэффициента полезного действия. Полученные результаты представлены в графическом виде. Уделено внимание вопросу приемлемости погрешности при обобщении данных об исходных потоках первичных энергоресурсов и продуктовых потоках централизованных генерирующих источников энергосистемы. Проанализирован вклад конденсационных электростанций в общий объем генерации электроэнергии, определены наиболее совершенные из них с термодинамической точки зрения. Проведен расчет их энергетических и эксергетических показателей, рассмотрены изменения, связанные с вводом Белорусской АЭС. Делается вывод о целесообразности дальнейшей реконструкции энергоисточников энергосистемы с целью снижения относительного веса природного газа в приходной части энергобаланса до 50 %. Достичь этого можно путем повышения термодинамической эффективности.

Ключевые слова: энергосистема, эксергия, эксергетический КПД, термодинамическая эффективность, анализ, конденсационные электростанции, Белорусская АЭС

Для цитирования: Оценка термодинамической эффективности Объединенной энергетической системы Беларуси. Часть 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>

Адрес для переписки

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

Address for correspondence

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

Assessment of Thermodynamic Efficiency of the Belarusian Energy System

Part 1

V. N. Romaniuk¹, A. A. Bobich¹, T. N. Ryzhova¹, T. V. Bubyр¹,
V. V. Yanchuk¹, Y. S. Yatsukhna¹

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

Abstract. The energy system is one of the foundations of a modern state, so, the need for its successful development and functioning is beyond doubt. In this regard, an objective assessment based on a set of indicators (viz. economic, energy and thermodynamic) is relevant. However, the traditional assessment of the operation of the energy system is carried out on the basis of such characteristics as the specific consumption of conventional fuel for electricity generation and heat release, which does not provide a comprehensive picture and is not always applied correctly. In this article, for the first time on the basis of the exergetic method, the calculation of the exergetic efficiency is considered. The use of this indicator makes it possible to obtain an objective assessment of the thermodynamic efficiency of such a complex formation as the energy system of a modern country in the easiest way. As an example, the unified energy system of Belarus in general and condensing power plants in particular have been analyzed for a fairly long period (2000–2021) and in various characteristic time periods. The method of calculating the exergetic efficiency is described. The results obtained are presented graphically. Attention is paid to the issue of the acceptability of the error when generalizing data on the initial flows of primary energy resources and product flows of centralized generating sources of the energy system. The contribution of condensing power plants to the total volume of electricity generation is analyzed, the most advanced of them are determined from a thermodynamic point of view. The calculation of their energy and exergetic indicators was carried out; the changes associated with the commissioning of the Belarusian NPP were considered. The conclusion is made that further reconstruction of energy sources of the power system in order to reduce the relative weight of natural gas in the incoming part of the energy balance to 50 % is expedient. This can be achieved by increasing the thermodynamic efficiency.

Keywords: energy system, exergy, exergetic efficiency, thermodynamic efficiency, analysis, condensing power plants, Belarusian NPP

For citation: Romaniuk V. N., Bobich A. A., Ryzhova T. N., Bubyр T. V., Yanchuk V. V., Yatsukhna Y. S. (2023) Assessment of Thermodynamic Efficiency of the Belarusian Energy System. Part 1. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 66 (1), 44–56. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-44-56> (in Russian)

Введение

Энергетическую эффективность теплоэнергетических систем принято оценивать по удельному расходу условного топлива на производство преобразованных энергопотоков – электрической и тепловой энергии. Этот показатель традиционен и достаточно удобен для энергетических систем с однородным оборудованием, когда в качестве первичного энергоресурса используется только органическое топливо. Если же в системе имеются источники раздельной генерации электрической и тепловой энергии, а также комбинированного производства преобразованных энергопотоков и при этом применяются различные первичные энергоресурсы (органиче-

ское и ядерное топливо, альтернативные источники энергии, побочные энергоресурсы, органические отходы промышленного и сельскохозяйственного производства), оценка таких сложных энергосистем по удельному расходу условного топлива теряет однозначность. Тогда требуется более универсальный индикатор энергетической эффективности. В этом качестве можно использовать термодинамические потенциалы, обладающие чрезвычайно важным свойством идентификации вида работы (механической, электрической и других видов в тех или иных условиях) [1, 2]. Целесообразность такого индикатора в технических приложениях отмечал еще академик В. И. Вернадский [3].

В [4] проанализированы методики оценки и термодинамической оптимизации технических систем преобразования энергии на базе эксергетических показателей, а также вопросы сравнения эффективности систем комбинированной и отдельной выработки преобразованных энергопотоков с помощью эксергетического метода. Вместе с тем информации о применении соответствующих показателей на основе эксергетического метода оценки для больших энергетических систем с многоуровневой структурой в общедоступной литературе нами не найдено. При этом следует отметить, что для отдельных технических систем методика эксергетического анализа достаточно хорошо отработана [2, 4–11].

Методика оценки термодинамической эффективности энергосистемы

Согласно [12–14], эффективность энергосистемы можно определить с помощью термодинамического анализа на базе эксергетического метода по таким показателям, как: термодинамический коэффициент полезного действия, степень термодинамического, технологического и полного совершенства технической системы.

Термодинамический КПД используется для детального анализа технической системы обычно в тех случаях, когда имеются потоки транзитной эксергии, значительно превышающие потоки эксергии, характеризующие процессы, протекающие в исследуемой технической системе, и определяется как

$$\eta = (\sum E'' - E^{tr}) / (\sum E' - E^{tr}) = 1 - \sum D / (\sum E' - E^{tr}) = E_{исп} / E_{расп}, \quad (1)$$

где $\sum E'$, $\sum E''$ – потоки эксергии соответственно на входе и выходе системы, ГВт·ч; E^{tr} – транзитные потоки эксергии, ГВт·ч; $E_{исп}$, $E_{расп}$ – используемый и располагаемый потоки эксергии соответственно, ГВт·ч; $\sum D$ – потери эксергии, ГВт·ч.

Для теплотехнологических процессов более информативна оценка термодинамической эффективности системы по степени технологического совершенства

$$\beta = \sum E_{\text{расп}} / \sum E' = 1 - \sum E^{tr} / \sum E'. \quad (2)$$

Степень полного совершенства находят по выражению

$$\mu = \sum E_{\text{исп}} / \sum E' = 1 - (\sum E^{tr} + \sum D) / \sum E'. \quad (3)$$

Степень термодинамического совершенства определяют как

$$\nu = \sum E'' / \sum E'. \quad (4)$$

Очевидна полезность всего приведенного набора показателей в зависимости от индивидуальных особенностей теплотехнологических систем. Для интегральной оценки разнородных систем преобразования энергии может применяться эксергетический КПД, т. е. степень термодинамического совершенства (4).

При количественной оценке степени термодинамического совершенства за выбранный период времени для системы комбинированной выработки энергопотоков соотношение (4) записывается в виде эксергетического КПД

$$\eta_e = (\sum W_3 + \sum E''_{qp} + \sum E''_{qcv}) / \sum E'_{\text{т-во}}, \quad (5)$$

где $\sum W_3$ – потоки электроэнергии, отпущенные внешним потребителям, ГВт·ч; $\sum E''_{qp}$, $\sum E''_{qcv}$ – эксергии потоков теплоты, отпущенной внешним потребителям, соответственно с паром и сетевой водой, ГВт·ч; $\sum E'_{\text{т-во}}$ – эксергии потоков топлив, потребляемых источниками энергосистемы, ГВт·ч.

Эксергия потоков теплоты E''_q , ГВт·ч, с паровым ($\sum E''_{qp}$) или водяным ($\sum E''_{qcv}$) теплоносителем

$$E''_q = Q\tau_e = Q(1 - T_0/T), \quad (6)$$

где Q – теплота, отпущенная с теплоносителем, ГВт·ч; τ_e – эксергетическая температурная функция; T_0 – температура окружающей среды, К; T – то же отпускаемых теплоносителей, К.

Температура отпускаемых сетевой воды и пара не одинаковая, но диапазон различий невелик, как и абсолютные значения температуры этих теплоносителей. В этом случае эксергетическая температурная функция изменяется незначительно. Следовательно, погрешностью определения эксергии отпускаемых тепловых потоков можно пренебречь, поскольку ее величина оказывается меньше погрешности имеющих исходных характеристик и расходов.

Для определения эксергии топлива E' , ГВт·ч, в [2, 4–6] предлагается ряд соотношений:

для природного газа

$$E'_{\text{пг}} = e_0 B = 1,04 Q_p^B B; \quad (7)$$

для жидких топлив

$$E'_{\text{жт}} = 0,975 Q_p^B B; \quad (8)$$

для твердых топлив

$$E'_{\text{тт}} = Q_p^B (1 - W_{\text{вл}}) B, \quad (9)$$

где e_0 – удельная эксергия, ГДж/кг; Q_p^B – высшая теплота сгорания, ГДж/кг; B – расход топлива, кг; $W_{\text{вл}}$ – влажность твердого топлива, доли.

Для расчета эксергии ядерного топлива предлагается соотношение, кДж/с [3]:

$$E'_{\text{ят}} = 5,354 \cdot 10^9 (B_{\text{ят}}/\mu), \quad (10)$$

где $B_{\text{ят}}$ – расход расщепляющегося изотопа ядерного топлива, загружаемого в реактор, кг/ч; μ – молярный вес расщепляющегося изотопа, кг/кмоль.

В силу объективных причин химическая эксергия, характеризующая эксергию топлив, определяется с той или иной погрешностью [4].

Использование эксергетического КПД позволяет более полно оценивать варианты развития энергосистемы при привлечении различных видов топлива, включая возобновляемые источники энергии и органические отходы производства. Кроме того, с помощью методов термодинамического анализа можно исследовать эффективность преобразования энергии внутри технической системы, что важно для комплексного изучения энергетических систем.

Расчет эксергетического коэффициента полезного действия

Эксергетический КПД Объединенной энергетической системы (ОЭС) Беларуси рассчитан за 2000–2021 гг. на основе годовых статистических отчетов. На рис. 1 динамика изменения эксергетического КПД приведена на фоне используемых для оценки работы энергетического оборудования данных по традиционным характеристикам: $УРТ_3$ – удельный расход топлива на производство электроэнергии, г/(кВт·ч); $УРТ_T$ – то же на производство тепловой энергии, кг/Гкал.

Увеличение эксергетического КПД с 29,4 до 34,0 % (рис. 1) обусловлено техническим перевооружением ОЭС, и в первую очередь внедрением высокоэффективных парогазовых технологий на конденсационных электростанциях (КЭС) и теплоэлектроцентралях (ТЭЦ). Так, в 2009–2017 гг. введены парогазовые блоки на Минской ТЭЦ-3, Лидской ТЭЦ, Гродненской ТЭЦ-2, Борисовской ТЭЦ, Могилевской ТЭЦ-1, Гомельской ТЭЦ-1,

а также мощные парогазовые установки ПГУ-400 на Минской ТЭЦ-5, Березовской и Лукомльской ГРЭС. Динамика предложенного индикатора хорошо коррелирует с динамикой изменения традиционных характеристик – удельного расхода условного топлива на производство электроэнергии и отпуска тепловой энергии. Однако для представительности сравнения энергетической эффективности ТЭЦ по двум энергетическим показателям (удельному расходу топлива на производство тепловой и электрической энергии) следует один из них зафиксировать на определенном уровне, тогда изменение оставшегося позволит получить более объективную оценку.

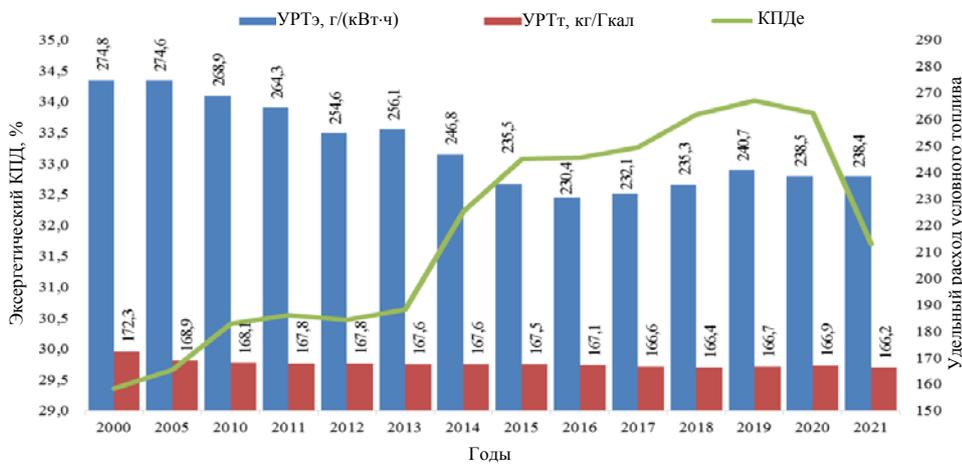


Рис. 1. Изменение энергетических и термодинамических показателей работы энергосистемы Беларуси в 2000–2021 гг.

Fig. 1. Alterations in the energy and thermodynamic performance of the Belarusian energy system in 2000–2021

С вводом в эксплуатацию Белорусской АЭС термодинамическая эффективность ОЭС Беларуси в 2021 г. снизилась на 1,4 % и составила 32,5 %, что ожидаемо, исходя из характеристик электроисточников. Однако экономически это целесообразно, поскольку АЭС вытесняет из оборота более дорогой вид топлива – природный газ. Вместе с тем снижение термодинамической эффективности энергосистемы указывает на необходимость ее дальнейшего развития для восстановления значения этого объективного индикативного показателя.

Общие сведения о конденсационных электростанциях Беларуси

В ОЭС Беларуси эксплуатируются три КЭС на органическом топливе (Березовская и Лукомльская ГРЭС, Минская ТЭЦ-5) и одна на ядерном топливе (Белорусская АЭС). Установленная электрическая мощность основного оборудования КЭС на органическом топливе на конец 2021 г. и его средняя загрузка по периодам года приведены в табл. 1.

Таблица 1

Установленная электрическая мощность и средняя загрузка основного оборудования конденсационных электростанций на конец 2021 г.

Installed electric capacity and average load of the main equipment of condensing power plants at the end of 2021

Наименование источника	Мощность, МВт		
	установленная электрическая	средняя, отопительный период	средняя, межотопительный период
Березовская ГРЭС			
Блок № 1	160	457	535
Блок № 3 (сб. схема)	$165 + 2 \cdot 25 = 215$		
Блок № 4 (сб. схема)	$165 + 2 \cdot 25 = 215$		
Блок № 5	$180 + 2 \cdot 29 = 238$		
Блок № 7 (ПГУ-400)	427		
Итого по Березовской ГРЭС	1255		
Лукомльская ГРЭС			
Блок № 1	315	924	1389
Блок № 2	315		
Блок № 3	315		
Блок № 4	315		
Блок № 5	300		
Блок № 6	300		
Блок № 7	300		
Блок № 8	300		
Блок № 9 (ПГУ-400)	427		
Итого по Лукомльской ГРЭС	2887		
Минская ТЭЦ-5			
Блок № 1	320	148	239
Блок № 2 (ПГУ-400)	400		
Итого по Минской ТЭЦ-5	720		
Итого по КЭС	4862	1529	2163

На проанализированных КЭС (табл. 1) имеются парогазовые установки, удельный вес которых в установленной мощности: для Лукомльской ГРЭС – 15 %, Березовской ГРЭС – 34 %, Минской ТЭЦ-5 – 55 %, или 26 % (1254 МВт) суммарной установленной мощности всех КЭС (4862 МВт). Указанными источниками в 2021 г. произведено 60 % всей отпускаемой электроэнергии, 73 % в межотопительный период и 52 % в отопительный (рис. 2). Поэтому целесообразно провести оценку термодинамической эффективности их работы.

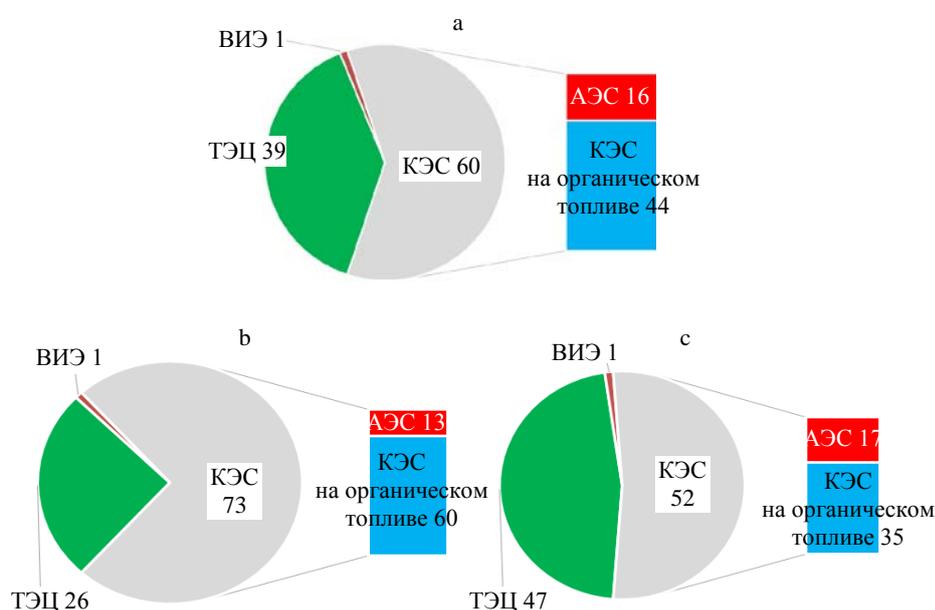


Рис. 2. Отпуск электроэнергии генерирующими источниками в 2021 г., %:
 а – годовой; б – в межотопительный период; с – в отопительный период

Fig. 2. Electricity supply by generating sources in 2021, %:
 a – the annual one; b – during the inter-heating period; c – during the heating period

Показатели работы КЭС приведены в табл. 2, 3.

Таблица 2

Генерация электроэнергии
 конденсационными электростанциями в 2021 г.
 Generation of electricity by condensing power plants in 2021

Наименование электростанции	Генерация электроэнергии, млрд кВт·ч			Установленная электрическая мощность, ГВт	Коэффициент использования установленной электрической мощности, %		
	годовая	отопительный период	межотопительный период		годовой	отопительный период	межотопительный период
Березовская ГРЭС	4,29	2,33	1,96	1,26	39	36	43
Лукомльская ГРЭС	9,80	4,70	5,10	2,89	39	32	48
Минская ТЭЦ-5	1,63	0,75	0,88	0,72	26	21	33
Итого по КЭС на органическом топливе	15,70	7,80	7,90	4,87	37	31	44
Белорусская АЭС	5,78	4,00	1,78	1,19	55	66	41
ИТОГО	21,50	11,80	9,73	6,06	41	38	44

Таблица 3

**Потребление условного топлива и отпуск электроэнергии
конденсационными электростанциями в 2021 г.
Conventional fuel consumption and electricity supply
by condensing power plants in 2021**

Наименование электростанции	Потребление условного топлива, млн т у.т.			Отпуск электроэнергии, млрд кВт·ч			Удельный расход условного топлива на отпуск электроэнергии, г/(кВт·ч)		
	годовое	отопительный период	межотопительный период	годовой	отопительный период	межотопительный период	годовой	отопительный период	межотопительный период
Березовская ГРЭС	1,12	0,62	0,50	4,16	2,25	1,91	269	274	263
Лукомльская ГРЭС	2,84	1,36	1,48	9,47	4,54	4,93	300	298	302
Минская ТЭЦ-5	0,40	0,20	0,20	1,58	0,73	0,85	253	273	237
Итого по КЭС на органическом топливе	4,36	2,17	2,19	15,20	7,50	7,70	287	289	285
Белорусская АЭС	1,95	1,35	0,60	5,40	3,73	1,67	362	362	362

Отпускаемый поток электроэнергии и поток мощности КЭС за 2021 г. приведены на рис. 3.

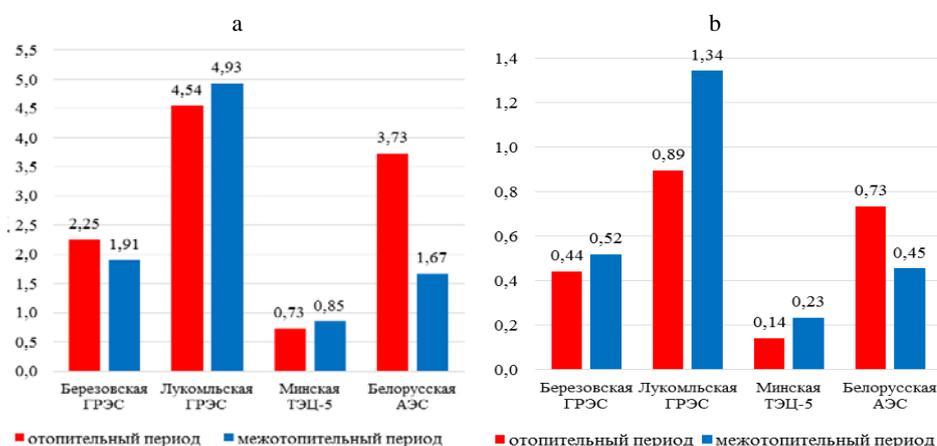


Рис. 3. Отпускаемые потоки электроэнергии (а) и мощности (б) за 2021 г.

Fig. 3. Supplied electricity flows (a) and capacity (b) for the periods of 2021

Доля отдельных КЭС в годовом отпуске вырабатываемой ими электроэнергии за 2021 г. приведена на рис. 4.

Анализ загрузки КЭС за 2021 г. показывает (табл. 2), что средний коэффициент использования установленной электрической мощности 41 %, что соответствует 3,6 тыс. ч работы в году с номинальной мощностью.

При этом использование электрических мощностей на Белорусской АЭС составляет 55 %, что значительно выше среднего уровня, а на Минской ТЭЦ-5 – 26 %, т. е. ниже среднего уровня. Одним из факторов, определяющих дальнейшую целесообразность эксплуатации оборудования, является его износ, который в ряде случаев достиг предельной величины.

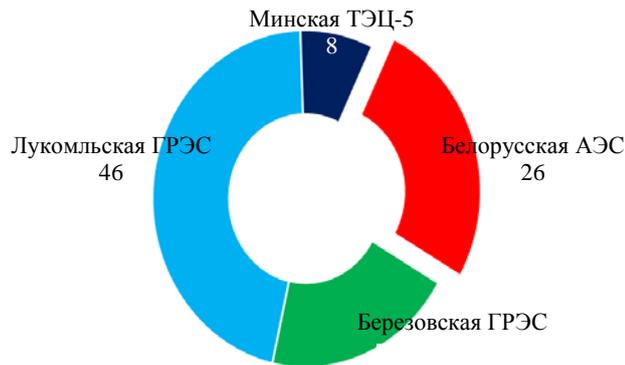


Рис. 4. Доля конденсационных электростанций в годовом отпуске электроэнергии в 2021 г., %

Fig. 4. The share of condensing power plants in annual electricity supply in 2021, %

Оценка термодинамической эффективности конденсационных электростанций

Ранжирование КЭС по величине эксергетического КПД от большего к меньшему за 2021 г., за отопительный и межотопительный периоды приведено на рис. 5. Максимальный эксергетический КПД имеет место на Минской ТЭЦ-5, что связано с наибольшим удельным весом ее ПГУ в генерации электроэнергии.

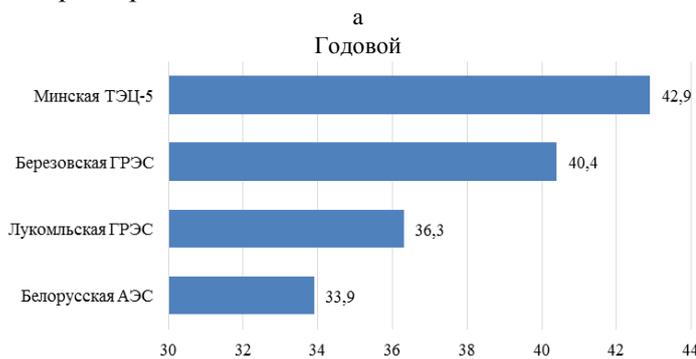


Рис. 5. Эксергетический коэффициент полезного действия конденсационных электростанций за 2021 г., %: а – годовой; б – за отопительный период; с – за межотопительный период (окончание рис. на с. 54)

Fig. 5. Exergetic efficiency of condensing power plants for 2021, %: a – the annual one; b – for the heating period; c – for the inter-heating period (ending of the Fig. is on p. 54)

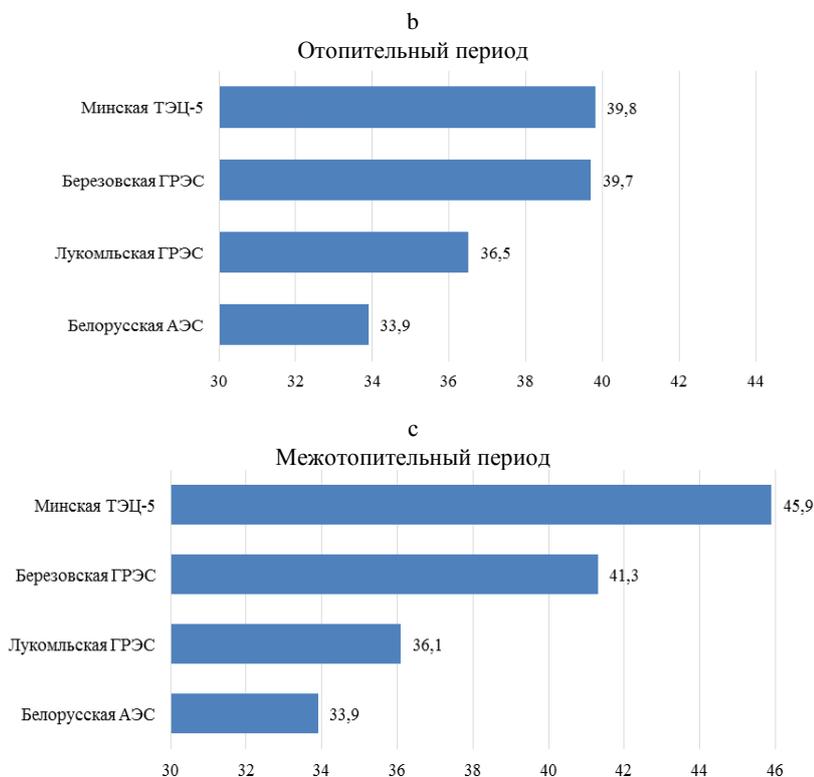


Рис. 5. Окончание
Fig. 5. Ending

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрена целесообразность внедрения в практику оценки энергисточников эксергетического коэффициента полезного действия, являющегося объективной индикативной характеристикой термодинамической эффективности технической системы.

2. Эксергетический коэффициент полезного действия конденсационных электростанций изменяется в широком диапазоне от 33,9 до 45,9 %, что связано с режимами работы оборудования в отопительный и межотопительный периоды. Наивысшую термодинамическую эффективность имеет Минская ТЭЦ-5 с максимальным удельным весом генерации на совершенных парогазовых установках.

3. У конденсационных электростанций термодинамическая эффективность выше среднего показателя по энергосистеме, так как они производят единственный и наиболее ценный продукт – электроэнергию.

4. Снижение термодинамической эффективности указывает на необходимость дальнейшего развития энергосистемы. Это важно для уменьшения потребления природного газа, доля которого с вводом Белорус-

ской АЭС снижается с 97 до 59 % [15], но при этом превышает порог 50 %, установленный в соответствии с критерием энергетической безопасности [15, 16].

ЛИТЕРАТУРА

1. К вопросу оценки термодинамической эффективности Белорусской энергосистемы / Е. О. Воронов [и др.] // Энергия и Менеджмент. 2016. № 3 (90). С. 2–7.
2. Бродянский, В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа / В. М. Бродянский. М.: Энергия, 1973. 296 с.
3. Вернадский, В. И. О задачах и организации прикладной научной работы АН СССР / В. М. Бродянский. Л.: Изд-во АН СССР, 1928. 42 с.
4. Шаргут, Я. Эксергия / Я. Шаргут, Р. Петела. М.: Энергия, 1968. 273 с.
5. Сажин, Б. С. Эксергетический метод в химической технологии / Б. С. Сажин, А. П. Булеков. М.: Химия, 1992. 208 с.
6. Сорин, М. В. Методика однозначного определения эксергетического КПД технических систем преобразования энергии и вещества / М. В. Сорин, В. М. Бродянский // Известия высших учебных заведений Министерства высшего и среднего специального образования СССР. Энергетика. 1985. № 3. С. 78–88.
7. Kriese, S. Exergie in der Kraftwerkstechnik. Leistungreaktoren-Dampfkraftwerke-Gasturbinen-Warme-Kraft-Kopplung / S. Kriese. Essen: Vulkan. 1971. 148 с.
8. Mujanovic, R. Bila s Parnog Bloka po Drugom Zakonu Termodinamike // R. Mujanovic // Termotechnika. 1977. № 3. Р. 56–67.
9. Pruschek, R. Exergetische Analyse eines Kernkraftwerke / R. Pruschek // BWK. 1970. № 1. Р. 64–70.
10. Siegel, K. Exergieanalyse Heterogenen Leistungsreaktoren / K. Siegel // BWK. 1970. № 9. Р. 434–440.
11. Романюк, В. Н. Оценка термодинамической эффективности функционирования энергосистемы Беларуси в условиях работы Белорусской АЭС / В. Н. Романюк, А. А. Бобич // Энергия и Менеджмент. 2016. № 4 (91). С. 2–9.
12. Андриющенко, А. И. Показатели эффективности сложных систем энергоснабжения и взаимосвязь между ними / А. И. Андриющенко // Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности: материалы 4-й Рос. науч.-техн. конф., Ульяновск, 24–25 апр. 2003 г. Ульяновск, 2003. С. 12–14.
13. Бобич, А. А. Комплекс энергосберегающих мероприятий на ТЭЦ при адаптации к условиям работы энергосистемы с вводом Белорусской АЭС: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14 / А. А. Бобич. Минск, 2018. 224 с.
14. Повышение энергетической эффективности и снижение энергетической составляющей себестоимости продукции теплоэнергетических и теплотехнических производств в современных условиях / М. П. Малашенко [и др.] // Энергоэффективность. 2019. № 8. С. 8–15.
15. Михалевич, А. А. Моделирование работы Белорусской энергосистемы с учетом ввода АЭС / А. А. Михалевич, В. А. Рак // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 1. С. 5–14. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-5-14>.
16. Зорина, Т. Г. Типологизация и анализ значимости рисков и угроз энергетической безопасности Республики Беларусь с учетом интеграции Белорусской АЭС в энергосистем / Т. Г. Зорина, В. В. Панасюк, С. Г. Прусов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 5. С. 385–397. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-65-5-385-397>.

REFERENCES

1. Voronov E. O., Romaniuk V. N., Sednin V. A., Bobich A. A. (2016) On the Issue of Assessing the Thermodynamic Efficiency of the Belarusian Energy System. *Energiya i Menedzhment* [Energy and Management], (3), 2–7 (in Russian).
2. Brodyanskii V. M. (1973) *Exergetic Method of Thermodynamic Analysis*. Moscow, Energiya Publ. 296 (in Russian).
3. Vernadsky V. I. (1928) *On the Tasks and Organization of Applied Scientific Work of the Academy of Sciences of the USSR* / V. M. Brodyansky. Leningrad, Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR. 42.
4. Szargut J., Petela R. (1968) *Exergia*. Moscow, Energiya Publ. 273 (in Russian).
5. Sazhin B. S., Bulekov B.S. (1992) *Exergetic Method in Chemical Technology*. Moscow, Khimiya Publ. 208 (in Russian).
6. Sorin M. V., Brodyanskii V. M. (1985) The Method of Unambiguous Determination of the Exergetic Efficiency of Technical Systems of Energy and Matter Conversion. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Ministerstva Vysshego i Srednego Spetsial'nogo Obrazovaniya SSSR. Energetika* [Proceedings of Higher Educational Institutions of the Ministry of Higher and Secondary Specialized Education of the USSR. Energy], (3), 78–88 (in Russian).
7. Kriese S. (1971) *Exergie in der Kraftwerkstechnik. Leistungskraftwerke-Gasturbinen-Warme-Kraft-Kopplung*. Essen, Vulkan. 148 (in German).
8. Mujanovic R. (1977) Bila s Parnog Bloka po Drugom Zakonu Termodinamike. *Termotechnika*, (3), 56–67.
9. Pruschek R. (1970) Exergetische Analyse eines Kernkraftswerke. *BWK*, (1), 64–70 (in German).
10. Siegel K. (1970) Exergieanalyse Heterogenen Leistungsreaktoren. *BWK*, (9), 434–440 (in German).
11. Romaniuk V. N., Bobich A. A. (2016) Assessment of the Thermodynamic Efficiency of the Functioning of the Belarusian Energy System in the Conditions of Operation of the Belarusian NPP. *Energiya i Menedzhment* [Energy and Management], (4), 2–9 (in Russian).
12. Andryushenko A. I. (2003) Efficiency Indicators of Complex Power Supply Systems and the Relationship between Them. *Energoberezhenie v Gorodskom Khozyaistve, Energetike, Promyshlennosti: Materialy 4-i Ros. Nauch.-Tekhn. Konf., Ulyanovsk, 24–25 Apr. 2003 g.* [Energy Saving in Urban Economy, Power Engineering, Industry: Materials of the 4th Russian Scientific and Technical Conference, Ulyanovsk, 24–25 Apr. 2003]. Ulyanovsk, 12–14 (in Russian).
13. Bobich A. A. (2016) *A Set of Energy-Saving Measures at the CHP Plant when Adapting to the Operating Conditions of the Power System with the Commissioning of the Belarusian NPP*. Minsk. 224 (in Russian).
14. Malashenko M. P., Romaniuk V. N., Bobich A. A. (2019) Increasing Energy Efficiency and Reducing the Energy Component of the Cost of Production of Heat and Power Industry and Heat Engineering Industry in Modern Conditions. *Energoeffektivnost'* [Energy Efficiency], (8), 8–15 (in Russian).
15. Mikhalevich 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).
16. Zoryna T. G., Panasyuk V. V., Prusov S. G. (2022) Typologation and Analysis of the Significance of Risks and Threats to the Energy Security of the Republic of Belarus Taking into Account the Integration of Belarusian NPP in the Energy System. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (5), 385–397. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-65-5-385-397> (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-57-65>

UDC 662.997

Heat and Material Balance of Heliopyrolysis Device

G. N. Uzakov¹, A. V. Novik², X. A. Davlonov¹, X. A. Almardanov¹, S. E. Chuliev¹

¹Karshi Engineering Economics Institute (Karshi, Republic of Uzbekistan),

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

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

Abstract. The article proposes a technological scheme for the process of obtaining alternative fuels from local biomass by the method of heliopyrolysis. Besides, the temperature regime in the reactor of the pyrolysis device and the thermal energy savings consumed for the specific needs of the device, as well as the thermal performance of the device are analyzed. It is known that reducing energy consumption in pyrolysis technology is a major challenge—because energy (heat) must first be supplied to maintain the reactor temperature regime. Typically, the processes carried out in a pyrolysis unit are carried out at the expense of coal, natural gas or electricity consumption. For the operation very large amount of thermal energy is required to decompose biomass waste, and additional heating of biomass requires excessive energy consumption. To prevent these technological problems, the article proposes a solar concentrator's heliopyrolysis system to heat the pyrolysis reactor. Applying a solar concentrator to this type of pyrolysis device can achieve a temperature of 400–700 °C. A schematic diagram of the experimental pyrolysis unit of the solar concentrator was developed, and samples of alternative fuels (pyrogas, liquid, solid fuels) were obtained as a result of thermal processing of biomass. Based on the analysis of the material balance of a heliopyrolysis plant with a parabolic-cylindrical solar concentrator, it was found that about 20 % pyrogas, 60 % liquid fuel, 8–20 % solid alternative fuel were obtained during the pyrolysis of cotton stalks with an initial biomass load of 3.76 kg. In order to determine the consumption of thermal energy in the pyrolysis process, as well as for the replaced solar energy, an analysis of the heat balance of the proposed installation was carried out. It is shown that the use of a solar concentrator makes it possible to reduce the specific energy consumption for the pyrolysis process by up to 30 %. The proposed heliopyrolysis device makes it possible to reduce the consumption of thermal energy for own needs, increase the overall efficiency of the installation and ensure a stable temperature regime for pyrolysis.

Keywords: heliopyrolysis, concentrator, pyrolysis reactor, biomass, amount of heat, enthalpy, solar radiation, thermal efficiency, alternative fuel, temperature, heat transfer coefficient, time

For citation: Uzakov G. N., Novik A. V., Davlonov X. A., Almardanov X. A., Chuliev S. E. (2023) Heat and Material Balance of Heliopyrolysis Device. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 66 (1), 57–65. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-57-65>

Адрес для переписки

Алмарданов Хамидилла Абдиганиевич
Каршинский инженерно-экономический институт
просп. Мустакиллик, 225,
180100, г. Карши, Республика Узбекистан
Тел.: +998 90 428-81-91
hamid_8191@mail.ru

Address for correspondence

Almardanov Xamidilla A.
Karshi Engineering Economics Institute
225, Mustakillik Ave.,
180100, Karshi, Republic of Uzbekistan
Tel.: +998 90 428-81-91
hamid_8191@mail.ru

Тепловой и материальный баланс гелиопиролизного устройства

Г. Н. Узаков¹⁾, А. В. Новик²⁾, Х. А. Давлонов¹⁾, Х. А. Алмарданов¹⁾,
С. Э. Чулиев¹⁾

¹⁾Каршинский инженерно-экономический институт (Карши, Республика Узбекистан),

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

Реферат. Предложена технологическая схема процесса получения альтернативного топлива из местной биомассы методом гелиопиролиза. Проанализированы температурный режим в реакторе пиролизной установки, экономия тепловой энергии, расходуемой на конкретные нужды оборудования, а также тепловая производительность установки. Снижение энергопотребления в технологии пиролиза является серьезной проблемой. Это связано с необходимостью подвода энергии (теплоты) для поддержания температурного режима реактора, дополнительного нагрева биомассы, а также особенностями процесса разложения отходов, для которого требуется очень большая тепловая энергия. Обычно пиролиз осуществляется за счет потребления угля, природного газа или электроэнергии. В статье предложено использовать для обогрева пиролизного реактора гелиопиролизную систему с параболическим цилиндрическим солнечным концентратором, что позволяет достичь температуры 400–700 °С. Разработана принципиальная схема экспериментальной пиролизной установки солнечного концентратора и получены образцы альтернативных топлив. Так, термическая переработка стеблей хлопчатника дала около 20 % пирогаза, 60 % жидкого топлива, 8–20 % твердого альтернативного топлива при загрузке исходной биомассы 3,76 кг. Рассмотрен тепловой и материальный баланс установки. Показано, что применение солнечного концентратора позволяет уменьшить удельные энергозатраты на процесс пиролиза до 30 %. Предложенная гелиопиролизная установка снижает расход тепловой энергии на собственные нужды, повышает общий коэффициент полезного действия и обеспечивает стабильный температурный режим пиролиза.

Ключевые слова: гелиопиролиз, концентратор, пиролизный реактор, биомасса, количество теплоты, энтальпия, солнечное излучение, тепловой КПД, альтернативное топливо, температура, коэффициент теплопередачи, время

Для цитирования: Тепловой и материальный баланс гелиопиролизного устройства / Г. Н. Узаков [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 66, № 1. С. 57–65. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-57-65>

Introduction

Demand for energy is growing in Uzbekistan as a result of industrial development and population growth. According to estimates approved by the State Statistics Committee of the Republic of Uzbekistan, in 2019 Uzbekistan's oil reserves reached 100 million tons and natural gas reserves – 1.1 trillion cubic meters, total reserves of petroleum products (diesel, kerosene, gasoline, natural gas) in the country, 4 billion tons of conventional fuel [1]. At present, 86 % of the electricity generated in the country is produced by thermal power plants, 90 % of them run on natural gas. In recent years, special attention has been paid to reducing energy consumption in production and product's costs, as well as the introduction of mechanisms for the use of renewable energy sources. In particular, the Resolution of the President of the Republic of Uzbekistan No. PD-3012 “On the program of measures for further development of renewable energy, energy

efficiency in the economy and social spheres in 2017–2021” and Resolution of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan dated November 25, 2015 No 343 “On measures to encourage the construction of biogas plants in livestock and poultry farms” provides comprehensive measures to ensure energy efficiency in the economy and social spheres of the country [2, 3]. The potential for the use of solar energy in the country is high, and in about 270–300 sunny days of the year (2700–3000 h) radiant energy can be used effectively for various purposes [4]. In world practice, the use of solar energy for lighting, heating, cooling, ventilation, heating and electricity generation of buildings is established. Nowadays, it is important to use solar concentrators for use in technological processes that require high temperatures from solar energy. In recent years, Uzbekistan has conducted research on the use of solar energy in various technological processes and achieved practical results [5–8].

Also in recent years, research on the use of pyrolysis devices in the production of alternative fuels from biomass shows that significant theoretical and practical results have been achieved in this area. Currently, foreign scientists are conducting research on the use of solar concentrators in the pyrolysis process. In particular, the Mexican scientist Morales studied the pyrolysis process using parabolic concentrators, but the studies did not fully explore the practical possibilities associated with the daily location of the sun and seasonal radiation levels [9]. A rapid pyrolysis system using a parabolic reflector was studied by Bangladesh scientist Joardder [10]. In China, Zeng et al. [11] proposed a two-stage heliostatic parabolic concentrator with a display system to control the heating rate and temperature of the pyrolysis reactor. Their research examined the effect of temperature (600–2000 °C and heating rate 5–450 °C/s on the productivity and properties of the hard coal obtained as a result of the process, rather than on the performance of the system during this period. A solar pyrolysis device with a two-axis tracking system was developed and tested by Lebanese scientist Zeitter using a Fresnel lens. In the process, a temperature of 550 °C was generated and pyrolysis of fuel from household waste was studied [12]. In the CIS countries, G. I. Palchenok and N. G. Khutskaya has been studied by the use of solar concentrators in biomass pyrolysis [13]. G. N. Uzakov, R. T. Rabbimov and X. A. Davlonov conducted research on the production of alternative fuels by pyrolysis from local biomass in the country [14, 15].

Materials and methods

The aim of the present study is to develop a solar concentrator heliopyrolysis device for biomass pyrolysis and to analyze heat and material balance. Taking into account the solar energy potential of the region, a technological scheme of the heliopyrolysis process for thermal processing of biomass has been created (Fig. 1).

The average temperature regime during biomass pyrolysis is 350–500 °C. Biomass raw material reserves are a very common alternative energy source, from which 1 m³ biogas gives 21.0–27.2 MJ/m³ of combustion heat, 0.6 liters

of gasoline, 1.7 kg of wood equivalent to heat energy [16]. Reducing energy consumption in pyrolysis technology is a major challenge. This is because energy (heat) must first be supplied to maintain the temperature regime of the reactor. Typically, the processes carried out in a pyrolysis unit are carried out at the expense of coal, natural gas or electricity consumption. For the operation very large amount of thermal energy is required to decompose biomass waste, and additional heating of biomass requires excessive energy consumption.

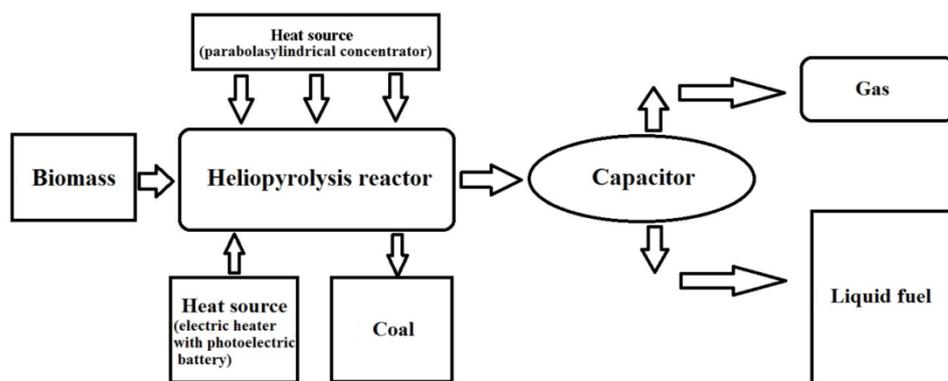


Fig. 1. Technological scheme of heliopyrolysis process

These technical and economic problems can be overcome by using a heliothermal heating system. As a result of research in this area, a method of using solar concentrators in the process of biomass pyrolysis, i. e. the method of heliopyrolysis, has been proposed (Fig. 2).

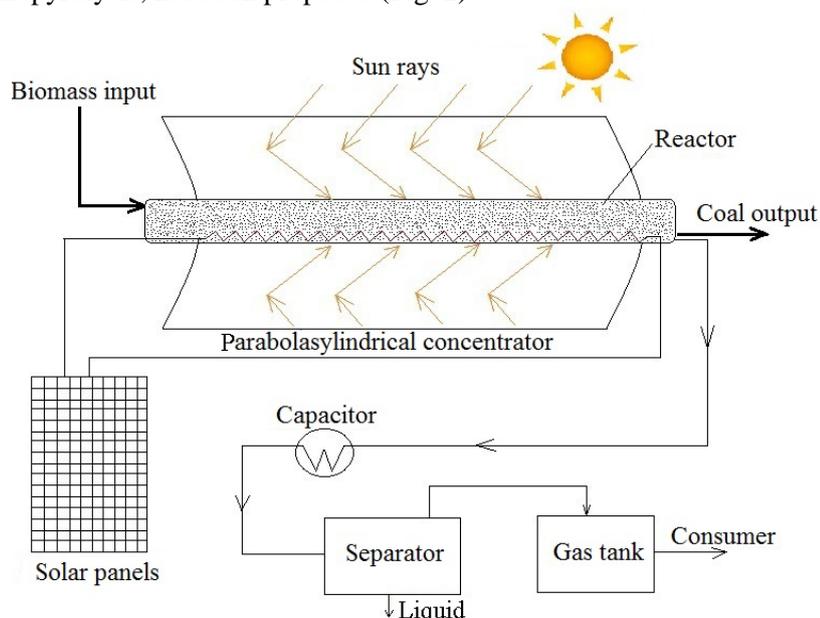


Fig. 2. Schematic diagram of a heliopyrolysis device

The solar concentrator-based heliopyrolysis device does not harm the environment and reduces the energy consumption for the process. The heat required for the process is generated by parabolacylindrical solar concentrators. The advantage of the proposed method is that the pyrolysis reactor can be continuously heated by solar energy using solar concentrators. Initially, the pyrolysis reactor is heated to a certain temperature by a solar heating system, while the pyrolysis reactor is heated continuously, i. e. during the pyrolysis cycle by a solar heating system at the same time as a conventional or electric heating system [17–19].



Fig. 3. Heliopyrolysis unit with rotary reactor and solar concentrator:
1 – parabolacylindrical concentrator;
2 – reactor; 3 – base foundations;
4 – gas outlet

It is important to study the heat balance of a pyrolysis reactor to obtain fuel from biomass by the heliopyrolysis method as it is important to heat the reactor surface with the aid of the sun and to provide heat continuously. An experimental version of a heliopyrolysis device with a rotating reactor and a solar concentrator in the proposed device is shown in Fig. 3.

The pyrolysis reaction takes place inside a stainless steel reactor. The main components of a solar pyrolysis system are the reactor, the parabolacylindrical solar concentrator, and the condenser. The reactor is heated from the outside by means of parabolacylindrical solar concentrators together with a continuous heating system. In this case, parabolacylindrical solar concentrators are used as a heat source for additional heating of the

reactor. As a result, using this combined device allows obtaining heat at a temperature of 350–500 °C. Pyrolysis vapors move to the condenser through the formation of a pressure inside the reactor above the atmospheric one. Condensate (biofuel) from pyrolysis vapor accumulates in liquid collectors. The separated gas is collected in a gas holder.

In this research work, the theory of heat-mass transfer of thermal engineering and solar devices and methods of calculating heat balance equations were used.

Results and discussion

To calculate the results of experimental research on a computer, the program for modeling the device of heliopyrolysis and calculation of exergetic balance for the production of alternative fuels from biomass was developed [20].

The heat balance can be written as follows, W:

$$Q_{reak} = Q_{proc} + Q_{loss} - Q_{sol.en} - Q_{elec}. \quad (1)$$

The amount of heat required to increase the temperature of the loaded biomass to the value of the pyrolysis process Q_{proc} , W:

$$Q_{proc} = m_b c_b (t_{proc} - t_b) 3.6 \cdot 10^{-3}, \quad (2)$$

where m_b is mass of biomass, kg; c_b is biomass heat capacity, J/kg·°C; t_{proc} is temperature required for the process, °C; t_b is biomass temperature, °C.

The amount of heat released into the environment through the reactor in the process Q_{loss} , W [21–23]:

$$Q_{loss} = \frac{2\pi l \lambda (t_{proc} - t_{biom})}{\ln \frac{d_2}{d_1}}, \quad (3)$$

where λ is thermal conductivity, W/(m·°C); l is reactor length, m; t_{proc} is the temperature required for pyrolysis, °C; t_{biom} is biomass temperature, °C; d_2 is the inside diameter of the reactor, m; d_1 is the outside diameter of the reactor, m.

Solar energy density $Q_{sol.en}$, W, in the focal zone of a parabolacylindrical concentrator [24, 25]:

$$Q_{sol.en} = 2P \operatorname{tg} \left(\frac{U_m}{2} \right) LRE_o, \quad (4)$$

where P is focal parameter; U_m is the angle of incidence of sunlight; L is concentrator length, m; E_o is the amount of the falling solar radiation, W/m²; R is light reflection coefficient.

The amount of heat released from a solar-powered electric heater Q_{elec} , W [26–28]:

$$Q_{elec} = IU\tau \cdot 3.6 \cdot 10^{-3}, \quad (5)$$

where I is current strength, A; U is electrical voltage, V; τ is time, h.

If we assume that the sum of the amount of heat needed to heat the loaded biomass and the heat lost to the environment is equal to the total amount of heat used for the process Q_{total} :

$$Q_{total} = Q_{proc} + Q_{loss}. \quad (6)$$

If we consider the sum of the amount of heat generated in the solar concentrator and the amount of heat generated using an additional electric heater to be equal to the amount of heat input to the heliopyrolysis device Q_{input} :

$$Q_{input} = Q_{sol.en} + Q_{elec}. \quad (7)$$

The amount of heat required for a heliopyrolysis device is determined using the following equation Q_{demand} :

$$Q_{demand} = Q_{total} - Q_{input}, \quad (8)$$

where Q_{demand} is the amount of heat required for the process, J.

The calculation results are presented in Tab. 1 and 2.

Table 1

Reactor heat balance parameters

Raw materials (biomass)	Physico-energetic parameters of the reactor								
	Mass of biomass m_b , kg	The size of the reactor V_r , l	Thermal conductivity λ , W/(m · C)	Biomass temperature t_b , °C	Temperature required for pyrolysis t_{proc} , °C	Heat of the pyrolysis process Q_{proc} , 10^3 W	Heat loss Q_{loss} , 10^3 W	Solar energy $Q_{sol, en}$, 10^3 W	Amount of heat required Q_{demand} , 10^3 W
Wood shavings	2.70	9	45.4	40	350	6.70	3.4	2.7	7.30
Small cattle manure	4.71	9	45.4	40	350	11.68	3.4	2.7	12.12
Cotton stalks	3.76	9	45.4	40	350	9.33	3.4	2.7	10.03

Table 2

Material balance of heliopyrolysis process

Raw materials (biomass)	Loaded biomass, kg	The products of heliopyrolysis		
		Pyrogas, m ³	Liquid, l	Solid fuel, kg
Wood shavings	2.70	0.60 (22 %)	1.0 (38 %)	1.10 (40 %)
Small cattle manure	4.71	0.80 (18 %)	2.4 (52 %)	1.41 (30 %)
Cotton stalks	3.76	0.75 (20 %)	2.2 (60 %)	0.75 (18 %)

The results of a comparative study on the extraction of alternative fuels from conventional and heliopyrolysis methods from wood shavings are given in Tab. 3.

Table 3

Thermal and technical characteristics of the heliopyrolysis process

Raw materials (biomass)	Loaded biomass, kg	Bio-mass moisture, %	Loaded biomass temp., °C	In the traditional way				When applying a solar concentrator to the system	
				process temp., °C	process time (min)	consumable heat, kW	consumable natural gas, m ³	the heat covered by the sun, kW	saved fuel (natural gas), m ³
Wood shavings	2.70	20	40	350–500	180	10.1	0.9–1.0	2.7	0.30
Small cattle manure	4.71	15	40	350–500	180	10.5	1.0–1.2	2.7	0.25
Cotton stalks	3.76	10	40	350–500	180	10.0	0.8–1.0	2.7	0.35

The energy consumption diagram of the heliopyrolysis process is shown in Fig. 4.

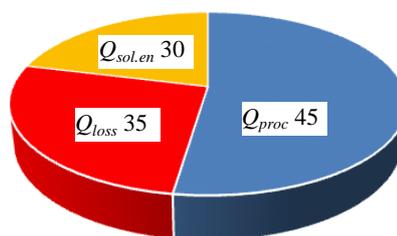


Fig. 4. Energy diagram of the process of heliopyrolysis, %

CONCLUSION

The efficiency of biofuel production varies mainly depending on the operating temperature of the pyrolysis reactor, the size of the biomass particles and the duration of operation. Experiments showed that 1.0 m³ of natural gas was burned when the moisture content of 2.7 kg of biomass was 20 % and to raise the internal temperature of the reactor to 350 °C for the pyrolysis process to take place. At the same time, 10.1 kW of energy was used to form the pyrolysis process. The process saved 0.3 m³ of natural gas or 2.7 kW of energy through the use of solar concentrators. The use of solar concentrators has made it possible to reduce the amount of fuel consumed for the process by 30 %. The experimental results can be used in the design and calculation of the heliopyrolysis device.

REFERENCES

1. Fuel and Energy Balance of the Republic of Uzbekistan. *The State Committee of the Republic of Uzbekistan on Statistics*. Available at: <https://www.stat.uz/uz/rasmiy-statistika/industry-2>.
2. On the Program of Measures for Further Development of Renewable Energy, Energy Efficiency in the Economy and Social Spheres in 2017–2021: Resolution of the President of the Republic of Uzbekistan, May 26, 2017, No PD-3012. Available at: <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/uzb174929.pdf> (in Russian).
3. On Measures to Encourage the Construction of Biogas Plants in Livestock and Poultry Farms of the Republic: Resolution of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan, November 25, 2015, No 343. Available at: <https://lex.uz/docs/2823206> (in Russian).
4. Avezov R. R., Voxidov A. U., Kuralov M. A. (2018) Principles of Development of Solar Energy in the Republic of Uzbekistan. *Sovremennye Problemy Vozobnovlyaemoi Energetiki: Sb. Materialov Resp. Nauch.-Prakt. Konf.* [Modern Problems of Renewable Energy: Collection of Materials of the Republican Scientific-Practical Conference, March 18, 2018]. Karshi. 11–13 (in Russian).
5. Uzakov G. N. (2010) Efficiency of Joint Operation of Greenhouses and Solar Greenhouses. *Applied Solar Energy*, 46 (4), 319–320. <https://doi.org/10.3103/S0003701X10040195>.
6. Uzakov G. N. (2011) Calculation of the Heat Engineering Characteristics of a Combined System of a Vegetable Storage Facility and Solar Greenhouse. *Applied Solar Energy*, 47 (3), 248–251. <https://doi.org/10.3103/S0003701X11030200>.
7. Uzakov G. N. (2012) Technical and Economic Calculation of Combined Heating and Cooling Systems Vegetable Store-Solar Greenhouse. *Applied Solar Energy*, 48 (1), 60–61. <https://doi.org/10.3103/S0003701X1201015X>.
8. Uzakov G. N., Shomuratova S. M., Toshmamatov B. M. (2021) Study of a Solar Air Heater with a Heat Exchanger – Accumulator. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 723, paper 052013. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/5/052013>.

9. Morales S., Miranda R., Bustos D., Cazares T., Tran H. (2014) Solar Biomass Pyrolysis for the Production of Bio-Fuels and Chemical Commodities. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 109, 65–78. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2014.07.012>
10. Joardder M. U., Halder P., Rahim A., Paul N. (2014). Solar Assisted Fast Pyrolysis: A Novel Approach of Renewable Energy Production. *Journal of Engineering*, 2014, Article ID 252848, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2014/252848>.
11. Zeng K., Minh D. P., Gauthier D., Weiss-Hortala E., Nzihou A., Flamant G. (2015) The Effect of Temperature and Heating Rate on Char Properties Obtained from Solar Pyrolysis of Beech Wood. *Bioresour. Technol.*, 182, 114–119. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.112>.
12. Zeaiter J., Ahmad M. N., Rooney D., Samneh B., Shammam E. (2015) Design of Automated Solar Concentrator for the Pyrolysis of Scrap Rubber. *Energy Conversion and Management*, 101, 118–125. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.05.019>.
13. Palchenok G. I., Khutskaya N. G. (2014) *Energy-Saving Technologies for Thermochemical Conversion of Biomass and Lignocarbonate Wastes*. Minsk, BNTU. 53 (in Russian).
14. Uzakov G. N., Davlonov X. A. (2021) *Energy Saving Heating Systems of Solar Greenhouses*. Tashkent, Voris Publ. 143 (in Russian).
15. Uzakov G. N., Davlonov X. A., Holikov K. N. (2018) Study of the Influence of the Source Biomass Moisture Content on Pyrolysis Parameters. *Applied Solar Energy*, 54 (6), 481–484. <http://doi.org/10.3103/S0003701X18060178>.
16. Uzakov G. N., Rabbimov R. T., Davlonov X. A., Uzakova Yu. G. (2015) *Application of Pyrolysis Biomass Technologies for the Production of Alternative Fuels*. Tashkent, Fan Publ. 120 (in Russian).
17. Almardanov X. A., Khatamov I. A., Turaev Z. B., Eshonkulov M., Jovliev S., Yusupov R. E. (2021) Application of Solar Concentrators to Obtain Alternative Fuel Through a Heliopyrolysis Device. *Universum: Technical Sciences*, (3), 8–12 (in Russian).
18. Vasilevich S. V., Malko M. V., Degterov D. V., Asadchyi A. N. (2020) Computational Study of the Yield of Solid Wood Pyrolysis Products under High Pressure. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (3), 253–263. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-3-253-263> (in Russian).
19. Mitrofanov A. V., Mizonov V. E., Vasilevich S. V., Malko M. V. (2021) Experiments and Computational Research of Biomass Pyrolysis in a Cylindrical Reactor. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (1), 51–64. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-51-64> (in Russian).
20. Davlonov X. A., Almardanov X. A., Khatamov I. A. (2021) *A Program for Modeling and Calculating the Exergic Balance of a Heliopyrolysis Device to Obtain Alternative Fuels from Biomass*. No DGU 10337, Tashkent 03.03.2021 (in Russian).
21. Kirillin V. A., Sychev V. V., Sheyndlin A. E. (2008) *Engineering Thermodynamics*. Moscow, MPEI Publ. 416 (in Russian).
22. Duffy J., Beskman U. (2013) *Fundamentals of Solar Thermal Power Engineering*. Wiley. 910.
23. Avezov R. R., Orlov A. Yu. (1988) *Solar Heating and Hot Water Systems*. Tashkent, Fan Publ. 288 (in Russian).
24. Popov G. P. (1969) *Concentric Optical Systems and Their Application in Optical Instrumentation*. Moscow, Nauka Publ. 135 (in Russian).
25. Mukhiddinov M. M., Ergashev S. F. (1995) *Solar Parabolic Cylindrical Installations*. Tashkent, Fan Publ. 208 (in Russian).
26. Bessonov L. A. (1973) *Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Vol. 1–3*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. (in Russian).
27. Demirchyan K. S., Neiman P. R., Korovkin N. V., Chechurin V. L. (2006) *Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Vol. 1–3*. St. Petersburg, Peter Publ. (in Russian).
28. Zeveke G. V., Ionkin P. A., Netushil A. V., Strakhov S. V. (1989) *Fundamentals of the Theory of Circuits*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 527 (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-66-79>

УДК 66.047.7

Исследование кинетики тепловлагообмена при термической обработке и сушке тонких влажных теплоизоляционных материалов

А. И. Ольшанский¹⁾, А. Н. Голубев¹⁾

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

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

Реферат. Проведено исследование кинетики сушки тонких теплоизоляционных плоских материалов. Представлена аппроксимация кривой скорости сушки различными методами. При определении длительности сушки зональными методами использовалось уравнение скорости сушки с коэффициентом сушки. Изложены способы обработки опытных данных зональными методами А. В. Лыкова, В. В. Красникова и методом Б. С. Сажина. Уравнение, полученное обработкой опытных данных по методу Б. С. Сажина для определения длительности процесса сушки, содержит только величину влагосодержания прогрева материала, знать критическое влагосодержание нет необходимости. Приведены зависимости для вычисления коэффициента сушки зональными методами. По результатам эксперимента представлены формулы для установления длительности тепловой обработки теплоизоляционных материалов. Дана зависимость относительной скорости сушки от относительного влагосодержания. Обработка экспериментальных данных обобщенными комплексными переменными создает условия инвариантности, позволяющие переходить от одних переменных к другим, от одной системы координат к другой, что сокращает число экспериментов. Приведены формулы с комплексными переменными для определения длительности сушки материалов. На основании уравнения кинетики сушки А. В. Лыкова и уравнения Г. К. Филоненко для относительной скорости сушки представлены формулы для нахождения плотности тепловых потоков, интенсивности испарения влаги и температуры для периода падающей скорости сушки. Проанализированы решения экспериментальных уравнений. Установлена погрешность, вызываемая обработкой опытных данных. Представлена проверка достоверности полученных эмпирических уравнений и проведено сопоставление расчетных значений основных параметров кинетики сушки с экспериментом.

Ключевые слова: влагосодержание, коэффициент сушки, скорость сушки, интенсивность сушки, сушка теплоизоляционных материалов

Для цитирования: Ольшанский, А. И. Исследование кинетики тепловлагообмена при термической обработке и сушке тонких влажных теплоизоляционных материалов / А. И. Ольшанский, А. Н. Голубев // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 66, № 1. С. 66–79. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-66-79>

Адрес для переписки

Ольшанский Анатолий Иосифович
Витебский государственный
технологический университет
просп. Московский, 72,
220035, г. Витебск, Республика Беларусь
Тел.: +375 212 47-50-26
tm@vstu.by

Address for correspondence

Ol'shanskii Anatolii I.
Vitebsk State
Technological University
72, Moskovsky Ave.,
220035, Vitebsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 212 47-50-26
tm@vstu.by

Investigation of the Kinetics of Heat and Moisture Exchange during Heat Treatment and Drying of Thin Wet Thermal Insulation Materials

A. I. Ol'shanskii¹⁾, A. N. Golubev¹⁾

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

Abstract. The kinetics of drying of thin heat-insulating flat materials has been studied. The approximation of the drying rate curve by various methods is presented. When determining the duration of drying by zonal methods, the equation of the drying rate with the drying coefficient was used. The techniques of processing experimental data by zonal methods of A. V. Lykov, V. V. Krasnikov and by the method of B. S. Sazhin are described. The equation obtained by processing experimental data using the B. S. Sazhin method to determine the duration of the drying process contains only the amount of moisture content of the heating of the material, there is no need to know the critical moisture content. Dependences for calculating the drying coefficient by zonal methods are given. According to the results of the experiment, formulas for determining the duration of heat treatment of thermal insulation materials are presented. The dependence of the relative drying rate on the relative moisture content is presented as well. The processing of experimental data by generalized complex variables creates invariance conditions that allow moving from one variable to another, from one coordinate system to another, which reduces the number of experiments. Formulas with complex variables for determining the duration of drying of materials are given. Based on the drying kinetics equation by A. V. Lykov and the equation for the relative drying rate by G. K. Filonenko, equations are given for determining the density of heat fluxes, the intensity of moisture evaporation and temperature for the period of decreasing drying rate. Solutions of experimental equations are analyzed. The error caused by the processing of experimental data is established. Verification of the reliability of the empirical equations obtained is presented and comparison of the calculated values of the main parameters of the drying kinetics with the experiment is carried out.

Keywords: moisture content, drying coefficient, drying speed, drying intensity, drying of thermal insulation materials

For citation: 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. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 66 (1), 66–79. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-66-79> (in Russian)

Введение

Сушка – процесс удаления влаги из твердых тел, связанный с высокими энергозатратами из-за большой теплоты парообразования. На испарение влаги из материала при температуре 90–150 °С расходуется в семь раз больше теплоты, чем на испарение воды. Возможность теоретического расчета длительности сушки влажных материалов в реальных условиях протекания процесса крайне ограничена [1–5]. В этом случае используют экспериментальные исследования с разработкой приближенных эмпирических уравнений для расчета кинетики сушки с минимальным числом постоянных, определяемых из опыта [1–6]. Наиболее эффективны методы обработки опытных данных, основанные на обобщенных переменных, характерных для сушки различных материалов.

Основная часть

Кинетика сушки. Исследование сушки конкретного материала начинается с построения кривых: сушки $\bar{u} = f(\tau)$, ее скорости $d\bar{u}/d\tau = f'(\bar{u})$ и температурных $\bar{t} = f(\tau)$, $\bar{t} = f(\bar{u})$, где \bar{u} и \bar{t} – влагосодержа-

ние и среднеинтегральная температура материала. Вид этих графических зависимостей определяется свойствами материала [1, 3, 5].

На рис. 1 показаны типичные для тонких плоских материалов кривая сушки $\bar{u} = f(\tau)$ и температурные кривые $t_n = f(\tau)$, $\bar{t} = f(\tau)$, построенные для войлочной пластины, где t_n – температура на поверхности материала.

В общем случае выделяют два периода. На стадии прогрева $\tau_{пр}$ материал прогревается от начальной температуры t_n до постоянной температуры мокрого термометра $t_{м.т.}$, приближенно принимаемой t_n , в конце стадии прогрева влагосодержание материала $\bar{u}_{пр}$. Скорость сушки возрастает от нуля до скорости сушки в первом периоде N , где $N = d\bar{u}/d\tau = \text{const}$ и влагосодержание линейно уменьшается во времени τ . При сушке тонких материалов наблюдается период постоянной температуры на уровне $t_{м.т.}$, совпадающий с периодом постоянной скорости сушки до значения критического влагосодержания $\bar{u}_{кр}$ (рис. 1). Время сушки в первом периоде τ_1 .

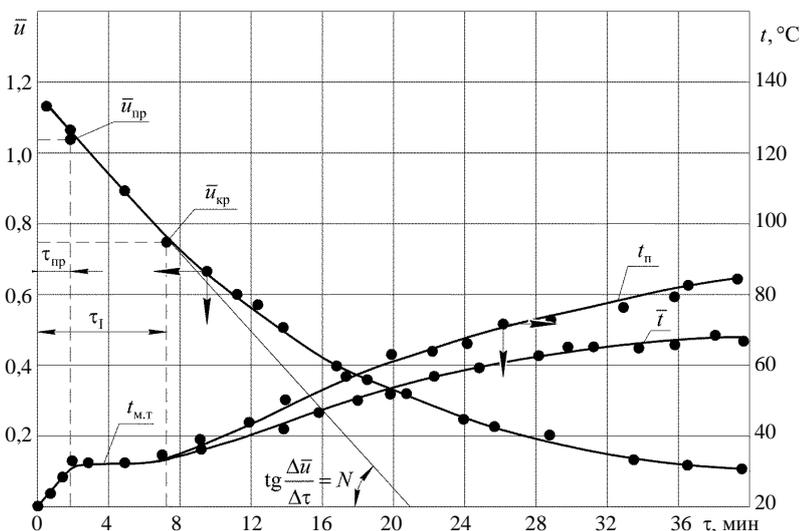


Рис. 1. Кривая сушки $\bar{u} = f(\tau)$ и температурные кривые $t_n = f(\tau)$, $\bar{t} = f(\tau)$ в процессе сушки войлочной пластины (режим сушки: температура среды $t_c = 90^\circ\text{C}$; скорость воздуха $v = 5\text{ м/с}$; относительная влажность воздуха $\phi = 5\%$)

Fig. 1. Drying curve $\bar{u} = f(\tau)$ and temperature curves $t_n = f(\tau)$, and $\bar{t} = f(\tau)$ during felt plate drying process in drying mode: medium temperature $t_c = 90^\circ\text{C}$, air speed $v = 5\text{ m/s}$, relative humidity of the air $\phi = 5\%$

При достижении влагосодержания $\bar{u}_{кр}$ начинается второй период – падающей скорости сушки. Температура увеличивается от $t_{м.т.}$ до температуры среды t_c при длительности сушки $\tau \rightarrow \infty$. Кривая сушки асимптотически к концу процесса приближается к равновесному влагосодержанию u_p , сушку необходимо заканчивать при кондиционном значении $\bar{u}_{кон} > \bar{u}_p$ во избежание пересушки материала и перерасхода энергии [1, 2]. Исследованиями установлено, что кривая сушки во втором периоде представляет собой

две, а иногда и три сложные сопряженные кривые в точках с влаго-содержаниями $\bar{u}_{кр2}$ и $\bar{u}_{кр3}$ [1, 3].

К основным кинетическим параметрам относятся время и скорость сушки, температура материала, плотность тепловых потоков, интенсивность испарения влаги. Основная задача кинетики – определение длительности процесса [1–6], при этом аналитический путь очень сложен и не всегда возможен [1, 5].

Зависимость скорости сушки от влагосодержания $d\bar{u}/d\tau = f(\bar{u})$ во втором периоде имеет сложный вид. По классификации А. В. Лыкова [1–3, 5], для самых разнообразных материалов наблюдаются всего шесть типов кривых скорости сушки. В простейшем случае для расчета длительности сушки применяют линейную аппроксимацию кривой скорости сушки при постоянном коэффициенте $K = \text{const}$ по однозональному методу А. В. Лыкова [1–7].

На рис. 2 показаны кривая скорости сушки для войлочной пластины и ее аппроксимация однозональным методом А. В. Лыкова (I), двухзональным методом В. В. Красникова (II) и зональным методом (III) при переменном значении коэффициента K с заменой сложной кривой скорости прямыми. При $\Delta\bar{u} \approx 0,1$ будет шесть зон, где 1–6 – зоны, в каждой из которых $K = \text{const}$.

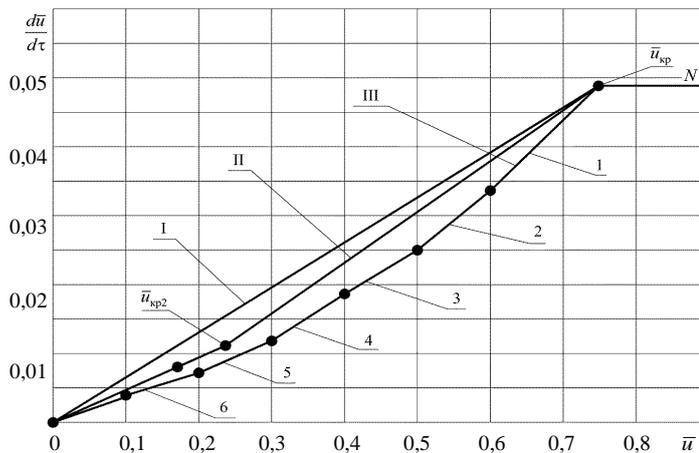


Рис. 2. Кривая скорости сушки $d\bar{u}/d\tau = f(\bar{u})$ войлочной пластины

(режим указан на рис. 1): I – аппроксимация методом А. В. Лыкова; II – методом В. В. Красникова; III – зональным методом; 1–6 – аппроксимация по зонам

Fig. 2. Curve of the drying rate $d\bar{u}/d\tau = f(\bar{u})$ in the process of drying the felt plate

(the drying mode is shown in Fig. 1): I – approximation by the method of A. V. Lykov; II – approximation by the method of V. V. Krasnikov; III – approximation by the zonal method; 1–6 – approximation by zones

Уравнение скорости сушки для однозонального метода (рис. 2, прямая I)

$$\left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right| \approx K (\bar{u} - \bar{u}_p). \quad (1)$$

При интегрировании (1) при $K = \text{const}$ получим длительность сушки в периоде падающей скорости [1–3, 5]

$$\tau_{II} \approx -\frac{1}{K} \ln \left(\frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{кр} - u_p} \right), \quad (2)$$

где \bar{u} – текущее влагосодержание материала; τ_{II} отсчитывается от нуля.

Длительность сушки с учетом времени в первом периоде по однозональному методу А. В. Лыкова

$$\tau \approx \tau_I + \tau_{II} = \frac{1}{N} \left[(\bar{u}_0 - \bar{u}_{кр}) - (\bar{u}_{кр} - u_p) \ln \left(\frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{кр} - u_p} \right) \right]. \quad (3)$$

Коэффициент сушки K по однозональному методу [1–3, 5]

$$K \approx \frac{N}{\bar{u}_{кр} - u_p} = \text{const}. \quad (4)$$

Длительность сушки по двухзональному методу В. В. Красникова (рис. 2, ломаная II) определяется уравнением ($u_p = 0$)

$$\tau = \tau_I + \tau_{II} \approx \frac{\bar{u}_0 - \bar{u}_{кр}}{N} + \frac{1}{K_1} \ln \frac{\bar{u}_{кр1}}{\bar{u}_1} + \frac{1}{K_2} \ln \frac{\bar{u}_{кр2}}{\bar{u}_{II}}, \quad (5)$$

где \bar{u}_1, \bar{u}_{II} – текущее влагосодержание соответственно в первой и второй части второго периода

$$\bar{u}_{кр2} < \bar{u}_1 < \bar{u}_{кр1}; \quad u_p < \bar{u}_{II} < \bar{u}_{кр2}.$$

Коэффициенты сушки K_1, K_2 в первой и второй частях второго периода численно равны тангенсам углов наклона отрезков прямых к оси τ . Величина этих коэффициентов зависит от вида влажного тела и скорости сушки в первом периоде N .

В отличие от зональных методов расчета кривой скорости сушки, метод расчета кинетики сушки на основе единого кинетического уравнения, предложенный Б. С. Сажиним [4], позволяет описывать весь процесс, включая первый и второй периоды сушки [3, 4, 8, 9]. В его основу положено обобщенное уравнение массопередачи, которое применительно к конвективной сушке имеет вид [3, 4, 8, 9]

$$\left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right| \approx K (\bar{u}_0 - \bar{u}) (\bar{u}_{пр} - u_p), \quad (6)$$

где K – эффективный коэффициент сушки.

Интегрирование (6) от начального влагосодержания \bar{u}_0 с учетом влагосодержания прогрева материала $\bar{u}_{пр}$ дает длительность сушки до заданного конечного влагосодержания [4]

$$\tau \approx \frac{\bar{u}_0}{K (\bar{u}_0 - u_p)} Z. \quad (7)$$

Параметр Z по методу Б. С. Сажина определяется выражением [4, 7]

$$Z = \ln \frac{(\bar{u}_0 - \bar{u})(\bar{u}_{\text{пр}} - u_p)}{(\bar{u}_0 - \bar{u}_{\text{пр}})(\bar{u} - u_p)}. \quad (8)$$

В системе координат $Z = f(\tau)$ кривые кинетики представляют собой прямые, угол наклона которых к оси абсцисс определяет эффективный коэффициент сушки K , а отрезки, отсекаемые по оси Z , равны $Z_0 = \bar{u}_{\text{пр}}$. Коэффициент сушки K равен тангенсу угла наклона прямых $Z = f(\tau)$ [4, 7]

$$\operatorname{tg} \psi = \ln \frac{Z - Z_0}{\tau} \approx K = \text{const.}$$

В реальных условиях K изменяется, поскольку кривая сушки представляет собой две или три сложные экспоненты, сопряженные в точках с влагосодержанием $\bar{u}_{\text{кр}2}$, $\bar{u}_{\text{кр}3}$. Закономерности изменения K вытекают из обобщенной кривой сушки, впервые построенной Г. К. Филоненко в системе координат $(\bar{u}_0 - u_p) = f(N\tau)$ [6]. При такой системе обработки опытных данных все кривые сушки при всех режимах сводятся в одну кривую. Комплекс $N\tau$ назван обобщенным временем сушки [1, 2]. В. В. Красниковым и Г. К. Филоненко [2, 6] на основе многих экспериментальных данных показано, что при начальном влагосодержании \bar{u}_0 при любом режиме сушки сохраняется неизменной величина $N\tau = \text{const}$. Из обобщенной кривой сушки следует уравнение для кривой скорости сушки [2, 6]

$$\left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right| = N^* N. \quad (9)$$

Следовательно, скорость сушки в любой момент второго периода можно определить по величине N для любого режима сушки и величине относительной скорости N^* [2]. Влияние режима сушки на K отражается величиной скорости в первом периоде N , которая является обобщенной переменной, устанавливающей влияние всех параметров на процесс. Относительная скорость сушки N^* не зависит от режима и для конкретного материала при данном методе является лишь функцией влагосодержания [1–3], что вытекает из метода обобщения кривых сушки Г. К. Филоненко [2–6]:

$$N^* = \frac{1}{N} \frac{d\bar{u}}{d\tau} = f(\bar{u}).$$

С целью установления действительной зависимости $N^* = f(\bar{u}/\bar{u}_{\text{кр}})$ проведено графическое дифференцирование более 20 кривых сушки для исследуемых материалов с анализом кривых скорости в широком диапазоне режимов ($t_c = 90\text{--}120$ °С; $v = 3, 5$ и 10 м/с). В результате получена зависимость, которая приближенно аппроксимируется уравнением

$$N^* \approx \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\text{кр}}} \right)^{1,6}. \quad (10)$$

Все кривые скорости сушки для исследуемых материалов относятся к третьему типу кривых по классификации А. В. Лыкова [1–5] и обращены выпуклостью к оси τ (рис. 2). Это характерно для капиллярно-пористых материалов [1–4].

На основании (1), (9) и (10)

$$K \approx \frac{NN^*}{\bar{u} - u_p} \approx \frac{N(\bar{u}/\bar{u}_{кр})^{1,6}}{\bar{u} - u_p}. \quad (11)$$

Следовательно, в процессах сушки K является переменной величиной.

Кривую скорости сушки для войлочной пластины (рис. 2, линия III) разделим на несколько зон, для каждой из которых K является величиной постоянной, а влагосодержание изменяется по линейному закону. Таким образом, кривая скорости сушки заменяется одной ломаной линией со ступенчатыми прямыми на выбранных промежутках $\Delta\bar{u}$, с большей точностью аппроксимирующей действительную кривую скорости.

Подставим в (2) значения K из (11), тогда с учетом времени сушки в первом периоде длительность процесса при переменных K

$$\tau = \frac{1}{N} \left[(\bar{u}_0 - \bar{u}_{кр}) - \frac{\bar{u} - u_p}{N^*} \ln \left(\frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{кр} - u_p} \right) \right], \quad (12)$$

где N^* найдем по (10).

Ключевым звеном при определении длительности сушки при интегрировании уравнения скорости (1) является коэффициент K .

Для однозонального метода относительная скорость сушки

$$N^* = \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{кр} - u_p}. \quad (13)$$

В табл. 1 приведены результаты расчета длительности сушки зональными методами и методом Б. С. Сажина.

Таблица 1

Результаты расчета длительности сушки войлочной пластины разными методами аппроксимации кривой скорости сушки (рис. 2)

The results of calculating the duration of drying a felt plate using different methods for approximating the drying rate curve (Fig. 2)

Пластина шерстяного войлока: 135 × 100 × 8 мм; $\rho = 200 \text{ кг/м}^3$; $\bar{u}_0 = 1,14$; $\bar{u}_{кр} = 0,75$; $\bar{u}_p = 0$, $N = 0,054 \text{ мин}^{-1}$. Режим сушки: $t_c = 90 \text{ }^\circ\text{C}$; $v = 5 \text{ м/с}$; $\varphi = 6 \%$								
Влагосодержание	\bar{u}	0,60	0,50	0,40	0,30	0,25	0,20	0,10
	$\bar{u} / \bar{u}_{кр}$	0,80	0,67	0,53	0,40	0,33	0,27	0,14
Коэффициент сушки								
Однозональный метод А. В. Лыкова	K (4)	$K \approx \frac{N}{\bar{u}_{кр} - u_p} = \text{const}$; $K = 0,072 \text{ мин}^{-1}$; $\bar{u}_{кр} = 0,75$						

Продолжение табл. 1

Двухзональный метод В. В. Красникова	K_1, K_2 (5)	$K_1 = 0,065 \text{ мин}^{-1}; K_2 = 0,115 \text{ мин}^{-1}; \bar{u}_{\text{кр}1} = 0,75; \bar{u}_{\text{кр}2} = 0,23$						
Метод Б. С. Сажина	K (6)	$K = \text{const}; K = 0,115 \text{ мин}^{-1}; \bar{u}_{\text{кр}} = 0,75$						
Зональный метод	$K = \text{var}$ (11)	0,063	0,054	0,047	0,038	0,024	0,023	0,022
Относительная скорость сушки								
$N^* = \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{\text{кр}} - u_p}$	(13)	0,80	0,67	0,53	0,40	0,33	0,27	0,14
$N_{\text{экс}}^* = \left(\frac{\bar{u}}{u_{\text{кр}}} \right)^{1,6}$	(10)	0,700	0,526	0,362	0,231	0,169	0,124	0,045
Длительность сушки τ , мин								
Однозональный метод А. В. Лыкова	(3)	11,9	14,2	16,8	21,2	23,5	27,6	37,8
Двухзональный метод В. В. Красникова	(5)	11,4	13,3	17,4	21,6	24,6	28,4	38,7
Метод Б. С. Сажина	(7)	11,2	13,3	16,8	21,6	23,5	26,8	38,2
Зональный метод	(12)	12,8	13,3	16,5	20,5	24,5	28,8	38,2
Эксперимент	–	12,5	13,5	16,5	20,5	25,0	28,5	38,0

Анализ расчетов времени сушки, представленных в табл. 1, показал следующее: по однозональному методу А. В. Лыкова (рис. 2, прямая I) погрешность в расчетах 7–10 %; по двухзональному методу В. В. Красникова (рис. 2, ломаная II) – 6–8 %; по зональному методу (рис. 2, линия III) – 4–5 %; по методу Б. С. Сажина – 5–7 %. Таким образом, более точным является метод при переменных значениях коэффициента сушки K .

Обобщенные комплексные переменные. К обобщенным переменным сушки относятся: $N\tau$ – обобщенное время сушки, $\tau_{\text{II}}/\tau_{\text{I}}$ – относительное время сушки, $\bar{u}/\bar{u}_{\text{кр}}$ – относительное влагосодержание, N^* – относительная скорость сушки [1–2]. Обработка опытных данных комплексными переменными создает условия инвариантности, позволяющие переходить от одних переменных к другим, от одной системы координат к другой, что значительно сокращает число экспериментов [2, 10–12]. Использование комплекса $N\tau$ придает исследованию сушки обобщенный характер, когда анализируется не единичный частный случай, а множество подобных совокупностей [2, 3].

На рис. 3 даны зависимости $N\tau_{\text{II}} = f\left(\bar{u}/\bar{u}_{\text{кр}}\right)$ для периода падающей скорости в процессах сушки керамики, войлока и асбеста при различных режимах.

В результате обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов получено уравнение [10, 11]

$$N\tau_{\text{II}} = \beta \exp\left(-2,2 \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\text{кр}}}\right). \quad (14)$$

Длительность сушки с учетом времени в первом периоде

$$\tau \approx \tau_I + \tau_{II} \approx \frac{1}{N} \left[(\bar{u}_0 - \bar{u}_{кр}) + \beta \exp \left(-2,2 \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right) \right]. \quad (15)$$

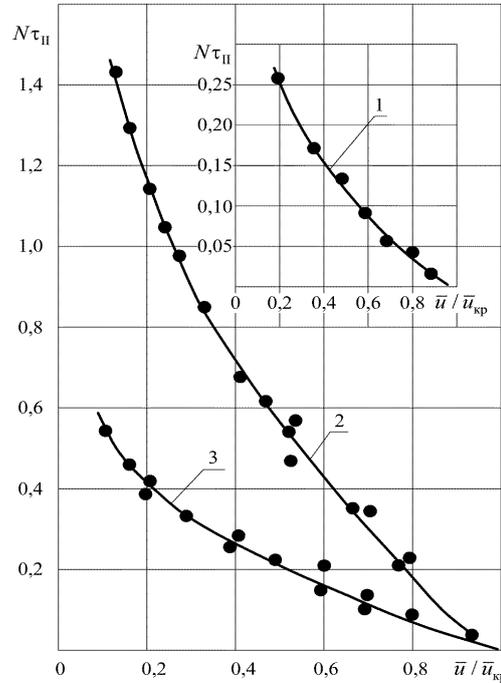


Рис. 3. Зависимость $N\tau_{II} = f(\bar{u}/\bar{u}_{кр})$

для процессов сушки:

1 – керамики; 2 – войлока;

3 – асбеста; режим сушки: $t_c = 90, 120$ °С;
 $v = 3, 5, 10$ м/с

Fig. 3. Dependence of the generalized drying time $N\tau_{II} = f(\bar{u}/\bar{u}_{кр})$ for the processes

of drying: 1 – ceramics, 2 – felt;

3 – asbestos; drying modes are:

$t_c = 90, 120$ °С; $v = 3, 5, 10$ m/s

Коэффициент β для исследуемых материалов дан в табл. 2.

Таблица 2

Значения коэффициентов β, A, A_1 в уравнениях (14), (16), (17)
в процессах сушки исследуемых материалов

The magnitudes of the coefficient β, A_1 and A in equations (14), (16), (17)
in the processes of drying of the materials under study

Наименование материала	β (14)	A (16)	A_1 (17)
Керамическая плитка	0,36	$\frac{1}{0,55 \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} + 0,19}$	$0,70 - 0,10 \frac{\bar{u}_0}{\bar{u}_{кр}}$
Листовой асбест	1,76	$\frac{1}{0,39 \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} + 0,18}$	$0,50 - 0,10 \frac{\bar{u}_0}{\bar{u}_{кр}}$
Шерстяной войлок	0,65	$\frac{1}{0,32 \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} + 0,14}$	$0,75 - 0,10 \frac{\bar{u}_0}{\bar{u}_{кр}}$

На рис. 4 представлена обработка опытных данных для $\tau_{II}/\tau_I = f(\bar{u}/\bar{u}_{кр})$ в процессах сушки керамики, асбеста и войлока при различных режимах в виде экспоненциальной и степенной зависимостей [13–16]:

$$\frac{\tau_{II}}{\tau_I} \approx A \exp\left(-2 \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}}\right); \quad (16)$$

$$\frac{\tau_{II}}{\tau_I} \approx A_1 \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}}\right)^{-1,25}, \quad (17)$$

где коэффициенты A , A_1 – нелинейные функции отношений соответственно $\bar{u}/\bar{u}_{кр}$ и $\bar{u}_0/\bar{u}_{кр}$ (рис. 5).

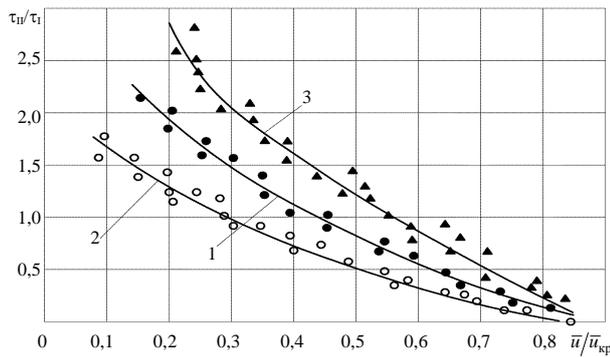


Рис. 4. Зависимость $\tau_{II}/\tau_I = f(\bar{u}/\bar{u}_{кр})$ в процессах сушки:

1 – керамики; 2 – асбеста; 3 – войлока (режимы указаны на рис. 3)

Fig. 4. Dependence $\tau_{II}/\tau_I = f(\bar{u}/\bar{u}_{кр})$ in the processes of drying:

1 – ceramics; 2 – asbestos; 3 – felt (drying modes are given in Fig. 3)

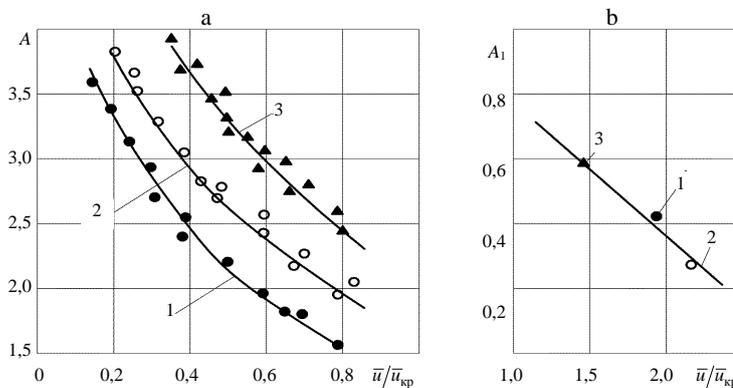


Рис. 5. Зависимость коэффициентов $A = f(\bar{u}/\bar{u}_{кр})$ (а), $A_1 = f(\bar{u}_0/\bar{u}_{кр})$ (б) для сушки:

1 – керамики; 2 – асбеста; 3 – войлока (режимы указаны на рис. 3)

Fig. 5. Dependence of coefficients $A = f(\bar{u}/\bar{u}_{кр})$ (а), $A_1 = f(\bar{u}_0/\bar{u}_{кр})$ (б) for drying of:

1 – ceramics; 2 – asbestos; 3 – felt (drying modes are given in Fig. 3)

Коэффициент A_1 в первом приближении вычисляется по зависимости $A_1 \approx 1,2 - 0,38 \frac{\bar{u}_0}{\bar{u}_{кр}}$. Более точные уравнения для определения коэффициентов A , A_1 даны в табл. 2.

Тогда уравнение (15) с учетом (16), (17) примет вид

$$\tau \approx \tau_I + \tau_{II} \approx \frac{\bar{u}_0 - \bar{u}_{кр}}{N} \left[1 + A \exp \left(-2 \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right) \right]; \quad (18)$$

$$\tau \approx \tau_I + \tau_{II} \approx \frac{\bar{u}_0 - \bar{u}_{кр}}{N} \left[1 + A_1 \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{-1,25} \right]. \quad (19)$$

Основное уравнение кинетики сушки А. В. Лыкова [1, 3, 8]

$$\frac{q_{II}}{q_I} = N^* (1 + Rb), \quad (20)$$

где q_I , q_{II} – плотность потока теплоты соответственно в первом и втором периодах.

При сушке тонких материалов расход теплоты на нагревание влажного тела значительно меньше, чем на испарение из него влаги, и число Ребиндера $Rb \ll 1$ [1, 2]. Пренебрегая числом Ребиндера при малых его значениях [1, 8], для плотности потока теплоты во втором периоде запишем

$$q_{II} = q_I N^*.$$

На основании (10) получим

$$q_{II} \approx q_I \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{1,6} = r \rho R_v N \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{1,6}, \quad (21)$$

где $q_I = r \rho R_v N$; r – теплота парообразования; ρ – плотность; R_v – отношение объема тела к поверхности.

Интенсивность испарения влаги в периоде постоянной скорости сушки [1–4]

$$j_I = \rho R_v N, \quad (22)$$

а в периоде падающей скорости

$$j_{II} = \frac{q_{II}}{r} \approx \frac{q_I \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{1,6}}{r} = \rho R_v N \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{1,6}. \quad (23)$$

Г. К. Филоненко на основании обобщенной кривой сушки (9) получил зависимость, устанавливающую связь влагообмена с теплообменом [6]:

$$N^* \approx \frac{t_c - t_{II}}{t_c - t_{м.т}}. \quad (24)$$

Температура на поверхности материала вычисляется по формуле

$$t_{II} = t_c - (t_c - t_{м.т}) N^* = t_c - (t_c - t_{м.т}) \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{1,6}. \quad (25)$$

В табл. 3 приведены результаты расчетов основных параметров сушки по полученным уравнениям и сравнение расчетных значений с экспериментом.

Таблица 3

Результаты расчета основных параметров кинематики сушки по полученным уравнениям и их сравнение с экспериментальными значениями
The results of calculating the main parameters of the kinematics of drying according to the obtained equations and comparing the calculated values with the experimental ones

Влаго- содер- жание \bar{u}	Относитель- ное влаго- содержание $\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}}$	Длительность сушки τ , мин						Температура поверхности $t_{пр}$, °C		Плотность потока теплоты во втором периоде q_{II} , Вт/м ²	Интенсивность испарения влаги в периоде падающей скорости j_{II} , 10 ³ кг/м ² с
		(экс)	(7)	(12)	(15)	(18)	(19)	(экс)	(25)		
Керамическая плитка: 120×78×5 мм; $\rho = 1860 \text{ кг/м}^3$; $\bar{u}_0 = 0,2$; $\bar{u}_{кр} = 0,1$; режим сушки: $t_c = 120 \text{ °C}$; $v = 5 \text{ м/с}$; $\varphi = 5 \%$; $N = 0,025 \text{ мин}^{-1}$; $t_{м.т} = 48,5 \text{ °C}$; $\tau_1 = 4 \text{ мин}$; $q_I = 7200 \text{ Вт/м}^2$; $j_I = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^2\text{с}$											
0,08	0,8	6,5	7,2	6,4	6,1	7,1	6,8	65,0	64,0	6380	2,66
0,06	0,6	8,5	8,6	8,3	8,9	8,4	8,8	75,0	73,5	4770	1,98
0,04	0,4	11,5	11,3	11,4	12,2	11,2	11,8	83,0	85,2	9260	1,37
0,02	0,2	16,5	17,2	16,5	15,9	18,6	17,2	92,0	90,5	1690	0,71
Листовой асбест: 120×80×6 мм; $\rho = 770 \text{ кг/м}^3$; $\bar{u}_0 = 0,46$; $\bar{u}_{кр} = 0,21$; режим сушки: $t_c = 120 \text{ °C}$; $v = 5 \text{ м/с}$; $\varphi = 5 \%$; $N = 0,028 \text{ мин}^{-1}$; $t_{м.т} = 37 \text{ °C}$; $\tau_1 = 7,5 \text{ мин}$; $q_I = 4840 \text{ Вт/м}^2$; $j_I = 2,15 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^2\text{с}$											
0,16	0,8	11,5	11,2	11,4	11,3	11,4	11,2	55,0	57,0	3860	1,61
0,14	0,7	12,5	12,4	12,5	12,2	12,8	12,3	59,0	61,2	3420	1,42
0,12	0,6	14,5	15,3	14,5	14,2	13,9	14,2	65,0	67,2	2830	1,18
0,08	0,4	18,5	20,5	18,4	18,3	19,2	19,2	76,0	79,4	1890	0,79
0,04	0,2	24,5	25,6	23,8	26,9	25,7	25,4	85,0	80,7	1050	0,40
0,02	0,1	29,0	29,8	28,7	31,4	32,3	30,8	98,0	101	680	0,26
Шерстяной войлок: 135×100×8 мм; $\rho = 220 \text{ кг/м}^3$; $\bar{u}_0 = 1,14$; $\bar{u}_{кр} = 0,75$; режим сушки: $t_c = 90 \text{ °C}$; $v = 5 \text{ м/с}$; $\varphi = 5 \%$; $N = 0,054 \text{ мин}^{-1}$; $t_{м.т} = 34 \text{ °C}$; $\tau_1 = 7,5 \text{ мин}$; $q_I = 3350 \text{ Вт/м}^2$; $j_I = 1,38 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^2\text{с}$											
0,60	0,80	12,5	11,2	12,8	12,4	12,1	11,8	41,0	40,8	2650	1,07
0,50	0,66	13,5	13,2	13,3	14,2	14,2	13,2	43,0	42,2	2150	0,89
0,40	0,53	16,5	16,8	16,5	16,2	16,2	16,7	46,0	45,7	1810	0,75
0,30	0,40	20,5	21,6	20,5	19,5	21,3	21,4	51,0	50,0	1440	0,61
0,20	0,26	28,5	26,8	28,8	27,6	30,2	28,5	58,0	57,6	840	0,34

ВЫВОДЫ

1. Проведено исследование кинетики сушки тонких теплоизоляционных плоских материалов. Рассмотрены способы обработки опытных данных обобщенными комплексными переменными и методы расчета длительно-

сти сушки. Установлены закономерности сушки теплоизоляционных материалов и даны уравнения для расчета всех ее кинетических параметров. В результате обработки эксперимента различными методами установлено, что коэффициент сушки в периоде падающей скорости является величиной переменной.

2. Проведена проверка достоверности полученных расчетных значений параметров в сравнении с экспериментом. Длительность сушки при переменных значениях коэффициента сушки определена с большей точностью по сравнению с однозональным методом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. М.: Энергия, 1968. 472 с.
2. Красников, В. В. Кондуктивная сушка / В. В. Красников. М.: Энергия, 1973. 288 с.
3. Акулич, П. В. Расчеты сушильных и теплообменных установок / П. В. Акулич. Минск: Беларус. наука, 2010. 443 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. Филоненко, Г. К. Сушильные установки / Г. К. Филоненко, П. Д. Лебедев. М. – Л.: Госэнергоиздат, 1952. 263 с.
7. 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.
8. Ольшанский, А. И. Кинетика тепловлагообмена и метод расчета длительности конвективной сушки натуральной кожи / А. И. Ольшанский, А. Л. Климентьев // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2020. Т. 65, № 4. С. 464–475. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-464-475>.
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. 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.
11. 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.
12. Ольшанский, А. И. Исследование теплообмена в процессе сушки влажных материалов по экспериментальным данным влагообмена с использованием обобщенных комплексных переменных / А. И. Ольшанский // Инженерно-физический журнал. 2014. Т. 87, № 4. С. 887–897.
13. 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>.
14. Ольшанский, А. И. Исследование теплообмена в процессе сушки методом регулярного режима / А. И. Ольшанский, В. И. Ольшанский // Инженерно-физический журнал. 2012. Т. 85, № 2. С. 385–391.
15. 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>.

16. Лыков, А. В. Теория тепло- и массопереноса / А. В. Лыков, Ю. А. Михайлов. М. – Л.: Госэнергоиздат, 1963. 535 с.

Поступила 09.04.2022 Подписана в печать 14.06.2022 Опубликована онлайн 31.01.2023

REFERENCES

1. Lykov A. V. (1968) *Theory of Drying*. Moscow, Energiya Publ. 472 (in Russian).
2. Krasnikov V. V. (1973) *Conductive Drying*. Moscow, Energiya Publ. 288 (in Russian).
3. Akulich P. V. (2010) *Calculations of Drying and Heat Exchange Installations*. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ. 443 (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. Filonenko G. K., Lebedev P. D. (1952) *Dryers*. Moscow – Leningrad, Gosenergoizdat Publ. 263 (in Russian).
7. Lykov A. V., Kuts P. S., Olshanskii A. I. (1972) Kinetics of Heat Transfer in the Process of Drying Wet Materials. *Journal of Engineering Physics*, 23 (3), 1082–1086. <https://doi.org/10.1007/bf00832214>.
8. Alshansky A. I., Klimentyev A. L. (2020) Kinetics of Heat and Moisture Exchange and Method for Calculating the Duration of the Convective Drying Process of Natural Leather. *Vestsi Natsyyanal'nai Akademii Navuk Belarusi. Seryya Fizika-Tekhnichnykh Navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*, 65 (4), 464–475. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-464-475> (in Russian).
9. Kutz 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 (6), 650–656. <https://doi.org/10.1007/bf00862568>.
10. Ol'shanskii A. I., Gusarov A. M. (2017) Experimental Study of the Kinetics of Drying Thin Flat Moist Materials by the Regular-Regime Method Using Generalized Complex Variables. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 90 (3), 665–678. <https://doi.org/10.1007/s10891-017-1614-x>.
11. 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 (6), 1362–1373. <https://doi.org/10.1007/s10891-014-1139-5>.
12. Ol'shanskii A. I. (2014) Study of the Heat Transfer in the Process of Drying of Moist Materials from Experimental Data on Moisture Transfer. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 87 (4), 917–928. <https://doi.org/10.1007/s10891-014-1089-y>.
13. 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).
14. Ol'shanskii A. I., Ol'shanskii V. I. (2012) Investigation of Heat Transfer in the Drying Process by the Method of Regular Regime. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 85 (2), 415–422. <https://doi.org/10.1007/s10891-012-0667-0>.
15. 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).
16. Lykov A. V., Mikhailov Yu. A. (1963) *Theory of Heat and Mass Transfer*. Moscow – Leningrad, Gosenergoizdat Publ. 535 (in Russian).

Received: 9 April 2022

Accepted: 14 June 2022

Published online: 31 January 2023

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-80-90>

УДК 537.84+661.66-022.532

Оптимизация рабочих характеристик магнитожидкостных уплотнений для ветроэнергетических установок

О. Н. Лабкович¹⁾, С. Г. Погирницкая¹⁾

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

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

Реферат. Использование магнитожидкостных уплотнений – перспективное направление при герметизации вращающихся валов ветроэнергетических установок. Они характеризуются высокой герметичностью, простотой конструкции, низкими потерями на трение. Магнитожидкостное уплотнение состоит из кольцевого магнита и двух концентраторов магнитного поля, образующих с валом узкий кольцевой зазор, в котором магнитная жидкость, удерживаемая магнитным полем, является герметичным затвором. Магнитные силы обеспечивают равновесие объема магнитной жидкости под воздействием перепада давления и центробежных сил. С увеличением скорости вращения вала до 10 м/с визуально наблюдается деформация свободной поверхности магнитной жидкости у поверхности вала в виде воронки, что приводит к снижению удерживаемого перепада давлений. По мере возрастания скорости вращения воронка увеличивается, часть магнитной жидкости выбрасывается из рабочей зоны, удерживаемый перепад давлений снижается, и при 50 м/с происходит полный выброс магнитной жидкости и разгерметизация уплотнения. С целью повышения устойчивости свободной поверхности магнитной жидкости в поле центробежных сил в нее вводили многослойные углеродные нанотрубки. Для них характерны высокая удельная поверхность и соответственно сильное притяжение Ван-дер-Ваальса. В магнитной жидкости многослойные углеродные нанотрубки образуют структуры, ориентированные вдоль силовых линий магнитного поля. Экспериментально установлено увеличение статической нагрузки, удерживаемой слоем магнитной жидкости, при введении наноуглеродных структур: при совпадении с осью структуры – на 100 %, для нормального направления нагрузки к оси структуры – на 50 %. В уплотнении с увеличением скорости вращения вала деформация свободной поверхности магнитной жидкости с наноуглеродными структурами наблюдалась при 18 м/с на расстоянии 3 мм от поверхности вала. Удерживаемый уплотнением перепад давлений увеличивался в интервале скоростей 10–40 м/с, максимальный эффект 50 % получен при скорости 40 м/с. Таким образом, введение наноуглеродных структур в магнитную жидкость позволило снизить влияние центробежных сил на удерживаемый

Адрес для переписки

Лабкович Ольга Николаевна
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 14,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-12-35
customs@bntu.by

Address for correspondence

Labkovich Olga N.
Belarusian National Technical University
14, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-12-35
customs@bntu.by

перепад давлений и повысить эффективность работы магнитожидкостного уплотнения при больших скоростях вращения вала ветроэнергетических установок.

Ключевые слова: магнитожидкостное уплотнение, наноуглеродная структура, свободная поверхность, магнитная жидкость, ветроэнергетическая установка

Для цитирования: Лабкович, О. Н. Оптимизация рабочих характеристик магнитожидкостных уплотнений для ветроэнергетических установок / О. Н. Лабкович, С. Г. Погирницкая // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 66, № 1. С. 80–90. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-80-90>

Optimization of Performance Characteristics of Magnetofluidic Seals for Wind Power Plants

O. N. Labkovich¹⁾, S. G. Pogirnikskaya¹⁾

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

Abstract. The use of magnetofluidic seals are a promising direction in sealing rotating shafts of wind power plants. Magnetofluidic seals are characterized by high tightness, simplicity of the design, low losses by friction. Magnetic fluid seal of the rotating shaft consists of a ring magnet and two concentrators of magnetic field, forming with the shaft a narrow ring gap in which the magnetic fluid retained by magnetic field is a hermetic seal. Magnetic forces provide balance of volume of magnetic fluid under the impact of pressure drop and centrifugal forces. With an increase in the speed of rotation of the shaft up to 10 m/s, deformation of the free surface of the magnetic fluid at the surface of the shaft in the form of a funnel is visually observed, which causes a decrease in the retained pressure drop. As the rotation speed increases, the funnel increases, part of the magnetic fluid is ejected from the working area, the retained pressure drop decreases, and at 50 m/s there is a complete release of the magnetic fluid and depressurization of the seal. In order to increase the stability of the free surface of the magnetic fluid in the field of centrifugal forces, multilayer carbon nanotubes were introduced into it. They are characterized by a high specific surface area and, accordingly, a strong Van der Waals attraction. In a magnetic fluid, multilayer carbon nanotubes form structures which are oriented along the magnetic field lines. The following increase in the static load retained by a layer of magnetic fluid has been experimentally determined with the introduction of nanocarbon structures: when coinciding with the axis of the structures the increase was by 100 %, for the normal direction of the load to the axis of the structure – by 50 %. In the seal, with an increase in the shaft rotation speed, deformation of the free surface of a magnetic fluid with nanocarbon structures was observed at 18 m/s at a distance of 3 mm from the shaft surface. The pressure drop retained by the seal increased in the speed range of 10–40 m/s, the maximum effect of 50 % was obtained at a speed of 40 m/s. Thus, the introduction of nanocarbon structures into the magnetic fluid made it possible to reduce the influence of centrifugal forces on the retained pressure drop and increase the efficiency of the magnetofluidic seal at high speeds of rotation of the shaft of wind power plants.

Keywords: magnetofluidic seal, nanocarbon structures, free surface, magnetic fluid, wind power plants

For citation: Labkovich O. N., Pogirnikskaya S. G. (2023) Optimization of Performance Characteristics of Magnetofluidic Seals for Wind Power Plants. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 66 (1), 80–90. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-66-1-80-90> (in Russian)

Введение

Эффективность работы ветроэнергетических установок (ВЭУ) во многом определяется минимальной скоростью ветра, при которой наблюдается страгивание вала, т. е. начало его вращения и выход электрогенератора на номинальную мощность. Для ее повышения необходимо обеспечить низкие потери на трение в уплотнениях, высокую герметичность для защиты

подшипниковых узлов и обмоток электрогенератора от пыли, абразивных частиц, воды, мелкодисперсной влаги. Окружная скорость уплотняемого вала изменяется от $v = 3-10$ м/с для ВЭУ малой мощности ($N = 3-5$ кВт) до $v \sim 50$ м/с при мощности ВЭУ $N \geq 100$ кВт [1].

Магнитожидкостные уплотнения вращающихся валов успешно используются в химической, горнодобывающей промышленности. Накоплен большой опыт их применения в вакуумной технике. Основные преимущества магнитожидкостных уплотнений: полное отсутствие утечек рабочей среды через зону уплотнения, эффективная защита от пыли и воды, низкие потери на трение, простота в обслуживании [2–4]. При увеличении скорости уплотняемого вала $v \geq 10$ м/с существенное значение приобретают факторы, снижающие эффективность работы уплотнений, – центробежные силы и диссипативный разогрев магнитной жидкости [5–7]. Центробежные силы становятся сравнимыми с магнитными силами, удерживающими магнитную жидкость в зазоре, и выбрасывают ее из рабочей зоны, что приводит к уменьшению удерживаемого перепада давлений. В [8–10] численно и экспериментально исследованы деформация свободной поверхности магнитной жидкости в уплотнении с увеличением скорости вращения вала, возникновение вторичных течений и влияние этих факторов на удерживаемый перепад давлений. Снизить влияние центробежных сил можно с помощью технических решений [3], однако это усложняет конструкцию уплотнения. Авторами [11, 12] экспериментально показано, что введение в объем магнитной жидкости многослойных углеродных нанотрубок (МУНТ) приводит к образованию наноуглеродных структур и увеличению статической нагрузки, удерживаемой этим объемом в магнитном поле.

Экспериментальные исследования

Представляет интерес исследование влияния наноуглеродных структур на повышение устойчивости свободной поверхности магнитной жидкости в поле центробежных сил и удерживаемый уплотнением перепад давлений с увеличением скорости вращения вала. Эксперименты проводили на стенде, представленном на рис. 1.

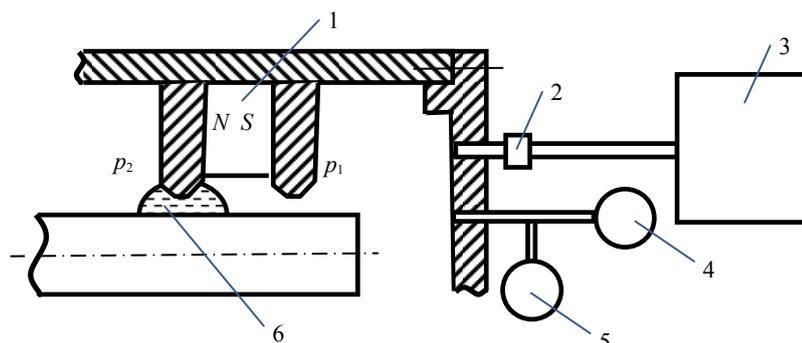


Рис. 1. Схема стенда для измерения удерживаемого уплотнением перепада давлений:

- 1 – узел уплотнения; 2 – вакуумный кран; 3 – вакуумный насос ВН-461;
- 4 – образцовый манометр; 5 – вакуумметр; 6 – магнитная жидкость

Fig. 1. Diagram of the stand for measuring the pressure drop retained by the seal:
1 – seal assembly; 2 – vacuum valve; 3 – ВН-461 vacuum pump;
4 – reference pressure gauge; 5 – vacuum gauge; 6 – magnetic fluid

Стенд состоит из узла магнитожидкостного уплотнения, вал которого приводится во вращение электродвигателем. Окружные скорости поверхности вала изменялись от 0 до 50 м/с. С помощью вакуумного насоса создавали перепад давления в рабочей камере уплотнения, который измеряли образцовыми манометром и вакуумметром с точностью 10^3 Н/м². Методика измерения удерживаемого перепада давления: рабочий зазор магнитожидкостного уплотнения заполняли магнитной жидкостью, устанавливали определенную скорость вращения вала, затем в рабочей камере с помощью вакуумного насоса создавали разрежение. Перепад давления, удерживаемый уплотнением ($\Delta p = p_2 - p_1$), увеличивали до максимального (Δp_{\max}), когда наблюдается полный выброс магнитной жидкости из рабочего зазора, т. е. разгерметизация.

В экспериментах использовали магнитную жидкость ММТ-50 на основе минерального масла и магнетита с намагниченностью насыщения $M_s = 50$ кА/м. Ее физические свойства при $T = 20$ °С и $H = 0$: динамический коэффициент вязкости $\eta = 0,1$ Па·с, плотность $\rho = 1430$ кг/м³, коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,19$ Вт/(м·К), диаметр частиц магнетита $d < 15$ нм.

На рис. 2 показаны геометрические параметры исследуемого магнитожидкостного уплотнения.

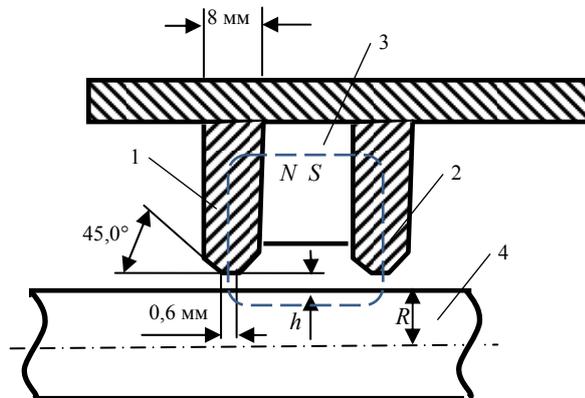


Рис. 2. Схема магнитожидкостного уплотнения:

1, 2 – полюс; 3 – постоянный магнит; 4 – вал

Fig. 2. Scheme of magnetofluidic seal:

1, 2 – poles; 3 – constant magnet; 4 – shaft

Радиус вала $R = 40$ мм, рабочий зазор между полюсом (концентратором магнитного поля) и валом $h = 0,2$ мм. Магнитное поле в рабочем зазоре, создаваемое постоянным феррит-бариевым магнитом, измерялось датчиком Холла и тесламетром универсальным 43205. Напряженность магнитного поля H в рабочем зазоре уплотнения изменялась в осевом направлении от 720 кА/м при $h = 0,2$ мм до 180 кА/м у свободной поверхности магнитной жидкости в статике ($v = 0$) (рис. 3).

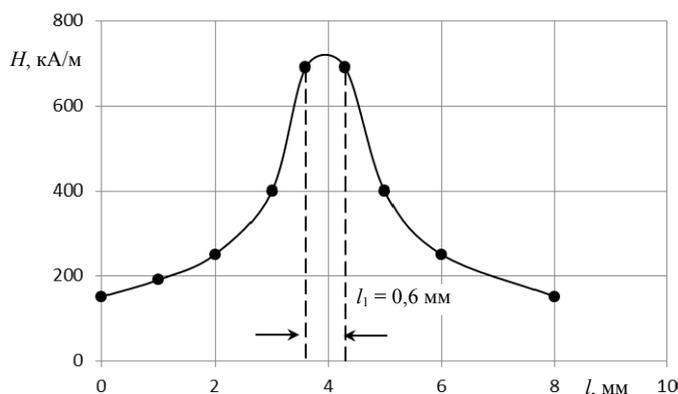


Рис. 3. Распределение магнитного поля в рабочем зазоре уплотнения

Fig. 3. Distribution of magnetic field in the working gap of the seal

Типичная зависимость удерживаемого уплотнением перепада давления Δp от скорости вращения вала v приведена на рис. 4 (кривая 1). С увеличением скорости $v > 10$ м/с Δp снижается, и при 50 м/с наступает полная разгерметизация уплотнения, т. е. $\Delta p = 0$.

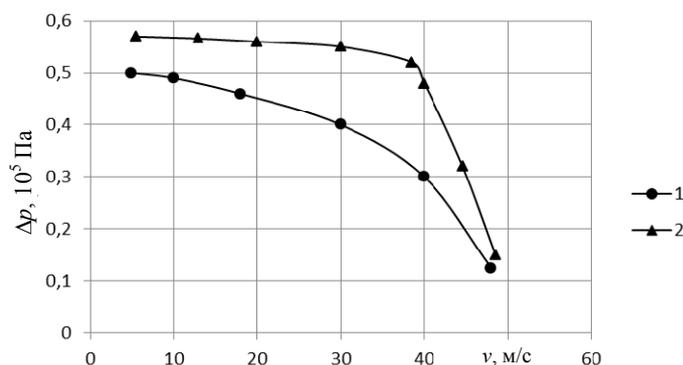


Рис. 4. Зависимость удерживаемого перепада давления от скорости вращения вала: 1 – магнитная жидкость ММТ-50; 2 – то же с многослойными углеродными нанотрубками концентрацией $c = 2\%$

Fig. 4. Dependence of retained pressure difference on rotation speed of the shaft: 1 – ММТ-50 magnetic fluid; 2 – ММТ-50 magnetic fluid with multilayer carbon nanotubes ($c = 2\%$)

Экспериментальная зависимость удерживаемого перепада давлений Δp от скорости вращения вала v хорошо аппроксимируется выражением [5]

$$\Delta p = \Delta p_{\text{ст}} - (\rho v^2 h) / 2R, \quad (1)$$

где $\Delta p_{\text{ст}}$ – перепад давлений, удерживаемый уплотнением при $v = 0$.

Выполнена оценка влияния центробежного ускорения и неоднородного магнитного поля в зазоре уплотнения на магнитную жидкость. При линейной скорости 50 м/с центробежное ускорение в прилегающих к валу слоях магнитной жидкости достигает $6000g$, где g – ускорение свободного па-

дения. Эффективное ускорение свободного падения в магнитной жидкости в поле магнитных сил $\mu_0 M_s \nabla H / \rho \approx 10^4 g$, где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; M_s – намагниченность насыщения магнитной жидкости; ∇H – градиент напряженности магнитного поля; ρ – плотность магнитной жидкости, $\rho = 10000 g$. Таким образом, ускорения центробежных сил и магнитного поля сравнимы.

Для оценки степени влияния центробежных сил на устойчивость магнитной жидкости в зазоре уплотнения в [3] предложен безразмерный критерий – магнитное число Фруда Fr_m , равное отношению центробежной силы к магнитной силе, действующих на единицу объема магнитной жидкости:

$$Fr_m = \frac{\rho v^2}{R \mu_0 M_s \nabla H}. \quad (2)$$

Влияние скорости вращения вала на деформацию свободной поверхности магнитной жидкости исследовали с помощью фото- и видеокамеры. Визуальные наблюдения показали, что на поверхности жидкости в месте контакта с валом образуется кольцевая воронка, которая наблюдалась ранее авторами [10].

На рис. 5 показана динамика изменения формы свободной поверхности магнитной жидкости при увеличении скорости вращения вала. Образование воронки приводит к уменьшению аксиальной толщины слоя магнитной жидкости x у поверхности вала, что является причиной снижения удерживаемого перепада давлений.

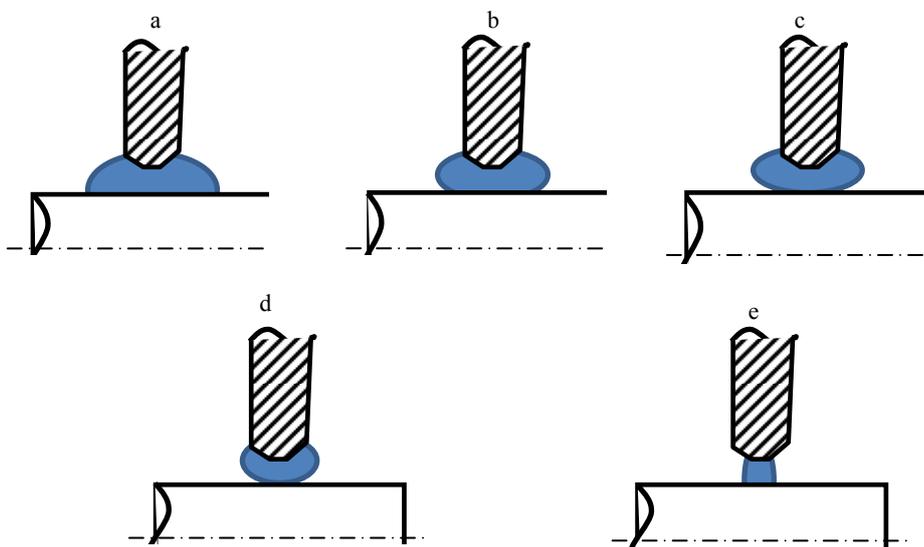


Рис. 5. Динамика изменения свободной поверхности магнитной жидкости при скорости v , м/с: а – 0; б – 10–18; с – 18–35; д – 35–45; е – 50

Fig. 5. Dynamics of alteration of magnetic fluid free surface depending on speed v , m/s: а – 0; б – 10–18; с – 18–35; д – 35–45; е – 50

В статике свободная поверхность магнитной жидкости совпадает с силовыми линиями магнитного поля (рис. 5a). При вращении вала, т. е. возникновении центробежных сил, от 10 до 18 м/с она принимает форму тора, у поверхности вала возникает воронка (рис. 5b). Дальнейший рост скорости деформирует свободную поверхность магнитной жидкости, глубина воронки возрастает, часть жидкости выбрасывается из рабочего зазора (рис. 5d). Увеличение скорости вала до 50 м/с приводит к разрушению слоя магнитной жидкости в рабочем зазоре и выбросу ее на полюс. Измеряли глубину воронки щупом толщиной 0,1 мм, установленным на микрометре, и определяли аксиальную толщину слоя магнитной жидкости в рабочем зазоре.

Зависимость осевого размера слоя магнитной жидкости у поверхности вала от скорости вращения носила такой же характер, как и удерживаемый перепад давлений (рис. 6, кривая 1).

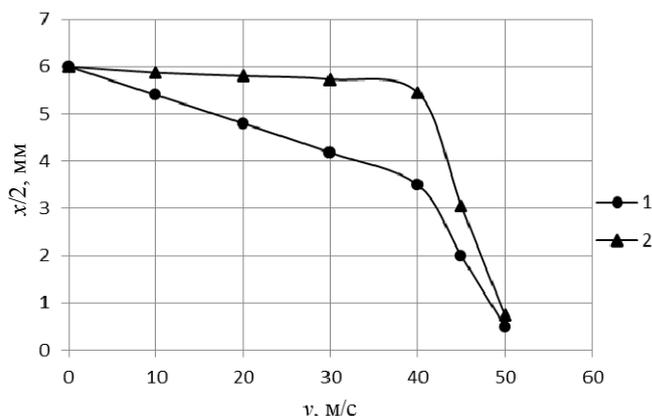


Рис. 6. Зависимость осевого размера магнитожидкостной пробки $x/2$ от скорости вращения вала: 1 – магнитная жидкость ММТ-50; 2 – то же с многослойными углеродными нанотрубками концентрацией $c = 2\%$

Fig. 6. Dependence of the axial size of magnetofluidic stoppers $x/2$ on rotation speed of the shaft: 1 – ММТ-50 magnetic fluid; 2 – ММТ-50 magnetic fluid with multilayer carbon nanotubes $c = 2\%$

Для повышения устойчивости свободной поверхности магнитной жидкости в поле центробежных сил в нее вводили МУНТ, образующие структуры при внешнем магнитном поле [11]. Многослойные углеродные нанотрубки представляют собой немагнитные цилиндры диаметром до 300 нм, длиной до 20 мкм и плотностью 1500 кг/м³. Концентрация МУНТ в магнитной жидкости ММТ-50 $c = 2\%$ весовых частей.

Методом визуализации исследовали структурирование МУНТ в магнитной жидкости в рабочем зазоре уплотнения. В зазор помещали стеклянную подложку, на которую наносили слой магнитной жидкости с МУНТ. Образец высушивали в магнитном поле уплотнения. Затем проводили анализ с помощью электронного микроскопа MIRA 3 TESCAN. В осевом направлении немагнитные МУНТ вытеснялись из области мак-

симального градиента магнитного поля (радиальный зазор $h = 0,2$ мм, $H_{\max} = 720$ кА/м) и образовывали структуры в области магнитных полей от $H = 450$ кА/м до $H = 180$ кА/м (свободная поверхность магнитной жидкости в статике). Типичная картина структур МУНТ у поверхности вала представлена на рис. 7.

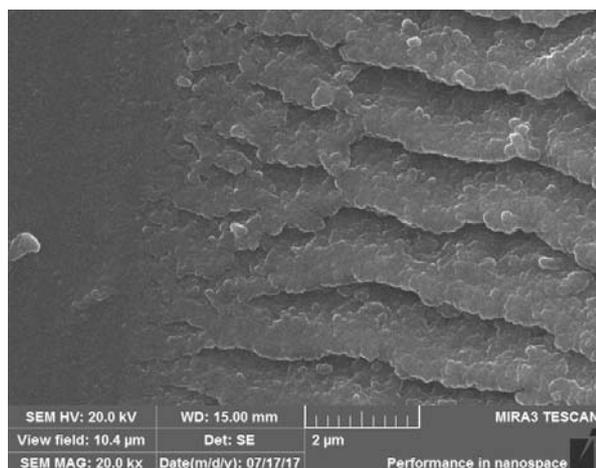


Рис. 7. Структуры многослойных углеродных нанотрубок у поверхности вала (ось вала вертикальная)

Fig. 7. Structures of multilayer carbon nanotubes at the shaft surface (the shaft axis is vertical)

На немагнитные МУНТ в магнитной жидкости во внешнем магнитном поле действует ориентирующий момент, обеспечивающий структурирование МУНТ вдоль силовых линий магнитного поля [12]:

$$Q_m = \mu_0 M^2 V_M, \quad (3)$$

где V_M – объем МУНТ.

По методике, предложенной в [12], экспериментально исследовали влияние наноуглеродных структур на распределение давления в слое магнитной жидкости площадью 800 мм^2 и высотой 5 мм.

Магнитная жидкость удерживалась двумя жестко закрепленными постоянными самарий-кобальтовыми магнитами, нагрузка на свободную поверхность жидкости осуществлялась калиброванными грузами через немагнитный шток. Как видно на рис. 8, при статической нагрузке структуры МУНТ увеличивали удерживаемое слоем магнитной жидкости давление. Причем полученный эффект зависел от ориентации вектора силы нагрузки и оси структур: при их сонаправленности соответствовал 100 % (кривые 1, 2), при векторе силы, нормальном к оси структур, – 50 % (кривые 3, 4).

При заправке уплотнения магнитной жидкостью ММт-50 с МУНТ наблюдалось повышение устойчивости свободной поверхности жидкости до скорости вращения вала $v < 40$ м/с: при $v = 18$ м/с возникла воронка на

расстоянии 3 мм от поверхности вала, которая развивалась с увеличением скорости вращения (рис. 9); при $v > 40$ м/с происходил частичный выброс магнитной жидкости из рабочего зазора; при $v = 50$ м/с вся жидкость выбрасывалась из зазора.

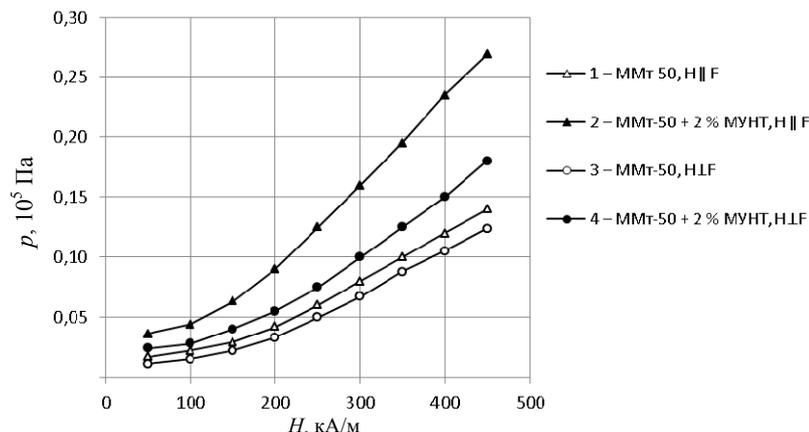


Рис. 8. Зависимость давления p от магнитного поля H (F – вектор силы нагрузки)

Fig. 8. Dependence of pressure p on magnetic field H (F is the load force vector)



Рис. 9. Магнитная жидкость ММт-50 с многослойными углеродными нанотрубками у поверхности вала

Fig. 9. MMt-50 magnetic fluid with multilayer carbon nanotubes ($c = 2\%$) at the shaft surface

Введение МУНТ в магнитную жидкость увеличивало удерживаемый уплотнением перепад давлений, при $v = 40$ м/с эффект достигал максимума и соответствовал 50 % (рис. 4, кривая 2). При этом повышалась устойчивость осевого размера магнитожидкостного слоя (рис. 6, кривая 2).

Известно, что существенную роль при использовании МУНТ играют силы Ван-дер-Ваальса (притяжения), которые являются короткодействующими и велики при небольших расстояниях между МУНТ, между МУНТ и металлическими поверхностями [13]. Эти силы носят электростатический характер. В [13] экспериментально установлено, что адгезионная прочность соединения МУНТ с металлической поверхностью зависит от направления внешней силы относительно оси МУНТ: при растяжении или сжатии нанотрубки сила отрыва составляла единицы микроныютон, при

изгибе нанотрубки – на два порядка ниже. Очевидно, что увеличение давления, удерживаемого слоем магнитной жидкости со структурами МУНТ в статике, определялось адгезионным взаимодействием между МУНТ, причем прочность структур на сжатие была выше на 50 % по сравнению с изгибом (рис. 8). Следовательно, основным механизмом увеличения удерживаемого высокоскоростным уплотнением перепада давлений при введении МУНТ в магнитную жидкость являлось структурообразование МУНТ и электростатическое притяжение между ними и поверхностью вала. При скорости $v = 40$ м/с совместное воздействие центробежных и гидродинамических сил приводило к разрушению структур МУНТ, удерживаемый перепад давлений резко снижался (рис. 4, кривая 2).

ВЫВОДЫ

1. В рабочем зазоре магнитоожидкостного уплотнения многослойные углеродные нанотрубки образуют структуры в области малых градиентов магнитного поля.

2. Добавка в магнитную жидкость 2 % многослойных углеродных нанотрубок повышает устойчивость ее свободной поверхности в поле центробежных сил и увеличивает удерживаемый уплотнением перепад давлений с ростом скорости вращения вала. Максимальный эффект 50 % получен при $v = 40$ м/с.

3. Магнитоожидкостные уплотнения с добавками многослойных углеродных нанотрубок являются эффективными герметизаторами для валов ветроэнергетических установок при скорости вращения от 0 до 40 м/с.

ЛИТЕРАТУРА

1. Твайделл, Дж. Возобновляемые источники энергии / Дж. Твайделл, А. Уэйр; пер. с англ. под ред. В. А. Коробова. М.: Энергоатомиздат, 1990. 391 с.
2. Михалев, Ю. О. Исследование ферроожидкостных уплотнений / Ю. О. Михалев, Д. В. Орлов, Ю. И. Страдомский // Магнитная гидродинамика. 1979. Т. 15, № 3. С. 69–76.
3. Берковский, Б. М. Магнитные жидкости / Б. М. Берковский, В. Ф. Медведев, М. С. Краков. М.: Химия, 1989. 240 с.
4. Петруша, Ю. С. Перспективы развития ветроэнергетики в Республике Беларусь / Ю. С. Петруша, Н. А. Попкова // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 2. С. 124–134. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-124-134>.
5. Берковский, Б. М. Проблемы разработки и пределы использования магнитоожидкостных уплотнений / Б. М. Берковский, М. С. Краков, В. К. Рахуба // Магнитная гидродинамика. 1982. Т. 18, № 1. С. 85–93.
6. Матусевич, Н. П. Экспериментальное исследование гидродинамических и тепловых процессов в магнитоожидкостных уплотнениях / Н. П. Матусевич, В. К. Рахуба, В. А. Чернобай // Магнитная гидродинамика. 1983. Т. 19, №1. С. 125–129.
7. Чернобай, В. А. Тепловые и гидродинамические процессы в высокоскоростных магнитоожидкостных уплотнениях, разработка их конструкций: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14 / В. А. Чернобай. Минск, 1983. 175 с.
8. Вислович, А. Н. Влияние центробежных и капиллярных сил на форму свободной поверхности магнитоожидкостного уплотнения / А. Н. Вислович, В. К. Полевиков // Магнитная гидродинамика. 1994. Т. 30, №1. С. 77–86.
9. Полевиков, В. К. Моделирование магнитоожидкостного уплотнения при наличии перепада давления / В. К. Полевиков, Л. Тобиска // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2001. № 6. С. 42–51.

10. Pogiritskaya, S. Experimental Study of a Dynamics of the Magnetic Fluid Free Surface in the High Speed Seal / S. Pogiritskaya, V. Chernobai // XII International Conf. on Magnetic Fluids: Abstracts. Sendai, 2010.
11. Лабкович, О. Н. Снижение потерь на трение при вихревом течении магнитной жидкости добавками углеродных нанотрубок / О. Н. Лабкович // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 3. С. 265–275. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-3-265-275>.
12. Labkovich, O. N. Influence of Carbon Nanotubes on the Dissipation of Disturbances in a Magnetic Fluid Layer / O. N. Labkovich, S. G. Pogiritskaya, V. A. Chernobay // Magnetohydrodynamics. 2021. Vol. 57, Iss. 2. P. 273–280. <https://doi.org/10.22364/mhd.57.2.10>.
13. Исследование адгезии вертикально ориентированных углеродных нанотрубок к подложке методом атомно-силовой микроскопии / О. А. Агеев [и др.] // Физика твердого тела. 2016. Т. 58, Вып. 2. С. 301–306.

Поступила 02.09.2022 Подписана в печать 04.11.2022 Опубликована онлайн 31.01.2023

REFERENCES

1. Twidell J. W., Weir A.D. (1986) *Renewable Energy Resources*. New York, Taylor & Francis, 439.
2. Mikhalev Yu. O., Orlov D. V., Stradomskii Yu. I. (1979) Ferrofluid Seals. *Magnitnaya Gidrodinamika = Magnetohydrodynamics*, 15 (3), 69–76 (in Russian).
3. Berkovskii B. M., Medvedev V. F., Krakov M. S. (1989) *Magnetic Fluids*. Moscow, Khmiya Publ. 240 (in Russian).
4. Petrusha U. S., Papkova N. A. (2019) The Prospects for Wind Energy Development in the Republic of Belarus. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (2), 124–134. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-124-134> (in Russian).
5. Berkovskii B. M., Krakov M. S., Rakhuba V. K. (1982) Design Problems and Use Limitations for Magnetic-Fluid Seals. *Magnitnaya Gidrodinamika = Magnetohydrodynamics*, 18 (1), 85–93 (in Russian).
6. Matusevich N. P., Rakhuba V. K., Chernobai V. A. (1983). Experimental Investigation of Hydrodynamic and Thermal Processes in Magnetofluid Seals. *Magnitnaya Gidrodinamika = Magnetohydrodynamics*, 19 (1), 125–129 (in Russian).
7. Chernobai V. A. (1983) *Thermal and Hydrodynamic Processes in High-Speed Magnetofluidic Seals, Development of Their Designs*. Minsk. 175 (in Russian).
8. Vislovich A. N., Polevnikov V. K. (1994) Effect of the Centrifugal and Capillary Forces on the Free Surface Shape of a Magnetic Liquid Seal. *Magnitnaya Gidrodinamika = Magnetohydrodynamics*, 30 (1), 77–86 (in Russian).
9. Polevnikov V. K., Tobiska L. (2001) Modeling of a Dynamic Magneto-Fluid Seal in the Presence of a Pressure Drop. *Fluid Dynamics*, 36 (6), 890–898. <https://doi.org/10.1023/A:1017906408433>.
10. Pogiritskaya S., Chernobai V. (2010) Experimental Study of a Dynamics of the Magnetic Fluid Free Surface in The High Speed Seal. *XII International Conf. on Magnetic Fluids: Abstracts*. Sendai, 2010.
11. Labkovich O. N. (2017) Reduction of Friction Losses due to the Vortex Flow of the Magnetic Fluid Caused by the Additives of Carbon Nanotubes *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (3), 265–275. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-3-265-275> (in Russian).
12. Labkovich O. N., Pogiritskaya S. G., Chernobay V. A. (2021) Influence of Carbon Nanotubes on the Dissipation of Disturbances in a Magnetic Fluid Layer. *Magnetohydrodynamics*, 57 (2), 273–280. <https://doi.org/10.22364/mhd.57.2.10>.
13. Ageev O. A., Blinov Y. F., Il'ina M. V., Il'in O. I., Smirnov V. A., Tsukanova O. G. (2016) Study of Adhesion of Vertically Aligned Carbon Nanotubes to a Substrate by Atomic-Force Microscopy. *Physics of the Solid State*, 58 (2), 309–314. <https://doi.org/10.1134/s1063783416020037>.

Received: 2 September 2022 Accepted: 4 November 2022 Published online: 31 January 2023

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-91-100>

УДК 662.711.4

Экспериментальное и расчетное исследование формирования композитного гранулированного топлива

Л. Н. Овчинников¹, Н. Л. Овчинников¹, А. В. Митрофанов²,
С. В. Василевич³, Н. С. Шпейнова²

¹Ивановский государственный химико-технологический университет
(Иваново, Российская Федерация),

²Ивановский государственный энергетический университет
(Иваново, Российская Федерация),

³Белорусская государственная академия авиации (Минск, Республика Беларусь)

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

Реферат. В настоящее время актуальной тенденцией развития энергетических комплексов ряда стран является расширение твердотопливной ниши, которое во многом обеспечивается за счет использования различных видов местного возобновляемого топлива. Оно зачастую обладает высокими теплотехническими свойствами (теплотой сгорания, зольностью и т. п.), но имеет низкие или плохо прогнозируемые физико-механические характеристики (прочность, гранулометрический состав и др.). Последнее практически исключает стабильную и эффективную работу систем автоматизации и механизации транспортировки гранул, а также технологические процессы котлоагрегатов. Создание композитных топлив с заданными физико-механическими свойствами позволяет решить эту проблему. Состав композитного топлива на основе торфа, опилок, целлюлозы и модификатора установлен на предыдущих этапах. Однако при заданном составе композиции физико-механические характеристики зависят от режимно-технологических условий получения гранул. В настоящей работе выполнено расчетно-экспериментальное исследование, направленное на поиск рациональных технологических условий гранулирования и сушки частиц композитного топлива с заданным массовым соотношением компонентов. Для приготовления топливных гранул определенного размера из исходных мелкофракционных компонентов использовалась лабораторная установка, основные элементы которой – Z-образный смеситель, шнековый гранулятор и сушилка со взвешенным слоем. Влияние независимых переменных на прочность и конечную влажность готовых гранул композитного топлива определено в рамках полного факторного эксперимента. В статье представлены графические изображения поверхностей отклика, характеризующие указанное влияние варьируемых факторов. Полученные регрессионные зависимости, описывающие влияние факторов на целевые свойства гранул, имеют линейный характер. Последнее ограничивает возможность использования градиентных методов оптимизации, поэтому необходимо искать рациональные условия с учетом ограничений, обусловленных технико-экономическими параметрами изготовления топливных гранул.

Ключевые слова: композитное гранулированное топливо, торф, отходы деревообработки, сушка, полный факторный эксперимент

Для цитирования: Экспериментальное и расчетное исследование формирования композитного гранулированного топлива / Л. Н. Овчинников [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 66, № 1. С. 91–100. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-91-100>

Адрес для переписки

Василевич Сергей Владимирович
Белорусская государственная академия авиации
ул. Уборевича, 77,
220096, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 249-97-65
svasilevich@yandex.ru

Address for correspondence

Vasilevich Sjarhei V.
77, Uborevich str.,
220096, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 249-97-65
svasilevich@yandex.ru

Experimental and Computational Study of the Formation of Composite Granular Fuel

L. N. Ovchinnikov¹⁾, N. L. Ovchinnikov¹⁾, A. V. Mitrofanov²⁾,
S. V. Vasilevich³⁾, N. S. Shpeynova²⁾

¹⁾Ivanovo State University of Chemistry and Technology (Ivanovo, Russian Federation),

²⁾Ivanovo State Power Engineering University (Ivanovo, Russian Federation),

³⁾Belarusian State Academy of Aviation (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Currently, the topical trend in the development of energy complexes in a number of countries is the expansion of the solid fuel use, which is largely provided by the use of various types of local renewable fuels. The latter often have high thermal properties (heat of combustion, ash content, etc.), but have low or poorly predicted physical and mechanical characteristics (strength, granulometric composition, etc.). These circumstances practically make stable and efficient operation of automation systems, mechanization of transportation of pellets, and technological processes of boilers impossible. The formation of a composite fuel with specified physical and mechanical properties provides a solution to this problem. The structure of the composite fuel based on peat, sawdust, cellulose and modifier was established at the previous stages of our work. However, in case of a given composition, the physical and mechanical characteristics depend on the operating and technological conditions for obtaining granules. In this paper, a statistical and experimental study was carried out aimed at finding rational technological conditions for granulating and drying composite fuel particles with a given mass ratio of components. To prepare fuel pellets of a given size from the initial fine-fraction components, a laboratory installation was used, the main elements of which were a Z-shaped mixer, a screw granulator, and a fixed bed dryer. The influence of independent variables on the strength and final moisture content of finished pellets of composite fuel was determined within the framework of a full factor experiment. The paper presents graphical images of response surfaces characterizing the specified influence of variable factors. The obtained regression dependences describing the influence of factors on the target properties of granules are linear in nature. The latter limits the possibility of using gradient optimization methods and creates the need to search for rational conditions, taking into account the limitations caused by the technical and economic parameters of obtaining finished fuel pellets.

Keywords: composite granular fuel, peat, woodworking waste, drying, full factor experiment

For citation: Ovchinnikov L. N., Ovchinnikov N. L., Mitrofanov A. V., Vasilevich S. V., Shpeynova N. S. (2023) Experimental and Computational Study of the Formation of Composite Granular Fuel. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 66 (1), 91–100. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-91-100> (in Russian)

Введение

В настоящее время тенденции развития энергетических комплексов ряда стран, в том числе России и Беларуси, четко указывают на расширение твердотопливной ниши в энергетическом секторе, которое во многом обеспечивается за счет использования различных видов местного возобновляемого топлива [1–3]. При этом важны вопросы пригодности этого топлива для технологического использования. Определяя целесообразность и эффективность вовлечения в оборот того или иного вида топлива, очевидно, приходится принимать во внимание большое количество факторов (экономических, экологических, географических, технологических и др.), значимость каждого из которых не всегда может быть однозначно оценена и требует специального обоснования [2–4].

Торф находится на промежуточной стадии процесса перехода от органической массы к угольному топливу (процесса минерализации) и поэтому может быть отнесен как к возобновляемым источниками энергии, так и к невозобновляемым. В России известные запасы торфа оцениваются специалистами примерно в 128 млрд т, что при существующем уровне во-

влечения его в хозяйственный оборот позволяет рассматривать торф как медленно возобновляемый источник энергии (slowly renewable biomass), уровень прироста объемов которого превышает уровень потребления [4–6].

Торф как топливо имеет широкий спектр экономических и экологических преимуществ: в частности, обладая близким к бурому углю значением низшей теплоты сгорания на горючую массу, он отличается более низким содержанием серы, невысокой зольностью, более приемлемым содержанием ртути [6]. Однако хорошо известны и лимитирующие использование торфа в качестве топлива факторы: высокая влажность, хрупкость частиц и их агрегатов, неоднородность характеристик в зависимости от сезона и др. [4–5]. В связи с этим значительную нишу в области исследований, направленных на вовлечение торфа в хозяйственный оборот в качестве топливного компонента, занимают труды, связанные с разработкой композитных топлив [7–10].

Важной задачей является не только подбор состава композиции, но и разработка и совершенствование технологии производства топливных гранул. В общем случае технологические схемы их производства включают следующие этапы: подготовка компонентов (сушка, измельчение, классификация), их смешивание, гранулирование, сушка [11–13]. Технологические аспекты отдельных стадий производства топливных гранул стали предметом достаточно широкого круга исследований (например, сушка гранул [5, 13], получение смесей [14, 15], различные способы их гранулирования [15, 16]). Несмотря на сравнительную многочисленность подобных работ, вопросы выработки рекомендаций по выбору конкретного способа осуществления того или иного технологического передела, а также методов расчета параметров указанных переделов являются открытыми и актуальными. Во многом это объясняется разнообразием видов топлива и, соответственно, значительным количеством возможных композиций. Таким образом, просто не может существовать исчерпывающего банка характеристик и соответствующих технологических рекомендаций. С другой стороны, технологический аспект проблем часто рассматривается вне связи с возможными изменениями состава композиций, т. е. изучается некоторый модельный материал, характеристики которого даны заранее или варьируются на нескольких уровнях. При такой постановке задачи практически не принимаются во внимание другие этапы жизненного цикла топлива. Например, на стадиях сушки, хранения, транспортировки искусственных видов топлива на основе торфа их топливно-энергетические параметры не важны, зато критически значимы их характеристики как сыпучих материалов (прочность, сыпучесть, истираемость и др.). Низкие значения этих показателей влекут за собой трудно прогнозируемые изменения гранулометрического состава топлив, что может нарушать режим работы систем автоматизации и механизации транспортировки гранул, а также технологические процессы котлоагрегатов [7, 16, 17]. В итоге к полученным новым результатам исследования всегда возникают вопросы, касающиеся их применимости при других режимах производства гранул, а также влияния на топливно-энергетические параметры топлива.

Предлагаемое в настоящей статье исследование направлено на поиск режима получения гранулированного композитного топлива, рационального с точки зрения теплотворной способности и требований к нему как к сыпучему продукту, и поэтому удачно позиционируется среди описанных выше крупных исследовательских направлений.

Методы и результаты исследования

Важной стадией получения гранулированного биотоплива является его сушка, которая часто организуется в конвективном потоке сушильного агента через фильтрующий слой материала [16]. В связи с этим в рамках настоящей работы проведены расчетно-экспериментальные исследования, направленные на поиск рациональных технологических условий гранулирования и сушки частиц готового продукта с заданным массовым соотношением компонентов.

Экспериментальное исследование проводили на лабораторной установке, схема которой приведена на рис. 1. Перед экспериментом установку вывели на стационарный тепловой режим. Воздух, нагнетаемый газодувкой, с заданным расходом (измеряется ротаметром) поступал в электрокалорифер, а оттуда в сушилку. Исходные мелкофракционные компоненты (целлюлоза, торф, опилки, модификатор и вода) подавались в смеситель, после их смешивания приготовленная паста направлялась в шнековый гранулятор для получения гранул заданного размера. На следующем этапе навеску гранул загружали в кювету и помещали на газораспределительную решетку сушилки. Через определенные интервалы времени проводили измерения значений температуры воздуха под решеткой, в слое и над слоем. Убыль влаги в гранулах слоя измеряли периодически с помощью электронных весов марки MW-120.

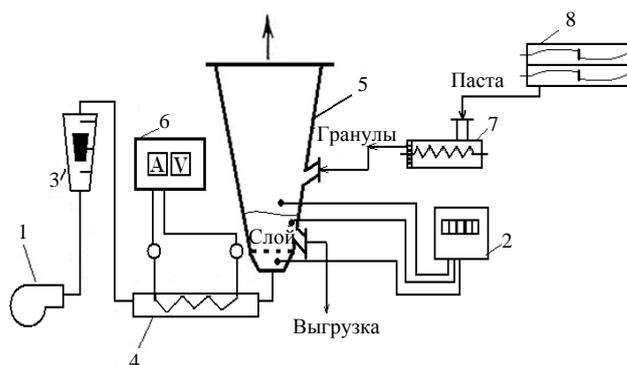


Рис. 1. Технологическая схема лабораторной установки для получения гранулированного композитного топлива: 1 – газодувка; 2 – прибор для измерения температуры; 3 – ротаметр для измерения расхода воздуха; 4 – электрокалорифер; 5 – сушилка с плотным слоем частиц; 6 – электрощит; 7 – шнековый гранулятор; 8 – Z-образный смеситель

Fig. 1. Technological scheme of a laboratory installation for producing granular composite fuel: 1 – gas blower; 2 – temperature measuring device; 3 – rotameter for measuring air flow; 4 – electric heater; 5 – fixed bed dryer; 6 – electrical panel; 7 – screw granulator; 8 – Z-shaped mixer

Для нахождения рациональных технологических условий получения качественных гранул композитного топлива выполнен полный факторный эксперимент с размерностью $N = 2^k$, где N – число опытов.

В качестве исследуемых параметров выбраны: Y_1 – конечная относительная влажность гранул, %; Y_2 – прочность гранул, МПа. Независимые переменные: X_1 – температура воздуха под решеткой, °С; X_2 – содержа-

ние модификатора в смеси, г; X_3 – время сушки, мин; X_4 – масса слоя, г; X_5 – расход воздуха, м³/ч. Интервалы и уровни варьирования независимых переменных: $\Delta X_1 = 70\text{--}90$ °С; $\Delta X_2 = 1\text{--}3$ % по массе; $\Delta X_3 = 25\text{--}35$ мин; $\Delta X_4 = 17\text{--}27$ г; $\Delta X_5 = 40\text{--}50$ м³/ч.

Выбран общий вид уравнений регрессии в виде полиномов, расположенных по восходящим степеням изучаемого фактора и одновременно линейных ко всем коэффициентам (полиномиальная регрессия) [18–19]:

$$Y = b_0 + b_1X + b_2X^2 + \dots + b_mX^m, \quad (1)$$

где b – параметры модели, подлежащие определению (коэффициенты регрессии).

В случае использования плана первого порядка для многофакторного эксперимента при условии взаимодействия (зависимости друг от друга) факторов выражение (1) трансформируется в соотношение вида [18–19]

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^m b_i X_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^m b_{ij} X_i X_j + \sum_{\substack{u,i,j=1 \\ i \neq j \neq u}}^m b_{iju} X_i X_j X_u + \dots, \quad (2)$$

где i, j и u – индексы факторов (1, 2, 3, ..., m); m – число исследуемых факторов.

Для определения коэффициентов регрессии использовали известные формулы [18–19]. Так, значение свободного слагаемого (b_0) находили как среднее арифметическое всех полученных в эксперименте значений параметра Y

$$b_0 = \frac{\sum_{j=1}^N Y_j}{N}, \quad (3)$$

где Y_j – экспериментальное значение параметра в j -м опыте.

Линейные выборочные коэффициенты регрессии

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^N X_{ij} Y_j}{N}, \quad (4)$$

где X_{ij} – кодированное значение фактора в j -м опыте.

После математической обработки результатов эксперимента, определения значений коэффициентов регрессионных уравнений и проверки их адекватности по критерию Фишера получены новые регрессионные зависимости [18–19].

Уравнение для определения конечной влажности

$$W = 0,022 - 0,00096X_1 - 0,0012X_3 - 0,0000875X_4 + 0,00041X_5. \quad (5)$$

Уравнение для определения прочности

$$\sigma = 0,2925 + 0,01X_1 - 0,01X_2 + 0,0175X_3 + 0,05X_5. \quad (6)$$

На рис. 2а представлена фотография гранул готового продукта, на рис. 2б приведены некоторые результаты сравнения экспериментальных

данных (точки) и расчетных значений (линии), полученных на основе предложенного регрессионного уравнения (2). Как видно, экспериментальные данные находятся в хорошем соответствии с расчетными (локальные расхождения между расчетами и результатами экспериментов составляют: для прочности – в пределах 5 %, для влажности – в пределах 7 %). Последнее позволяет перейти к рассмотрению вопросов использования результатов статистического моделирования для поиска рациональных технологических режимов получения гранул.

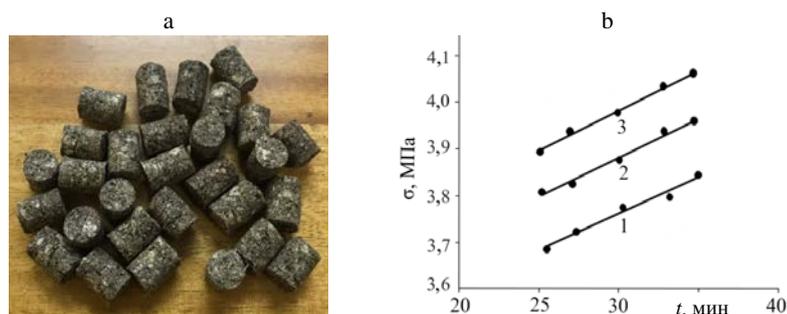


Рис. 2. Гранулы композитного топлива: а – фотография; б – графики прочности в зависимости от продолжительности сушки (точки – экспериментальные данные; линии – расчетные значения) при различных температурных режимах: 1 – 70 °С; 2 – 80; 3 – 90 °С

Fig. 2. Composite fuel pellets: а – photo; б – graphs of the strength of composite fuel pellets depending on the drying time (points – experimental data; lines – calculated forecasts) under different temperature conditions: 1 – 70 °С; 2 – 80; 3 – 90 °С

Результаты и обсуждение

Некоторые результаты статистического моделирования с использованием метода полного факторного эксперимента представлены в виде графического изображения поверхностей отклика (рис. 3–5). Эти рисунки позволяют дать характеристику влияния выбранных факторов на основные исследуемые параметры (прочность гранул σ и их конечную влажность W).

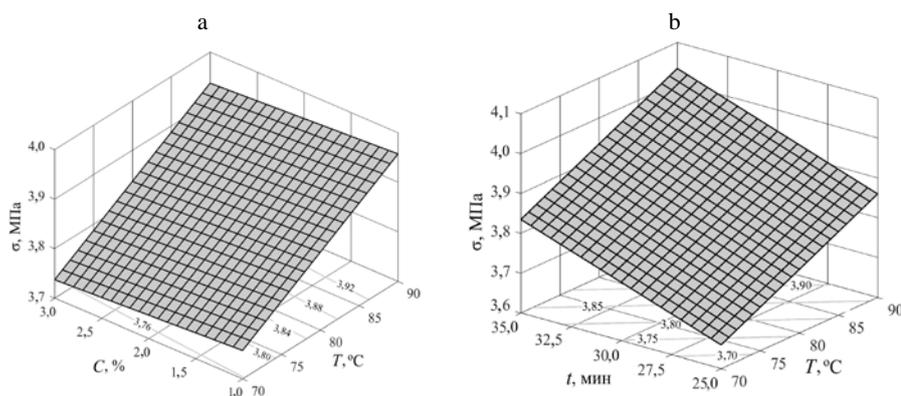


Рис. 3. Зависимость прочности гранул композитного топлива от: а – концентрации модификатора; б – времени сушки

Fig. 3. The dependence of the composite fuel granules strength on: а – the concentration of the modifier; б – the drying time

Из анализа рис. 3 видно, что прочность гранул возрастает с повышением концентрации модификатора и температуры воздуха под решеткой. Дальнейшее увеличение концентрации модификатора в готовом продукте экономически нецелесообразно, так как величина прочности гранул доведена до товарного значения ($\sigma > 4,0$ МПа); повышение температуры газового теплоносителя под решеткой выше $100\text{ }^\circ\text{C}$ недопустимо, так как это может привести к возгоранию композитного топлива в аппарате.

Прочность гранул, согласно рис. 4, возрастает с увеличением расхода газового теплоносителя до $50\text{ м}^3/\text{ч}$ и продолжительности сушки до 35 мин. Расход газа в аппарате свыше $50\text{ м}^3/\text{ч}$ нецелесообразен, так как в этом случае происходит разрушение плотного слоя и переход его в состояние псевдооживления, когда влажные частицы формируемых гранул разрушаются и это ведет к снижению качества готового продукта.

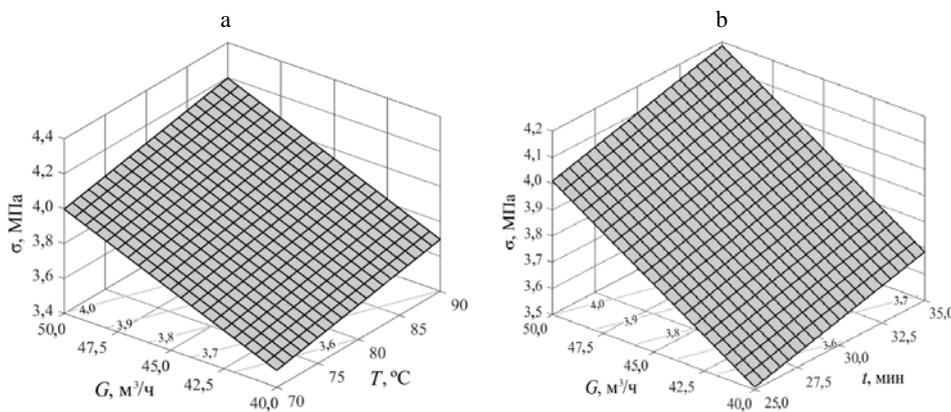


Рис. 4. Зависимость прочности гранул композитного топлива от расхода нагретого воздуха, подаваемого в сушильную камеру: а – при различной температуре воздуха под решеткой; б – при изменении времени сушки

Fig. 4. The dependence of the composite fuel granules strength on the flow rate of heated air supplied to the drying chamber: а – at different air temperatures under the grate; б – when the drying time changes

Из результатов исследования, показанных на рис. 5, следует, что для выбранных интервалов варьирования независимых переменных уменьшение конечной влажности готового продукта наблюдается при увеличении времени сушки и снижении массы навески материала.

При статистической обработке расчетно-экспериментальных данных поиск экстремума обычно осуществляется с использованием градиентных методов [18–19], однако такой подход не приводит к разумной асимптотике в контексте настоящего исследования, так как полученные регрессионные зависимости (5), (6) имеют линейный характер. Иными словами, несмотря на достаточные прогностические возможности предложенных соотношений, их использование лимитируется переходом объекта в новое качественное состояние (например, наблюдается возгорание частиц и т. п.). Поэтому при анализе результатов экспериментальных исследований и статистического моделирования необходимо учитывать ограничения, обусловленные технико-экономическими параметрами получения готовых топливных гранул, отвечающих требованиям стандартов. В частности, как было отмечено ранее, принималось во внимание снижение качества гото-

вого продукта при переходе слоя в псевдооживленное состояние (достижении скорости начала псевдооживления), а также склонность топлива к подгоранию при форсировании теплового режима обработки.

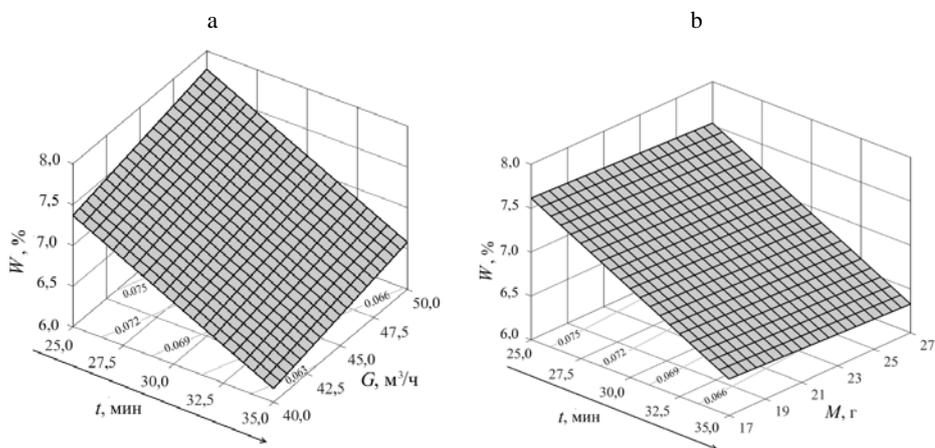


Рис. 5. Зависимость конечной влажности гранул композитного топлива от времени сушки: а – при различном расходе воздуха, подаваемого в сушилку; б – при различной массе слоя

Fig. 5. The dependence of the composite fuel pellets final moisture content on drying time: a – at different air flow rates supplied to the dryer; b – at different bed weights

В результате при осуществлении расчетно-экспериментальных исследований формирования гранулированного композитного топлива в настоящей работе определены следующие рациональные режимные параметры их получения: температура воздуха под решеткой $T = 84\text{ }^{\circ}\text{C}$; время сушки $t = 33\text{ мин}$; расход воздуха $G = 48\text{ м}^3/\text{ч}$.

ВЫВОДЫ

1. Выполнено поисковое исследование с целью обоснования технологических параметров формирования композитных топливных гранул, физико-механические свойства которых создают условия для обеспечения стабильной и эффективной работы систем автоматизации и механизации транспортировки гранул, а также технологических процессов котлоагрегатов. Задачи исследования решены при помощи статистического моделирования с применением метода полного факторного эксперимента для определения рациональных технологических параметров сушки гранулированного композитного топлива.

2. Предложены регрессионные зависимости для определения физико-механических свойств композитного топлива, обладающие высокой прогностической эффективностью для заданного компонентного состава топливных гранул. Представлены графические изображения поверхностей отклика, характеризующих влияние независимых переменных на прочность и конечную влажность готовых гранул. Получены рациональные технологические параметры формирования гранулированного композитного топлива заданного компонентного состава.

3. Полученные результаты могут рассматриваться в качестве конкретных указаний по организации процесса формирования гранул предложенного состава, а также как алгоритм действий при вовлечении в оборот новых видов топлив и создании режимных карт получения топливных гранул на их основе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корсак, Е. П. Формирование системы угроз энергетической безопасности Республики Беларусь / Е. П. Корсак // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 4. С. 388–398. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-388-398>.
2. Фортов, В. Е. Состояние развития возобновляемых источников энергии в мире и в России / В. Е. Фортов, О. С. Попель // Теплоэнергетика. 2014. № 6. С. 4–13.
3. Пехота, А. Н. Исследование термоаналитическими методами энергетических свойств брикетированного многокомпонентного топлива / А. Н. Пехота, С. А. Филатов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. Т. 65, № 2. С. 143–155. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-2-143-155>.
4. Laitinen, S. Exposure to Biological and Chemical Agents at Biomass Power Plants / S. Laitinen [et al.] // Biomass Bioenergy. 2016. Vol. 93. P. 78–86. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.06.025>.
5. Thermal Processing of Biomass into High-Calorific Solid Composite Fuel / R. Tabakaev [et al.] // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2017. Vol. 124. P. 94–102. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2017.02.016>.
6. Исследование процесса термического разложения и горения торфяного топлива / П. А. Марьяндышев [и др.] // Химия твердого топлива. 2019. № 5. С. 33–38.
7. Solid Biofuels for Energy. A Lower Greenhouse Gas Alternative / ed. P. Grammelis // Springer-Verlag London Limited, 2011. 242 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-84996-393-0>.
8. Михайлов, А. В. Угле-торфяные композиции для сжигания в котельных / А. В. Михайлов // Записки Горного института. 2016. Т. 220. С. 538–544.
9. Упрочняющие добавки для формованного древесного топлива / А. А. Макеенко [и др.] // Труды БГТУ. Серия 2. 2018. № 2. С. 51–54.
10. Табакаев, Р. Б. Твердое композитное топливо из низкосортного сырья / Р. Б. Табакаев, А. В. Казаков, А. С. Заворин // Известия Томского политехнического университета. Техника и технологии в энергетике. 2014. Т. 325, № 4. С. 56–64.
11. Christoforou, E. Advances in Solid Biofuels / E. Christoforou, P. A. Fokaides // Springer Nature Switzerland AG, 2019. 130 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-00862-8>.
12. Томсон, А. Э. Торф и продукты его переработки / А. Э. Томсон, Г. В. Наумова. Минск: Беларус. навука, 2009. 328 с.
13. Наумович, В. М. Искусственная сушка торфа / В. М. Наумович. М.: Недра, 1984. 222 с.
14. The Influence of Raw Material Characteristics on the Industrial Pelletizing Process and Pellet Quality / M. Arshadi [et al.] // Fuel Processing Technology. 2008. Vol. 89, Iss. 12. P. 1442–1447. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.07.001>.
15. Experimental Verification of Novel Pellet Model Using a Single Pelleter Unit / J. K. Holm [et al.] // Energy and Fuels. 2007. Vol. 21, Iss. 4. P. 2446–2449. <https://doi.org/10.1021/EF070156L>.
16. Овчинников, Л. Н. Исследование процесса получения комплексных гранулированных органоминеральных удобрений пролонгированного действия на основе торфа / Л. Н. Овчинников // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2017. Т. 60, № 9. С. 100–104.
17. Application of the Theory of Markov Chains to Theoretical Study of Processes in a Circulating Fluidized Bed / A. Mitrofanov [et al.] // Particulate Science and Technology. 2017. Vol. 37, Iss. 8. P. 1028–1033. <https://doi.org/10.1080/02726351.2018.1525459>.
18. Ахназарова, С. Л. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии / С. Л. Ахназарова, В. В. Кафаров. М.: Высш. школа, 1978. 319 с.
19. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. М.: Наука, 1976. 279 с.

Поступила 09.04.2022 Подписана в печать 14.06.2022 Опубликована онлайн 31.01.2023

REFERENCES

1. Korsak E. P. (2019) Formation of the System of Threats to Energy Security of the Republic of Belarus. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (4), 388–398. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-388-398> (in Russian).
2. Fortov V. E., Popel' O. S. (2014) The Current Status of the Development of Renewable Energy Sources Worldwide and in Russia. *Thermal Engineering*, 61 (6), 389–398. <https://doi.org/10.1134/S0040601514060020>.
3. Pekhota A. N., Filatov S. A. (2022) Investigation of Energy Properties of Briquetated Multi-component Fuel by Thermo-Analytical Methods. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (2), 143–155. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-2-143-155> (in Russian).
4. Laitinen S., Laitinen J., Fagernäs L., Korpijärvi K., Korpinen L., Ojanen K., Aatamila M., Jumpponen M., Koponen H., Jokiniemi J. (2016) Exposure to Biological and Chemical Agents at Biomass Power Plants. *Biomass and Bioenergy*, 93, 78–86. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.06.025>.
5. Tabakaev R., Shanenkov I., Kazakov A., Zavorin A. (2017) Thermal Processing of Biomass into High-Calorific Solid Composite Fuel. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 124, 94–102. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2017.02.016>.
6. Maryandyshev P. A., Mukhreva I. I., Lyubov V. K., Schonnenbeck C., Trouve G., Brillard A., Brillhac J.-F. (2019) Thermal Decomposition and Combustion of Peat Fuel. *Solid Fuel Chemistry*, 53 (5), 283–288. <https://doi.org/10.3103/S0361521919050094>.
7. Grammelis P. (ed.) (2011) *Solid Biofuels for Energy. A Lower Greenhouse Gas Alternative*. London – Dordrecht – Heidelberg – New York, Springer-Verlag. 242. <https://doi.org/10.1007/978-1-84996-393-0>.
8. Mikhailov A. V. (2016) Coal-Peat Composition for Co-Combustion in Local Boilers. *Journal of Mining Institute*, 220, 538–544. <https://doi.org/10.18454/pmi.2016.4.538>.
9. Makeyenko A. A., Naumova G. V., Khmyzov I. A., Solov'yeva T. V. (2018) Strengthening Additives for Formatted Wood Fuel. *Trudy BGTU. Seriya 2: Khimicheskie Tekhnologii, Biotekhnologiya, Geoekologiya* [Proceedings of BSTU. Ser. 2], (2), 51–54 (in Russian).
10. Tabakaev R. B., Kazakov A. V., Zavorin A. S. (2014). Solid Composite Fuel from Low-Grade Raw (Technological Aspect). *Izvestiya Tomskogo Politehnicheskogo Universiteta. Tekhnika i Tekhnologii v Energetike = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering and Technology in the Energy Sector*, 325 (4), 56–64 (in Russian).
11. Christoforou E., Fokaidis P. A. (2019) *Advances in Solid Biofuels*. Cham, Springer. 130. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-00862-8>.
12. Thomson A. E., Naumova G. V. (2009) *Peat and its Processed Products*. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ. 328 (in Russian).
13. Naumovich V. M. (1984) *Artificial Drying of Peat*. Moscow, Nedra Publ. 222 (in Russian).
14. Arshadi M., Gref R., Geladi P., Dahlqvist S.-A., Lestander T. (2008) The Influence of Raw Material Characteristics on the Industrial Pelletizing Process and Pellet Quality. *Fuel Processing Technology*, 89 (12), 1442–1447. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.07.001>.
15. Holm J. K., Henriksen U. B., Wand K., Hustad J. E., Posselt D. (2007) Hustad and Dor the Posselt. Experimental Verification of Novel Pellet Model Using a Single Pelleter Unit. *Energy and Fuels*, 21 (4), 2446–2449. <https://doi.org/10.1021/EF070156L>.
16. Ovchinnikov L. N. (2017). Investigation of Process of Obtaining Complex Granulated Organo-Mineral Fertilizers of Prolonged Action Based on Peat. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya = ChemChemTech*, 60 (9), 100–104 (in Russian).
17. Mitrofanov A., Mizonov V., Camelo A., Tannous K. (2019) Application of the Theory of Markov Chains to Theoretical Study of Processes in a Circulating Fluidized Bed. *Particulate Science and Technology*, 37 (8), 1032–1038. <https://doi.org/10.1080/02726351.2018.1525459>.
18. Akhnazarova S. L., Kafarov V. V. (1978) *Optimization of Experiment in Chemistry and Chemical Technology*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 319 (in Russian).
19. Adler Yu. P., Markova E. V., Granovsky Yu. V. (1976) *Experiment Planning in the Search for Optimal Conditions*. Moscow, Nauka Publ. 279 (in Russian).